河海大学学报

（自然科学版）

Hehai Daxue Xuebao

(Ziran Kexue Ban)

双月刊，1957年创刊

第54卷　第5期　2026年9月25日出版

JOURNAL OF HOHAI UNIVERSITY

(NATURAL SCIENCES)

Bimonthly, Founded in 1957

Vol. 54　No. 5　Sep. 2026

本刊入选下列数据库

荷兰《文摘与引文数据库》（Scopus）
美国《化学文摘》（CA）
美国《剑桥科学文摘》（CSA）
俄罗斯《文摘杂志》（AJ）
波兰《哥白尼索引》（IC）
中国科学引文数据库（CSCD）
中国学术期刊综合评价数据库（CAJCED）
中国科技论文与引文数据库（CSTPCD）
本刊被《中国知网》《万方数据系统数字化期刊群》
《中国学术期刊文摘》《中文科技期刊数据库》全文收录
并被COAJ收录

本刊荣获

第三届中国精品科技期刊
第六届中国精品科技期刊
首届江苏省新闻出版政府奖提名奖
中国高校百佳科技期刊
全国水利系统优秀科技期刊
华东地区优秀期刊
江苏省优秀期刊

主　　管：中华人民共和国教育部
主　　办：河海大学
编 辑 出 版：《河海大学学报（自然科学版）》编辑部
地址：南京市西康路1号　邮政编码：210098
电话：025-83786642　传真：025-83786642
电子信箱：xb@hhu.edu.cn
网络地址：https://jour.hhu.edu.cn
编委会主任：郑金海
主　　编：郑金海
编辑部主任：彭桃英
印　　刷：南京千字文印务有限公司
发 行 范 围：公开发行
国 内 发 行：中国邮政集团公司江苏省分公司
订　　阅：全国各地邮政局
国 外 发 行：中国国际图书贸易集团有限公司
（北京市 399 信箱　100048）

Supervisory Authority
Ministry of Education, P. R. China
Sponsored by
Hohai University
Edited and Published by
Editorial Board of Journal of Hohai University (Natural Sciences)
Address: No.1 Xikang Road, Nanjing 210098, P. R. China
Tel: 86-25-83786642
E-mail: xb@hhu.edu.cn
https: //jour.hhu.edu.cn
Editor-in-Chief
Zheng Jinhai
Distributed at Home by
China Post Group Jiangsu Branch
Distributed Abroad by
China International Book Trading Corporation
P. O. Box 399, Beijing 100048, P. R. China

ISSN 1000-1980

国际标准连续出版物号：ISSN 1000-1980　国内邮发代号：28-63
国内统一连续出版物号：CN 32-1117/TV　国外发行代号：BM2740

定价：30.00 元

河海大学学报（自然科学版）

第五十四卷 第五期

二〇二六年九月

CSCD核心期刊
中文核心期刊
中国科技核心期刊
RCCSE核心期刊

ISSN 1000-1980
CODEN HDXZAI

河海大学学报

（自然科学版）

JOURNAL OF HOHAI UNIVERSITY

(NATURAL SCIENCES)



第54卷　第5期
Vol. 54　No. 5
2026
9月

《河海大学学报（自然科学版）》
第十三届编辑委员会

编委会顾问（以姓氏笔画为序）：

马洪琪　王　超　王光谦　卢耀如　严以新　汪集旸　张长宽　张建云　陆桂华　陈厚群

陈星莺　周创兵　胡亚安　钟登华　姜弘道　索丽生　徐　辉　徐祖信

主 任 委 员：郑金海

副主任委员：宋翔洲

主　　编：郑金海

副 主 编：施建勇　冯　钧　程亚军　孙洪广

编辑部主任：彭桃英

编　　委（以姓氏笔画为序）：

丁　坤　丁选明　王　栋　王　媛　王卫光　王正伟　王延杰　王玲玲　王高旭　王锦国

甘　磊　付　静　冯　钧　吉伯海　伞冰冰　刘　凡　刘　桦　刘小峰　许文祥　许崇育

孙洪广　李　璐　李典庆　李琼芳　吴　峰　余　欣　张　犁　张玉全　张铁林　张继生

陆光华　陈永辉　陈　华（武汉大学）　陈　华（河海大学）　邵建富　周　丰　周玉良

周思源　郑金海　孟令奎　赵　春　赵兰浩　赵永好　赵海涛　赵燕容　禹海涛　施建勇

袁赛瑜　徐泽平　徐俊增　陶龙宾　黄　艳　梅国雄　彭桃英　董增川　韩光洁　程永光

程亚军　程旭华　鲁春辉　谢亿民　赖世兴　雷瑞波　管大为　谭　倩　霍冠英

《河海大学学报（自然科学版）》
首届青年编辑委员会

王　超　尤国祥　付　瑾　吕亚茹　朱　淳　刘　懿　刘肖廷　李　源　李玉萍　李永富

杨士红　肖儒雅　吴　凡　吴　丹　吴　娟　吴玉娜　吴勇信　谷　岩　闵凡路　沈骁腾

宋子健　张　睿　陈东旭　陈伟秋　陈宇辉　陈更新　周亦洲　周海祚　柳梦阳　贺　瑞

徐　磊　高红民　郭　磊　黄浩乾　梁　越　蒋　晟　程　星　傅中秋　曾文治　魏长赟

“三峡水运新通道工程关键技术专题”征稿

“十五五”首个国家重大标志性工程——三峡水运新通道工程的建设，是党中央立足国家发展战略大局作出的重大部署，也是一项造福千秋的世纪工程。这是破除长江干线“肠梗阻”、构建综合立体交通网络的骨干性基础工程，对深入推动长江经济带高质量发展、促进构建新发展格局具有极其重大而深远的战略意义。三峡水运新通道工程（含三峡新船闸建设与葛洲坝船闸拆除扩建）规模宏大，面临着极复杂的水力学条件、超高陡边坡稳定、原址拆除重建风险管控以及智能建造等多项世界级技术挑战。为集中展示三峡水运新通道建设在工程基础理论、关键核心技术突破及重大装备研发方面的最新研究成果，促进水利、水运工程学科的发展，《河海大学学报（自然科学版）》（中文核心期刊、CSCD核心期刊）开展“三峡水运新通道工程关键技术专题”征稿，欢迎相关专家学者积极参加讨论、踊跃投稿，录用论文将于2027年《河海大学学报（自然科学版）》正刊专题栏目中陆续出版。

一、征稿召集人

胡亚安院士（南京水利科学研究院），陈达教授（河海大学），朱延涛教授（河海大学）

二、征稿主题（包括但不限于）

1. 复杂水流条件下通航水力学及水动力演变
   - 引航道通航水流条件、非恒定流影响及流态优化
   - 超高水头船闸输水系统水力特性与控制优化
   - 复杂边界下船闸群通航水动力耦合响应机制
2. 巨型通航建筑物关键设计理论及工程安全控制
   - 三峡水运新通道超高陡边坡变形机理及稳定性控制
   - 复杂地质条件下深基坑开挖与超高直立边墙稳定
   - 超大尺度船闸结构韧性、耐久性与长寿命服役保障
3. 船闸拆除扩建工程智能建造与施工风险管控
   - 近城区船闸原址拆除扩建施工组织与多工序协同控制
   - 复杂地质条件下爆破开挖对既有结构扰动效应与安全控制
   - 巨型通航建筑物新材料、新工艺与智慧建造技术
4. 三峡水运新通道建设对生态环境的影响与修复策略
   - 工程施工及运行对水生生物及生境的累积影响
   - 典型鱼类栖息地保护与生态航道构建
   - 新老通道协同运行下的水环境演变与生态补偿机制
5. 船闸群智能联合调度与全生命周期智慧管控
   - 三峡－葛洲坝梯级船闸群智能联合调度协同优化
   - 高密度船舶交通流演化规律与智能仿真预警
   - 梯级巨型船闸群智慧管控平台构建与智能运维

三、投稿要求

1. 稿件类型

原创研究论文、综述等，要求未在国内外期刊或会议上公开发表，无知识产权争议，符合学术道德规范。

2. 内容规范

论点明确、数据可靠、逻辑严谨、文字精炼，符合《河海大学学报（自然科学版）》投稿格式要求。

3. 投稿网址

https://jour.hhu.edu.cn/hhdxxbzr/home，投稿时请注明“三峡水运新通道工程关键技术专题”。

4. 审稿流程

专题稿件将实行同行评议制度，由领域内知名专家严格把关，确保学术质量。

四、征稿时间

2026年6月18日至2027年8月30日。

欢迎广大学者围绕上述热点提交高质量论文，共同为三峡水运新通道工程建设贡献学术力量！

《河海大学学报（自然科学版）》编辑部

2026年6月18日

河海大学学报

（自然科学版）

第 54 卷第 5 期　　2026 年 9 月

目　次

·水文水资源·

基于 pySTEPS 的登陆热带气旋降雨短临预报分析 …… 周艳平，黄　一，杨　建（1）
图神经网络对地下水位预测的不同物理机制融合方案比较 …… 刘　波，王佳宝，李志勇，姜　伟（10）
基于雨量站-微波数据融合的雨量场构建 …… 欧思程，史晓薇，刘道君，徐卫立，杨　涛（18）
基于多源融合降水的 WRF-Hydro 模型在中小河流径流模拟的适用性评估
…… 李振鑫，姚　成，杨丰源，侯爱中，孙元元，李京兵，龚俊超（29）
考虑滞后效应的机器学习模型对淮北平原土壤温度的模拟研究
…… 王　迪，鞠　琴，莫李娟，卢怡然，何亚男，梅海鹏，胡永胜（39）
基于多通道偏振与双分支 Transformer 的水下图像复原… 许馨月，霍冠英，孔伟丰，彭　超，苏　勇（49）

·水利水电工程·

空化工况下喷水推进泵非稳定流动及熵产分析
…… 张　睿，王正欣，邢静艺，徐　辉，丁旭洁，李剑平，陈邦华，李　森（60）
黄河下游河道冲淤的综合水沙条件研究 …… 孙嘉悦，张　曼，周建军（69）
知识图谱与大语言模型协同的河涌整治方案智能决策方法
…… 张凯博，叶　枫，许　栋，李彬权，窦身堂（79）
融合机器学习与贝叶斯模型平均的水电站来水预测方法
…… 陈　凯，罗煜宁，张　珂，吴　南，吴星宇，王宇昊，王有香，彭　晶（91）
暗管排水对江苏沿海滩涂垦区土壤脱盐改良影响的试验研究 …… 吴　为，金　秋（99）
基于闸群联合调控的荆州沙北片河网水动力重构研究
…… 林炜杰，徐　津，陈　瀚，朱　海，彭习渊，杨　卫，唐洪武，王玲玲（106）

·土木工程·

基于非离散设计的三维岩质边坡桩加固优化设计方法
…… 郭文秀，康　斌，王筱萌，孙志彬，姬　建（114）
盐蚀与动水环境下沥青混合料的直接拉伸试验研究
…… 姚云龙，胡　建，展冰洋，李　浩，刘　鑫，洪宝宁（121）
木质素衍生物改良黏性土抗崩解特性及微观机理
…… 宋泽卓，刘　瑾，姚亦姜，卜　凡，陈志昊，史昕昊（129）
基于多输出机器学习的碎石桩复合地基本构参数反演方法
…… 钱泽龙，岑威钧，刘　东，钱家豪，郑长海，韩建华（138）
整体冲刷对刘五店航道桥锚碇基础稳定性的影响
…… 林路宇，蔡华忠，郭梦雨，刘宝森，贺　瑞，占晓明（146）

·港口航道与海岸海洋工程·

动水位作用下海底隧道非线性渗流场解析研究
…… 刘　翔，黎奎辰，王东池，张　雨，姜谙男，房　倩（155）
干散货港区 $PM_{2.5}$ 浓度多变量混合预测模型 …… 陶凯旋，封学军，季皆名，涂傲辉，林志端（164）
基于 OpenFOAM 的网袋状牡蛎礁消浪特性数值模拟
… 邵士好，陶爱峰，王佑齐，田　鹏，邢金洋，刘剑浩，徐　伟，范　骏，陈新平，韩　宇（173）
海上风电吸力筒基础灌浆材料特性及可回收性试验
…… 翟汉波，李婷婷，代加林，杨金康，王伟臣，付登锋，黄　维（181）
极端环境下单锚与三锚系泊深水浮标动力响应特性对比分析
…… 陈航伟，孙安琪，吴　聪，王成智，覃文鸿，乔东生（190）

·机电工程·

源荷不确定性扰动下电压波动区间解析分析与越限抑制 …… 黄　桦，朱立轩，余一平（199）

本期责任编辑：刘晓艳

JOURNAL OF HOHAI UNIVERSITY

(NATURAL SCIENCES)

Vol. 54 No. 5 **Sep. 2026**

CONTENTS

Analysis of rainfall nowcasting for landfalling tropical cyclones using pySTEPS ····· *Zhou Yanping, Huang Yi, Yang Jian*(1)

Comparison of different physical mechanism fusion schemes for groundwater level prediction by graph neural networks ····· *Liu Bo, Wang Jiabao, Li Zhiyong, Jiang Wei*(10)

Study on rainfall field construction based on rain gauge-microwave data fusion ····· *Ou Sicheng, Shi Xiaowei, Liu Daojun, Xu Weili, Yang Tao*(18)

Applicability evaluation of WRF-Hydro model based on multi-source merged precipitation for runoff simulation in small and medium-sized rivers ··· *Li Zhenxin, Yao Cheng, Yang Fengyuan, Hou Aizhong, Sun Yuanyuan, Li Jingbing, Gong Junchao*(29)

Simulation of soil temperature in the Huaibei Plain using machine learning models considering lag effects ····· *Wang Di, Ju Qin, Mo Lijuan, Lu Yiran, He Ya'nan, Mei Haipeng, Hu Yongsheng*(39)

Underwater image restoration based on multi-channel polarization and dual-branch Transformer ····· *Xu Xinyue, Huo Guanying, Kong Weifeng, Peng Chao, Su Yong*(49)

Analysis of unsteady flow and entropy generation in a water-jet pump under cavitating conditions ··· *Zhang Rui, Wang Zhengxin, Xing Jingyi, Xu Hui, Ding Xujie, Li Jianping, Chen Banghua, Li Sen*(60)

A comprehensive flow-sediment indicator to the lower Yellow River siltation ····· *Sun Jiayue, Zhang Man, Zhou Jianjun*(69)

Intelligent decision-making method for river regulation schemes via collaboration of knowledge graph and large language model ····· *Zhang Kaibo, Ye Feng, Xu Dong, Li Binquan, Dou Shentang*(79)

Inflow forecasting method for hydropower stations by integrating machine learning and Bayesian model averaging ··· *Chen Kai, Luo Yuning, Zhang Ke, Wu Nan, Wu Xingyu, Wang Yuhao, Wang Youxiang, Peng Jing*(91)

Experiment study on effect of underground pipe drainage on soil desalinization improvement in coastal tidal flat reclamation area of Jiangsu Province ····· *Wu Wei, Jin Qiu*(99)

Research on hydrodynamic reconstruction of Shabei River Network in Jingzhou based on joint gate group operation ··· *Lin Weijie, Xu Jin, Chen Han, Zhu Hai, Peng Xiyuan, Yang Wei, Tang Hongwu, Wang Lingling*(106)

Optimization design method for three-dimensional pile-reinforced rock slopes based on non-discrete design ····· *Guo Wenxiu, Kang Bin, Wang Xiaomeng, Sun Zhibin, Ji Jian*(114)

Experimental study on direct tensile properties of asphalt mixtures under salt erosion and dynamic water conditions ····· *Yao Yunlong, Hu Jian, Zhan Bingyang, Li Hao, Liu Xin, Hong Baoning*(121)

Anti-disintegration properties and microscopic mechanism of clayey soil improved by lignin derivatives ····· *Song Zezhuo, Liu Jin, Yao Yijiang, Bu Fan, Chen Zhihao, Shi Xinhao*(129)

Inversion method for constitutive parameters of gravel pile composite foundation based on multi-output machine learning ····· *Qian Zelong, Cen Weijun, Liu Dong, Qian Jiahao, Zheng Changhai, Han Jianhua*(138)

Effects of general scour on the stability of the anchorage foundation of the Liuwudian Navigation Channel Bridge ····· *Lin Luyu, Cai Huazhong, Guo Mengyu, Liu Baosen, He Rui, Zhan Xiaoming*(146)

Analytical study on nonlinear seepage field of subsea tunnels under dynamic water levels ····· *Liu Xiang, Li Kuichen, Wang Dongchi, Zhang Yu, Jiang Annan, Fang Qian*(155)

Multivariate hybrid prediction model for $PM_{2.5}$ concentration in dry bulk ports ····· *Tao Kaixuan, Feng Xuejun, Ji Jieming, Tu Aohui, Lin Zhiduan*(164)

Numerical simulation of wave attenuation characteristics of oyster shell bags based on OpenFOAM ····· *Shao Shihao, Tao Aifeng, Wang Youqi, Tian Peng, Xing Jinyang, Liu Jianhao, Xu Wei, Fan Jun, Chen Xinping, Han Yu*(173)

Experimental study on material properties and recyclability of grout for offshore wind suction bucket foundation ··· *Zhai Hanbo, Li Tingting, Dai Jialin, Yang Jinkang, Wang Weichen, Fu Dengfeng, Huang Wei*(181)

Comparative analysis of dynamic response characteristics of deep-water buoys with single-point and three-point mooring systems in extreme environments ····· *Chen Hangwei, Sun Anqi, Wu Cong, Wang Xianzhi, Qin Wenhong, Qiao Dongsheng*(190)

Analytic analysis and over-limit mitigation of voltage fluctuation interval under source-load uncertainty ····· *Huang Hua, Zhu Lixuan, Yu Yiping*(199)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.05.001

基于 pySTEPS 的登陆热带气旋降雨短临预报分析

周艳平[1],黄 一[1],杨 建[2,3]

(1. 三峡大学数理学院; 2. 长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室; 3. 三峡大学土木与建筑学院)

摘要:以 2017 年飓风哈维降雨事件为案例,评估了 3 种短临预报模型(S-PROG、Extrapolation、ANVIL)对热带气旋引发极端降雨的预测能力。结果表明:ANVIL 模型在降雨空间分布模拟方面表现最优,但对强降雨强度存在系统性高估;S-PROG 模型对降雨强度变化趋势存在滞后;Extrapolation 模型在短期(0~2 h)预报中稳定性最高,能够准确捕捉降雨强度峰值及时间演变;高分辨率气象数据与多源数据融合可显著提升模型性能,雷达外推技术与深度学习算法结合展现出较大潜力。

关键词:降雨短临预报;热带气旋;多普勒雷达数据;极端天气

中图分类号:P339 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-1980(2026)05-0001-09

Analysis of rainfall nowcasting for landfalling tropical cyclones using pySTEPS

Zhou Yanping[1], **Huang Yi**[1], **Yang Jian**[2,3]

(1. *College of Mathematics and Physics, China Three Gorges University*;
2. *Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of the Ministry of Water Resources, Changjiang River Scientific Research Institute*; 3. *College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University*)

Abstract: The predictive capabilities of three nowcasting models (S-PROG, Extrapolation, and ANVIL) for extreme rainfall induced by tropical cyclones were evaluated using the 2017 Hurricane Harvey rainfall event as a case study. The results indicate that the ANVIL model shows the best performance in simulating the spatial distribution of rainfall, but systematically overestimates heavy rainfall intensity; the S-PROG model shows a lag in tracking rainfall intensity variations; and the Extrapolation model achieves the highest stability in short-term (0-2 h) nowcasting, accurately capturing the peak rainfall intensity and its temporal evolution. The fusion of high-resolution meteorological data and multi-source data can significantly enhance model performance, and the combination of radar extrapolation techniques and deep learning algorithms shows great potential.

Key words: rainfall nowcasting; tropical cyclone; Doppler radar data; extreme weather

热带气旋作为引发极端降雨的典型天气系统,凭借其强大的水汽输送能力,常导致沿海及内陆地区在短时间内出现强降雨过程,进而诱发洪涝灾害。此类灾害不仅对基础设施与生态环境构成巨大压力,亦对社会经济活动产生深远影响,因此成为全球水文气象研究的重点[1-5]。全球变暖背景下,热带气旋的频率和强度有可能持续增加,进一步加剧极端降雨对沿海和内陆地区的威胁[6-9]。热带气旋引发的极端降雨事件具有显著的致灾性,开发并应用先进的降雨短临预报模型,在气旋影响前实现精准预报,能够为城市防灾减灾及公众安全保障提供关键的决策支撑[10-12]。

降雨短临预报是指针对短期内(一般为 0~6 h)天气情况的预报[13],它利用高频率、高分辨率的气象雷达回波数据,结合先进的模型算法,对短时间内的降雨时空变化进行实时预测。降雨短临预报方法主要包括 4 类:①雨量计数据的统计预测,这种方法利用地面雨量计测得的降雨数据,结合统计方法进行降雨预报。尽管这种方法直观简单,但受限于雨量计的空间分布,预报精度相对较低[14-15]。②天气雷达和卫星测量的外推,这种方法通过使用天气雷达和卫星的观测数据,采用图像外推技术进行降雨预报。虽然这种方法能够提供较高的空间分辨率,但预报时效较短,且易受天气系统变化的影响[16-18]。③数值天气预报(NWP)模型,该模型基于气象物理学原理,利用数值模拟方法进行天气预报。NWP 模型具有较高的理论依据和预报能

基金项目:国家自然科学基金项目(11901346);长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室开放基金项目(CKWV20221019/KY)

作者简介:周艳平(1980—),女,副教授,博士,主要从事流体力学研究。E-mail:qybie@126.com

通信作者:杨建(1980—),男,讲师,博士,主要从事偏微分方程研究。E-mail:zyp5208@ctgu.edu.cn

力,但计算量大,实时性较差[19-21]。④深度学习方法,近年来表现出色,尤其是卷积神经网络(CNN)、U-Net、卷积长短期记忆网络(ConvLSTM);该方法能够从大量数据中自动学习特征,显著提高预报精度,但对数据量和计算资源的要求较高[22-26]。不同的降雨短临预报方法各有优缺点,在实际应用中应根据具体需求进行合理选择,以充分发挥其各自的优势。

pySTEPS (python framework for short-term ensemble prediction systems)是近年来开发的一个用于降雨短临预报的开源工具,它基于雷达回波的分析,提供了一系列短期降雨预报方法[27]。本文评估了 pySTEPS 的3种主要模型——S-PROG(spectral prognosis)模型、ANVIL(autoregressive nowcasting using vertically integrated liquid equations)模型以及外推法(Extrapolation 模型)对热带气旋引发的极端降雨的短临预报性能。

1 研究方法

1.1 短临预报模型

S-PROG 模型是一种基于频谱分解的降雨预报模型,通过捕捉降雨回波的不同尺度特征进行短临预报。该模型的核心思想是将雷达回波场分解为不同的空间尺度分量,并对各个尺度上的降雨特征进行时间外推,通过分析雨场的空间和动态缩放特性来预测不同尺度上降雨特征的寿命和演变[28]。

Extrapolation 模型是一种较为经典的降雨预报模型,它依赖雷达数据,通过计算降雨回波的运动矢量,并沿拉格朗日轨迹进行外推,预测降雨的未来分布。其基本原理是基于当前降雨回波的移动速度场,进行线性外推,即假设降雨系统在短时间内的移动趋势是线性的[29]。

ANVIL 模型结合了自回归模型(AR)和使用垂直积分液体(VIL)的质量平衡方程,通过 RadVil 方法预测地表降雨率,其核心在于通过物理过程建模和统计推断相结合的方式提高预报的精度[30]。

1.2 验证指标

本文预测的事件分为两类:已发生事件和未发生事件。这些事件属于分类变量,具备非概率性质并且是离散的。以降雨发生概率预测为例,模型性能评估通过以下验证指标实现:真阳性(TP)指模型预测某事件会发生,且该事件实际发生;真阴性(TN)指模型预测某事件不会发生,且该事件实际未发生;假阳性(FP)指模型预测某事件会发生,但该事件实际未发生;假阴性(FN)指模型预测某事件不会发生,但该事件实际发生。

根据以上指标有助于全面评估短临预报模型的性能,通过比较真阳性、真阴性、假阳性和假阴性的数量,衡量模型在不同情境下的准确性与可靠性。此外,基于这些数据,还可进一步计算检出概率(POD)、误报率(FAR)、Heidke 技能分数(HSS)和关键成功指数(CSI)等验证指标[31],以更深入地分析模型表现。

2 研究区概况和研究数据

2.1 研究区概况

休斯敦(图1,底图来自 OpenStreetMap)是得克萨斯州最大的城市,也是美国第4大城市,地处墨西哥湾沿岸的低地地带,地势平坦,区域内水系发达,分布有复杂的河流网络。该区域具有高度城市化特征,其城市化进程导致地表硬化程度加剧,显著削弱了土壤的自然渗透能力。在此条件下,强降雨引发的地表径流汇流速度加快,进而显著抬升了城市洪涝灾害的发生风险。休斯敦地区复杂的河流与水网系统在降雨事件中扮演着关键水文角色,尤其在暴雨与风暴潮的叠加影响下,排水能力受到显著制约,极易诱发严重的城市内涝。此外,休斯敦位于热带气旋高发区域,频繁受到极端天气事件的影响。2017 年的飓风哈维事件是一个典型案例,其带来的空前强降雨和洪涝灾害造成了1 250 亿美元的经济损失和 88 人死亡[32]。这一事件暴露了休斯敦及其周边地区在应对强降雨、洪水和风暴潮等极端气象事件时的显著脆弱性,并为研究极端降雨事件

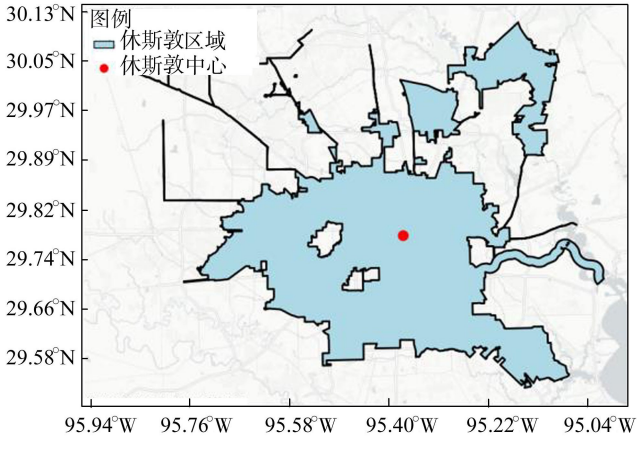


图1 休斯敦城市范围

Fig. 1 The city limits of Houston

的成因与影响提供了重要的背景。

2.2　研究数据

本文采用美国 MRMS(多雷达多传感器)系统的多普勒雷达数据。MRMS 系统融合了雷达、卫星、地面观测和数值天气预报模型的数据,能提供高时空分辨率的水文气象产品。该系统每 2 min 生成覆盖美国本土 48 州和加拿大南部的实时决策支持产品[33],为紧急决策提供及时的降雨估计。MRMS 系统的定量降雨估计(QPE)系统结合约 180 个雷达,生成连续的 3D 雷达马赛克,分辨率高达 1 km(空间)和 2 min(时间)。该系统通过整合雷达、卫星、大气、闪电及雨量计观测数据,提供恶劣天气和降雨预报产品,克服了单雷达系统的局限性[34]。

此外,从 DayMet 数据中获取了休斯敦地区 2013—2023 年日降水量数据[35],该数据集提供 1 km 空间分辨率的逐日降雨信息(图 2),可展示休斯敦地区日降水量的空间变化特征。同时,从美国国家飓风中心网站提取的 HURDAT 数据集涵盖了该期间内影响休斯敦地区(以休斯敦为中心附近 500 km)的所有热带气旋,包括不同强度的热带风暴和飓风(图 3),这些数据为研究降雨与极端天气事件之间的关系提供了基础。

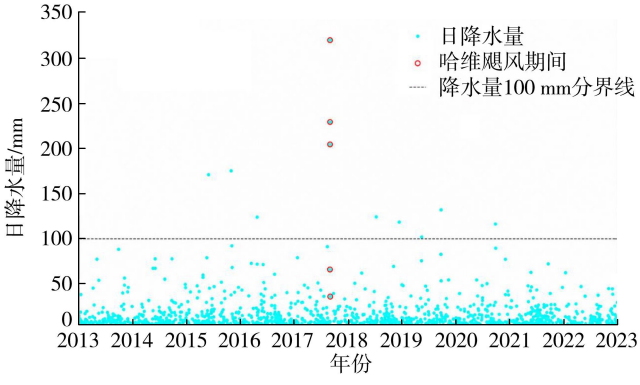


图 2　2013—2023 年休斯敦日降水量

Fig. 2　Daily rainfall in Houston during 2013-2023

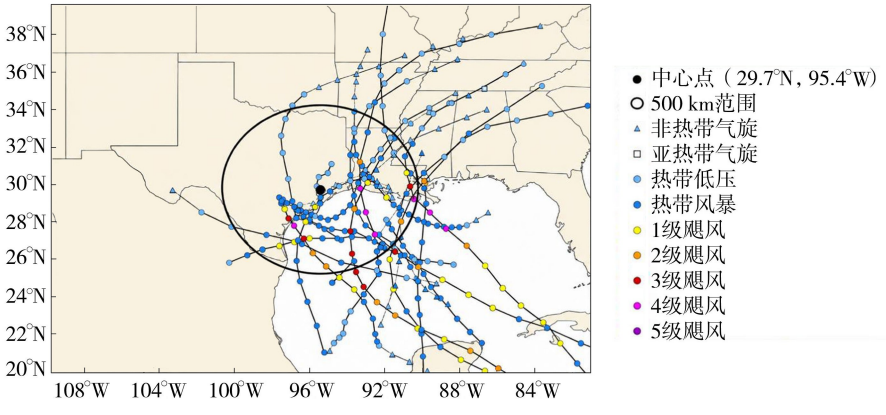


图 3　2013—2023 年影响休斯敦的飓风轨迹

Fig. 3　Hurricane tracks affecting Houston during 2013-2023

表 1 汇总了 2013—2023 年间影响休斯敦地区的 17 次飓风事件,数据源自热带气旋扩展最佳路径数据集(IBTrACS)。统计显示,在 2013—2023 年期间该地区多数飓风集中于每年 6—10 月。首先依据风速对 17 次飓风事件进行初步分组,继而采用国际通用的萨菲尔-辛普森飓风等级(SSHWS)对其进行系统分类。

本文选取 2017 年哈维飓风作为降雨短临预报模型的分析案例,主要基于其极端降雨对休斯敦地区造成了严重影响,带来了大规模洪涝灾害。哈维飓风在休斯敦及周边地区产生了前所未有的降雨总量,部分区域累计降雨超过 1 500 mm,创下美国本土有观测记录以来的最高值,成为美国历史上降水量最大的热带气旋。这一破纪录的极端降雨引发了国际学者的广泛关注,并被多项研究作为典型案例加以分析。哈维飓风的降雨在 20 世纪末的重现期约为 2 000 a,而在未来气候变暖背景下,其重现期将显著缩短至约 100 a 一次[36-37]。此外,不同研究表明人为气候变化使该类事件的发生概率增加了 1.5~5 倍,或至少提升了 3.5 倍,进一步强

表1 2013—2023年影响休斯敦的飓风事件

Table 1 Hurricane events affecting Houston during 2013-2023

序号	风暴代号	开始时间	结束时间	最大累计降水量/mm	最大风速/Kt
1	KAREN	2013-10-03T06:00:00	2013-10-06T06:00:00	286	55
2	BILL	2015-06-16T00:00:00	2015-06-18T00:00:00	383	50
3	CINDY	2017-06-21T06:00:00	2017-06-23T00:00:00	474	50
4	HARVEY	2017-08-25T06:00:00	2017-08-31T12:00:00	1 536	115
5	BARRY	2019-07-12T18:00:00	2019-07-15T06:00:00	598	65
6	IMELDA	2019-09-17T12:00:00	2019-09-19T00:00:00	1 123	40
7	OLGA	2019-10-25T18:00:00	2019-10-26T06:00:00	260	40
8	CRISTOBAL	2020-06-08T06:00:00	2020-06-08T18:00:00	386	50
9	HANNA	2020-07-24T06:00:00	2020-07-26T06:00:00	374	80
10	LAURA	2020-08-26T18:00:00	2020-08-27T18:00:00	298	130
11	BETA	2020-09-19T12:00:00	2020-09-24T06:00:00	400	55
12	DELTA	2020-10-09T06:00:00	2020-10-10T12:00:00	380	120
13	ZETA	2020-10-28T18:00:00	2020-10-28T21:00:00	250	100
14	CLAUDETTE	2021-06-18T18:00:00	2021-06-19T06:00:00	380	40
15	IDA	2021-08-29T18:00:00	2021-08-30T12:00:00	760	130
16	NICHOLAS	2021-09-13T12:00:00	2021-09-17T06:00:00	510	65
17	HAROLD	2023-08-22T06:00:00	2023-08-22T18:00:00	380	50

注:最大累计降水量和最大风速为飓风登陆期间的最值。

调了该事件在气候变化研究中的代表性与指示意义。

为了验证哈维飓风(HARVEY, 2017)的典型性,并增强研究的普适性,本文选取了多个登陆休斯敦的飓风进行对比分析。这些飓风在最大风速、累计降水量和移动速度方面存在显著差异。例如,哈维的最大风速为115 Kt,累计降水量高达1 536 mm,而风速更高的艾达(IDA, 130 Kt)和劳拉(LAURA, 130 Kt)仅分别产生760 mm和298 mm的降水,表明风速并非决定降水量的唯一因素。此外,伊梅尔达(IMELDA, 40 Kt)虽仅为热带风暴,但因其停滞特性,累计降水量达1 123 mm,接近哈维,这说明飓风的移动速度在降雨累计中起关键作用。

飓风降雨能力受多个因素共同影响。移动速度较慢的飓风,如哈维和伊梅尔达,在特定区域长时间停滞,导致水汽持续输送,使降水量远超快速移动的风暴(劳拉和泽塔(ZETA, 100 Kt, 250 mm))。同时,风速较低但降雨核心靠近陆地的飓风,如尼古拉斯(NICHOLAS, 65 Kt, 510 mm)和巴里(BARRY, 65 Kt, 598 mm),也能产生显著降雨。这表明,即便是低强度飓风,在合适的大气动力条件下,仍可能导致严重降雨事件。

综上,哈维飓风的极端降雨主要归因于其缓慢移动导致的长时间停滞,而不仅仅是风速因素。类似的降雨机制在伊梅尔达和尼古拉斯等飓风中也有所体现,进一步说明研究基于哈维的极端降雨短临预报模型具有代表性。同时,本文的扩展分析为不同类型飓风的降雨预报提供了更广泛的验证基础,从而增强了研究结论的适用性和说服力。

3 结果与分析

3.1 飓风运动与降水量的耦合分析

由图4(图中降水数据为面平均降水量)可知,全天的降水量呈现显著的非均匀分布特征,并展现出明显的高峰期累积效应。①1 h降水量在约12:00时达到局部峰值,并维持较高水平,这一变化与飓风中心靠近休斯敦的时间一致;②累计降水量在不同滑动窗口下呈现逐步增加的趋势,12 h滑动窗口在13:00时达到最大值(超过200 mm),而3 h与6 h滑动窗口则反映出降雨强度的短时波动。这种降雨模式通常与飓风内部雨带的结构密切相关,雨带在风暴接近陆地时往往会进一步加强。

由图5可知,哈维飓风自墨西哥湾向得克萨斯州移动,并在接近休斯敦时停滞,导致降雨集中且持续。飓风的34 Kt风速场的最大半径揭示了强风和强降雨带的位置。具体而言,在休斯敦东部标准时间2017年8月27日12:00时,飓风中心位于休斯敦南部,其北侧的雨带恰好覆盖该城市。飓风的缓慢移动进一步加剧了降雨的持续性。

通过计算飓风风速与累计降水总量之间的相关性,发现二者存在较强的单调关联,斯皮尔曼相关系数达0.738,表明风速增强通常伴随降雨强度的显著上升。该结果符合大气动力学基本理论:较高风速有利于增

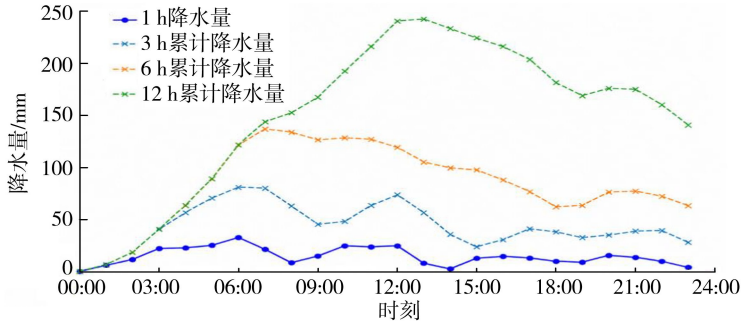


图 4　2017 年 8 月 27 日全天降水量

Fig. 4　Rainfall for whole day on August 27, 2017

强水汽输送与垂直上升运动,进而促进深对流云系发展,增大降雨强度。尤其在飓风成熟阶段,强风区附近的涡旋结构可导致局地辐合加强,使降雨在空间分布上呈现明显的不均匀性,这一特征在本文的降水观测数据中亦得到印证。此外,较高的相关系数还可能反映出降雨对风速变化的滞后效应,即风速达到峰值后,降雨仍能维持较高强度,这与飓风过程中湿对流持续作用的物理机制一致。基于上述分析,可明确飓风动力结构与极端降水之间存在显著的耦合机制。一方面,飓风北侧雨带影响休斯敦期间,湿热空气与地表冷空气交汇,触发强烈抬升运动,诱发局地强降水;另一方面,飓风在休斯敦附近路径减速,使该地区长时间处于雨带控制之下,显著延长降雨持续时间并增加累计雨量。同时,低洼平原地形与高度城市化环境提高了水汽凝结效率,进一步放大了洪涝风险。

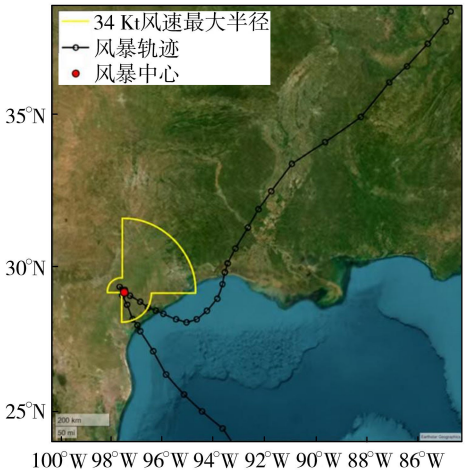


图 5　休斯敦东部标准时间 2017 年 8 月 27 日 12:00 哈维飓风运动轨迹和风速场空间分布

Fig. 5　Trajectory and spatial distribution of wind speed field of Hurricane Harvey at 12:00 Houston Eastern Standard Time on August 27, 2017

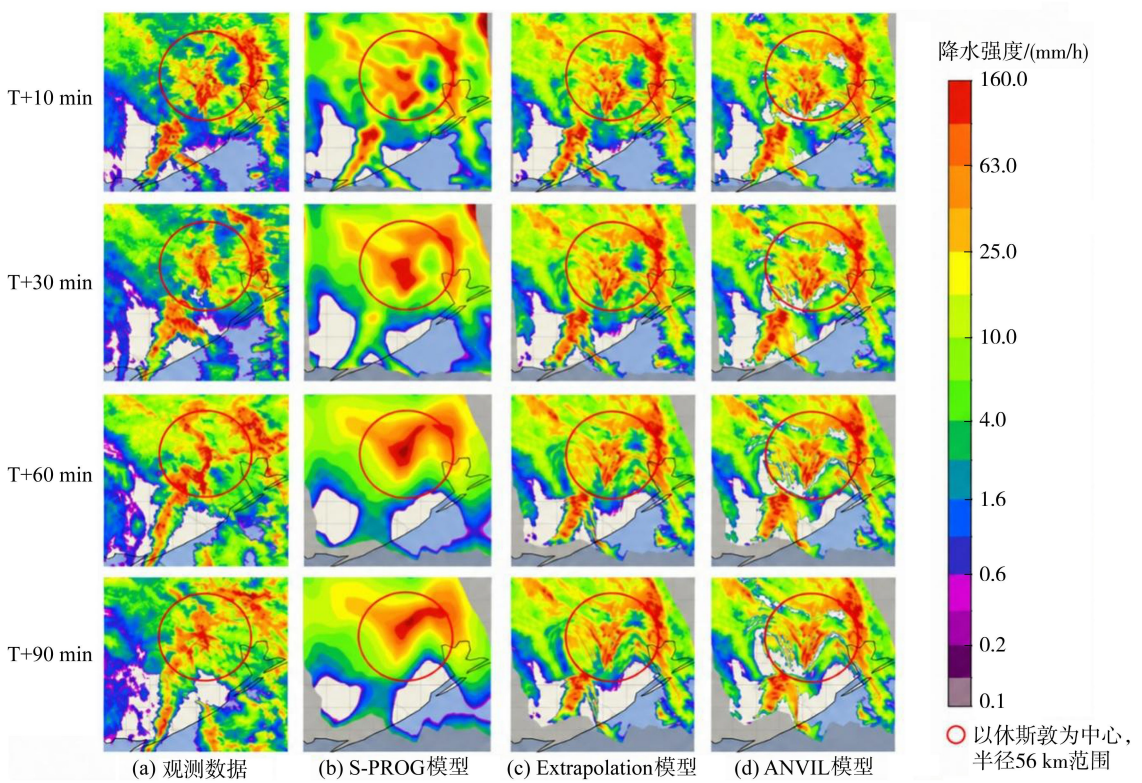
哈维飓风的极端降雨主要受控于雨带分布与路径演变,其中缓慢移动是降雨持续的核心驱动因素。图 4 与图 5 的耦合分析显示,飓风风场结构与局地气候条件的叠加效应在灾害形成中具有关键作用。未来在气候变暖背景下,此类过程可能更加频发与极端,对城市韧性与灾害响应能力提出更高要求。

3.2　降水的空间分布和强度分析

从空间分布角度看,通过对比观测数据与 3 种短临预报模型(S-PROG、Extrapolation、ANVIL)的结果(图 6),可以发现各模型在不同时间步中对降雨区域的捕捉能力存在差异。在降雨中心区域(以休斯敦为中心,半径 56 km 的区域),Extrapolation 模型能够准确定位主要降雨区域,但在某些边缘区域存在轻微低估现象。S-PROG 模型在空间精细度上的表现不足。降雨区域呈现出较平滑的特征,局部细节丢失,尤其是在降雨核心区,轮廓显得较为模糊。ANVIL 模型在空间覆盖范围上有高估现象,特别是在休斯敦以东及南部地区,尽管核心降雨区域的覆盖较好,但其降雨边缘扩展过大。

从降水强度的预报表现看, Extrapolation 模型的降水强度预报较为保守,尤其在 2017 年 8 月 27 日 11:00 时,降水强度的峰值区域(黄色和红色区域)被低估,特别是在核心降雨区。S-PROG 模型的降水强度预测明显不足,尤其是在核心降雨区域,未能预测出红色区域的强降雨,反而表现为大面积的低强度降雨。ANVIL 模型能够捕捉 80%的峰值区域,但在部分地区(例如休斯敦东部)存在强度高估现象,尤其是红色区域面积的扩展。

在时间变化趋势上,通过纵向对比不同时间步的降雨空间分布和强度变化,分析发现各模型对降雨事件的动态演变捕捉能力有所不同。例如,在 2017 年 8 月 27 日 11:00 降雨逐渐增强的时刻,Extrapolation 模型能够跟踪降雨强度的变化趋势,而 S-PROG 模型未能准确反映出降雨的增强过程。ANVIL 模型在此时间节点上则表现出一定的时滞,导致降雨过程的动态反映略显不足。



注:T 为休斯敦东部标准时间 2017 年 8 月 27 日 10:00。

图 6 各短临预报模型预报结果

Fig. 6 Forecast results of each nowcasting model

综上所述,通过空间分布、降水强度及时间变化趋势的综合对比分析,各模型在该降雨事件中的表现各有优劣。总体而言,Extrapolation 模型在捕捉时间动态变化方面相对占优,ANVIL 模型在降水强度峰值的预报上表现突出,而 S-PROG 模型在空间分布精确度上则略显不足。上述结果为不同模型的适用场景提供了参考依据,也明确了各自的优化方向:Extrapolation 模型应着力提升对降水强度峰值的捕获能力,同时改善边缘区域的降雨预测精度;S-PROG 模型需减少对高频分量的过度滤波,以提升空间精细度,并增强对短时强降水过程的动态响应能力;ANVIL 模型则应降低强降雨强度高估的发生概率,并提高对降雨系统扩展及衰减阶段的时间响应时效。

3.3 模型评估

通过分析不同模型在关键成功指数(CSI)、误报率(FAR)、检出概率(POD)和 Heidke 技能分数(HSS)等指标随预报提前时间和降雨阈值(例如 0.1、1、10 mm/h)变化的情况,全面评估了 S-PROG 模型、ANVIL 模型和 Extrapolation 模型的性能,结果如图 7 所示。

在降雨阈值大于 0.1 mm/h 时,Extrapolation 模型的 HSS、POD 和 CSI 分数始终高于 S-PROG 模型和 ANVIL 模型,但其 FAR 也高于后两者。具体而言,Extrapolation 模型的 HSS 在前 20 min 始终保持在 0.8 以上,并在 100 min 后降至 0.6。CSI 的变化趋势与 HSS 相似,在前 90 min 内维持在 0.6 以上,直到 2 h 后下降至 0.46。POD 在整个时间段内保持在 0.6 左右。需要注意的是,Extrapolation 模型的 FAR 在 2 h 后达到了 0.32,表明其误报率较高。相比之下,S-PROG 模型的 FAR 始终较低,在 2 h 内维持在 0.1 以下。ANVIL 模型的性能在这 3 个模型中居中,其 HSS 和 POD 均低于 Extrapolation 模型,但高于 S-PROG 模型,且 FAR 高于 S-PROG 模型但低于 Extrapolation 模型。

降雨阈值大于 1 mm/h 时,Extrapolation 模型、S-PROG 模型和 ANVIL 模型的 HSS 和 CSI 在 2 h 内表现接近。ANVIL 模型的 POD 始终高于 S-PROG 模型和 Extrapolation 模型。然而,ANVIL 模型的 FAR 在整个时间段内也较高,2 h 后达到了 0.4,说明其误报率较高。S-PROG 模型在所有时间段内的 FAR 最低,显示其在避免误报方面具有优势。

降雨阈值大于 10 mm/h 时,Extrapolation 模型、S-PROG 模型和 ANVIL 模型的 HSS、POD 和 CSI 迅速下

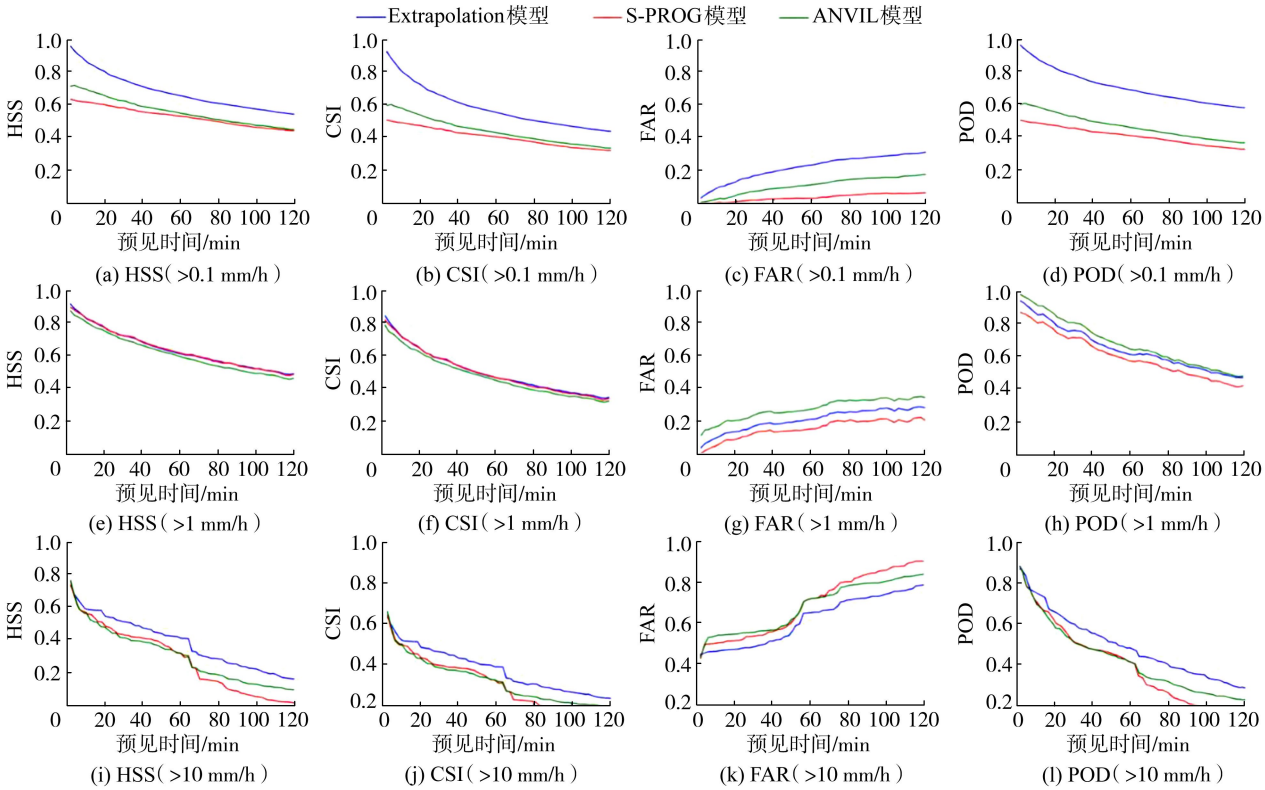


图 7　3 种模型关于 HSS、CSI、FAR 和 POD 的评分

Fig. 7　Scores of HSS, CSI, FAR, and POD for three models

降。所有模型的 HSS、POD 和 CSI 在 2 h 后均降至 0.2 以下,且 FAR 在 2 h 后均超过 0.8,表明此时 3 种模型的误报率均非常高,导致预测性能显著下降。综上所述,不同模型在低、中等降水强度下具备一定预报能力,其中 Extrapolation 模型在多项指标上表现优异,但误报率偏高;S-PROG 模型具有较强的误报控制能力;ANVIL 模型则在降雨检测(POD)方面表现突出。对极端降雨的预报效果仍有待提升,后续研究可聚焦于模型对高强度、低频事件的响应机制优化。

3.4　讨论

针对 3 种模型的表现差异,结合其算法原理及哈维飓风案例进行分析可知:S-PROG 模型基于傅里叶频谱分解,通过对高频分量进行指数衰减,较适用于大尺度、平稳性较强的降雨系统,但对局地强降水及非平稳降雨过程的响应能力不足;ANVIL 模型采用局地相似性匹配与动态场校正方法,能够有效捕捉降雨系统的非线性演变特征,尤其适用于对流性强、形态复杂的降雨事件,因而在此次飓风过程中表现最佳;Extrapolation 模型则依赖光流外推技术,未考虑降水强度的内在变化,仅在系统稳定、移动路径清晰的条件下表现良好,面对飓风降雨的复杂演变过程时误差显著增大。哈维飓风的降雨过程具有强烈的空间非均匀性、非平稳性及长时间滞留特征,致使 S-PROG 模型低估局部强降雨,Extrapolation 模型难以刻画降雨的增强与消散过程,而 ANVIL 模型则较好地再现了降雨场在时空维度的变化格局。

基于上述分析,未来研究计划如下:①算法实现与性能对比,在 pySTEPS 框架基础上,构建多模型集合预报模块,比较加权平均法、动态切换法及深度学习融合法在集合预报中的性能差异。②多事件验证,扩展研究案例,纳入其他登陆飓风(如 2019 年伊梅尔达、2020 年劳拉)的降雨预报资料,系统评估集合预报方法的稳健性与普适性。③不确定性量化,利用集合预报生成多组降雨场集合,构建概率预报区间,提供更为可靠的降雨概率及不确定性估计,提升其在业务应用中的实用价值。④与深度学习模型结合,探索传统光流外推与深度学习技术的融合路径,利用 U-Net 或 ConvLSTM 等网络结构,对 3 种预报结果进行动态校正与融合,以期进一步提升预报精度。

4　结　语

Extrapolation 模型在降雨中心定位及趋势捕捉方面表现较为突出,ANVIL 在复杂降水结构下具备一定优

势,而S-PROG则在控制误报率方面表现稳定。本文基于典型个例的定量评估,可为未来热带气旋极端降雨的短临预报模型优化与融合提供理论支撑和方法参考。

参考文献:

[1] Chan K T F,Chan J C L,Zhang Kailin,et al. Uncertainties in tropical cyclone landfall decay[J]. NPJ Climate and Atmospheric Science,2022,5(1):93.

[2] 邱江潮,刘丙军,杨子博,等. 基于水位流量关系的流量估算不确定性分析[J]. 水科学进展,2020,31(2):214-223. (Qiu Jiangchao,Liu Bingjun,Yang Zibo,et al. Uncertainty analysis of estimated discharge based on stage-discharge rating curves[J]. Advances in Water Science,2020,31(2):214-223. (in Chinese))

[3] 苑希民,兰卓青,王丽娜,等. 极端天气城市特大暴雨洪涝灾害特征再分析及应对策略[J]. 水利学报,2024,55(11):1298-1308. (Yuan Ximin,Lan Zhuoqing,Wang Lina,et al. Reanalysis of the characteristics of extreme rainstorm and flood disaster in urban areas and coping countermeasures[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2024,55(11):1298-1308. (in Chinese))

[4] 刘丁蓉,杨凯,孙仕. 珠三角城市群内涝灾害韧性综合评估及障碍因子识别[J]. 水利经济,2024,42(4):23-29. (Liu Dingrong, Yang Kai, Sun Shi. Comprehensive assessment and obstacle factor recognition of waterlogging disaster resilience in Pearl River Delta urban agglomeration[J]. Journal of Economics of Water Resources,2024,42(4):23-29. (in Chinese))

[5] 徐宗学,卢兴超,施奇妙. 城市暴雨洪涝灾害特征与风险评估研究进展[J]. 水利水电科技进展,2025,45(1):1-9. (Xu Zongxue, Lu Xingchao, Shi Qimiao. Research progress on urban flooding disaster characteristics and risk assessment[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2025,45(1):1-9. (in Chinese))

[6] Bagtasa G. Contribution of tropical cyclones to rainfall in the philippines[J]. Journal of Climate,2017,30(10):3621-3633.

[7] 张金善,殷成团,张然,等. 中国沿海登陆热带气旋活动特征分析[J]. 水科学进展,2018,29(6):759-767. (Zhang Jinshan, Yin Chengtuan,Zhang Ran,et al. Analysis on characteristics of Chinese coastal landfall tropical cyclone activities[J]. Advances in Water Science,2018,29(6):759-767. (in Chinese))

[8] 苑希民,黄玉啟,田福昌,等. 基于LSTM-GM神经网络模型的风暴潮增水预报方法[J]. 水资源保护,2023,39(6):8-15. (Yuan Ximin,Huang Yuqi, Tian Fuchang, et al. Research on forecasting method of storm surge based on LSTM-GM neural network model[J]. Water Resources Protection,2023,39(6):8-15. (in Chinese))

[9] 叶陈雷,徐宗学,雷晓辉,等. 福州晋安河片区海绵改造对城市内涝的影响[J]. 水资源保护,2023,39(1):83-92. (Ye Chenlei,Xu Zongxue,Lei Xiaohui,et al. Influences of sponge reconstruction of Jin'an River drainage district in Fuzhou City on urban flooding/waterlogging[J]. Water Resources Protection,2023,39(1):83-92. (in Chinese))

[10] 谷洪钦,刘开磊,刘玉环,等. 综合多源不确定性的洪水概率预报试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(2):99-104. (Gu Hongqin, Liu Kailei, Liu Yuhuan, et al. Experiments on flood probability forecasting accounting for multi-source uncertainty[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(2):99-104. (in Chinese))

[11] 罗锋,汪忆,杨洁,等. 相似路径台风风暴潮过程对比[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(6):130-140. (Luo Feng, Wang Yi,Yang Jie,et al. Comparative study on storm surge processes caused by typhoons with similar tracks[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(6):130-140. (in Chinese))

[12] 侯精明,王梓驿,李东来,等. 管网排水能力对雨水口堵塞和管道淤积的响应规律模拟[J]. 水科学进展,2025,36(1):122-131. (Hou Jingming,Wang Ziyi,Li Donglai,et al. Simulation of the response of drainage capacity of pipe network to street inlet clogging and pipeline silting[J]. Advances in Water Science,2025,36(1):122-131. (in Chinese))

[13] 李皓轩,梅松军,周康,等. 降雨短时临近预报技术研究进展[J]. 中国防汛抗旱,2023,33(5):19-22. (Li Haoxuan,Mei Songjun,Zhou Kang,et al. Advances on rainfall nowcasting techniques[J]. China Flood & Drought Management,2023,33(5):19-22. (in Chinese))

[14] 李月清,孙自安,杨洋,等. 滇西暴雨高值区的雨量计适用性分析[J]. 中国防汛抗旱,2025,35(10):29-33. (Li Yueqing, Sun Zi'an,Yang Yang,et al. Analysis of the applicability of rain gauge in the high-value area of rainstorm in Western Yunnan [J]. China Flood & Drought Management,2025,35(10):29-33. (in Chinese))

[15] 苟璐峰,田宇,季明锋,等. 多类型雨量计测雨能力对比分析[J]. 中国防汛抗旱,2025,35(4):95-100. (Gou Lufeng,Tian Yu,Ji Mingfeng,et al. Comparative analysis of rainfall measurement ability of multi-type rain gauges[J]. China Flood & Drought Management,2025,35(4):95-100. (in Chinese))

[16] 陈晓宏,钟睿达,王兆礼,等. 新一代GPM IMERG卫星遥感降水数据在中国南方地区的精度及水文效用评估[J]. 水利学报,2017,48(10):1147-1156. (Chen Xiaohong,Zhong Ruida,Wang Zhaoli,et al. Evaluation on the accuracy and hydrological performance of the latest-generation GPM IMERG product over South China[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2017,48

(10):1147-1156. (in Chinese))

[17] Jiang Shanhu, Wei Linyong, Ren Liliang, et al. Evaluation of IMERG, TMPA, ERA5, and CPC precipitation products over Chinese mainland: Spatiotemporal patterns and extremes[J]. Water Science and Engineering, 2023,16(1): 45-56.

[18] 王维,刘佳,李传哲,等. 高分辨率融合降水驱动下的 WRF/WRF-Hydro 耦合模拟研究[J]. 水资源保护,2023,39(5):125-134. (Wang Wei, Liu Jia, Li Chuanzhe, et al. Study on coupled WRF/WRF-Hydro system driven by high resolution merging precipitation[J]. Water Resources Protection,2023,39(5):125-134. (in Chinese))

[19] Chung K S, Yao I A. Improving radar echo lagrangian extrapolation nowcasting by blending numerical model wind information: statistical performance of 16 typhoon cases[J]. Monthly Weather Review,2020,148(3):1099-1120.

[20] Lin H H, Tsai C C, Liou J C, et al. Multi-weather evaluation of nowcasting methods including a new empirical blending scheme [J]. Atmosphere,2020,11(11):1166.

[21] Nerini D, Foresti L, Leuenberger D, et al. A reduced-space ensemble Kalman filter approach for flow-dependent integration of radar extrapolation nowcasts and NWP precipitation ensembles[J]. Monthly Weather Review,2019,147(3):987-1006.

[22] Kim T, Yang Tiantian, Zhang Lujun, et al. Near real-time hurricane rainfall forecasting using convolutional neural network models with Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG) product[J]. Atmospheric Research,2022,270:106037.

[23] Li Zewen, Liu Fan, Yang Wenjie, et al. A survey of convolutional neural networks: analysis, applications, and prospects[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems,2022,33(12):6999-7019.

[24] 李建柱,李磊菁,冯平,等. 基于深度学习的雷达降雨临近预报及洪水预报[J]. 水科学进展,2023,34(5):673-684. (Li Jianzhu, Li Leijing, Feng Ping, et al. Radar rainfall nowcasting and flood forecasting based on deep learning[J]. Advances in Water Science,2023,34(5):673-684. (in Chinese))

[25] 杨涛,沈玉芳,陈渝青,等. 基于指数雨胞雨衰模型的微波链路雨强反演方法[J]. 水资源保护,2024,40(5):11-17. (Yang Tao, Shen Yufang, Chen Yuqing, et al. A microwave link rain intensity inversion method based on exponential rain cell rain attenuation model[J]. Water Resources Protection,2024,40(5):11-17. (in Chinese))

[26] 邓志弘,刘丙军,张卡,等. 基于 CNN-LSTM 的珠江河口台风过程实时滚动修正预报[J]. 海洋预报,2024,41(1):94-103. (Deng Zhihong, Liu Bingjun, Zhang Ka, et al. Real-time rolling correction forecasting of typhoon process in the Pearl River estuary based on CNN-LSTM[J]. Marine Forecasts,2024,41(1):94-103. (in Chinese))

[27] Imhoff R O, De Cruz L, Dewettinck W, et al. Scale-dependent blending of ensemble rainfall nowcasts and numerical weather prediction in the open-source pysteps library[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,2023,149(753):1335-1364.

[28] Pulkkinen S, Nerini D, Pérez Hortal A A, et al. Pysteps: an open-source Python library for probabilistic precipitation nowcasting (v1.0)[J]. Geoscientific Model Development,2019,12(10):4185-4219.

[29] 郑淋淋,邱学兴. 一种改进的降水临近外推预报技术方法研究及效果检验[J]. 气象科技,2020,48(1):97-106. (Zheng Linlin, Qiu Xuexing. An improved method of precipitation nowcasting extrapolation forecasting and its verification [J]. Meteorological Science and Technology,2020,48(1):97-106. (in Chinese))

[30] Nisi L, Hering A, Germann U, et al. Hailstorms in the Alpine region: Diurnal cycle, 4D-characteristics, and the nowcasting potential of lightning properties[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,2020,146(733):4170-4194.

[31] Tounsi A, Temimi M, Abdelkader M, et al. Assessment of deterministic and probabilistic precipitation nowcasting techniques over New York metropolitan area[J]. Environmental Modelling & Software,2023,168:105803.

[32] Sebastian A, Bader D J, Nederhoff C M, et al. Hindcast of pluvial, fluvial, and coastal flood damage in Houston, Texas during Hurricane Harvey (2017) using SFINCS[J]. Natural Hazards,2021,109(3):2343-2362.

[33] Woods D, Kirstetter P E, Vergara H, et al. Hydrologic evaluation of the global precipitation measurement mission over the U.S.: Effect of spatial and temporal scales[J]. Journal of Hydrology,2024,635:131134.

[34] Habibi H, Awal R, Fares A, et al. Performance of multi-radar multi-sensor (MRMS) product in monitoring precipitation under extreme events in Harris County, Texas[J]. Journal of Hydrology,2021,598:126385.

[35] Chegini T, Li Hongyi, Leung L R. HyRiver: Hydroclimate data retriever[J]. Journal of Open Source Software,2021,6(66):3175.

[36] Zhang Wei, Villarini G, Vecchi G A, et al. Urbanization exacerbated the rainfall and flooding caused by hurricane Harvey in Houston[J]. Nature,2018,563(7731):384-388.

[37] Emanuel K. Assessing the present and future probability of hurricane Harvey's rainfall[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2017,114(48):12681-12684.

(收稿日期:2025-02-19　编辑:刘晓艳)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.05.002

图神经网络对地下水位预测的不同物理机制融合方案比较

刘 波,王佳宝,李志勇,姜 伟

(河海大学水文与水资源学院)

摘要:为揭示不同物理机制融合方案对图神经网络(GNN)地下水位预测精度的影响,基于鄱阳湖流域 114 个监测站的逐日地下水位数据,综合考虑地下水位空间相关性、地表水-地下水关联属性及降雨滞时效应等物理因素,设计了 6 种物理机制融合方案的图卷积神经网络(GCN)结构,并对比分析了 6 种方案的地下水位预测精度。鄱阳湖流域实例验证结果表明:GCN 在预测地下水位动态变化时展现了出色的总体模拟能力和精度,各方案 R^2 均超过 0.9;融合提前 1 月降雨与地表水-地下水关联属性的方案精度最高(MAE 为 0.060 1 m),较单距离邻接矩阵方案提升约 6.8%;考虑降雨滞时可增强地下水位对降雨滞后响应的刻画,关联属性矩阵对潜水井水位预测结果的 RMSE 提升效果优于承压水井。

关键词:地下水位预测;图神经网络;物理机制融合;特征选择;图结构;鄱阳湖流域

中图分类号:TP183;P641.7 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-1980(2026)05-0010-08

Comparison of different physical mechanism fusion schemes for groundwater level prediction by graph neural networks

Liu Bo, Wang Jiabao, Li Zhiyong, Jiang Wei

(*College of Hydrology and Water Resources, Hohai University*)

Abstract: To reveal the influence of different physical mechanism fusion schemes on the groundwater level prediction accuracy of graph neural network (GCN), six graph convolutional network (GCN) structures with different physical mechanism fusion schemes were designed based on the daily groundwater level data from 114 monitoring stations in the Poyang Lake Basin by comprehensively considering the physical factors such as spatial correlation of groundwater levels, surface water-groundwater connectivity, and rainfall lag effect. The groundwater level prediction accuracies of the six schemes were compared. The results from the Poyang Lake Basin case validation show that the GCN demonstrated excellent overall simulation capability and accuracy when predicting the dynamic changes of groundwater levels; the R^2 of all schemes exceeds 0.9. The scheme fusing one-month-ahead rainfall and surface water-groundwater connectivity attributes achieves the highest accuracy (with an MAE of 0.060 1 m), improving the accuracy by about 6.8% compared with the single distance matrix scheme. Taking rainfall lag into account characterizes better the delayed response of groundwater levels to rainfall; moreover, the connectivity attribute matrix yields better RMSE improvements for phreatic well water-level predictions than for confined wells.

Key words: groundwater level prediction; graph neural network; physical mechanism fusion; feature selection; graph structure; the Poyang Lake Basin

地下水位动态特征与降雨、地表水系及水文地质条件等因素密切相关[1-2]。降雨入渗[3]及河流、湖泊等地表水体的入渗[4]是潜水补给的重要来源[5-7]。这些补给要素及其强度的空间分布受水文地质条件的控制,是影响地下水位动态的主要因素之一,具有明显空间差异性与相关性。

地下水位动态模拟预测的主要方法包括物理模拟、数值模拟与统计模型法。由于完备的水文地质条件[8]往往难以获取,且水文地质概念模型的构建、边界条件及源汇项的确定均存在一定主观不确定性,加之计算成本较高,数值模拟法在资料匮乏地区及大尺度区域的应用受到限制[9]。近年来,随着观测数据的不断积累与多源数据的日益丰富,众多学者已将数据驱动方法和机器学习技术广泛应用于地下水位预

基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFC3211600)

作者简介:刘波(1980—),女,副教授,博士,主要从事地下水系统模拟与预报研究。E-mail:liubohhu@hhu.edu.cn

测[10-12]。此类方法能够捕捉输入变量与目标变量之间的非线性关系,识别时间序列数据中的隐藏模式,如支持向量机(SVM)[12]、卷积神经网络(CNN)[13]、长短时记忆网络(LSTM)[14]、门控循环单元(GRU)[15]等机器学习算法,在地下水位预测研究中展现了良好的应用潜力。但 Cao 等[16]的研究发现,CNN 在处理非结构化数据和挖掘地下水位数据中的时序信息方面存在局限;LSTM 和 GRU 在处理非欧式空间数据和复杂数据结构特征方面存在不足。

图神经网络(graph neural network,GNN)模型是专为分析和处理图结构数据而设计的深度学习模型[17]。GNN 通过信息传递机制更新节点状态,整合节点特征和图结构信息,对时空属性数据更具预测能力,在生态水文、系统故障分析[18-19]等领域取得了显著应用成效。例如:Chen 等[18]通过将生态水文模型中的饱和流模型 MODFLOW 替换为径向基函数神经网络,提出了一种整合物理基础数值模型和机器学习模型的新范式,既保持了模型的准确性和泛化能力,又显著提升了模型的计算效率和灵活性;Gao 等[19]提出了物理嵌入递归图神经网络(Pe-RGNN)的新型故障诊断模型,该模型通过将传感器间的物理依赖关系嵌入到图结构,并利用递归图神经网络提取时序信息,实现了复杂系统的故障诊断。

GNN 能够综合时空机制属性,有效提高地下水位动态预测精度[20]。图卷积神经网络(GCN)[21]是 GNN 的一种,它利用图的结构特性设计卷积操作,从而在图数据上进行有效的特征学习。有学者在构建图波神经网络(GWN)模型时,将监测井作为节点,通过自适应邻接矩阵和图卷积层捕捉井间空间关系,并利用门控时间卷积网络提取时间特征,用于不列颠哥伦比亚省地下水位预测,取得了优于 CNN、LSTM 等模型的预测效果[22]。通过考虑监测站之间的空间关系构建 GNN,可以有效提高模拟精度和效率[23]。Pang 等[24]提出了一种基于注意力机制的图神经网络(aGNN)模型,用于模拟地下水中的污染物传输,并量化污染源与污染物传播之间的因果关系。当前 GNN 用于地下水位预测的研究主要集中于模型应用和模拟能力实证方面,然而如何有效地将物理机制融入模型以提高预测的准确性和科学性,仍是有待探讨的问题。

为对比评估不同物理机制融合方案对 GNN 地下水位预测精度的影响,本文通过设置降雨、地表水-地下水关联、地下水流场等物理要素信息在 GNN 结构中的不同融合方案,以鄱阳湖流域为实例,探讨不同类型物理机制的建模方案对提高 GNN 预测精度的差异,以期为地下水位预测提供参考。

1　GNN 构建与结构设计

1.1　GNN

本文选取 GNN 的变体 GCN 构建地下水位预测模型,以实现对地下水位的时空结构模拟与预测。GNN 的核心在于信息传递机制[25],其中每个节点通过聚合邻居节点的信息更新自己的状态表示,通过迭代更新节点状态来捕捉节点及其邻居的信息和图的拓扑结构。这种迭代更新机制使得节点的最终状态能够包含其邻居的信息以及图的拓扑结构特征。

特征矩阵是一个包含所有节点特征信息的矩阵,通常表示为 $\boldsymbol{X}\in\boldsymbol{R}_{N\times D}$,其中 N 为图中节点总数,D 为每个节点的特征维度。邻接矩阵是一个方阵,用于表示图中所有节点之间的连接关系,通常表示为 $\boldsymbol{A}\in\boldsymbol{R}_{N\times N}$。邻接矩阵 $\boldsymbol{A}$ 中的数据 A_{ij} 表示节点 i 与 j 之间的连通性。如果节点和节点之间连通,则 A_{ij} 的值为边的权重;如果不连通,则 A_{ij} 的值为 0。特征矩阵提供了节点的属性特征,邻接矩阵提供了节点之间的连接关系。GNN 模型通过特征矩阵和邻接矩阵的结合来学习节点的表示,即通过特征矩阵传递节点的特征信息,同时利用邻接矩阵来聚合邻居节点[25]的信息。

1.2　GCN 模型框架

本文采用两层 GCN 网络层构建模型框架[26](图 1)。模型的输入是一个图结构,该结构由邻接矩阵和特征矩阵共同定义。模型输入首先被送入 GCN 卷积层 1 进行处理。在此过程中,图结构数据通过图卷积操作进行特征提取,随后通过 ReLU(rectified linear unit)激活函数进行非线性变换,以增强模型的表达能力。经过卷积层 1 处理后,数据被传递到卷积层 2,数据再次经过图卷积操作,进一步提炼和抽象特征。卷积层 2 的输出结果经过 ReLU 激活函数处理后被用作模型的预测输出。这种双层 GCN 结构设计,旨在通过逐层图卷积模块和非线性激活函数,有效捕捉和利用图数据中的局部连接模式,从而提高模型对图结构数据的预测性能。

1.3　图结构方案设计

图结构由邻接矩阵与特征矩阵组成。对于图结构 $G=(V,E,\boldsymbol{A})$,V 为图节点集合,E 为图上各个节点之

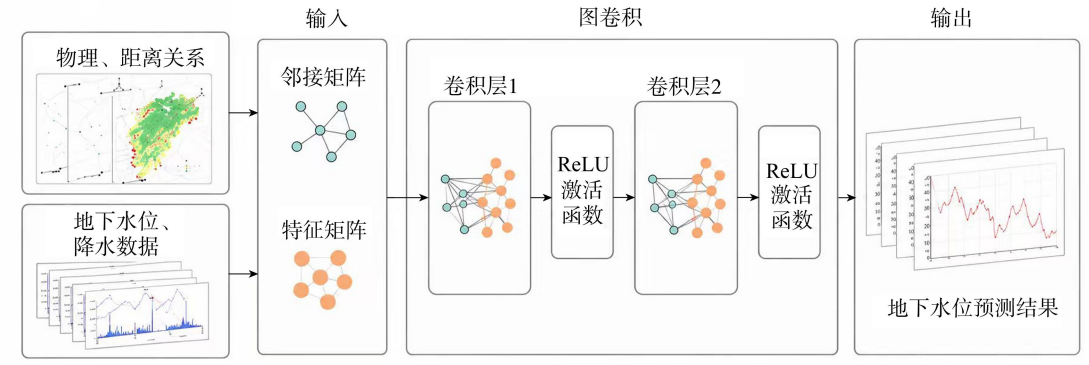


图1 GCN模型框架

Fig. 1 Framework of GCN model

间的连通性,也就是边的集合。在地下水位预测过程中,每个地下水监测井代表一个节点,每个节点之间的连接可以用边表示,以地下水位监测井的地下水位与降雨历史资料作为特征矩阵,地下水监测井之间的空间关系作为邻接矩阵,构成地下水监测井群的图结构,从而将整个研究区地下水网络用图进行描述。

邻接矩阵用于量化监测站点间的相互依赖性,A_{ij} 表示站点 i 与站点 j 之间的依赖权重,定义为两站点距离(distance)的倒数,即站点间的距离越短,其依赖权重越大,从而揭示了站点间联系的紧密程度。

通过不同的特征矩阵与邻接矩阵构建方式,设计GCN模型的图结构方案。鉴于降雨与地下水位动态之间存在显著的成因联系,即降雨过程直接影响地下水位变化,可反映气候条件对地下水位的影响[27],本文选取降雨作为辅助预测变量。具体地,基于相关分析成果,以预测时段前1月及前3月的降雨数据作为节点特征,构建GCN模型。此外,考虑到地表水与地下水构成相互关联的水文连续体[28],综合地下水流特征、地表水与地下水相互联系的物理机制[29],进一步区分了两种类型的邻接矩阵,即地表水-地下水关联属性矩阵和距离邻接矩阵。地表水-地下水关联属性邻接矩阵依据监测井在鄱阳湖流域水系中的空间分布构建,通过站点之间是否存在地表水力联系[30],确定地理连接关系。如果不存在地表水力联系则两站点间不存在边的连接,两点之间权重为0,若存在地表水力联系,则两点之间的权重为距离的倒数。距离邻接矩阵考虑监测井周围60 km范围内(保证每个监测井可以与一个邻近监测井连为一条边)包含的监测井构建了基于距离的连接关系。相应得到6种图结构设计方案(表1)进行GCN建模。

表1 方案名称及方案内容

Table 1 Name and content of schemes

方案名称	方案内容
GR	地表水-地下水关联属性邻接矩阵,单地下水位数据作为特征矩阵
D+P_{t-1}	单距离邻接矩阵,地下水位+提前1个月的降雨作为特征矩阵
GR+P_{t-1}	地表水-地下水关联属性邻接矩阵,地下水位+提前1个月的降雨作为特征矩阵
GR+P_{t-3}	地表水-地下水关联属性邻接矩阵,地下水位+提前3个月的降雨作为特征矩阵
D+P_{t-3}	单距离邻接矩阵,地下水位+提前3个月的降雨作为特征矩阵
D	单距离邻接矩阵,单地下水位数据作为特征矩阵

采用2018年1月至2019年12月逐日数据进行GCN模型的训练与验证,通过滚动计算的方式预测2020年各月地下水位,比较不同方案的预测效果,评估其性能。

1.4 模型评价方法

通过贝叶斯优化方法确定GCN的最佳超参数,设置如下参数,批量大小为32,学习率为0.001,损失函数为均方误差(MSE),优化器为Adam,激活函数为ReLU。用于评估模型性能的指标包括平均绝对误差(MAE)、相对误差(RE)、均方根误差(RMSE)、决定系数(R^2),误差越小,预测越准确,决定系数越大,结果越可靠。

2 研究区概况与数据

2.1 鄱阳湖流域概况

鄱阳湖流域,位于长江中下游南岸,地理坐标范围24°29′14″N~30°04′41″N、113°34′36″E~118°28′58″E,

地形以丘陵和山地为主,中部湖区地势较低,四周被山脉环绕(图 2)。流域属于中亚热带湿润季风气候,气候温和,年均降水量约为 1 632 mm,降水的季节和年际变化显著,具有明显的地域性分布差异。鄱阳湖流域包含 6 个子流域,即赣江、抚河、信江、饶河、修河 5 条河流流域及鄱阳湖区(以下分别简称为赣、抚、信、饶、修、湖)。在鄱阳湖的不同洲滩,地下水埋深变化范围为 0.1~8.1 m。枯水季节,洲滩地下水埋深可达到 8.1 m,湖岸带[31]不同典型区地下水埋深变化范围为 2.2~10 m,与湖水位变化在月尺度上表现出较好的一致性。汛期湖水位抬升,地下水与湖水保持约 4 个月较为活跃的水力联系。

2.2　数据来源

数据包括鄱阳湖流域 2018—2020 年 114 个地下水位监测站的逐日地下水位数据与 75 个中央报汛站逐日雨量资料,均来自江西省水文监测中心。

2.3　地下水位动态及其影响因素

降雨与地下水位动态存在物理因果联系,汛期降雨的有效补给使地下水位变化过程与降雨过程存在显著的相关性。同时,地下水位对降雨存在一定的滞后现象[32],即地下水位有可能对若干个月之前的降水产生响应。合理引入地下水位变化的滞时因子,能够更准确地捕捉其动态规律[29],从而显著提高地下水位预报的精度。鄱阳湖流域内 6 个子流域代表性地下水位与不同月份的前期降雨过程的相关性热图(图 3)表明,约 50%的站点相关系数介于 0.4~0.7,表明地下水位与降水量之间具有良好的相关性。研究区内逐月降雨过程与平原区代表站(黄沙站)和山丘区代表站(九江滨江站)的平均地下水位过程(图 4)进一步表明,平原区地下水位的变化较降雨过程存在 1~3 月的滞时(图 4(a)),山丘区降雨滞时略短,约为 1~2 月(图 4(b))。

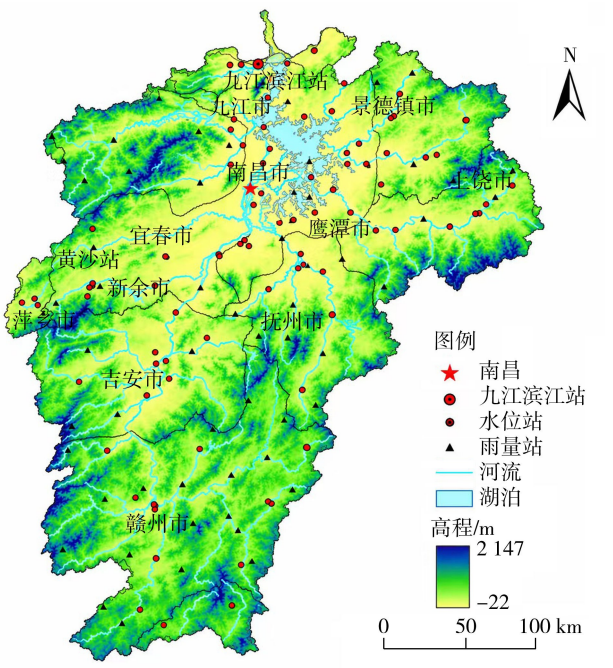
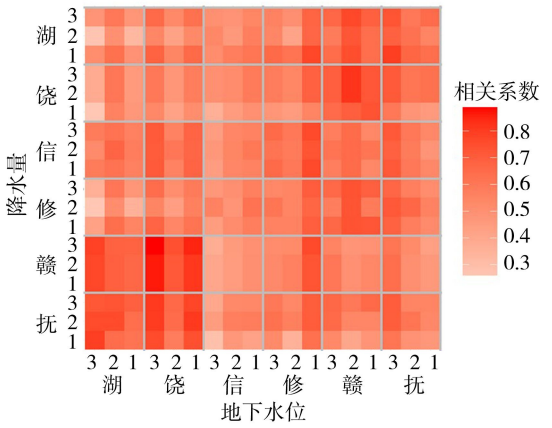


图 2　研究区概况

Fig. 2　Overview of study area



注:坐标轴上的数字表示地下水位对降水量的滞时长度,即当月地下水位之前不同月的降水量。

图 3　子流域代表站降水量与地下水位相关性热图

Fig. 3　Heat map of correlation between rainfall and groundwater level at representative stations in sub-basins

3　结果与分析

3.1　不同方案地下水位预测精度比较

由于预测 2020 年各月地下水位和全年地下水位得到的评估指标数据较多,因此仅列出 2020 年全年的地下水位数据预测结果的精度(表 2)。各方案的 R^2 均超过 0.9,表明各方案模型都有很好的拟合度,能够很好地复现地下水位的变化过程。考虑降雨滞时的 GR+P_{t-1} 方案 MAE、RE 均小于 GR 方案;D+P_{t-1} 的 MAE 小于 D 方案(减小约 3%),表明在构建邻接矩阵时,添加降雨数据并适当考虑降雨滞时会使整体预测精度提升,相比于 D 方案,GR 的误差更小,表明使用地表水-地下水关联属性构建邻接矩阵能有效提高预测精度。

3.2　融合降雨的建模方案

为评估降雨数据融合对 GCN 模型预测准确性的影响,对比了考虑 1 个月、3 个月的地下水位对降雨滞时加距离因素和仅考虑距离因素的 GCN 模型在鄱阳湖站点的 RMSE。由图 5 可知,在山丘地区,考虑降雨 1 个月滞时构建的 GCN 模型预测性能最佳,RMSE 较低,表明合理整合降雨数据能提高模型在复杂地形(如

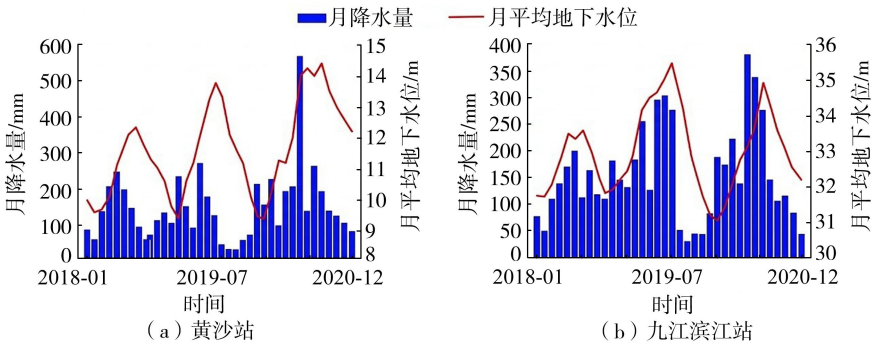


图4 代表站逐月降水量与地下水位过程

Fig. 4 Processes of monthly rainfall and groundwater level at representative stations

表2 各方案模型预测精度

Table 2 Prediction accuracies of each scheme model

方案名称	MAE/m	RE/%	RMSE/m	R^2
GR	0.061 8	0.20	0.130 4	0.979 9
D+P_{t-1}	0.062 6	0.20	0.134 7	0.978 6
GR+P_{t-1}	0.060 1	0.19	0.130 6	0.979 9
GR+P_{t-3}	0.061 8	0.20	0.131 7	0.979 5
D+P_{t-3}	0.064 4	0.21	0.132 2	0.979 4
D	0.064 5	0.21	0.131 8	0.979 5

山丘)地区的预测精度。然而,构建邻接矩阵所融合的数据要素并非越多越好。模拟结果显示地下水位与降水量之间存在约1月的滞时,即引入P_{t-1}数据的模型表现更佳,而引入滞时为3月降雨数据的模型可能引入了过多干扰信息,不利于模型优化。综上,在预测目标变量的过程中,选择合适的数据比单纯追求数据量的增加更有利于模型预测。

此外,在空间上,南坑站、龙南站、黄岗山站、德安站3种建模预测方案的RMSE均较大(图5),因此以D+P_{t-1}方案为例,进一步分析2020年全年地下水位模拟过程(图6)。上述4个站对极值的预测均不够精确,导致RMSE偏大,可能是因为4个站位于流域上游,邻近站点较少,站仅通过较少边与其他站点相连,节点关联性较弱,限制了模型在这些节点处的信息传递;同时4个站地处丘陵山区,地下水位波动幅度较大,预测结果误差过大,使预测值与实际值出现偏差。

3.3 融合地表水与地下水相互作用的建模方案

考虑到地表水与地下水联系信息对模型性能的影响,本文选择GR(侧重于体现地表水与地下水体的联系)和D(只考虑站点之间的距离大小)两个方案的预测结果进行对比分析(图7)。在面对地下水位变化波动剧烈或平滑的站点数据时,两种方案均能预测到地下水位的变化趋势,但GR方案相较D方案展现出更优的预测性能,对降雨滞后的控制能力更好。D方案的邻接矩阵为无选择的,只依据距离的全连接方式,而GR方案则依据地表水与地下水之间的关系对站点之间邻接关系进行了选择性构建。这种基于先期特征选择的方法使得模型更容易、更准确地学习到数据中的潜在模式,从而提升模型的预测能力。图7(b)龙南站的预测误差较小但是预测趋势与实际存在较大差距,可能是因为该站的节点关联性较弱,限制了其信息传递的效率,导致模型未能充分学习到该站点地下水位动态的局部细微特征,而过度依赖其已学习的全局特征。

在114个站点(即监测井)的整体数据中,有76个监测井的预测结果RMSE因加入地表水-地下水关联属性而得到提升,占比约66.67%;另有38个监测井的预测结果RMSE有所下降,占比约33.33%。这一数据充分说明,加入地表水-地下水关联属性对绝大部分监测井的预测精度起到了积极作用。在84个潜水监测井中,有61个的预测结果RMSE得到提升,占比约72.6%,仅23个出现下降,占比约27.4%;而在30个承压水监测井中,预测结果RMSE提升的为16个,占比约53.3%,下降的为14个,占比约46.7%。显然,潜水监测井的提升效果更为显著,这反映出潜水井与地表水体的联系更为紧密,对地表水-地下水关联属性的响应更敏感;而承压水监测井由于与地表水体的联系相对较少,其对该关联属性的响应也就不够明显。

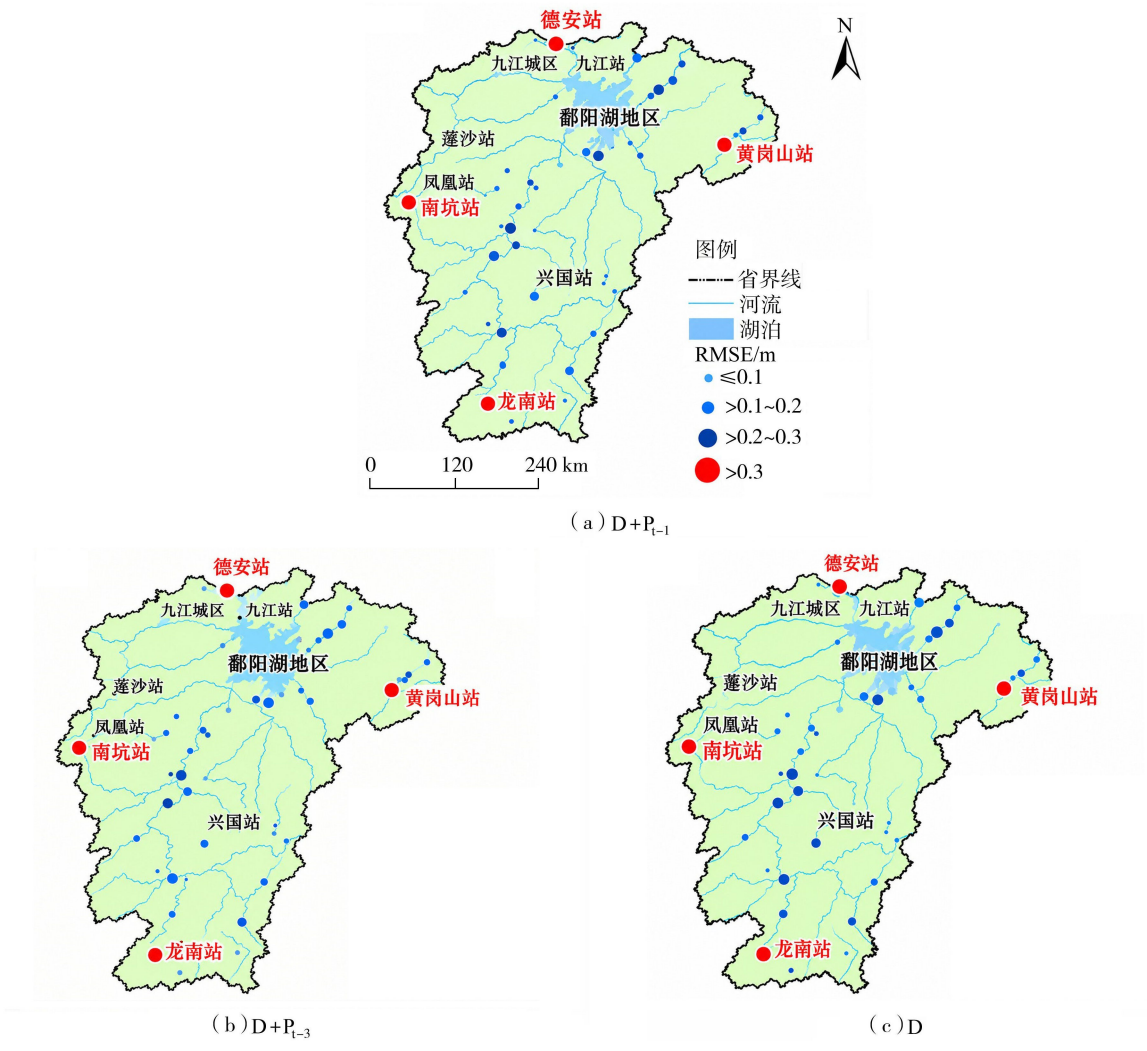


图 5　典型方案地下水位预测误差

Fig. 5　Groundwater level prediction errors for typical schemes

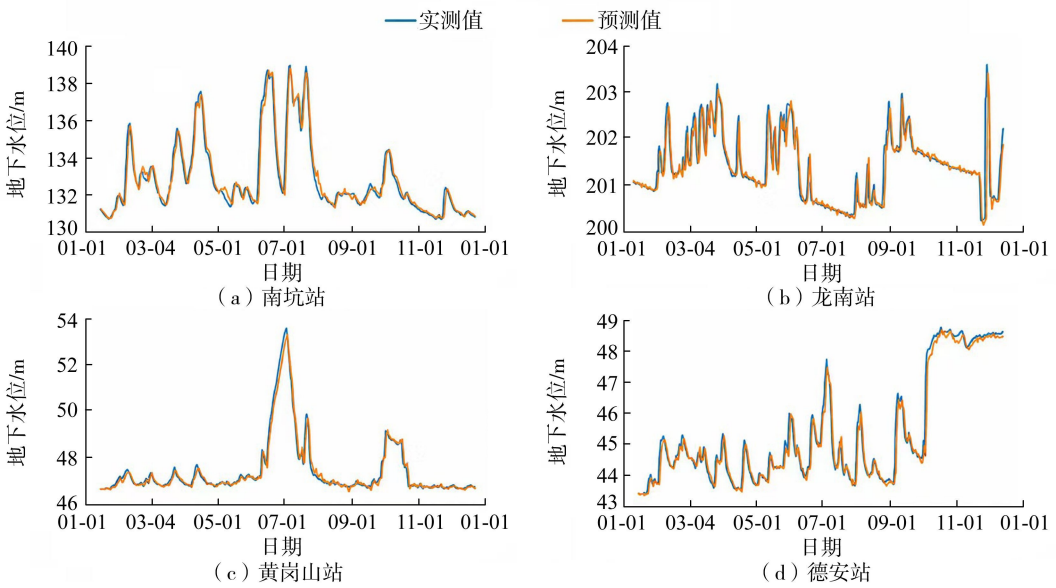


图 6　2020 年代表站 D+P$_{t-1}$ 方案下地下水位过程线

Fig. 6　Processes of groundwater level under D+P$_{t-1}$ scheme at representative stations in 2020

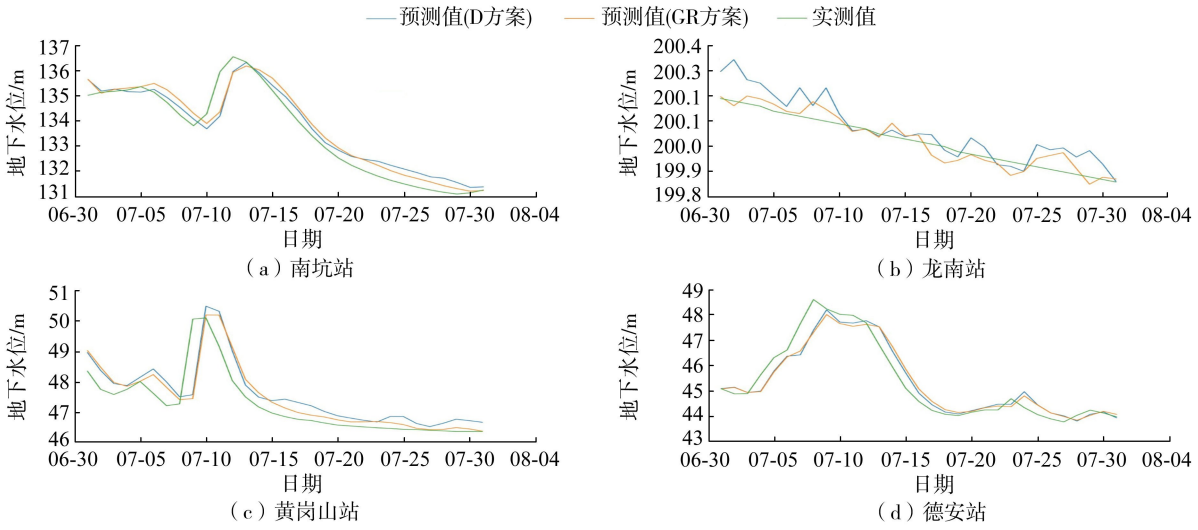


图7 2020年代表站7月D、GR方案地下水位过程线

Fig. 7 Processes of groundwater level under D and GR schemes at representative stations in July 2020

4 结 论

a. GCN在预测地下水位动态变化时展现了出色的总体模拟能力和精度。GCN通过适时引入降雨数据,并结合地表水与地下水的物理联系信息,有效捕捉了不同站点的地下水位变化模式,显著提升了模型对降雨滞时的控制能力,这一改进进一步验证了模型的高精度和稳定性。

b. 考虑到降雨对地下水位的滞时影响特性,构建融入提前降雨数据的特征矩阵,能使GCN模型充分利用降雨时序特征,提升模型对滞后现象的控制能力,使其预测表现优于未充分结合降雨数据的方案,凸显了合理利用时序降雨信息对提升模型预测性能的重要性。

c. 基于地下水位与地表水存在密切交互的特性,提出构建地表水-地下水关联属性邻接矩阵的方案,能准确捕捉水体物理联系及地下水位变化模式,预测精度与稳定性显著优于单纯基于距离的邻接矩阵方案。

d. 加入地表水-地下水关联属性对地下水位预测的提升效果因观测的地下水类型而异:与地表水体联系紧密的潜水井预测精度提升显著,这源于两者的直接关联使其对该属性更敏感;而联系不紧密的承压水监测井因间接关联,受该属性影响有限,预测效果提升较弱。此外,引入物理信息后,GCN模型的MAE显著下降,但RMSE无明显改善,说明模型对极端值的预测仍有不足,后续需针对性优化结构。同时,由于受模型与数据资料限制,本研究仅考虑了降雨及地表水-地下水物理联系两种机制,未涉及地形、植被等其他影响因素,后续可补充相关流域属性以进一步提升模型预测表现。

参考文献:

[1] 束龙仓,殷晓然,袁亚杰,等. 三江平原典型区河水与地下水水量交换的时空变化规律分析[J]. 水利学报,2021,52(10):1151-1162. (Shu Longcang, Yin Xiaoran, Yuan Yajie, et al. Temporal and spatial variation of water quantity exchange between surface water and groundwater in typical district of Sanjiang Plain[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(10): 1151-1162. (in Chinese))

[2] 束龙仓,徐丽丽,袁亚杰,等. 三江平原典型区地下水流场变化及主要影响因素分析[J]. 水利学报,2022,53(6):644-654. (Shu Longcang, Xu Lili, Yuan Yajie, et al. Analysis on variation of groundwater flow field and its main influencing factors in the typical district of Sanjiang Plain[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(6): 644-654. (in Chinese))

[3] 谢丽纯,陈建耀,付丛生,等. 华南滨海小流域降雨入渗对地下水的补给分析[J]. 生态环境学报,2011,20(8/9):1259-1267. (Xie Lichun, Chen Jianyao, Fu Congsheng, et al. Observation and analyses of groundwater recharge from rainfall infiltration in a coastal watershed, South China[J]. Ecology and Environment Sciences, 2011, 20(8/9): 1259-1267. (in Chinese))

[4] 周瑞静,宋炜,倪宝峰. 基于数值模拟的地表水体对地下水源地影响研究:以北京市通州区为例[J]. 城市地质,2020,15(4):388-393. (Zhou Ruijing, Song Wei, Ni Baofeng. Study on influence of surface water on groundwater source based on numerical simulation: taking Tongzhou district of Beijing as an example[J]. Urban Geology, 2020, 15(4): 388-393. (in

Chinese))

[5] 宋子奕,鲁程鹏,吴成城,等. 2009—2019 年河西走廊地下水位时空分布及演变趋势[J]. 水资源保护,2023,39(2):160-167. (Song Ziyi,Lu Chengpeng,Wu Chengcheng,et al. Spatiotemporal Distribution and evolution trend of ground water level in Hexi Corridor from 2009 to 2019[J]. Water Resources Protection,2023,39(2):160-167. (in Chinese))

[6] 刘紫萱,周冰玉,李志威,等. 黄河源区典型泥炭湿地地下水水位时空变化及流量过程[J]. 水利水电科技进展,2024,44(3):27-33. (Liu Zixuan,Zhou Bingyu,Li Zhiwei,et al. Spatiotemporal change of groundwater level and discharge process in a typical peatland watershed in Source Region of Yellow River[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(3):27-33. (in Chinese))

[7] Wang Wang,Chen Jiaqi,Chen Jiansheng,et al. External groundwater recharge of Tianchi Lake in Changbai Mountain[J]. Water Science and Engineering,2026,19(1): 47-55.

[8] 井淼,张江江,刘瑾,等. 水位、水量、产量联控的华北平原地下水超采区节水灌溉多目标优化[J]. 水资源保护,2025,41(2):184-192. (Jing Miao,Zhang Jiangjiang,Liu Jin,et al. Multi-objective optimization of water-saving irrigation in groundwater over-exploitation area of the North China Plain under joint control of water level, water volume, and crop yield[J]. Water Resources Protection,2025,41(2):184-192. (in Chinese))

[9] 郝治福,康绍忠. 地下水系统数值模拟的研究现状和发展趋势[J]. 水利水电科技进展,2006,26(1):77-81. (Hao Zhifu, Kang Shaozhong. Current situation and development trend of numerical simulation of groundwater system[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2006,26(1):77-81. (in Chinese))

[10] Tao Hai,Hameed M M,Marhoon H A,et al. Groundwater level prediction using machine learning models: a comprehensive review[J]. Neurocomputing,2022,489: 271-308.

[11] Azad A S,Islam N,Nabi M N,et al. Developments and trends in water level forecasting using machine learning models: a review[J]. IEEE Access,2025,13:63048-63065.

[12] 牛欣怡,鲁程鹏,卢佳赟,等. 机器学习模型在地下水埋深模拟中的适应性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(4):74-82. (Niu Xinyi,Lu Chengpeng,Lu Jiayun,et al. Adaptability analysis of machine learning model in groundwater depth simulation[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(4):74-82. (in Chinese))

[13] Yang Xingyu,Zhang Zhongrong. A CNN-LSTM model based on a meta-learning algorithm to predict groundwater level in the Middle and Lower reaches of the Heihe River,China[J]. Water,2022,14(15):2377.

[14] 闫佰忠,孙剑,王昕洲,等. 基于多变量 LSTM 神经网络的地下水水位预测[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2020,50(1):208-216. (Yan Baizhong,Sun Jian,Wang Xinzhou,et al. Multivariable LSTM neural network model for groundwater levels prediction[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition),2020,50(1):208-216. (in Chinese))

[15] 陈文龙,杨云丽,张煜,等. 基于天地协同与深度学习的灌区地下水位模拟[J]. 长江科学院院报,2023,40(7):88-95. (Chen Wenlong,Yang Yunli,Zhang Yu,et al. Simulation of groundwater level in irrigation area based on sky-earth cooperation and deep learning[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2023,40(7):88-95. (in Chinese))

[16] Cao Hongye,Han Ling,Li Liangzhi. A deep learning method for cyanobacterial harmful algae blooms prediction in Taihu Lake,China[J]. Harmful Algae,2022,113:102189.

[17] Yu Bing, Yin Haoteng, Zhu Zhanxing. Spatio-temporal graph convolutional networks: a deep learning framework for traffic forecasting[C]//Proceedings of the 27th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI). Stockholm:IJCAI, 2018.

[18] Chen Chong,Zhang Hui,Shi Wenxuan,et al. A novel paradigm for integrating physics-based numerical and machine learning models: a case study of eco-hydrological model[J]. Environmental Modelling & Software,2023,163:105669.

[19] Gao Yushan,Zhong Zhirong,Ma Meng,et al. Physics-embedded recurrent graph neural network for fault diagnosis of complex systems[J]. IEEE Access,2024,12: 122426-122436.

[20] Zhou Yu,Zheng Haixia,Huang Xin,et al. Graph neural networks:taxonomy,advances,and trends[J]. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology,2022,13(1):15.

[21] 谢娟英,张建宇. 图卷积神经网络综述[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版),2024,52(2):89-101. (Xie Juanying,Zhang Janyu. The review of the graph convolutional neural networks[J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition),2024,52(2):89-101. (in Chinese))

[22] Bai Tao,Tahmasebi P. Graph neural network for groundwater level forecasting[J]. Journal of Hydrology,2023,616:128792.

(下转第 28 页)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.05.003

基于雨量站-微波数据融合的雨量场构建

欧思程[1],史晓薇[1],刘道君[1],徐卫立[1],杨 涛[2]

(1.中国长江电力股份有限公司;2.河海大学水科学研究院)

摘要:针对传统插值方法难以有效融合雨量站-微波链路降雨观测数据的问题,提出了基于随机混合惠特克-香农算法的雨量场协同重构框架,通过构建合成降雨基准场,系统对比了雨量站单源插值与雨量站-微波数据融合的二维降水重构性能,同时使用图像平滑处理技术改善了随机重构方法在雨量场构建中噪声较大、不够光滑的问题。结果表明:随机混合惠特克-香农算法的空间重构精度与雨量站密度及微波链路覆盖率显著正相关,且随着可能重构场数量的增多,精度更好,但当可能重构场数量超过 20 时,降雨范围高估率增至 80%;5×5 均值滤波可使均方根误差降低 60%,显著优于中值滤波及其他窗口尺度方案;微波链路数据在提升雨量场空间分辨率(达 1 km 级)与动态表征能力方面具有补充价值,为 5G 通信背景下城市水文模型的实时数据同化提供了一条可扩展且极具应用前景的技术路径。

关键词:雨量场构建;随机算法;微波链路;微波雨致衰减;数据融合;图像平滑

中图分类号:P412.13 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-1980(2026)05-0018-11

Study on rainfall field construction based on rain gauge-microwave data fusion

Ou Sicheng[1], **Shi Xiaowei**[1], **Liu Daojun**[1], **Xu Weili**[1], **Yang Tao**[2]

(1. *China Yangtze Power Co., Ltd.*; 2. *Institute of Water Science and Technology, Hohai University*)

Abstract: To address the problem that traditional interpolation methods are difficult to effectively fuse rain gauge and microwave link rainfall observation data, a collaborative reconstruction framework for rainfall fields based on a stochastic hybrid Whittaker-Shannon algorithm was proposed. By constructing a synthetic rainfall reference field, the two-dimensional precipitation reconstruction performance of single-source interpolation of rain gauges and dual-source fusion of rain gauges and microwave data was systematically compared. At the same time, an image smoothing technique was used to mitigate the problems of excessive noise and lack of smoothness of the stochastic reconstruction method in rainfall field construction. The results show that the spatial reconstruction accuracy of the stochastic hybrid Whittaker-Shannon algorithm is significantly positively correlated with the rain gauge density and microwave link coverage. Moreover, as the number of possible reconstructed fields increases, the accuracy is better; however, when the number of possible reconstructed fields exceeds 20, the overestimation rate of rainfall extent increases to 80%. The 5×5 mean filter can reduce the root mean square error by 60%, which is significantly superior to the median filter and other window scale schemes. Microwave link data have complementary value in enhancing the spatial resolution (up to the 1 km scale) and dynamic representation capability of rainfall fields, providing a scalable and highly promising technical pathway for real-time data assimilation of urban hydrological models under the 5G communication context.

Key words: rainfall field construction; stochastic algorithm; microwave link; microwave rainfall attenuation; data fusion; image smoothing

降水是诸多自然灾害的一项关键触发因子,触发的灾害严重威胁人民生命财产安全。开展精细化雨量场构建,兼具基础理论探索与防灾减灾应用的双重价值,可为逐小时乃至逐分钟级降雨预报产品的研发奠定基础。高分辨率降水数据是实现精细化雨量场构建的基本前提。传统以雨量计为主的观测手段虽能提供高精度的单点降雨信息,但受限于站网密度与空间布设不均,难以准确捕捉雨量场的时空连续演变特征[1-11]。微波通讯信号在传播过程中携带的衰减、极化等信息,为降水反演提供了新的技术路径——不仅能获取区域降水的空间分布,还可有效规避传统遥感手段中扫描角度与地表杂波等因素带来的测量干扰[12-14]。因此,利用降雨衰减-雨强(attenuation-rain rate,A-R)关系,反演更加精确的降雨数据[15],能够为精细化降雨短临预

基金项目:中国长江电力股份有限公司科研项目(Z242302064)

作者简介:欧思程(1992—),男,工程师,硕士,主要从事梯级调度自动化研究。E-mail:18068639057@163.com

报提供有力数据支撑。围绕微波链路测雨这一方向,国内外学者已开展了大量探索性工作。Kramer 等[16-17]分别发现了单频链路测量城市降水的潜力,将微波链路定位为传统雨量计的有益补充;Messer 等[18]研究了利用商业微波链路(commerscial mircowave links,CMLs)测量降水的可行性,进一步指出其在特定场景下具备合作乃至替代传统技术的潜力。Leijnse 等[19-21]验证了微波链路测量降水的可行性,Minda 等[22]以 50 GHz 链路作为路径平均雨量计,通过与滴谱仪及地面雨量计的对比验证,证实其可有效发挥路径积分雨量计的功能,从而在一定程度上弥补传统雨量计空间分布稀疏与时间分辨率不足的缺陷。在降雨场重构层面,Goldshtein 等[23]提出了面向稀疏商业微波网络的反演技术,Overeem 等[24]进一步实现了城市区域雨量场的实际反演试验。

为此,本文提出基于随机混合惠特克-香农(the random mixing Whittaker-Shannon,RMWS)算法的雨量场重构方法。基于德国南部降水模拟数据,分别重构雨量站单源雨量场与雨量站-微波数据融合雨量场,并采用中值滤波等图像平滑技术抑制网格噪声,最终通过对比评价验证该方法在提升雨量场精细化水平方面的有效性。

1　研究方法

1.1　微波通信反演降水量

设微波初始发射能量为 $E_{f,a}^0$:

$$E_{f,a}^0 = C_{f,a}\exp(\mathrm{i}kz_0) \tag{1}$$

式中:f 为微波频率;a 为微波偏振;$C_{f,a}$ 为微波振幅;k 为微波波数;z_0 为微波发射位置。

当微波在降雨场中进行传播时,在微波链路的频率范围内,因波长与雨滴尺寸处于同一量级,二者之间会产生显著的相互作用。此时,位置 z 处的微波能量可由下式近似估计:

$$E_{f,a} = C_{f,a}\exp\left[-\mathrm{i}k(z-z_0) + \mathrm{i}\frac{\lambda^2}{\pi}\int_0^z \mathrm{d}z\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} F_{f,a}(D)N(D,z)\,\mathrm{d}D\right] \tag{2}$$

式中:λ 为微波波长;D 为微波传输路径上的等效直径;$F_{f,a}(D)$ 为前向散射振幅函数;$N(D,z)$ 为 z 处的雨滴谱分布函数;$N(D,z)\,\mathrm{d}D$ 为在直径区间[D, D+dD]内单位体积的液滴数目。

对于微波链路而言,$z-z_0=l$(l 为链路长度),式(2)可改写为:

$$E_{f,a}(l) = C_{f,a}\exp\left[-\mathrm{i}kl + \mathrm{i}\frac{\lambda^2}{\pi}l\int_{D_{\min}}^{D_{\max}}\mathrm{Re}(F_{f,a}(D))\overline{N}(D)\,\mathrm{d}D - \frac{\lambda^2}{\pi}l\int_{D_{\min}}^{D_{\max}}\mathrm{Im}(F_{f,a}(D))\overline{N}(D)\,\mathrm{d}D\right] \tag{3}$$

其中

$$\overline{N}(D) = \frac{1}{l}\int_0^l N(D,z)\,\mathrm{d}D$$

式中:$\overline{N}(D)$ 为微波传输路径上的平均雨滴谱分布函数。

联立式(1)(3)可得微波路径上的雨致衰减 A_r 为:

$$A_\mathrm{r} = 10\lg\left(\frac{|E_{f,a}|^2}{|E_{f,a}^0|^2}\right) \approx 0.434\frac{\lambda^2}{\pi}l\int_{D_{\min}}^{D_{\max}}\mathrm{Re}(F_{f,a}(D))\overline{N}(D)\,\mathrm{d}D \tag{4}$$

式(4)两边同除以 l 可得到微波在其传输路径上的雨致衰减率 k_R:

$$k_\mathrm{R} = 0.434\frac{\lambda^2}{\pi}\int_{D_{\min}}^{D_{\max}}\mathrm{Re}(F_{f,a}(D))\overline{N}(D)\,\mathrm{d}D \tag{5}$$

因为,前向散射振幅与雨滴的消光截面关系为:

$$C_{\mathrm{ext},a} = \frac{\lambda^2}{\pi}\mathrm{Re}(F_{f,a}(D)) \tag{6}$$

因此,式(5)可改写为:

$$k_\mathrm{R} = 0.434\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} C_{\mathrm{ext},a}\overline{N}(D)\,\mathrm{d}D \tag{7}$$

对于降雨强度 R 而言,其与雨滴谱分布的关系为:

$$R = 6\pi 10^{-4}\int_0^\infty D^3 v(D)N(D)\,\mathrm{d}D \tag{8}$$

式中:$v(D)$为等效直径为 D 的雨滴终端下落速度。

1.2 雨量场构建方法

随机混合算法是 Hu 等[25]提出的渐进变形方法的扩展,任何正态分布的空间随机场 $Z(x)$ 都可以表示为 n 个独立的随机场 $Y_i(x)$ $(i=1,2,\cdots,n)$ 的线性组合。同时,Bárdossy 等[26]的研究表明,雨量计观测值可用于表示雨量场 $R(x)$ 的降雨频率,先根据 x 处雨量计的观测值估算边缘分布 $F(\cdot)$,然后将 $R(x)$ 转换为正态分布:

$$Z(x)=\varphi^{-1}(F(R(x))) \tag{9}$$

式中:φ^{-1} 为逆标准正态分布。

计算满足降雨场 $Z(x)$ 的权重 w_i,则 $Z(x)$ 为:

$$Z(x)=\sum_{i=1}^{n} w_i Y_i(x) \tag{10}$$

其中

$$\sum_{i=1}^{n} w_i^2 \leqslant 1$$

式中:w_i 为 $Y_i(x)$ 权重。

若 $\sum_{i=1}^{n} w_i^2 > 1$,则增加无条件随机场 $Y_i(x)$ 的数量 n,直到 $\sum_{i=1}^{n} w_i^2 \leqslant 1$,从而得到修正后的雨量场:

$$Z'(x)=\sum_{i=1}^{n} w_i' Y_i(x) \tag{11}$$

式中:$Z'(x)$为修正后的 $Z(x)$;w_i' 为修正后的权重。

为了保持 $Z(x)$ 的方差,必须添加第 2 个分量 $Z''(x)$:

$$Z''(x)=p(\boldsymbol{w}',\boldsymbol{\lambda})\sum_{m=1}^{J-n}\lambda_m U_m(x) \qquad (m=1,2,\cdots,J-n) \tag{12}$$

其中

$$U_m(x_{k'})=0$$

式中:$U_m(x)$为附加场,每个 $U_m(x)$ 被构造为 $J(J>n)$ 个无条件的随机场;$x_{k'}$为雨量站 k'的位置;$\boldsymbol{\lambda}_m$ 为 $U_m(x)$ 的权重;$p(\boldsymbol{w}',\boldsymbol{\lambda})$为 $\boldsymbol{w}'=(w_1',w_2',\cdots w_n')$和 $\boldsymbol{\lambda}=(\lambda_1,\lambda_2,\cdots\lambda_{J-n})$映射到 $R(x)$的函数。

为确定 $\boldsymbol{\lambda}_m$,必须将 $R(x)$与 $Z(x)$的对应值进行比较,因此对于每条微波链路(microwave links,MWL)的路径 $L_\xi(\xi=1,2,\cdots,c)$,其中 c 为路径条数,则 $Z(x)$的路径平均降雨频率为:

$$R(x)=\int_{L_\xi}^{F^{-1}}\varphi(Z(x))\,\mathrm{d}x \tag{13}$$

式中:φ 为正态分布;F^{-1} 为逆边缘分布。

利用 MWL 观测值 R_ξ 与 $Z(x)$中对应的路径平均降雨频率(式(13))之间的对比,建立非线性条件(式(14)),使得 R_ξ 与式(13)之间的差异最小化。

$$f_{\mathrm{obj}}=\sum_{\xi=1}^{c}\left(\int_{L_\xi}^{F^{-1}}\varphi(Z(x))\,\mathrm{d}x-\overline{R_\xi}\right)^2<\varepsilon \tag{14}$$

式中:f_{obj} 为目标函数;ε 为定义的阈值;$\overline{R}_\xi$ 为 R_ξ 的平均值。

可通过不断增大 J 找到一组使得 $f_{\mathrm{obj}}<\varepsilon$ 的权重$(\lambda_1,\lambda_2,\cdots\lambda_{J-n})$。最终得到满足式(10),并与 MWL 观测结果一致的场:

$$Z(x)=\sum_{i=1}^{n} w_i' Y_i(x)+p(\boldsymbol{w}',\boldsymbol{\lambda})\sum_{m=1}^{J-n}\lambda_m U_m(x) \tag{15}$$

根据式(16)逆变换场 $Z(x)$,可得到基于给定雨量站和微波链路观测的重构雨量场的一种可能解。需要了解的是,选择不同的随机场 $Y_i(x)$和 $U_m(x)$,计算出的 $Z(x)$会有所不同,继而得到不同的 $R(x)$,因此使用随机混合算法得到的是与给定观测结果一致的解集。

$$R(x)=F^{-1}(\varphi(Z(x))) \tag{16}$$

1.3 图像平滑处理方法

图像平滑也称为图像去噪,是为了抑制图像噪声改善图像质量进行的处理。本文选择均值滤波法和中值滤波法进行图像处理,并分别使用不同大小的窗口进行效果比较。均值滤波法是将原有的像素灰度值用

邻域内各像素的灰度平均值代替,实现图像的平滑。中值滤波法用一个滑动窗口,对窗口内的像素灰度排序,用中值代替窗口中心像素的灰度值,是一种非线性的图像平滑法[27-28]。

2　雨量场构建实验

为涵盖不同空间范围的降水分布特征,本文选取了 2015 年 8 月 23 日 12:22、13:22 和 14:22 这 3 个时次的小时降水量数据。在随机混合算法选择上,使用基于 Hörning 等[29]提出的 RMWS 算法的开源 python 包 RMWSPy 进行计算。RMWS 算法利用了随机混合的属性,允许将标准优化替换为一维优化序列,使得在这个一维空间中,目标函数的单个分量可以使用单位圆上的简单惠特克-香农插值近似,可降低计算成本,并确保了目标函数的单调收敛。

2.1　研究区概况与数据来源

本文使用的数据是由 GCS 超级计算机 JUQUEEN[30]使用 COSMO 模型 v4.21[31],结合名称为通用陆面模式(the Community Land Model,CLM)的地面模型[32]在水平分辨率为 1.1 km 的约束条件下对德国南部区域进行区域气候模拟所得到的降水数值模拟场景数据。该数据覆盖区域地形条件复杂,降雨分布符合复杂分布研究需求,面积达 57 850 km^2,地理范围为 47.80 °N~ 49.63°N、7.95°E~10.37°E,包含德国南部的内卡河流域,流域面积约为 14 000 km^2。

基于德国气象局(Deutscher Wetterdienst,DWD)下属气候数据中心(Climate Data Center,CDC)提供的雨量计和微波链路数据,在研究区域内生成了 71 个数据点和 100 条微波链路(图 1),分别模拟雨量计和微波链路观测的小时降水量。虚拟雨量计与微波链路均布设于 2007—2015 年间实际设备所在的地理位置。降水数值模拟场景数据集作为本研究的参考“真值”,可在严格可控的边界条件与初始条件下生成降水场。基于该数据集,能够通过重复同一场景试验,分别对比分析雨量站独立构建的雨量场与雨量站-微波链路融合构建的雨量场。

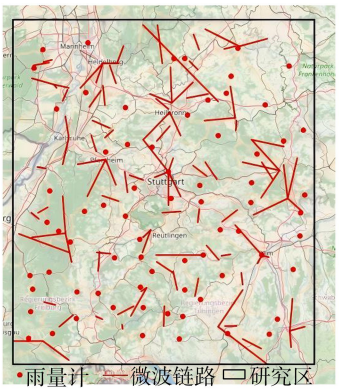


图 1　研究区概况

Fig. 1　Overview of the study area

2.2　参数设置

使用以下参数初始化 RMWS 算法:①domainsize = (*y*size, *x*size)设置网格大小,根据虚拟数据格式将其设置为(165, 183);②covmod = cmod 定义分步骤拟合的协方差模型;③*n*Fields = *n*fields 设置想要模拟的条件场的数量,即可能重构场的数量;④cp = cp 定义模拟网格上的相等式约束坐标;⑤cv = cv 定义对应于 cp 的等式约束值;⑥le_cp = lecp 定义模拟网格上小于或等式约束的坐标;⑦le_cv = lecv 定义与 le_cp 对应的小于或等式的约束值(在本例中是记录零降雨的观测值);⑧optmethod = ‘circleopt’ 定义 RMWSCondSim 以倒置模式运行;⑨minObj = 0.4 定义终止阈值,即,如果目标函数达到该值,则反演终止;⑩maxiter = 300 定义最大迭代次数,如果完成最大迭代次数后没有达到 minObj,反演将终止。

2.3　基于雨量站数据的雨量场构建

将边缘分布与雨量站数据进行拟合,并利用拟合的边缘分布函数和逆标准正态分布将线性观测值转换为标准正态值,再将空间协方差函数拟合到线性观测,计算出满足雨量计观测值场 $Z(x)$ 中的权重 w_i,继而得到重构的雨量场。由以上步骤计算得出的是一个解集,也就是多个可能的重构场,可以通过设置参数获得希望的解个数。

2.4　基于雨量站-微波数据融合的雨量场构建

微波链路观测代表了链路路径上的非线性积分,可以视为随机混合算法计算中的非线性积分约束。由图 2 可知,各雨量场的降雨分布基本一致,但是降水量呈现效果的清晰度不同,尤其是单一重构场噪声很大,随着取均值的可能重构场数量增多,图像逐渐清晰化,到了 20 个重构场均值,已呈现出较为良好的效果,但是一些极端降雨情况被模糊掉,如实况雨量场为晴以及降雨较大的区域。

由图 3 可知,与 12:22 相比,14:22 的降雨范围更广,各雨量场的降雨分布基本一致。降水量的呈现效果较 12:22 更清晰。单一重构场噪声仍然很大,随着取均值可能重构场数量增多,图像逐渐清晰化,到了

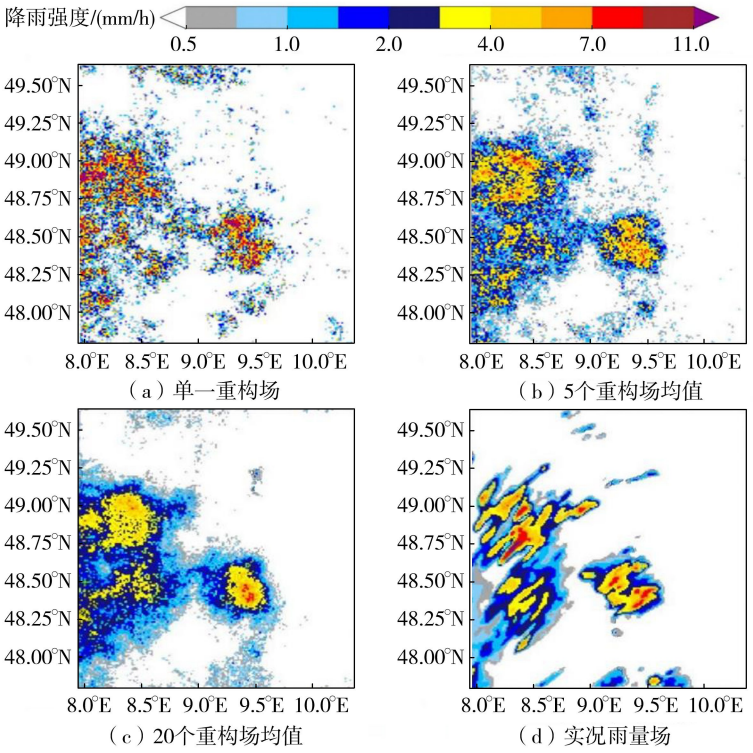


图2 12:22不同重构场对比

Fig. 2 Comparison of different reconstructed fields at 12:22

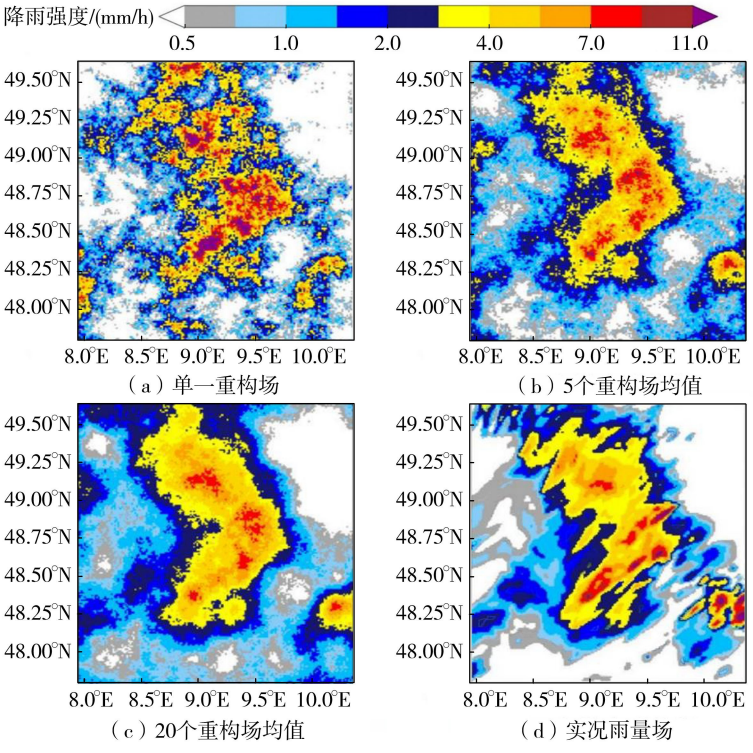


图3 14:22不同重构场对比

Fig. 3 Comparison of different reconstructed fields at 14:22

20个重构场均值,已呈现出较为良好的效果,与12:22相同的是,局部降雨特征被平滑,且随着取均值的数量增大平滑的效果更加严重。

由图2、图3可知,20个重构场均值处理比5个重构场均值处理去噪的效果更有效,重构场数量越多,平滑的效果越明显,但同时局部特征也会被平滑掉。因此,选择合适的重构场数量进行均值处理尤为关键,在

后续的处理中选择 20 个重构场计算出的平均值作为随机混合算法插值的结果。

2.5　数据平滑处理

由图 2(c)、图 3(c)可知,20 个重构场均值仍然有较大噪声,但继续增大均值处理的重构场数量,则可能过度平滑降雨极值,掩盖极端降水信息。为此,本文采用均值滤波和中值滤波对插值场进行局部平滑处理,以期在有效去噪的同时,尽可能降低对极端值的过度平滑风险。由图 4 和图 5 可知,均值滤波去噪效果良好,但随着滑动窗口尺寸变大,局部特征被模糊的风险也相应增加。

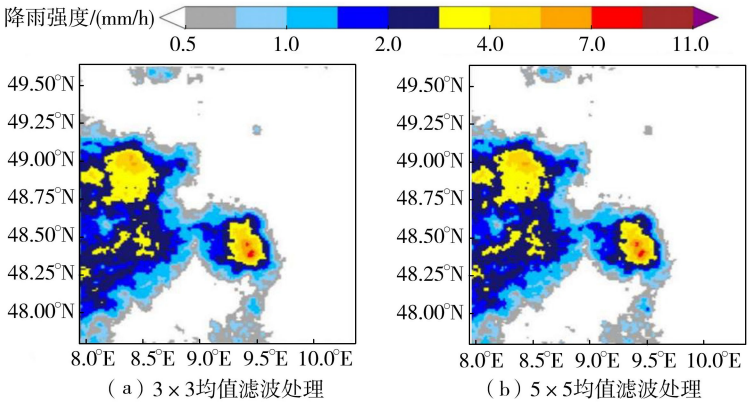


图 4　12:22 均值滤波处理对比

Fig. 4　Comparison of mean filter processing at 12:22

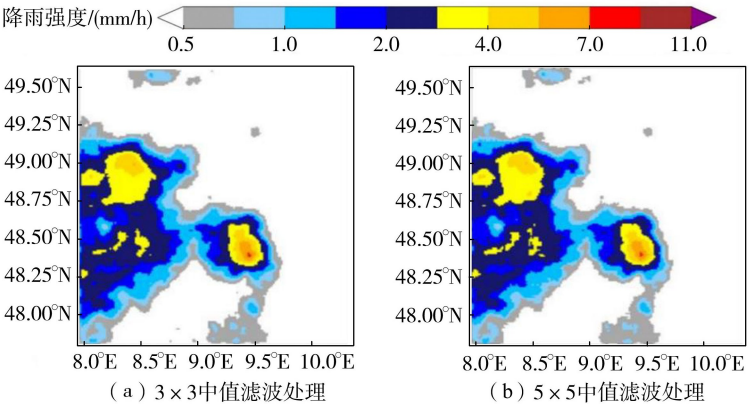


图 5　12:22 中值滤波处理对比

Fig. 5　Comparison of median filter processing at 12:22

3　结果评价与分析

3.1　基于雨量站-微波数据融合的雨量场构建评价

选取了 2015 年 8 月 23 日 12:22、14:22 连续降雨的起止 1 h 两个时刻的小时降雨数据(virtual rainfall, VR),设定阈值为 0.1 mm,对基于随机混合算法的重构雨量场(simulated rainfall field,Sim)进行等级变量统计检验(命中率、漏报率、空报率、TS 评分、BS 评分),以及连续变量类检验(平均误差、平均绝对误差、均方根误差、相关系数(R)),并对基于雨量站数据(rain gauge,RG)的重构雨量场与基于微波链路融合(RG+MWL)的重构雨量场的精度进行对比分析,结果见表 1。

由表 1 可知,2015 年 8 月 23 日 12:22,基于 RG 数据的单一重构雨量场的平均误差较小,均方根误差较大,相关性系数较低(<0.5),但命中率较高(>0.7),漏报空报较低,TS 评分大于 0.5,BS 评分接近 1 且大于 1,表明重构雨量场在降雨范围上高估了。相比基于 RG 的单一重构雨量场,基于 RG+MWL 的重构雨量场各项指标都更为理想,更具优势。2015 年 8 月 23 日 14:22,基于 RG 数据的单一重构雨量场的误差较大,命中率很高(>0.95),漏报空报趋于 0,TS 评分大于 0.85,BS 评分更加趋近 1 且大于 1,表明重构降雨场在降雨范围上略微高估倾向。相比基于 RG 的单一重构雨量场,基于 RG+MWL 的重构雨量场各项指标都更为理想,

表1 基于随机混合算法的重构雨量场精度

Table 1 Accuracy of reconstructed rainfall field based on RM algorithm

时刻	重构数据	VR/mm	Sim/mm	平均误差/mm	平均绝对误差/mm	均方根误差/mm	相关系数
2015-08-23 T12:22	RG	0.653	0.748	0.095	0.834	2.01	0.382
	RG+MWL	0.653	0.712	0.060	0.798	1.86	0.469
2015-08-23 T14:22	RG	1.773	2.116	0.343	1.219	2.01	0.576
	RG+MWL	0.653	2.069	0.296	1.070	1.742	0.657
时刻	重构数据	命中率	漏报率	空报率	TS评分	BS评分	
2015-08-23 T12:22	RG	0.737	0.263	0.340	0.534	1.116	
	RG+MWL	0.776	0.224	0.308	0.577	1.122	
2015-08-23 T14:22	RG	0.951	0.049	0.071	0.886	1.024	
	RG+MWL	0.970	0.030	0.072	0.902	1.046	

相关系数大于0.65,命中率达0.970,更具优势。

综上,基于随机混合算法的重构雨量场,在连续变量类检验中,降雨起止两个时刻的误差都相对较小,相关系数由低到高,在12:22甚至表现为弱相关,其原因可能是降雨区域范围太小,在雨区的雨量站和微波链路相应地也小(图6),利用随机混合算法时约束条件过少,使得雨量场重构的能力无法呈现,随着降雨区域范围的变大相关系数也逐渐增大。在等级变量统计检验中,基于随机混合算法的重构雨量场有着较高的命中率与较低的漏报率和空报率,体现出较为良好的精度效果,而降雨区域范围越大效果越好,尤其在14:22,命中率达到0.9以上,在TS评分上也有着相似的结论;在两个时刻中,重构雨量场的BS评分都较为理想,接近于1且都大于1,说明整体上呈现高估的情况。因此,当雨区内雨量站和微波链路足够多时,利用随机混合算法重构的雨量场具有较为良好的精度,体现出雨量场重构的能力和可靠性。此外,相比基于RG的单一重构雨量场,基于RG+MWL的重构雨量场的各项指标都更为理想。

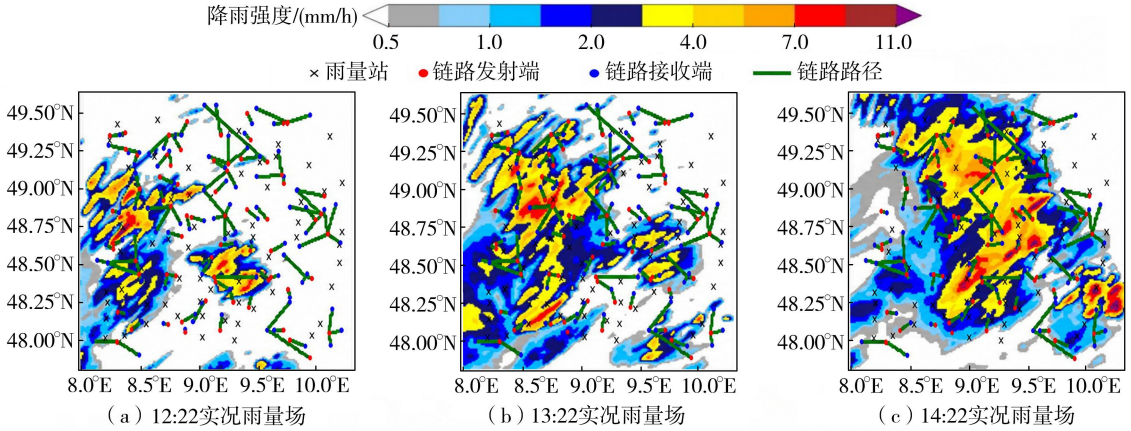


图6 实况雨量场与雨量站分布

Fig. 6 Observed rainfall field and distribution of rain gauge stations

因为基于RG+MWL的重构雨量场各项指标都更为理想,因此继续对融合微波数据的单一可能重构场、5个重构场均值、20个重构场均值的精度进行对比分析,结果见表2。由表2可知,2015年8月23日12:22,随着取均值重构场数量的增多,平均误差增大,平均绝对误差和均方根误差逐渐减小,相关性系数升高,20个重构场均值时达到0.725,命中率升高,在20个重构场均值时达到0.977,漏报逐渐趋向0,TS评分趋于稳定,BS评分大于1且逐渐增加,表明重构降雨场在降雨范围上高估现象加剧。2015年8月23日14:22,随着取均值重构场数量的增多,各项误差逐渐减小,相关性系数升高,在20个重构场均值时达到0.847,命中率升高,在20个重构场均值时接近1,漏报空报逐渐趋向0,TS评分趋于稳定,BS评分大于1,略微增加,表明重构雨量场在降雨范围上高估现象稍有加剧。基于RG+MWL的两个时刻的重构雨量场,在连续变量类检验中,随着取均值的重构场数量增多,误差指标减小,相关系数明显增大;在等级变量统计检验中,随着重构场的数量增多,空报率有小幅度提高,命中率接近1,相应的漏报率则接近于0,在TS评分上没有明显的变化,BS评分则随着重构场的数量增多而变大,说明整体上降雨高估的情况愈加明显。

表 2　基于微波融合数据的均值雨量场精度

Table 2　Accuracy of mean rainfall field based on microwave fusion data

时刻	雨量场重构方法	VR/mm	Sim/mm	平均误差/mm	平均绝对误差/mm	均方根误差/mm	相关系数
2015-08-23 T12：22	单一重构场	0.653	0.712	0.060	0.798	1.860	0.469
	5 个重构场均值	0.653	0.819	0.167	0.554	1.080	0.676
	20 个重构场均值	0.653	0.784	0.131	0.504	0.944	0.725
2015-08-23 T14:22	单一重构场	1.773	2.069	0.296	1.070	1.742	0.657
	5 个重构场均值	1.773	2.029	0.256	0.770	1.213	0.804
	20 个重构场均值	1.773	2.024	0.250	0.684	1.062	0.847

时刻	雨量场重构方法	命中率	漏报率	空报率	TS 评分	BS 评分
2015-08-23 T12:22	单一重构场	0.776	0.224	0.308	0.577	1.122
	5 个重构场均值	0.944	0.056	0.410	0.570	1.599
	20 个重构场均值	0.977	0.023	0.461	0.532	1.813
2015-08-23 T14:22	单一重构场	0.970	0.030	0.072	0.902	1.046
	5 个重构场均值	0.999	0.001	0.099	0.900	1.108
	20 个重构场均值	0.999	0.001	0.097	0.903	1.106

基于 RG+MWL 的重构雨量场,随着重构场数量增多,多数指标都呈现出较好的结果,但也表现出更加严重的整体高估现象。各项指标的对比中,整体上 20 个重构场取均值的效果为佳。因此,将 20 场取均值的基于 RG+MWL 的重构降雨场为随机混合算法重构雨量场的结果。

将基于 RG 的重构雨量场(20 场取均值)与基于 RG+MWL 的重构雨量场(20 场取均值)数据分别与相应实况数据进行拟合,结果如图 7 所示。各时刻基于 RG+MWL 的重构雨量场结果的决定系数都比基于 RG 的高,更加接近 1,因此基于 RG+MWL 的重构雨量场更符合实际。

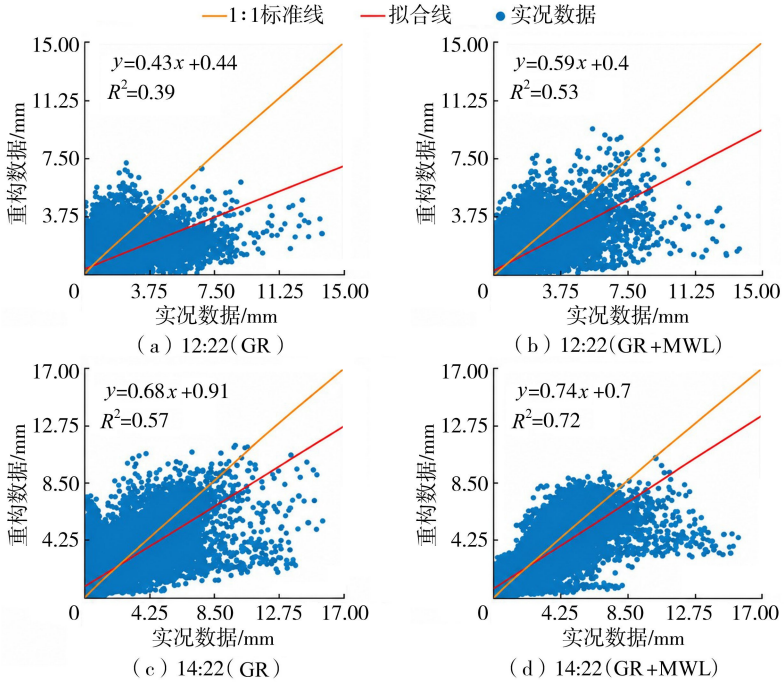


图 7　线性拟合

Fig. 7　Linear fitting

3.2　重构雨量场平滑处理评价

由表 3 可知,12:22 时刻和 14:22 时刻,对 20 个重构场均值的结果分别进行均值滤波与中值滤波处理,误差指标有着不同程度地减小,同时相关系数也有着不同程度的增大,等级变量指标没有太大的变化,趋于稳定。12:22 时刻 5×5 窗口均值滤波法均方根误差最小,相关性系数最高为 0.754,命中率最高为 0.988,漏报最低。14:22 时刻,5×5 窗口均值滤波法误差指标最小,相关性系数最高为 0.855。由于 20 个重构场均值在等级变量统计检验中表现出极为良好的精度效果,已然没有太大的上升空间,因此在均值滤波和中值滤波

中指标已趋于稳定,尤其是空报率和 BS 评分并没有进一步增加;而在连续变量类检验中,误差均有小幅度降低,相关系数则小幅度提高,而在两种滤波方法的两个滑动窗口大小中,5×5 的均值滤波法在整体上表现出优势。因此,本文以经过 5×5 的均值滤波法平滑处理后的 20 个重构场取均值的基于 RG+MWL 的重构降雨场作为最终的重构雨量场。

表 3 数据平滑处理雨量场精度分析

Table 3 Accuracy analysis of rainfall field for data smoothing

雨量场	VR/mm		Sim/mm		平均误差/mm		平均绝对误差/mm		均方根误差/mm		相关系数	
重构方法	12:22	14:22	12:22	14:22	12:22	14:22	12:22	14:22	12:22	14:22	12:22	14:22
20 个重构场均值	0.653	1.773	0.784	2.024	0.131	0.250	0.504	0.684	0.944	1.062	0.725	0.847
均值滤波(3×3)	0.653	1.773	0.779	2.012	0.126	0.239	0.487	0.664	0.905	1.040	0.747	0.853
均值滤波(5×5)	0.653	1.773	0.775	2.003	0.123	0.230	0.483	0.655	0.894	1.031	0.754	0.855
中值滤波(3×3)	0.653	1.773	0.764	2.015	0.111	0.241	0.481	0.670	0.909	1.044	0.744	0.852
中值滤波(5×5)	0.653	1.773	0.755	2.006	0.103	0.233	0.472	0.662	0.895	1.036	0.752	0.854

雨量场	命中率		漏报率		空报率		TS 评分		BS 评分	
重构方法	12:22	14:22	12:22	14:22	12:22	14:22	12:22	14:22	12:22	14:22
20 个重构场均值	0.977	0.999	0.023	0.001	0.461	0.097	0.532	0.903	1.813	1.106
均值滤波(3×3)	0.986	0.999	0.014	0.001	0.470	0.097	0.526	0.903	1.860	1.107
均值滤波(5×5)	0.988	1.000	0.012	0	0.473	0.096	0.524	0.903	1.875	1.106
中值滤波(3×3)	0.982	0.999	0.018	0.001	0.457	0.096	0.537	0.903	1.811	1.106
中值滤波(5×5)	0.983	0.999	0.017	0.001	0.457	0.096	0.538	0.904	1.81	1.105

4 结 语

融合重构的空间分辨率与区域内观测密度呈显著正相关,当雨量站和微波链路数量达到一定阈值时,相关系数趋于稳定;相较于单源重构,融合方案在误差指标上呈现显著降低,但随着可能场数量增加会引发系统性降雨范围高估;采用均值滤波可有效抑制高估效应,同时维持精度指标的优化平衡。本文算法在多源数据同化中具备显著优势,但其计算复杂度与随机场选择依赖性可能制约业务化应用,后续需结合并行计算与集合平均技术提升工程可行性。同时,本文研究尚有不足之处,例如使用的数据为合成虚拟数据,只能一定程度上反映真实降雨过程,且因为历史长时间降雨场次较少,没有选择多场不同强度的降雨进行研究,同时对降雨场范围高估现象成因缺乏深入分析。拟在后续研究中使用真实微波雨致衰减反演降雨数据,并通过对比试验进一步探究高估成因,提高降雨监测和预报的时空分辨率。

参考文献:

[1] 李英华,原立格. 信息化背景下 5G 通信技术对智慧水利建设的作用分析[J]. 水利水电科技进展,2022,42(6):132-133. (Li Yinghua, Yuan Lige. The role of 5G communication technology in the construction of smart water conservancy under the context of informationization[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(6): 132-133. (in Chinese))

[2] 杨肖丽,张佳乐,黄星怡,等. 气候变化和人类活动对长江流域极端径流的影响[J]. 水资源保护,2025,41(4):1-9. (Yang Xiaoli, Zhang Jiale, Huang Xingyi, et al. Impacts of climate change and human activities on extreme runoff in the Yangtze River Basin[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(4): 1-9. (in Chinese))

[3] 鞠琴,吴金雨,王兴平,等. 机器学习算法在降水和气温多模式集成中的应用[J]. 水资源保护,2024,40(3):106-115. (Ju Qin, Wu Jinyu, Wang Xingping, et al. Application of machine learning algorithms in multimodal integration of precipitation and temperature[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(3): 106-115. (in Chinese))

[4] 朱凯莉,赖成光,王兆礼,等. 城市化背景下长三角核心城市群汛期降水时空演变特征分析[J]. 水资源保护,2023,39(6):95-103. (Zhu Kaili, Lai Chengguang, Wang Zhaoli, et al. Temporal and spatial evolution characteristics analysis of flood season precipitation in core city group of the Yangtze River delta under background of urbanization[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(6): 95-103. (in Chinese))

[5] 唐国强,万玮,曾子悦,等. 全球降水测量(GPM)计划及其最新进展综述[J]. 遥感技术与应用,2015,30(4):607-615. (Tang Guoqiang, Wan Wei, Zeng Ziyue, et al. An overview of the global precipitation measurement (GPM) mission and it's latest development[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2015, 30(4): 607-615. (in Chinese))

[6] 陈浩然. 基于深度学习的气象降尺度及短临预报研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2023.
[7] 沈哲辉,韩静妍,桂敬聪,等. 长江流域再分析与卫星反演降水数据的适用性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(1):50-61. (Shen Zhehui, Han Jingyan, Gui Jingcong, et al. Analysis of the applicability of reanalysis and satellite-derived precipitation data in the Yangtze River Basin[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025,53(1):50-61. (in Chinese))
[8] 谈灿灿,张润润,邓志民,等. 基于暴雨空间自相关性的降水量插值方法比较[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(6):8-14. (Tan Cancan, Zhang Runrun, Deng Zhimin, et al. Comparison of precipitation interpolation methods considering spatial autocorrelation of rainstorm precipitation[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(6):8-14. (in Chinese))
[9] 胡文韬,余钟波,陈松峰,等. 长江上游卫星反演与再分析降水数据的适用性评估[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(3): 15-24. (Hu Wentao, Yu Zhongbo, Chen Songfeng, et al. Applicability evaluation of satellite and reanalysis precipitation products in upper Yangtze River Basin[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(3):15-24. (in Chinese))
[10] 张旭旻,陈颖冰,李永坤,等. 雨量数据缺失条件下基于实测流量的北京市“23·7”极端暴雨降水反演[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(6):38-44. (Zhang Xumin, Chen Yingbing, Li Yongkun, et al. Precipitation retrieval of the “23·7” extreme rainstorm in Beijing based on measured discharge under the deficiency of rainfall data[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(6):38-44. (in Chinese))
[11] 李新,陈馨蕾,周义斌,等. 黄淮海和江淮平原小时极端降水时空演变及归因分析[J]. 水资源保护,2025,41(5):285-295. (Li Xin, Chen Xinlei, Zhou Yibin, et al. Spatiotemporal evolution and attribution analysis of hourly extreme precipitation in the Huang-Huai-Hai Plain and Jiang-Huai Plain[J]. Water Resources Protection,2025,41(5):285-295. (in Chinese))
[12] 高清泉. 微波通讯链路测量降水[D]. 成都:成都信息工程大学,2018.
[13] 杨涛,沈玉芳,陈渝青,等. 基于指数雨胞雨衰模型的微波链路雨强反演方法[J]. 水资源保护,2024,40(5):11-17. (Yang Tao, Shen Yufang, Chen Yuqing, et al. A microwave link rain intensity inversion method based on exponential rain cell rain attenuation model[J]. Water Resources Protection,2024,40(5):11-17. (in Chinese))
[14] 陈渝青,郑鑫,宋莹,等. 短距离无线微波链路降雨反演模型研究[J]. 电波科学学报,2024,39(3):579-586. (Chen Yuqing, Zheng Xin, Song Ying, et al. Study on a rainfall intensity retrieval model for short links[J]. Chinese Journal of Radio Science,2024,39(3):579-586. (in Chinese))
[15] 宋泊明. 复杂气象条件下微波信号路径衰减估计与衰减场重构研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2020.
[16] Kramer S, Verworn H R, Redder A. Improvement of X-band radar rainfall estimates using a microwave link[J]. Atmospheric Research, 2005,77(1/2/3/4):278-299.
[17] Upton G J G, Holt A R, Cummings R J, et al. Microwave links: the future for urban rainfall measurement? [J]. Atmospheric Research,2005,77(1/2/3/4):300-312.
[18] Messer H, Zinevich A, Alpert P. Environmental monitoring by wireless communication networks[J]. Science,2006,312(5774): 713.
[19] Leijnse H, Uijlenhoet R, Stricker J N M. Hydrometeorological application of a microwave link: 1. Evaporation[J]. Water Resources Research,2007,43(4):W04416.
[20] Leijnse H. Hydrometeorological application of microwave links: measurement of evaporation and precipitation[D]. Wageningen: Wageningen University,2007.
[21] Leijnse H, Uijlenhoet R, Stricker J N M. Rainfall measurement using radio links from cellular communication networks[J]. Water Resources Research,2007,43(3):W03201.
[22] Minda H, Nakamura K. High temporal resolution path-average rain gauge with 50-GHz band microwave[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,2005,22(2):165-179.
[23] Goldshtein O, Messer H, Zinevich A. Rain rate estimation using measurements from commercial telecommunications links[J]. IEEE Transactions on Signal Processing,2009,57(4):1616-1625.
[24] Overeem A, Leijnse H, Uijlenhoet R. Measuring urban rainfall using microwave links from commercial cellular communication networks[J]. Water Resources Research,2011,47(12):W12505.
[25] Hu L Y, Blanc G, Noetinger B. Gradual deformation and iterative calibration of sequential stochastic simulations[J]. Mathematical Geology,2001,33(4):475-489.
[26] Bárdossy A, Hörning S. Random mixing: an approach to inverse modeling for groundwater flow and transport problems[J]. Transport in Porous Media,2016,114(2):241-259.

[27] 杨建华,李丽,张伟. 基于形态学的锯材表面缺陷图像处理方法研究[J]. 林业机械与木工设备,2012,40(9):18-20. (Yang Jianhua,Li Li,Zhang Wei. Research on processing methods for sawn timber surface defect images based on morphology[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment,2012,40(9):18-20. (in Chinese))

[28] 孙永生,刘大健,秦蒙. 多幅图像中值法在滤除噪声中的应用[J]. 电视技术,2012,36(23):15-17. (Sun Yongsheng,Liu Dajian,Qin Meng. Many images median method in application of noise filtering[J]. Video Engineering,2012,36(23):15-17. (in Chinese))

[29] Hörning S,Haese B. RMWSPy (v 1.1):a Python code for spatial simulation and inversion for environmental applications[J]. Environmental Modelling & Software,2021,138:104970.

[30] Stephan M,Docter J. JUQUEEN:IBM Blue Gene/Q® supercomputer system at the Jülich Supercomputing Centre[J]. Journal of Large-Scale Research Facilities,2015,1:A1.

[31] Baldauf M,Seifert A,Förstner J,et al. Operational convective-scale numerical weather prediction with the COSMO model:description and sensitivities[J]. Monthly Weather Review,2011,139(12):3887-3905.

[32] Lawrence P J,Chase T N. Representing a new MODIS consistent land surface in the Community Land Model (CLM 3.0)[J]. Journal of Geophysical Research:Biogeosciences,2007,112(G1):G01023.

(收稿日期:2025-05-28 编辑:刘晓艳)

(上接第17页)

[23] 许明家,孙龙,李爽,等. 基于图神经网络的地下水位动态模拟模型[J]. 水文,2025,45(1):30-36. (Xu Mingjia,Sun Long,Li Shuang,et al. Dynamic model of groundwater level based on graph neural networks[J]. Journal of China Hydrology,2025,45(1):30-36. (in Chinese))

[24] Pang Min,Du Erhu,Zheng Chunmiao. Contaminant transport modeling and source attribution with attention-based graph neural network[J]. Water Resources Research,2024,60(6):e2023WR035278.

[25] Wu Zonghan,Pan Shirui,Chen Fengwen,et al. A comprehensive survey on graph neural networks[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems,2021,32(1):4-24.

[26] Scarselli F,Gori M,Tsoi A C,et al. The graph neural network model[J]. IEEE Transactions on Neural Networks,2009,20(1):61-80.

[27] 李小根,刘泓辰,付景保,等. 基于CNN-Attention-LSTM模型的地下水水位预测[J]. 水资源保护,2025,41(4):228-235. (Li Xiaogen,Liu Hongchen,Fu Jingbao,et al. Groundwater level prediction based on CNN-Attention-LSTM model[J]. Water Resources Protection,2025,41(4):228-235. (in Chinese))

[28] 梅超,石虹远,李瑞栋,等. 基于数值试验的降雨径流过程对不透水面空间分布的响应分析[J]. 水资源保护,2024,40(1):86-92. (Mei Chao,Shi Hongyuan,Li Ruidong,et al. Response analysis of rainfall runoff process to spatial distribution of impervious area based on numerical experiments[J]. Water Resources Protection,2024,40(1):86-92. (in Chinese))

[29] 黄强,尚嘉楠,方伟,等. 基于可解释机器学习的黄河源区径流分期组合预报[J]. 人民黄河,2024,46(9):50-59. (Huang Qiang,Shang Jianan,Fang Wei,et al. Combined forecasting of streamflow in the source region of the yellow river based on interpretable machine learning[J]. Yellow River,2024,46(9):50-59. (in Chinese))

[30] 吴学文,瞿永钢,李玲. 基于复杂网络理论的河流网络建模与分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2014,42(2):177-182. (Wu Xuewen,Qu Yonggang,Li Ling. River network modeling and analysis based on complex network theory[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2014,42(2):177-182. (in Chinese))

[31] 李云良,张小琳,赵贵章,等. 鄱阳湖区地下水位动态及其与湖水侧向水力联系分析[J]. 长江流域资源与环境,2016,25(12):1894-1902. (Li Yunliang,Zhang Xiaolin,Zhao Guizhang,et al. Dynamics of groundwater level and laterally hydraulic connection between lake and groundwater in Poyang Lake Area[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2016,25(12):1894-1902. (in Chinese))

[32] 黄一凡,张翔,邓梁堃,等. 基于机器学习的汉江流域径流模拟与时滞变化分析[J]. 水资源保护,2024,40(6):173-180. (Huang Yifan,Zhang Xiang,Deng Liangkun,et al. Runoff simulation and time-lag change analysis in the Han River Basin based on machine learning[J]. Water Resources Protection,2024,40(6):173-180. (in Chinese))

(收稿日期:2025-04-25 编辑:刘晓艳)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.05.004

基于多源融合降水的 WRF-Hydro 模型在中小河流径流模拟的适用性评估

李振鑫[1],姚 成[1,2],杨丰源[3],侯爱中[4],孙元元[5],李京兵[6],龚俊超[1]

(1. 河海大学水文水资源学院; 2. 中国气象局水文气象重点开放实验室; 3. 河北省水文勘测研究中心;
4. 水利部信息中心(水文水资源监测预报中心); 5. 湖北长江中星科技有限公司; 6. 安徽省水文局)

摘要: 为了满足水文模型对高精度降水数据的需要,以湿润的屯溪流域与半湿润的紫荆关流域为研究区域,构建了基于外部漂移克里金法的多源降水融合算法,融合雨量站实测数据与 IMERG 卫星降水数据,生成高精度、高时空分辨率的融合降水数据,并以该融合降水数据驱动 WRF-Hydro 水文模型,对研究区域进行径流模拟,评估其在中小河流洪水预报中的适用性。结果表明:以雨量站实测数据为基准,卫星降水数据在紫荆关流域存在严重低估降水强度现象,融合降水数据的各评价指标优于原始 IMERG 卫星降水数据;融合降水数据驱动 WRF-Hydro 模型比 IMERG 卫星降水数据能更好地模拟洪水过程,且模型在湿润流域的适用性强于半湿润流域。

关键词:多源融合降水;卫星降水;WRF-Hydro 模型;中小河流;径流模拟;紫荆关流域;屯溪流域
中图分类号:P338 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-1980(2026)05-0029-10

Applicability evaluation of WRF-Hydro model based on multi-source merged precipitation for runoff simulation in small and medium-sized rivers

Li Zhenxin[1], **Yao Cheng**[1,2], **Yang Fengyuan**[3], **Hou Aizhong**[4], **Sun Yuanyuan**[5], **Li Jingbing**[6], **Gong Junchao**[1]

(1. *College of Hydrology and Water Resources, Hohai University*;
2. *Key Laboratory of Hydro-Meteorology China Meteorological Administration*;
3. *Hydrological Survey and Research Center of Hebei Province*;
4. *Information Center, Ministry of Water Resources (Hydrology Monitor and Forecast Center)*;
5. *Hubei Yangtze River Zhongxing Technology Co., Ltd.*; 6. *Anhui Provincial Bureau of Hydrology*)

Abstract: To meet the needs of hydrological models for high-precision precipitation data, with the humid Tunxi Basin and the semi-humid Zijingguan Basin as the study areas, a multi-source precipitation merging algorithm based on external drift kriging was constructed to merge the measured precipitation data at stations and the IMERG satellite precipitation data, generating merged precipitation data with high precision and high spatiotemporal resolution. The WRF-Hydro hydrological model was driven by the merged precipitation data to conduct runoff simulations in the study areas, and its applicability in flood forecasting for small and medium-sized rivers was evaluated. The results show that taking the measured precipitation data at stations as the benchmark, the satellite precipitation data exhibits a serious underestimation of precipitation intensity in the Zijingguan Basin, and the evaluation indicators of the merged precipitation data are better than those of the original IMERG satellite precipitation data. Furthermore, the WRF-Hydro model driven by the merged precipitation data can better simulate the flood process than that driven by the IMERG satellite precipitation data, and the model shows stronger applicability in the humid basin than in the semi-humid basin.

Key words: multi-source merged precipitation; satellite precipitation; WRF-Hydro model; small and medium-sized river; runoff simulation; the Zijingguan Basin; the Tunxi Basin

随着气候变暖加剧,局地极端天气事件频发,中小河流洪水灾害已成为我国洪灾的主要类型,其预报工作亟待重点攻关[1]。中小河流下垫面空间异质性强、产汇流时间短,其独特的水文响应特征使得洪水预报难度大,精度往往难以满足实际需求[2]。水文模型是进行洪水预报的重要工具,很大程度上决定了洪水预

基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFC3211400);中央高校基本科研业务费专项资金项目(B240203007);水利部重大科技项目(SKS-2022136);河北省省级水利科技计划项目(2025-18)

作者简介:李振鑫(2001—),男,硕士研究生,主要从事水文预报研究。E-mail:lzx190322@163.com

通信作者:姚成(1982—),男,教授,博士,主要从事水文模型与水文预报研究。E-mail:yaocheng@hhu.edu.cn

报精度,分布式水文模型能够考虑水文参数过程和流域下垫面的空间异质性,适用于中小河流洪水预报[3]。由美国国家大气研究中心(NCAR)研发的 WRF-Hydro 模型,是新一代分布式水文模型,径流模拟精度较高,在中小河流域预报中具有潜在优势[4]。

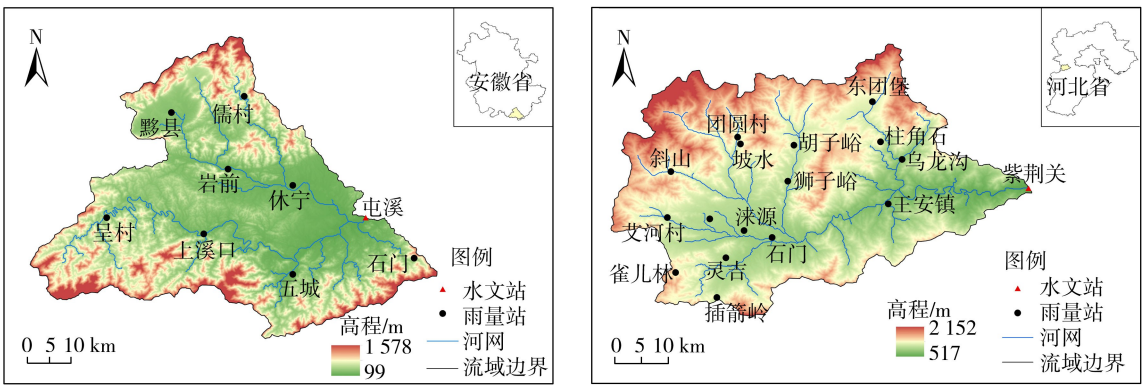
降水是水文模型的最重要输入变量,其精度与时效性间接决定了径流模拟结果的精度与时效性[5]。获取降水数据的主要途径包括雨量站观测、气象雷达反演和卫星遥感反演[6]。雨量站实测数据精度高,但空间分布稀疏且不均匀[7];气象雷达与卫星遥感反演数据时空连续性强,但误差较大[8-9]。降水融合技术通过多源协同,整合不同来源降水数据的优势,可生成对真实地表降水场更为准确、空间连续的估计[10],如随机森林法[11]、外部漂移克里金(Kriging with external drift,KED)法[12]、地理加权回归法[13]等,其中 KED 法通过严谨的空间相关性建模,充分利用了多源数据的空间分布特征,可显著提升降水估计的精度与可靠性[14]。Jewell 等[15]采用多种插值方案融合雷达降水与雨量站实测降水,发现 KED 法在所有测试方案中精度最高、鲁棒性最强。因此,降水融合技术被广泛应用于构建高精度降水融合产品,以驱动水文模型,提升径流模拟精度。闫鑫等[16]采用随机森林降尺度与协同克里金融合方法,融合 GPM 卫星降水数据与雨量站实测数据并驱动水文模型,发现该融合产品精度显著提升,进一步提升了水文模型的径流模拟效果。晁丽君等[17]将 CMORPH 卫星降水数据与雨量站实测数据融合,并驱动 WRF-Hydro 模型对子午河流域进行径流模拟,发现融合降水在中小河流洪水模拟中明显优于原始卫星数据。但现有研究大多针对特定区域进行多源融合降水评估,由于卫星、雷达反演降水数据在不同气候区误差特征不同,融合降水数据在不同气候类型的中小河流的径流模拟中的适用性亟待验证和评估。

本文选取屯溪流域与紫荆关流域为研究区域,以 IMERG(Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM)卫星降水数据与雨量站观测数据为数据源,采用 KED 法生成多源融合降水,评估基于多源融合降水数据的 WRF-Hydro 模型在湿润流域与半湿润流域的中小河流径流模拟效果,以期为数据融合技术与 WRF-Hydro 模型在中小河流洪水预报中的应用提供科学依据与参考建议。

1 研究区概况与数据

1.1 研究区概况

屯溪流域位于新安江上游,经纬度范围为 29.5°N~30.0°N、117.6°E~118.5°E,流域面积为 2 670 km^2。屯溪流域地形周高中低,呈西高东低走势,极易形成洪水,且河道纵比降大,洪水陡涨陡落。屯溪流域属于北亚热带湿润性季风气候,年平均气温为 15~17℃,多年平均降水量约为 1 600 mm,是典型的湿润中小流域。紫荆关流域位于大清河流域北支拒马河上游,经纬度范围为 39.2°N~39.7°N、114.5°E~115.2°E,流域面积为 1 760 km^2,主河道长 81.5 km,河道纵坡 5.5‰,多山区,洪水主要产自汛期暴雨,暴涨暴落,断面冲淤变化较大,水位流量关系不稳定。紫荆关流域属于中温带半湿润性季风气候,年平均气温约为 13.8℃,多年平均降水量约 682 mm,是半湿润半干旱的中小流域。研究区域内雨量站和水文站分布如图 1 所示。



(a)屯溪流域 (b)紫荆关流域

图 1 研究区域概况

Fig. 1 Overview of study areas

1.2　研究数据

IMERG 数据是全球降水测量计划 GPM 的最新一代多卫星集成降水数据产品,现已更新至 V07B 版本[18-19]。IMERG 数据产品空间分辨率为 0.1°,最小时间分辨率为 0.5 h,空间覆盖全球。根据数据校准处理流程与发布时间分类,IMERG 数据可分为近实时产品 IMERG-Early、IMERG-Late 以及后处理产品 IMERG-Final。IMERG-Early 在观测后 4 h 发布,IMERG-Late 在观测后 14 h 发布,两者都是未经任何地面数据校正的纯卫星近实时降水产品;IMERG-Final 在观测后 4 月发布,经月尺度地面观测数据校正,是卫星-雨量计融合降水产品[20]。通常来说,IMERG-Final 产品精度相对最优,IMERG-Late 产品次之,IMERG-Early 产品相对最差。综合考虑精度、时效性与研究内容,本文采用 IMERG-Late 产品作为卫星数据源。

WRF-Hydro 模型主要输入数据为地理静态数据与气象强迫数据。地理静态数据主要有地形数据、土地利用、土壤类型、植被类型、叶面积指数等,地形数据来源于基于航天飞机雷达的多尺度水文数据和地图(HydroSHEDS),由 WRF-Hydro ArcGIS Pre-processor 前处理工具处理生成,主要包括高程、河网、流向等数据;其余地理静态数据来源于 WRF(weather research and forecasting model)模式前处理系统 WPS(WRF preprocessing system)的地理静态数据库,由 WPS 前处理系统生成。气象强迫数据主要包括入射长短波辐射、比湿、气温、地表气压、近地表风速、降水,其中降水数据采用 IMERG 卫星降水与雨量站实测降水融合生成的融合降水数据,时空分辨率为 1 h、1 km;其余气象强迫数据由 GLDAS(global land data assimilation system)数据在空间上双线性插值、时间上线性插值得到,最终形成时空分辨率为 1 h、1 km 的气象强迫数据。研究涉及的观测资料为屯溪流域与紫荆关流域的实测降雨与出口断面的实测流量,选自水文年鉴。

2　研究方法

2.1　WRF-Hydro 模型

WRF-Hydro 模型是由美国国家大气研究中心研发,最初是用以改进 WRF 模型的陆地水文过程描述,促进陆地水文模式与大气模式的耦合[21]。随着模型发展,WRF-Hydro 模型已经成为具有物理基础、高时空分辨率、可以与大气模式耦合或离线运行的分布式水文模型[22]。WRF-Hydro 模型主要包括陆面模式和汇流模块,汇流模块又分壤中流模块、坡面流模块、地下水模块、河道水库模块[23-24]。WRF-Hydro 模型首先通过陆面模式计算能量(感热通量、潜热通量、净辐射)与水量(冠层截留、下渗、超渗)的垂直通量和土壤温湿度,将计算结果降尺度至汇流模块,汇流模块先计算侧向壤中流,再计算地表径流、地下径流,得到汇流网格的地表水头、地下水头与土壤湿度,将结果返回陆地表面模型进行下一时刻的计算[25]。WRF-Hydro 模型的物理过程有多种方案配置,本文的陆面模式为 Noah-MP(noah multi-parameterization)模式,河道汇流采用扩散波,地下径流采用概念水箱模型。模型的陆面模式网格分辨率设置为 1 km,计算时间步长为 60 s,汇流模块网格分辨率设置为 250 m,计算时间步长为 15 s,模型输入输出时间步长为 1 h。

2.2　融合方法

KED 法是一种地质统计学方法,是广义克里金法的一种特例[26]。该方法将一个或多个空间连续的、与目标变量空间趋势高度相关的协变量作为背景信息对目标变量进行插值。在通过 KED 法进行卫星降水、降水融合时,卫星降水是唯一的协变量,站点实测降水为目标变量。

未知点 x_0 处的融合降水值计算如下:

$$P_{\mathrm{m},x_0}=\sum_{\alpha=1}^{n}w_\alpha P_{\mathrm{g},x_\alpha} \tag{1}$$

式中:P_{m,x_0} 为 x_0 处的融合降水值;w_α 为雨量站 α 对应的克里金权重;P_{g,x_α} 为雨量站 α 的实测降水值;x_α 为雨量站 α 的位置坐标;n 为雨量站数量。

由式(1)可知,KED 融合的关键是求取雨量站的克里金权重。克里金权重由 3 个约束确定:

$$\sum_{\alpha=1}^{n}w_\alpha=1 \tag{2}$$

$$\sum_{\alpha=1}^{n}w_\alpha P_{\mathrm{s},x_\alpha}=P_{\mathrm{s},x_0} \tag{3}$$

$$\sum_{\beta=1}^{n}w_\alpha\gamma_{x_\alpha-x_\beta}+\mu_1+\mu_2P_{\mathrm{s},x_\alpha}=\gamma_{x_\alpha-x_0}\qquad(\alpha=1,2,\cdots,n) \tag{4}$$

式中:P_{s,x_α} 为雨量站 α 位置的卫星降水值;P_{s,x_0} 为未知点 x_0 处的卫星降水值;$\gamma_{x_\alpha - x_\beta}$ 为雨量站 α 位置与雨量站 β 位置 x_β 之间的半方差;$\gamma_{x_\alpha - x_0}$ 为位置 x_α 与 x_0 之间的半方差;μ_1、μ_2 为拉格朗日乘子。

由于 IMERG 卫星数据时间分辨率为 0.5 h,空间分辨率为 0.1°,与模型气象强迫数据时空分辨率不匹配,因此先将 0.5 h 的 IMERG 原始卫星数据累加到 1 h,通过双线性插值降尺度至模型网格,得到时空分辨率为 1 h、1 km 的降尺度 IMERG 卫星数据。将降尺度卫星数据作为空间协变量,结合实测降水目标变量,应用 KED 法进行多源数据融合,最终生成时空分辨率为 1 h、1 km 的高精度融合降水产品。

2.3 模拟方案

鉴于 WRF-Hydro 模型所需数据量大、运行时间长,考虑计算成本问题,本文在屯溪流域选取 2016—2017 年作为率定期,2019—2020 年作为验证期,其中 2018 年部分雨量站资料缺失,故舍去;对于紫荆关流域,受限于雨洪资料较少,选取 2012—2023 年作为率定期,2024 年作为验证期。率定期与验证期划分大致按照 70%率定期、30%验证期划分,其中屯溪流域由于 2018 年部分资料缺失,以 2018 年为界划分率定期与验证期。选取的洪水事件涵盖多种量级(表 1),包括屯溪 2020 年洪水和紫荆关“23·7”大洪水,具有合理性与代表性。先基于各洪水场次内的站点实测降水数据,验证卫星降水数据与融合降水数据的精度;然后分别以卫星降水数据与融合降水数据驱动 WRF-Hydro 模型,对率定期各场次洪水进行径流模拟,并以水文站实测流量为基准,独立进行模型参数率定,获得与各降水数据相适应的优选参数集;最后分别以卫星降水数据与融合降水数据及相应的优选参数集驱动水文模型,对验证期各洪水场次进行径流模拟,以实测流量评估两种降水数据的径流模拟。

表 1 主要洪水事件统计

Table 1 Statistics of major flood events

流域	洪水事件	开始时间	结束时间	洪峰流量/(m^3/s)	洪水量级	次降水量/mm
屯溪	20160618	2016-06-18T09:00	2016-06-25T08:00	4 280	中	246.52
	20160702	2016-07-02T09:00	2016-07-10T08:00	1 980	小	152.08
	20160715	2016-07-15T09:00	2016-07-20T08:00	1 220	小	86.91
	20170611	2017-06-11T09:00	2017-06-17T08:00	1 730	小	150.00
	20170623	2017-06-23T09:00	2017-06-29T08:00	4 210	中	217.50
	20190618	2019-06-18T09:00	2019-06-26T08:00	2 960	小	217.37
	20190702	2019-07-02T09:00	2019-07-09T08:00	1 900	小	160.45
	20190712	2019-07-12T09:00	2019-07-16T08:00	4 270	中	181.60
	20200618	2020-06-18T09:00	2020-06-24T08:00	2 010	小	201.49
	20200702	2020-07-02T09:00	2020-07-11T08:00	5 040	中	523.42
紫荆关	20120720	2012-07-20T09:00	2012-07-26T08:00	2 130	特大	171.37
	20200717	2020-07-17T09:00	2020-07-23T08:00	161	小	79.57
	20230730	2023-07-30T09:00	2023-08-03T08:00	1 980	大	328.57
	20240825	2024-08-25T09:00	2024-08-30T08:00	330	中	102.20

2.4 评价指标

采用相关系数(R)、相对偏差(RB)、均方根误差(RMSE)3 个指标从不同维度定量评估融合降水数据的精度,其中 R 表征融合降水数据与站点实测降水数据的一致性,RB 表征融合降水数据相对于站点实测降水数据的总体偏差程度,RMSE 表征融合降水数据与站点实测降水数据之间的误差。

采用洪峰相对误差(E_P)、洪量相对误差(E_Q)、纳什效率系数(NSE)、峰现时间误差(ET)4 个指标评估径流模拟效果[27]。当某场洪水模拟结果的洪峰相对误差小于 20%时,则洪峰模拟合格;洪量相对误差小于 20%时,则洪量模拟合格;峰现时间误差小于 3 h 时,则峰现时间模拟合格[28]。当某场洪水模拟结果的 NSE 大于 0.50 时,则认为模拟洪水过程的拟合效果是可接受的;NSE 大于 0.70 时,则认为模拟洪水过程拟合效果较好。一次径流模拟的洪峰、洪量、峰现时间均模拟合格,则为合格模拟。合格模拟次数与模拟总次数之比的百分数为合格率(QR),表示多次模拟的总体精度水平。

3 结果与分析

3.1 融合结果分析

由表 2 可知,屯溪流域主要洪水事件的 IMERG 卫星降水数据的 R 范围为 0.51~0.78,平均为 0.63;RB

范围为-19.1%~30.9%,绝对值平均为 12.7%;RMSE 范围为 2.24~4.43 mm/h,平均为 2.93 mm/h。融合降水数据的 R 范围为 0.88~0.97,平均为 0.93;RB 范围为 0.0%~0.8%,绝对值平均为 0.35%;RMSE 范围为 0.94~2.50 mm/h,平均为 1.47 mm/h。10 场洪水中,融合降水数据的 R 与 RMSE 均优于卫星降水数据;除 20190702、20200702 两场洪水外,其余 8 场洪水融合降水 RB 绝对值均小于卫星降水。

表 2　主要洪水事件卫星降水与融合降水评价指标

Table 2　Evaluation indicators of satellite precipitation and merged precipitation for major flood events

流域	洪水事件	R		RB/%		RMSE/(mm/h)	
		卫星降水	融合降水	卫星降水	融合降水	卫星降水	融合降水
屯溪	20160618	0.66	0.92	16.1	0.5	3.37	1.82
	20160702	0.57	0.92	20.7	0.4	2.39	1.11
	20160715	0.60	0.93	3.5	0.1	2.27	1.03
	20170611	0.62	0.94	30.9	0.0	2.24	0.94
	20170623	0.78	0.97	25.4	0.2	3.00	1.24
	20190618	0.72	0.93	-5.9	0.8	2.96	1.61
	20190702	0.51	0.88	0.1	0.3	3.16	1.79
	20190712	0.77	0.94	-19.1	0.3	2.76	1.53
	20200618	0.55	0.94	-5.2	0.4	2.73	1.13
	20200702	0.56	0.89	0.3	0.5	4.43	2.50
紫荆关	20120720	0.72	0.92	-58.8	0.7	4.25	2.12
	20200717	0.76	0.93	-73.2	-0.3	2.18	0.94
	20230730	0.46	0.91	-8.8	0.4	5.85	2.51
	20240825	0.85	0.98	-2.4	0.0	1.29	0.42

紫荆关流域主要洪水事件的 IMERG 卫星降水数据 R 范围为 0.46~0.85,平均为 0.70;RB 范围为 -73.2%~-2.4%,绝对值平均为 35.8%;RMSE 范围为 1.29~5.85 mm/h,平均为 3.39 mm/h。融合降水数据的 R 范围为 0.91~0.98,平均为 0.94;RB 范围为-0.3%~0.7%,绝对值平均为 0.35%;RMSE 范围为 0.42~2.51 mm/h,平均为 1.50 mm/h。4 场洪水中,融合降水数据的 R、RB 与 RMSE 均显著优于卫星降水。

IMERG 卫星降水数据在屯溪流域和紫荆关流域与站点实测降水数据都有较良好的相关性;IMERG 卫星降水数据在屯溪流域系统偏差较小,RB 绝对平均值为 12.7%,但在紫荆关流域出现严重的系统偏差,RB 绝对平均值达 35.8%,其中 20120720 场次洪水期间 RB 高达-58.8%,20200717 场次洪水期间 RB 高达 -73.2%,严重低估降水强度。这一现象与现有研究结论相悖,现有研究普遍认为 IMERG 卫星降水数据倾向于高估实际降水,特别是在半湿润区[29]。这可能与流域地形有关,IMERG 卫星降水数据在平坦地形中倾向于高估降水量,在复杂地形条件下则表现出较大的随机性[30],而紫荆关流域较多复杂山地,故 IMERG 卫星降水数据在紫荆关流域出现较大负偏差。

通过 R、RB、RMSE 的对比可知,相较于 IMERG 卫星降水数据,融合降水数据在屯溪流域和紫荆关流域精度都有较大提升。

3.2　WRF-Hydro 模型关键参数率定

考虑到站点实测降水数据为点状数据,与 WRF-Hydro 模型所需的网格化气象强迫数据不匹配,网格化插值会引入较大误差、降低精度。后续仅分析卫星降水数据与融合降水数据在研究流域的径流模拟效果。从融合结果分析可知,卫星降水数据偏差较大,与融合降水数据的误差特征不一致。参照过往研究[31],本文对卫星降水数据与融合降水数据分别进行 WRF-Hydro 模型参数率定,并对比两者的径流模拟效果。

WRF-Hydro 模型参数众多,考虑参数物理意义与过往研究,选取主要敏感参数进行率定。根据李致家等[32]的研究,WRF-Hydro 模型主要敏感参数如下:土层厚度乘子、土层渗透系数、河道糙率乘子为高敏感参数;水箱模型指数为敏感参数,地表糙率乘子为中等敏感参数。考虑到计算成本,采用手动逐步逼近法对主要敏感参数进行率定[33]。按照敏感性顺序依次选取参数,在合理的取值范围内以适当步长修改参数并驱动模型,以 NSE 与洪峰相对误差为评价指标,确定参数最优值。分别将卫星降水数据与融合降水数据作为 WRF-Hydro 模型的输入数据,率定关键参数,结果见表 3。

3.3　径流模拟结果分析

屯溪流域主要洪水事件的模拟结果见表 4,图 2 为典型洪水的逐小时洪水流量模拟过程。从整体上看,

表3 WRF-Hydro模型主要参数及率定结果

Table 3 Main parameters and calibration results of WRF-Hydro model

流域	数据	土层厚度乘子	土层渗透系数	河道糙率乘子	水箱模型指数	地表糙率乘子
屯溪流域	卫星降水	1.0	2.0	2.0	5	0.9
	融合降水	1.0	2.0	1.6	4	0.8
紫荆关流域	卫星降水	0.5	3.0	1.8	4	0.9
	融合降水	0.5	1.2	1.2	5	0.9

表4 屯溪流域径流模拟评价指标

Table 4 Evaluation indicators for runoff simulation in Tunxi Basin

洪水事件	卫星降水				融合降水			
	E_P/%	E_Q/%	NSE	ET/h	E_P/%	E_Q/%	NSE	ET/h
20160618	15.3	33.1	0.86	3.0	3.7	6.9	0.98	−5.0
20160702	9.2	29.9	0.68	2.0	−9.1	9.4	0.96	1.0
20160715	9.4	23.0	0.65	5.0	25.8	24.0	0.83	2.0
20170611	58.2	24.6	0.34	2.0	0.5	−3.2	0.94	1.0
20170623	13.4	35.8	0.83	1.0	−4.3	−0.2	0.98	0.0
20190618	−0.4	45.5	0.66	−3.0	11.1	2.2	0.89	0.0
20190702	4.0	21.7	0.76	8.0	3.8	14.9	0.85	−3.0
20190712	−29.8	−17.6	0.85	1.0	−5.1	−1.0	0.98	0.0
20200618	−29.1	−0.6	0.19	42.0	3.6	13.5	0.88	−2.0
20200702	1.1	7.7	0.69	8.0	6.0	5.3	0.93	−1.0
场次平均	17.0	23.95	0.65	7.5	7.3	8.1	0.92	1.5
合格率	0%				80%			

注:E_P、E_Q、ET的场次平均为绝对值的平均,下同。

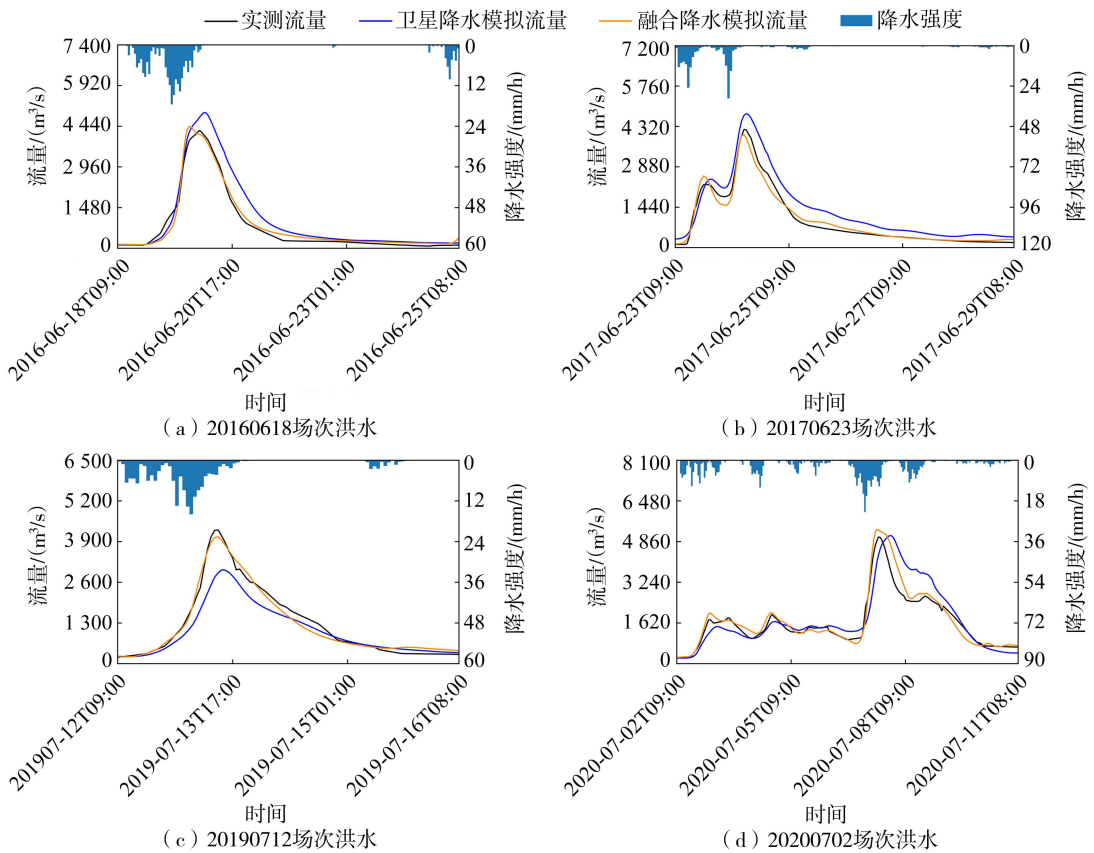


图2 屯溪流域典型场次洪水流量过程线

Fig. 2 Discharge hydrographs of typical flood events in Tunxi Basin

基于卫星降水数据的径流模拟效果欠佳,E_P绝对值平均为17.0%,其中20170611、20190712、20200618场次洪峰相对误差不合格;E_Q绝对值平均达23.95%,仅20190712、20200618、20200702场次洪量相对误差合格;

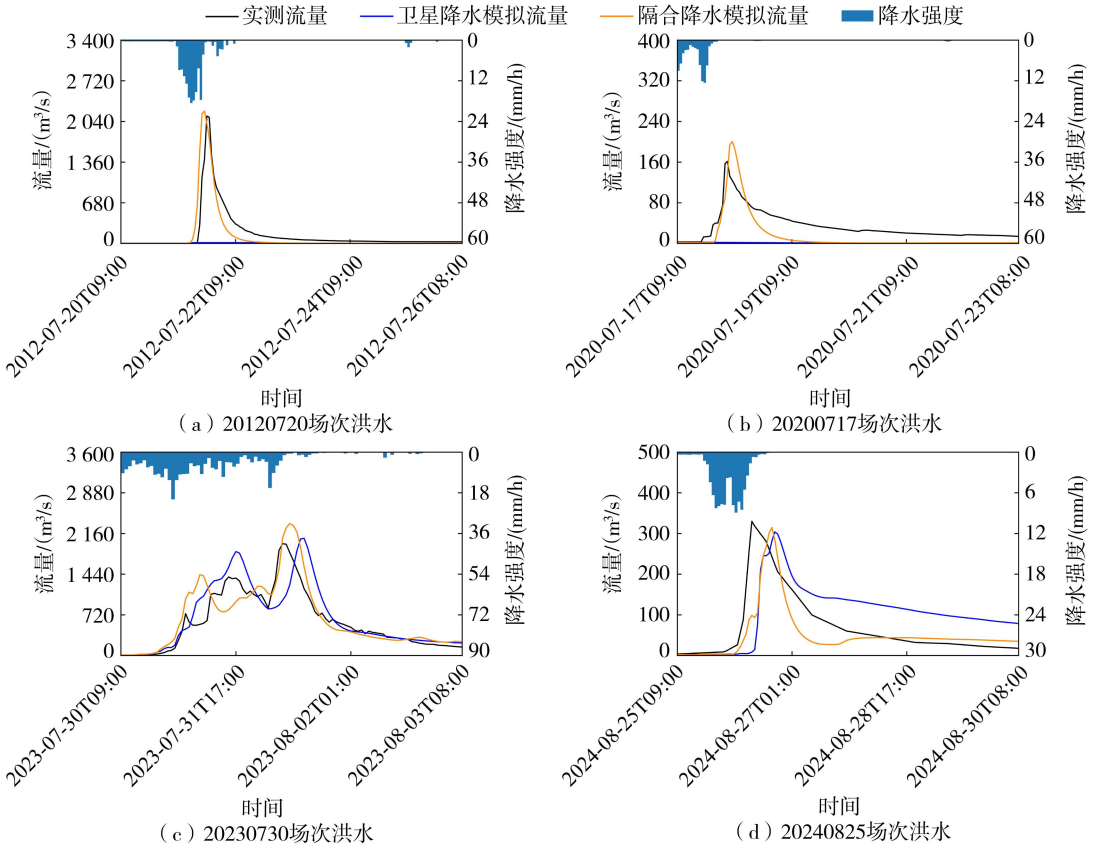
NSE 平均值为 0.65,模型拟合效果可接受,但 20170611、20200618 场次的 NSE 分别为 0.34、0.19,拟合效果很差;ET 绝对值平均为 7.5 h,其中 20200618 场次误差达 42.0 h,预报误差较大。基于融合降水数据的模拟效果较卫星降水数据有很大提升,E_P 绝对值平均降至 7.3%;E_Q 绝对值平均降至 8.1%;各场次洪水 NSE 均大于 0.80,NSE 平均值提升至 0.92,流量过程拟合精度达到高度可靠水平;ET 绝对值平均降至 1.5 h。从典型洪水来看,卫星降水数据在 20160618 与 20170623 场次洪水高估降水强度,导致洪峰流量与洪量偏高,而在 20190712 场次洪水低估了降水强度,导致洪峰流量与洪量偏低;4 场洪水基于卫星降水数据的径流模拟退水段模拟均较差,而融合降水数据在 4 场典型洪水中精度较高,径流模拟的洪峰、洪量与拟合程度都十分优秀。

紫荆关流域主要洪水的模拟结果见表 5,图 3 为典型洪水的逐小时洪水流量模拟过程。基于卫星降水数据的径流模拟结果较差,E_P 对值平均达 52.8%,E_Q 绝对值平均达 64.6%,其中 20120720、20200717 场次洪水模拟完全失效,E_P 与 E_Q 都接近 100.0%,这主要归因于卫星降水数据的严重低估,20120720、20200717 场次洪水期间卫星降水数据 RB 分别为-58.8%、-73.2%。基于融合降水数据的径流模拟结果显著优于卫星降水数据,E_P 绝对值平均为 12.6%,E_Q 绝对值平均为 27.3%;对于 4 场洪水的径流模拟,融合降水数据在

表 5　紫荆关流域径流模拟评价指标

Table 5　Evaluation indicators for runoff simulation in Zijingguan Basin

洪水事件	卫星降水				融合降水			
	E_P/%	E_Q/%	NSE	ET/h	E_P/%	E_Q/%	NSE	ET/h
20120720	-100.0	-100.0	-0.18	-36.0	3.8	-21.2	0.70	-1.0
20200717	-98.4	-96.8	-1.24	-21.0	24.1	-54.2	0.15	2.0
20230730	4.7	11.8	0.64	6.0	18.0	9.5	0.73	2.0
20240825	-7.9	49.7	-0.03	8.0	-4.6	-24.4	0.58	7.0
场次平均	52.8	64.6	0.20	17.8	12.6	27.3	0.54	3.0
合格率	0%				25%			



（a）20120720场次洪水　（b）20200717场次洪水

（c）20230730场次洪水　（d）20240825场次洪水

图 3　紫荆关流域典型场次洪水流量过程线

Fig. 3　Discharge hydrographs of typical flood events in Zijingguan Basin

各项评价指标上整体优于卫星降水数据,仅20230730场次洪水的E_P指标劣于卫星降水数据。对于20230730场次多峰洪水,基于卫星降水数据的模拟过程对第一个洪峰模拟较好,起涨段较为贴合,仅洪峰流量偏大,但第二个洪峰出现较大偏差,峰现时间明显滞后;基于融合降水数据的模拟过程对第一个洪峰模拟较差,峰现时间提前,第二个洪峰起涨段模拟较好且峰现时间较准确,但洪峰流量偏大。

图4为屯溪流域与紫荆关流域的径流模拟评价指标箱线图。从降水输入源方面比较,相较于卫星降水数据,融合降水数据在两个流域都表现出更优的性能,其径流模拟的E_P、E_Q和ET 3个评价指标的中位数更接近于零,且离散程度显著较低,NSE更趋近于1,说明融合降水数据在模拟水文过程方面具有更高的精度与稳定性。从流域方面比较,屯溪流域的基于卫星降水数据与融合降水数据的径流模拟的各项评价指标普遍优于紫荆关流域,表现为误差分布更低且集中、NSE整体偏高,反映出该流域的水文响应与模型结构之间具有更好的适应性。

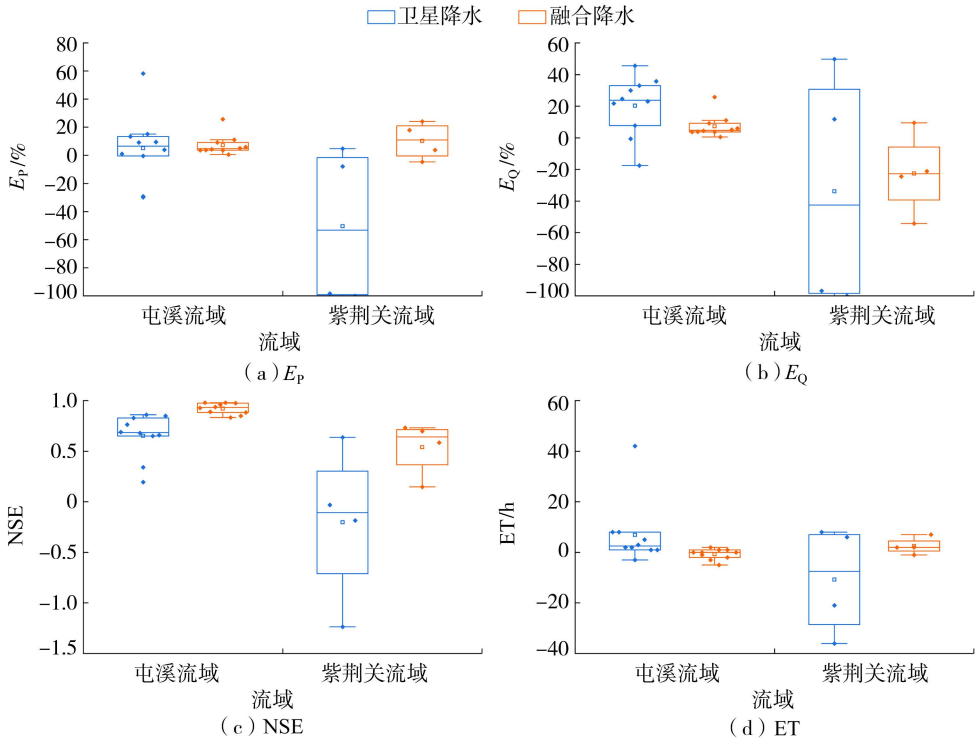


图4 径流模拟评价指标箱线图

Fig. 4 Box plot of evaluation indicators for runoff simulation

具体而言,在屯溪流域,基于卫星降水数据的径流模拟结果合格率为0%,而基于融合降水数据的径流模拟结果合格率为80%;在紫荆关流域,基于卫星降水数据的径流模拟出现预报失效,而基于融合降水数据的径流模拟基本符合洪水过程。湿润流域和半湿润流域的融合降水数据的径流模拟效果均优于卫星降水数据,间接证明了融合方法能有效提高降水数据的精度。最后,进一步比较基于卫星降水数据与融合降水数据的WRF-Hydro模型在湿润流域和半湿润流域的径流模拟结果。在卫星降水数据的驱动下,屯溪流域的洪峰相对误差绝对值平均值比紫荆关流域低67.8%,洪量相对误差绝对值平均值比紫荆关流域低63.0%。屯溪流域纳什效率系数均值为0.65,紫荆关流域NSE均值为-0.20。在融合降水数据的驱动下,屯溪流域的平均洪峰相对误差绝对值比紫荆关流域低42.1%,平均洪量相对误差绝对值比紫荆关流域低70.3%;屯溪流域径流模拟结果合格率为80%,而紫荆关流域径流模拟结果合格率为25%。这些结果表明,无论采用卫星降水数据还是融合降水数据作为驱动数据,WRF-Hydro模型在湿润流域的适用性均优于半湿润流域。分析其原因主要有两点:其一,虽然WRF-Hydro模型综合考虑了蓄满产流与超渗产流,但其超渗径流计算机制仍不完善,还是在以蓄满产流为主的湿润流域应用效果较好。其二,IMERG卫星降水数据在紫荆关流域精度较差,出现严重低估现象,同时也影响了融合降水数据精度,这导致模型在紫荆关流域模拟较差。

4　结　论

a. IMERG 卫星降水数据在屯溪流域与紫荆关流域都与站点实测降水数据有较好的相关性,但在紫荆关流域出现严重低估情况,这可能与紫荆关流域复杂地形有关。每场洪水对应的融合降水数据精度较卫星降水数据都有较大提升,体现了 KED 多源降水融合技术的稳健性,并且证明数据融合能有效提高降水数据的精度。

b. 在湿润的屯溪流域,卫星降水数据驱动的模型能较好拟合洪水过程,而融合降水数据驱动的模型则表现出更高的模拟精度;在半湿润的紫荆关流域,卫星降水驱动的模型效果不稳定甚至出现预报完全失效,而融合降水驱动的模型能较好模拟洪水过程。总体而言,无论湿润流域还是半湿润流域,基于融合降水的模型模拟结果均优于基于卫星降水的模型模拟结果,凸显了多源降水融合技术在提升洪水模拟效果方面的适用性与可靠性。

c. 无论是采用卫星降水数据,还是融合降水数据,WRF-Hydro 模型在湿润流域的应用效果都要优于半湿润流域。这可能是因为模型超渗径流计算机制不完善,不能很好模拟半湿润流域的“降雨-径流”的非线性关系。

参考文献:

[1] 刘丁蓉,杨凯,孙仕. 珠三角城市群内涝灾害韧性综合评估及障碍因子识别[J]. 水利经济,2024,42(4):23-29. (Liu Dingrong,Yang Kai,Sun Shi. Comprehensive assessment and obstacle factor recognition of waterlogging disaster resilience in Pearl River Delta urban agglomeration[J]. Journal of Economics of Water Resources,2024,42(4):23-29. (in Chinese))

[2] 刘志雨,刘玉环,孔祥意. 中小河流洪水预报预警问题与对策及关键技术应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):1-6. (Liu Zhiyu,Liu Yuhuan,Kong Xiangyi. Problems,strategies and key technology research of flood forecasting and early warning for small and medium-sized rivers[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(1):1-6. (in Chinese))

[3] 李致家,李安琪,姚成,等. 基于分布式模型的永定河流域“23·7”特大洪水模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(5):10-17. (Li Zhijia,Li Anqi,Yao Cheng,et al. Simulation of “23·7” catastrophic flood in the Yongding River Basin based on distributed models[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025,53(5):10-17. (in Chinese))

[4] 王维,刘佳,李传哲,等. 高分辨率融合降水驱动下的 WRF/WRF-Hydro 耦合模拟研究[J]. 水资源保护,2023,39(5):125-134. (Wang Wei,Liu Jia,Li Chuanzhe,et al. Study on coupled WRF/WRF-Hydro system driven by high resolution merging precipitation[J]. Water Resources Protection,2023,39(5):125-134. (in Chinese))

[5] Chao Lijun,Zhang Ke,Li Zhijia,et al. Geographically weighted regression based methods for merging satellite and gauge precipitation[J]. Journal of Hydrology,2018,558:275-289.

[6] 郭建茂,吴登国,韩金龙,等. 基于雷达和遥感卫星的新疆区域降水反演[J]. 干旱区研究,2025,42(6):957-969. (Guo Jianmao,Wu Dengguo,Han Jinlong,et al. Precipitation retrieval for Xinjiang region based on radar and remote sensing satellites[J]. Arid Zone Research,2025,42(6):957-969. (in Chinese))

[7] 秦鼎超,张行南,张自航,等. 基于多源融合降水数据的雨量站网适用性评估方法[J]. 人民长江,2025,56(3):106-115. (Qin Dingchao,Zhang Xingnan,Zhang Zihang,et al. Applicability evaluation method for rainfall gauge networks based on multi-source integrated rainfall data[J]. Yangtze River,2025,56(3):106-115. (in Chinese))

[8] 胡文韬,余钟波,陈松峰,等. 长江上游卫星反演与再分析降水数据的适用性评估[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(3):15-24. (Hu Wentao,Yu Zhongbo,Chen Songfeng,et al. Applicability evaluation of satellite and reanalysis precipitation products in upper Yangtze River Basin[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(3):15-24. (in Chinese))

[9] 胡保健,李伟,陈传法,等. 利用空间随机森林方法提升 GPM 卫星遥感降水质量[J]. 遥感学报,2024,28(2):414-425. (Hu Baojian,Li Wei,Chen Chuanfa,et al. Improving the quality of remotely sensed precipitation product from GPM satellites by using a spatial random forest[J]. National Remote Sensing Bulletin,2024,28(2):414-425. (in Chinese))

[10] 宋蕾玥,张珂,晁丽君,等. 基于随机森林模型的长江流域分区多源融合降水模拟方法研究[J]. 水资源保护,2024,40(3):125-132. (Song Leiyue,Zhang Ke,Chao Lijun,et al. Research on zoning multi-source fusion precipitation simulation method of the Yangtze River Basin based on random forest model[J]. Water Resources Protection,2024,40(3):125-132. (in Chinese))

[11] Chen Chuanfa,Hu Baojian,Li Yanyan. Easy-to-use spatial random-forest-based downscaling-calibration method for producing

precipitation data with high resolution and high accuracy[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2021,25(11):5667-5682.
[12] Chen Fengrui,Gao Yongqi,Wang Yiguo,et al. A downscaling-merging method for high-resolution daily precipitation estimation [J]. Journal of Hydrology,2020,581:124414.
[13] Wehbe Y,Temimi M,Adler R F. Enhancing precipitation estimates through the fusion of weather radar,satellite retrievals,and surface parameters[J]. Remote Sensing,2020,12(8):1342.
[14] 张婷,李怡,李建柱,等. 多源降雨数据融合及其水文应用研究进展[J]. 自然灾害学报,2022,31(1):15-28. (Zhang Ting,Li Yi,Li Jianzhu,et al. Research progress on multi-source rainfall data fusion and their hydrological application[J]. Journal of Natural Disasters,2022,31(1):15-28. (in Chinese))
[15] Jewell S A,Gaussiat N. An assessment of kriging-based rain-gauge-radar merging techniques[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,2015,141(691):2300-2313.
[16] 闫鑫,陈华,尚志宏,等. 星地数据融合的日降水产品及其径流模拟研究[J]. 中国农村水利水电,2023(6):36-46. (Yan Xin,Chen Hua,Shang Zhihong,et al. Daily precipitation estimates merging ground-based observations with satellite-derived data and its runoff simulated performance[J]. China Rural Water and Hydropower,2023(6):36-46. (in Chinese))
[17] 晁丽君,张珂,陈新宇,等. 基于多源降水融合驱动的 WRF-Hydro 模型在中小河流洪水预报中的适用性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(3):55-64. (Chao Lijun,Zhang Ke,Chen Xinyu,et al. Applicability of WRF-Hydro model based by multi-source precipitation merging in flood forecasting for small and medium-sized watersheds[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(3):55-64. (in Chinese))
[18] 沈哲辉,韩静妍,桂敬聪,等. 长江流域再分析与卫星反演降水数据的适用性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(1):50-61. (Shen Zhehui,Han Jingyan,Gui Jingcong,et al. Analysis of the applicability of reanalysis and satellite-derived precipitation data in the Yangtze River Basin[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025,53(1):50-61. (in Chinese))
[19] Jiang Shanhu,Wei Linyong,Ren Liliang,et al. Evaluation of IMERG,TMPA,ERA5,and CPC precipitation products over Chinese mainland: Spatiotemporal patterns and extremes[J]. Water Science and Engineering,2023,16(1): 45-56.
[20] 陈汉清,鹿德凯,周泽慧,等. GPM 降水产品评估研究综述[J]. 水资源保护,2019,35(1):27-34. (Chen Hanqing,Lu Dekai,Zhou Zehui,et al. An overview of assessments on global precipitation measurement (GPM) precipitation products[J]. Water Resources Protection,2019,35(1):27-34. (in Chinese))
[21] Cho K,Kim Y. Improving streamflow prediction in the WRF-Hydro model with LSTM networks[J]. Journal of Hydrology,2022,605:127297.
[22] Chao Lijun,Zhang Ke,Wang Sheng,et al. Assimilation of surface soil moisture jointly retrieved by multiple microwave satellites into the WRF-Hydro model in ungauged regions:towards a robust flood simulation and forecasting[J]. Environmental Modelling & Software,2022,154:105421.
[23] 孙明坤,李致家,刘志雨,等. WRF-Hydro 模型与新安江模型在陈河流域的应用对比[J]. 湖泊科学,2020,32(3):850-864. (Sun Mingkun,Li Zhijia,Liu Zhiyu,et al. Application of WRF-Hydro modeling system in Chenhe Basin and comparison with Xin'anjiang model[J]. Journal of Lake Sciences,2020,32(3):850-864. (in Chinese))
[24] 郭晨煜,吕海深,朱永华,等. WRF-Hydro 模型参数在河西内陆河流域的敏感性分析[J]. 水利水电科技进展,2023,43(6):120-127. (Guo Chenyu,Lyu Haishen,Zhu Yonghua,et al. Sensitivity analysis of WRF-Hydro model parameters in Hexi Inland River Basin[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(6):120-127. (in Chinese))
[25] Gochis D J,Barlage M,Cabell R,et al. The WRF-Hydro® modeling system technical description,(version 5.1.1). NCAR technical note[R]. Boulder:NCAR,2020.
[26] Huang Yufen,Tsang Y,Nugent A D. Deriving gridded hourly rainfall on O'ahu by combining gauge and radar rainfall[J]. Journal of Hydrometeorology,2023,24(12):2239-2257.
[27] 李致家,张心愿,白云鹏,等. 海河"23·7"流域性特大洪水复盘模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(5):13-19. (Li Zhijia,Zhang Xinyuan,Bai Yunpeng,et al. Retrospective simulation on the Haihe "23·7" basin-wide extreme flood[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(5):13-19. (in Chinese))
[28] GB/T 22482—2008 水文情报预报规范[S].
[29] 张茹,雍斌,曾岁康. GPM 卫星降水产品在中国大陆的精度评估[J]. 人民长江,2021,52(5):50-59. (Zhang Ru,Yong Bin,Zeng Suikang. Evaluation of GPM satellite precipitation products over China's mainland[J]. Yangtze River,2021,52(5):50-59. (in Chinese))

(下转第 172 页)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.05.005

考虑滞后效应的机器学习模型对淮北平原土壤温度的模拟研究

王 迪[1],鞠 琴[1],莫李娟[2],卢怡然[3],何亚男[1,4],梅海鹏[4],胡永胜[4]

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室; 2. 太湖流域水文水资源监测中心(太湖流域水环境监测中心);
3. 武义县水务局; 4. 安徽省(水利部淮委)水利科学研究院五道沟水文水资源实验站)

摘要:基于淮北平原五道沟实验站 2000—2024 年土壤温度与气象观测数据,采用相关性函数特征(CFF)方法系统分析了气温、气压等气象因子在不同土壤深度(10、20、40、80、160、320 cm)的滞后效应,将各深度滞后处理后的气象因子作为输入,驱动卷积神经网络(CNN)模型、长短期记忆网络(LSTM)模型及 CNN-LSTM 模型模拟 6 个深度土壤温度的演变过程,并评估了 3 个机器学习模型在不同深度的适用性与模拟精度。结果表明:气象因子的最优滞后时间随土壤深度增加而延长,浅层(10~20 cm)土壤滞后时间最短(0~3 d);中层(40~80 cm)延长至 8~29 d;深层(160~320 cm)则延长至 44~89 d;3 个机器学习模型的模拟效果在不同深度表现出明显的分层差异,整体上浅层优于深层;CNN-LSTM 模型在各深度均表现出更高的精度与稳定性,决定系数 R^2 普遍维持在 0.94 以上,优于单一模型;在 320 cm 深层土壤中,CNN-LSTM 模型的 R^2 为 0.941,较 LSTM 模型提升 17%,较 CNN 模型提升 45%,体现了卷积特征提取与时序记忆能力耦合的优势。

关键词:土壤温度;气象因子;滞后效应;机器学习;CNN-LSTM 模型;五道沟水文水资源实验站
中图分类号:S152.8 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-1980(2026)05-0039-10

Simulation of soil temperature in the Huaibei Plain using machine learning models considering lag effects

Wang Di[1], **Ju Qin**[1], **Mo Lijuan**[2], **Lu Yiran**[3], **He Ya'nan**[1,4], **Mei Haipeng**[4], **Hu Yongsheng**[4]

(1. *State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University*;
2. *Taihu Basin Hydrology and Water Resources Monitoring Center (Taihu Basin Water Environment Monitoring Center)*;
3. *Wuyi County Bureau of Water Resources*;
4. *Wudaogou Hydrology and Water Resources Experimental Station, Water Resources Research Institute of Anhui Province*)

Abstract: Based on the soil temperature and meteorological observation data from the Wudaogou Experimental Station in the Huaibei Plain from 2000 to 2024, the correlation function feature (CFF) method was adopted to systematically analyze the lag effects of meteorological factors, such as air temperature and air pressure, at different soil depths (10, 20, 40, 80, 160, and 320 cm). Using the lag-processed meteorological factors at each depth as inputs, the convolutional neural network (CNN), long short-term memory (LSTM), and CNN-LSTM models were driven to simulate the evolution processes of soil temperature at the six depths, and the applicability and accuracy of the three machine learning models at different depths were evaluated. The results indicate that the optimal lag time of meteorological factors increases with the increase of soil depth. The lag time of shallow soil (10-20 cm) is the shortest (0-3 d); the lag time of middle soil (40-80 cm) is 8-29 d; the lag time of deep soil (160-320 cm) extends to 44-89 d. The simulation performance of the three machine learning models exhibits clear stratified differences at different depths, with the shallow layer generally outperforming the deep layer. The CNN-LSTM model demonstrates higher accuracy and stability at all depths, and its coefficient of determination (R^2) is generally maintained above 0.94, outperforming the single models. In the deep soil of 320 cm, the R^2 of the CNN-LSTM model is 0.941, which improves by 17% compared with the LSTM model and 45% compared with the CNN model. This reflects the advantages of coupling convolutional feature extraction with temporal memory capability.

Key words: soil temperature; meteorological factor; lag effect; machine learning; CNN-LSTM model; the Wudaogou Hydrology and Water Resources Experimental Station

---

基金项目:国家自然科学基金项目(52279018);安徽省(水利部淮委)水利科学研究院青年科技创新计划项目(KY202307);江苏省大学生创新创业项目(X2026102940117)

作者简介:王迪(2002—),男,硕士研究生,主要从事水文物理规律模拟及水文预报研究。E-mail:241301010112@hhu.edu.cn

通信作者:鞠琴(1980—),女,副教授,博士,主要从事气候变化下水文响应研究。E-mail:juqin@hhu.edu.cn

土壤温度是多学科研究中的重要参数,反映土壤与环境的能量交换,影响土壤的物理、化学和生化过程。随着全球气温上升,温度变化对生态系统、农业生产和人类健康的影响日益加剧,土壤温度研究变得至关重要。根据联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告,2011—2020年全球地表气温比工业化前高出1.09℃,而海洋表面温度升高0.88℃,人类活动影响是主要原因[1]。世界气象组织(WMO)指出,2014—2023年为最热10 a,2023年成为1850年以来最热的一年,全球温度比工业化前偏高1.45℃[2]。在全球气候变化和极端高温频发的背景下,研究土壤温度与气候间的作用机制及提高模拟精度对农业和气候研究具有重要意义。

目前,常用的土壤温度模拟模型主要有物理过程驱动模型和数据驱动模型。物理过程驱动模型通过能量守恒定律及土壤热传导方程描述土壤温度传导机制,方程参数通常由观测或试验计算得到,具有物理意义。Hu等[3]提出了一种改进土壤温度热传导方程边界条件的热传导模型并应用于唐古拉观测点。Duc等[4]提出了一个应用衰减函数,考虑传热机制影响的非饱和土体导热函数(TCF)模型,并检验了其在黏土中的预测有效性。与物理过程驱动模型相比,数据驱动模型计算结构简单,参数需求少,善于从大量水文观测数据中提取潜在规律及隐含信息。随着计算能力的不断提升,该类模型日益受到研究者的广泛关注。数据驱动模型又可分为统计模型和机器学习模型,统计模型通过建立时间序列或多元回归方程实现,机器学习模型通过训练数据集挖掘提取数据信息并调整模型参数[5]。深度学习具有更为复杂的神经网络结构,可对数据特征进行自动提取,如卷积神经网络(CNN)、循环神经网络及长短期记忆网络(LSTM)等,在水文变量预报方面应用效果较好。例如:Wang等[6]基于卫星遥感数据利用CNN计算地表温度;张观山等[7]将LSTM与注意力机制结合构建LSTM-AT模型预测温室空气温度;Feng等[8]采用ELM、GRNN、BPNN和RF算法对黄土高原浅层土壤的半小时和逐日温度进行了预测;Zhang等[9]将经验模态分解方法与LSTM组合用于预测洞庭湖流域的地表温度,发现耦合模型在温度预测中更具优势;朱成杰等[10]利用SPA-GA-SVR模型预测土壤水分及温度;徐俊杰等[11]采用6种机器学习算法对西藏那曲土壤剖面温度进行模拟预测,发现RBF神经网络模型最优。

气象因子对土壤温度的影响并非即时发生,而是存在一定的时间延迟。地表气温的变化对土壤温度的影响通常需要经过土壤的热传导才能逐渐显现出来,而这一过程可能会持续数小时或数天。土壤温度的滞后效应与土壤的热储存和传导特性、表面植被的蒸散作用等因素密切相关。土壤温度与气温有正相关关系,较气温变化缓慢[12-14],并且随着土层深度的增加,温度变化的延迟越来越明显[15]。然而,目前有关土壤温度模拟方面的研究,较少考虑土壤温度相对于气象因子的滞后效应,探索其滞后效应及其在不同的机器学习模型中的应用有待进一步深入研究。

淮北平原位于中国南北气候过渡带,是中国重要的商品粮基地。本文基于淮北平原五道沟水文水资源实验站2000—2024年的实测土壤温度数据及气象数据,分析土壤温度的主要影响因素,采用相关性函数特征(CFF)方法优选各气象因子在土壤深度(0、10、20、40、80、160、320 cm)的最优滞后时间,构建CNN、LSTM和卷积长短期记忆网络(CNN-LSTM)3个模型,用滞时处理的气象因子作为模型输入,优选出模拟精度相对较好的模型,旨在为淮北平原精准农业发展和气候变化适应策略制定提供有效工具支撑。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况及数据来源

淮北平原地处黄淮海平原南侧,安徽省北部(32°25′N~34°35′ N,114°55′E~118°10′ E),处于南北方过渡带和冷暖气团交锋地带,年均降水量为901.6 mm,年均气温15.01℃,汛期6—9月降水量占全年总量的62%左右。研究区域总面积为3.74万km^2,农田耕地面积达3 206.5万亩(1 km^2 = 1 500亩),占安徽省总耕地面积的47.8%,是安徽省面积最大、人口最多的农业区,也是中国重要的粮食生产基地之一。本文使用的各深度土壤温度数据及气象数据来自淮北平原的五道沟水文水资源实验站,该实验站位于安徽省淮北地区南部蚌埠市北25 km的固镇县新马桥原种场境内,站内采用人工气象观测与高精度气象观测两种观测方式,两者均可以获取不同深度的土壤温度,土壤温度观测深度依次为0、10、20、40、80、160、320 cm,于每日8:00、14:00和20:00观测。观测时间为2000—2024年,标准气象场的气象因子观测包括气温、地表温度、绝对湿度、水汽压力差和饱和差等,与土壤温度观测同步进行。本文将实测数据按时间顺序划分为训练集和测试

集,其中前 80%(2000 年 1 月 1 日至 2020 年 12 月 31 日)作为训练集用于模型训练,后 20%(2021 年 1 月 1 日至 2024 年 12 月 31 日)作为测试集用于检验模型的预测精度与泛化能力。

1.2　研究方法

本文采用 CFF 方法对气象因子的滞后效应进行处理,以优选各输入因子的最佳滞后时间。在此基础上,分别构建 CNN 模型、LSTM 模型以及 CNN-LSTM 模型 3 个机器学习模型用于土壤温度模拟。

1.2.1　相关性函数特征方法

CFF 方法常用于气象、水文和环境预测建模中,用来确定输入因子(如气温、湿度、降水等要素)与目标变量(例如土壤温度等)的相关性随时间滞后的变化情况。该方法通过计算目标变量与候选气象因子在不同滞后时间下的相关系数,揭示因子对目标变量的响应延迟效应,并确定最优滞后时间。

本文基于气温、水汽压力差、饱和差、地表温度和绝对湿度 5 个气象因子的原始序列分别构建 0~120 d 的滞后序列,将每一滞后版本的因子序列与对应土壤温度序列进行配对,剔除因滞后引入的缺失数据后,计算其与土壤温度的皮尔逊相关系数。最终根据皮尔逊相关系数的最大值确定最优滞后时间。通过该过程识别各因子在不同深度对土壤温度的响应延迟特性,为后续构建土壤温度模拟模型提供参数依据。

1.2.2　CNN 模型

CNN 模型是一种专用于处理具有网格结构数据(如图像、气象数据)的深度学习模型[16-17]。其核心结构包括卷积层、池化层和全连接层。卷积层通过滑动卷积核提取局部特征,利用局部连接和参数共享减少计算量,提升模型效率。池化层(如最大池化或平均池化)进一步压缩数据,保留关键特征并降低维度[18-19]。CNN 模型通过多层堆叠实现从低级到高级特征的抽象,最终由全连接层整合全局信息并输出模拟结果。凭借强大的特征提取能力,CNN 模型在计算机视觉和多源气象数据建模中表现优异,尤其擅长处理高维时空数据[20]。

1.2.3　LSTM 模型

LSTM 模型是为解决传统循环神经网络(RNN)的长期依赖问题而设计的时序模型。其核心是带有门控机制的记忆单元,包括输入门、遗忘门和输出门。遗忘门决定历史信息的保留程度,输入门筛选当前输入的重要特征,输出门控制信息的传递[21]。通过细胞状态,LSTM 能稳定保存和更新长期依赖关系,避免梯度消失或爆炸,其强大的信息存储与更新能力在面对复杂的时序数据时,表现出了独特的优势[22-24]。

1.2.4　CNN-LSTM 模型

CNN-LSTM 模型结合了 CNN 模型的空间特征提取能力和 LSTM 模型的时序建模优势,既能降低高维数据的复杂度,又能捕捉长期动态变化,适用于多维时间序列预测[25]。CNN 模块通过卷积和池化操作压缩输入数据并提取空间特征,全连接层将特征转换为 LSTM 适配的格式。LSTM 模块则利用门控机制学习时序依赖关系,通过全连接层最终输出预测模拟结果[26]。CNN 模型、LSTM 模型和 CNN-LSTM 模型结构如图 1 所示。

本文模型以最大最小归一化处理后的时间序列为输入,首先通过序列折叠层将其转化为二维结构,并在卷积模块中依次采用二维卷积、批量归一化、ELU 激活函数与平均池化操作,实现局部空间特征的提取与压缩。卷积特征经由序列展开和展平层重新恢复为序列形式,输入至包含 32 个和 8 个隐藏单元的双层堆叠 LSTM 网络,以捕捉时间维度上的深层次依赖关系。卷积层与 LSTM 层通过卷积特征序列化后输入 LSTM 的方式实现耦合,其中 CNN 负责在每个时间步上提取局部模式,LSTM 则进一步学习跨时间步的动态变化。通过空间特征提取与时序依赖建模的有机结合提升预测精度。为提升模型的泛化能力与稳定性,网络在全连接层中引入 0.25 的 Dropout,结合 L2 正则化与梯度裁剪,同时采用 Adam 优化器进行 500 轮训练,并设置分段式学习率衰减策略。各机器学习模型的关键参数配置见表 1。

1.3　评价指标

为对比分析 3 个模型在淮北平原五道沟水文水资源实验站土壤温度模拟中的表现,本文选用决定系数(R^2)、平均偏差误差(MBE)、平均绝对误差(MAE)、均方根误差(RMSE)、平均绝对百分比误差(MAPE)作为评价指标[27]。R^2 越接近 1 表示模型拟合效果越好,越接近 0 表示模型解释能力较弱。MBE 反映了模型是否存在系统性的预测误差,为正表示模型预测偏大,为负则表示模型预测偏小。MAE 反映了模型预测的准确程度,值越小,说明模型模拟结果与实际值的差异越小。RMSE 能够量化预测误差的大小,值越小,表示模型的预测误差越小。MAPE 反映了模型在各个预测点上的相对误差,尤其适用于比较不同数据集的预测

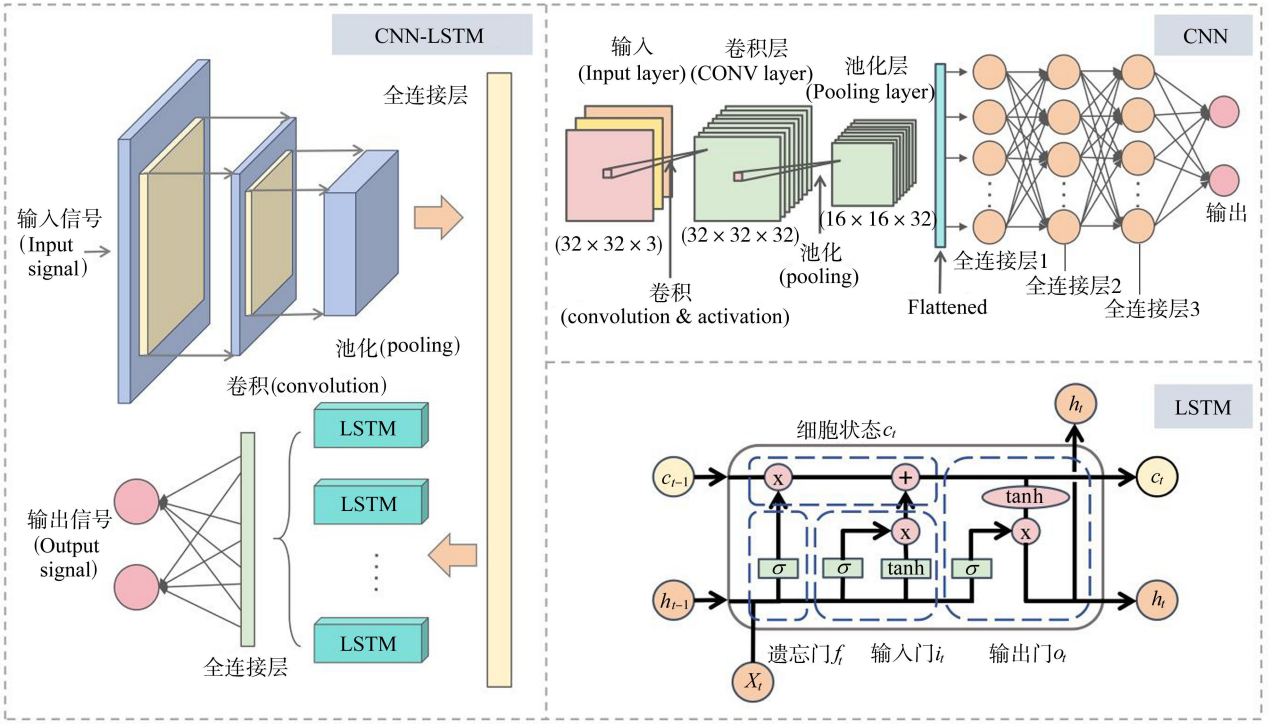


图1 CNN、LSTM和CNN-LSTM模型结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of structures of CNN, LSTM, and CNN-LSTM models

表1 机器学习模型参数

Table 1 Machine learning model parameters

类别	参数	设置值或说明	类别	参数	设置值或说明
通用参数	最大训练周期	500	CNN参数	卷积层数	2
	批次大小	64		卷积核大小	[2,1],[3,1]
	优化器	Adam		卷积核个数	8,16
	初始学习率	0.01		步长	1
	学习率下降因子	0.2		填充方式	same
	学习率下降周期	400		池化层类型	平均池化
	正则化系数	1×10^{-3}		池化核大小	2×1
	Dropout比例	0.25	LSTM参数	LSTM层数	2
	梯度阈值	1		隐藏节点数	32,8

效果,值越小表示模型在预测时的相对误差越小[28]。

2 结果与分析

2.1 滞后效应分析

基于五道沟水文水资源实验站2000—2024年土壤温度和气象观测资料,揭示气象因子对土壤温度的滞后响应规律,确定土壤温度相对于各气象因子的最优滞后时间,为后续基于机器学习算法的预测建模提供合适的输入变量。

2.1.1 不同深度土壤温度变化规律分析

土壤温度观测布设于0、10、20、40、80、160、320 cm共7个深度,每日于8:00、14:00和20:00进行3次测定,以三者的算术平均值作为当日土壤温度。由图2(a)可知,所有深度的土壤温度均呈现显著的季节性波动,全年波动的相位一致但振幅不同。不同深度的温度变化幅度存在显著差异,土壤表层(0 cm)温度波动最剧烈,全年温差为30.1℃,320 cm深度土壤温度稳定在15℃附近,波动幅度为6.6℃。当表层土壤吸收到达地面的太阳辐射升温时,热量向下传播,下层土壤吸热升温,随着土壤深度增加,能量通量减少,出现振幅阻尼现象。表层土壤温度最高值出现在7月,随深度增加,土壤温度的峰现时间逐渐延后,在320 cm处土壤温

度峰值出现在 10 月,相较于表层滞后 3 个月。土壤中热量传播及气象作用需要时间,因此不同深度土壤到达温度循环周期同一相位的时间相较于表层土壤有所延迟,即时间滞后现象,随着深度增加,现象更加明显。

由图 2(b)可知,冬季和早春,土壤温度随深度增加而显著升高,深层土壤在此期间温度明显高于表层,表现出冬季温度高、夏季温度低的季节性分布特征。夏季由于表层土壤直接接受太阳辐射并受气温、蒸发等气象因子的影响,其温度显著高于深层。这种季节性温度极值的滞后现象,主要由于气象因子作用于表层土壤的热传导速度较慢,热量逐层向下传递的过程导致深层土壤对外部气象变化的响应具有一定延迟性。表层至深层的热量传输主导了温度振幅的衰减与相位的滞后。

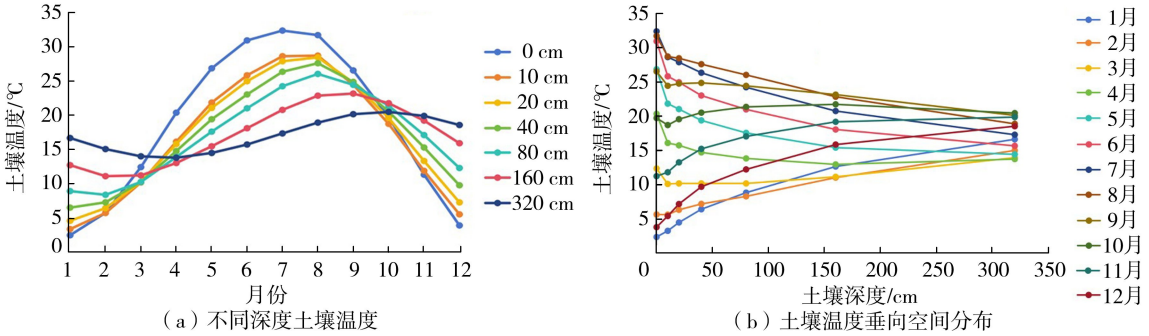


图 2　土壤温度变化曲线

Fig. 2　Variation curves of soil temperature

2.1.2　气象因子与土壤温度变化对比分析

由图 3 可知,气象因子与土壤温度均表现出明显的周期性波动特征,在波动相位上,浅层土壤对气象因子的响应较为迅速,温度曲线与气象因子变化曲线波动相位相似,波峰波谷出现时间接近。随着土壤深度的增加,土壤温度的波峰出现时间滞后。深层土壤中温度变化幅度减小,其最高温度常常出现在气象因子峰值若干天之后,进一步体现出土壤对气候信号的时滞效应。对于土壤温度建模预测而言,准确识别这种滞后关系至关重要。

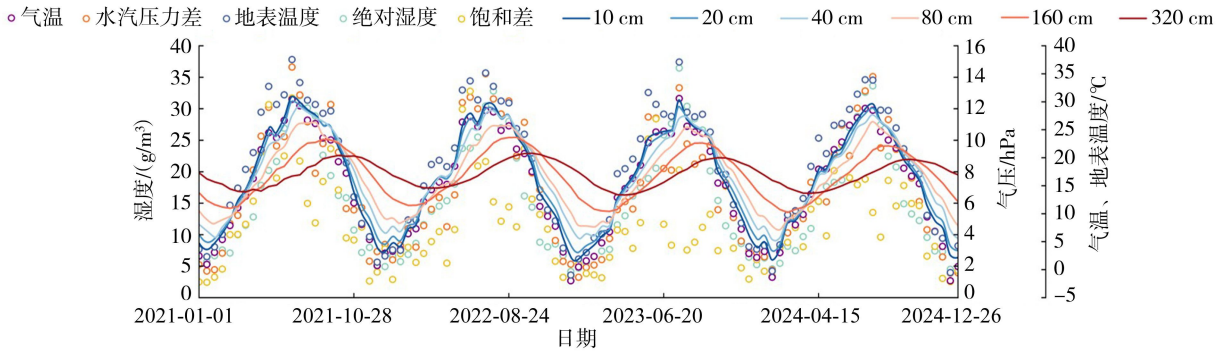


图 3　2021—2024 年气象因子与不同深度土壤温度 15 d 滑动平均值对比

Fig. 3　Comparison between meteorological factors and 15-day moving averages of soil temperature at different depths during 2021-2024

2.1.3　最优滞后时间的确定

为明确各气象因子对土壤温度的滞后响应关系,本文采用 CFF 方法,基于 2000—2024 年的观测数据系统分析气温、地表温度、绝对湿度、水汽压力差和饱和差等气象因子与不同深度土壤温度之间的关系。

CFF 方法计算出的不同深度的气象因子做 0~120 d 滞后处理后与土壤温度的皮尔逊相关系数如图 4 所示。浅层土壤温度受气象因子影响较直接,滞后效应较小,深层土壤温度存在强时滞性,滞后处理补偿了气象因子对土壤温度的延迟响应时间,滞后处理的气象因子与土壤温度的相关性得到显著提升。不同气象因子的最优滞后时间分布规律各异,但普遍存在浅层最优滞后时间短、深层最优滞后时间长的规律。经过滞后处理,气温、地表温度和绝对湿度与各深度土壤温度的最优相关系数均达到 0.90 以上。在 320 cm 深度,水汽压力差的相关系数由滞后处理前的 0.11 提升至 0.75,饱和差则由 0.05 提升至 0.56。气象因子与土壤温度之间的时序相关性经滞后处理得到了提升。

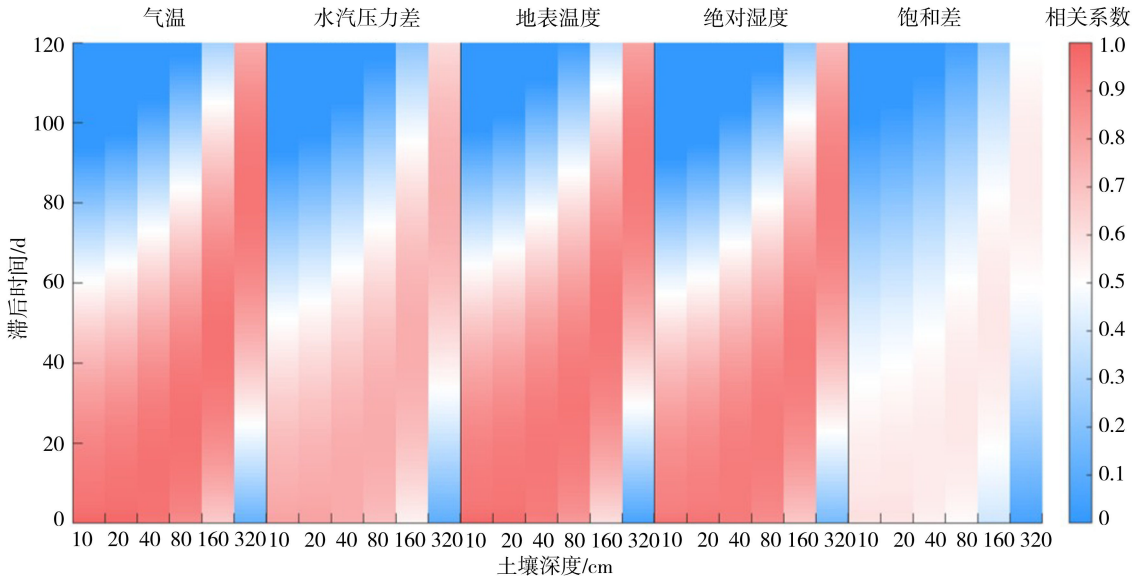


图4 滞后处理的气象因子与各深度土壤温度的相关系数热图

Fig. 4 Heat map of correlation coefficients between lag-processed meteorological factors and soil temperature at each depth

由图5可知(图中误差棒表示95%置信区间),地表温度在浅层土壤中的最优滞后时间最短,通常在3 d以内,而在深层(如160 cm及以下)则显著延后,最优滞时达50~80 d。所有的气象因子都呈现随土壤深度增加,最优滞后时间也增加的趋势,反映深层土壤中存在气象因子响应时间延迟效应。这一结果与Zhang等[29]分析1958—2010年澳大利亚140个站点的土壤温度滞后响应的研究结果相符。

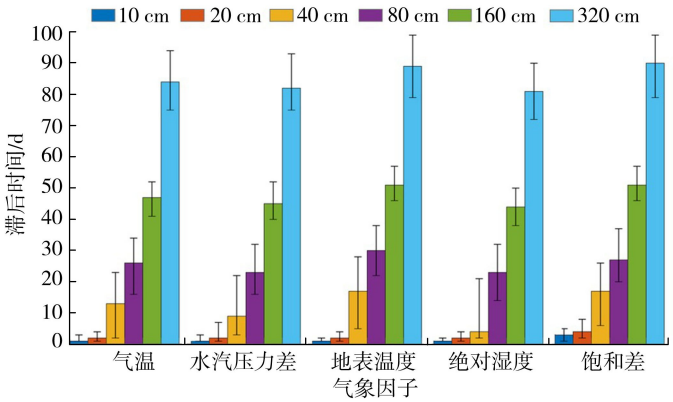


图5 气象因子在不同土壤深度的最优滞后时间分布

Fig. 5 Distribution of optimal lag time of meteorological factors at different soil depths

不同气象因子的滞后效应表现出一定差异,浅层土壤(10、20 cm)中,所有气象因子的最优滞后时间均集中在0~3 d。其中,地表温度与10 cm土壤温度的最优滞后时间为0 d,显示出二者变化几乎同步;饱和差的滞后时间稍大,为2~3 d,可能与土壤水分向大气界面的传输过程有关。在中层(40、80 cm),滞后时间显著延长,最优滞后时间普遍为8~29 d。以地表温度为例,其在40 cm深度的最优滞后时间为16 d,在80 cm深度延长至29 d,反映出热量由表层传导至中层所需的时间周期约为两周至1月,显示出较强的热扩散时滞。对于深层土壤(160、320 cm),滞后时间达到高峰。各因子的最优滞后时间普遍超过40 d,最大可达89 d。此结果说明气象因子对深层土壤温度的影响需经历更长的传播与缓冲过程,体现出深层土壤系统的热惯性特性和低频响应特征。

2.2 机器学习模型对土壤温度的模拟效果对比

由表2可知,3个模型的R^2均为浅层高,深层低。相关性方面,CNN-LSTM模型在所有深度的土壤中均表现优异,预测效果最好。在10~20 cm浅层土壤中,CNN、LSTM和CNN-LSTM模型的预测精度较为接近,R^2均大于0.88。但随着土壤深度的增加,CNN-LSTM模型的优势逐渐显现,3个模型在80 cm深度模拟的R^2

差值扩大至 0.2,预测精度差异增大。在 160 cm 深度,CNN-LSTM 模型的 R^2 为 0.979,相较于 LSTM 模型的 0.868 提升 13%,较 CNN 模型的 0.714 提升 37%,在 320 cm 深度的土壤中,CNN 模型表现最差,R^2 降低至 0.65,CNN-LSTM 模型相较于 CNN 和 LSTM 模型的相关系数分别提升 45%和 17%,表明耦合模型在深层土壤温度预测中具有一定的优势,在 80~320 cm 的中深层土壤中 CNN-LSTM 模型的 R^2 均为最高值,明显高于 CNN 模型和 LSTM 模型。

表 2　各模型不同深度土壤测试集预测评价指标

Table 2　Prediction evaluation metrics of each model on test set at different soil depths

土壤深度/cm	模型	R^2	MAE/℃	MBE/℃	RMSE/℃	MAPE/%
10	CNN	0.938	1.910	−1.593	2.323	0.185
	LSTM	0.961	1.457	0.476	1.847	0.181
	CNN-LSTM	0.962	1.405	−0.010	1.823	0.155
20	CNN	0.891	2.293	0.639	2.847	0.197
	LSTM	0.953	1.502	−0.606	1.871	0.141
	CNN-LSTM	0.974	1.096	0.089	1.360	0.090
40	CNN	0.884	2.081	−0.609	2.537	0.155
	LSTM	0.946	1.400	0.276	1.728	0.113
	CNN-LSTM	0.977	0.821	0.153	1.118	0.065
80	CNN	0.775	2.458	−0.935	2.955	0.155
	LSTM	0.888	1.719	−0.778	2.079	0.098
	CNN-LSTM	0.976	0.756	0.061	0.983	0.048
160	CNN	0.714	1.924	−0.089	2.355	0.115
	LSTM	0.868	1.820	1.378	2.257	0.102
	CNN-LSTM	0.979	0.672	0.267	0.877	0.044
320	CNN	0.650	1.209	−0.040	1.443	0.070
	LSTM	0.807	0.814	−0.593	1.045	0.046
	CNN-LSTM	0.941	0.509	0.452	0.589	0.029

误差评价中,CNN-LSTM 模型综合表现最好,其在 10~20 cm 浅层的表现优异,在 10 cm 处其 MAE、RMSE、MAPE 分别为 1.405℃、1.823℃、0.155%,且 MBE 小于 0.01℃接近无偏,LSTM 和 CNN-LSTM 模型的表现接近,MAE 与 RMSE 数值接近,均优于 CNN 模型;40~80 cm 中层,CNN-LSTM 模型的 MAE 为 0.789℃,较 LSTM 和 CNN 模型分别降低 49%和 65%,MAPE 降至 0.057%,偏差控制 MBE 为 0.107℃,优于其他模型;在 160~320 cm 深层,CNN 和 LSTM 模型稳定性下降,且普遍存在预测值低估问题,CNN-LSTM 模型在 160 cm 的平均绝对误差 MAE 仅为 CNN 模型的 35%,MAPE 低至 0.044%,平均偏差误差 MBE 为 0.267℃轻微可控,深层表现优于两个单一模型。

由图 6、图 7 可知,3 个模型大致符合实际土壤温度的变化趋势,测试集的结果要略优于训练集,各模型在浅层土壤的预测大致相同,随土壤深度增加,CNN 和 LSTM 模型在模拟土壤温度时,模拟偏差主要体现在峰谷值,波峰和波谷与实际曲线产生较大误差,在深层土壤中更明显。CNN-LSTM 模型预测土壤温度曲线变化趋势与实际土壤温度变化基本吻合,甚至在某些时段内与土壤温度观测值曲线重合;在预测曲线上其预测值的波动性较小,表现出更高的平滑度和稳定性,在时间序列上不同深度的曲线拟合度均高于 LSTM 和 CNN 模型。

2.3　讨论

土壤温度在不同深度呈现出典型的时空变化特征。浅层土壤温度与地表气温同步性较强,受大气辐射和降水等外界因素的直接影响,表现出显著的季节变化。然而,随着深度增加,土壤温度的波动幅度逐渐减小,且存在明显的时间滞后现象。在夏季地表气温已经达到最高值的情况下,深层土壤往往需要经过数周甚至几个月才逐渐达到峰值。这种现象是由于热量在土壤中传导过程缓慢,且深层土壤热容量较大,对外界气候波动的响应延迟显著。土壤温度在年尺度上的变化趋势近似于正弦曲线,波动平稳且规律性较强。浅层温度曲线起伏明显,而深层则呈现出“低频滤波”特征,即高频的短期扰动逐渐被削弱,仅保留长期平滑的变化。这一结果与江西省[30]的研究相吻合。本研究中所揭示的滞后效应,符合土壤热力学过程的基本规律。

CNN 模型虽然擅长提取局部空间特征,但缺乏对时序滞后关系的刻画能力,因此在深层预测中表现最差,R^2 从 10 cm 的 0.938 降至 320 cm 的 0.650。LSTM 模型依靠其记忆机制能够在一定程度上保留气象因子

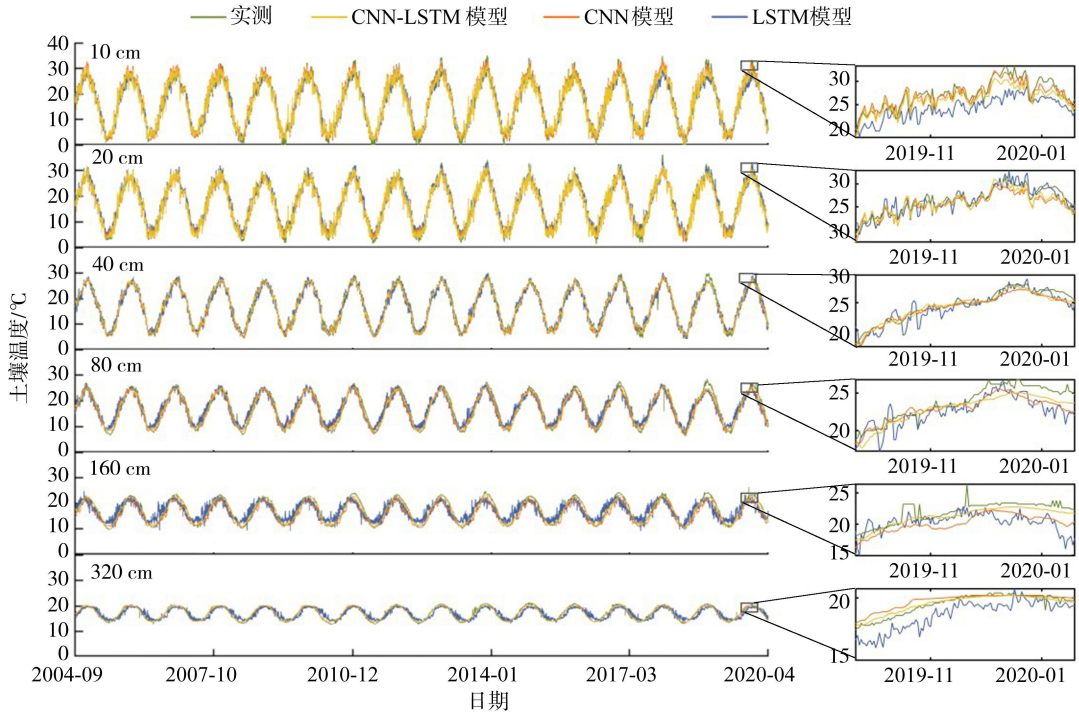


图 6 不同土壤深度训练集土壤温度预测结果对比

Fig. 6 Comparison of prediction results of soil temperature at different soil depths on training set

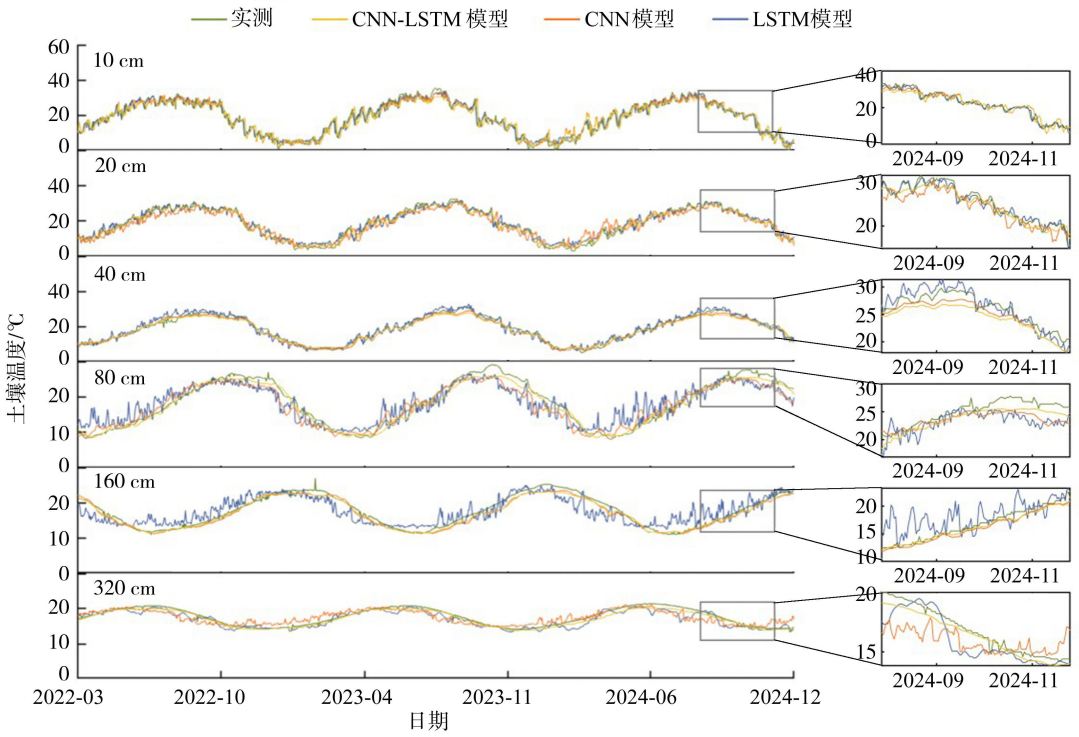


图 7 不同土壤深度测试集土壤温度预测结果对比

Fig. 7 Comparison of prediction results of soil temperature at different depths on test set

的历史信息,从而减轻滞后效应带来的精度损失,预测性能更为稳健。而融合了 CNN 与 LSTM 优势的 CNN-LSTM 模型在不同深度均能保持较高的拟合水平,在 320 cm 深度时 R^2 仍高达 0.941,显示出优异的稳定性与适应性。CNN 和 LSTM 的结合不仅能处理空间特征,也能高效捕捉时间依赖性,这种融合模型能够在不同土壤深度上保持更好的泛化能力[31]。土壤温度序列是多种周期性信号的叠加,对于较浅的土壤,空间特征的作用较大,CNN 能有效地从输入数据中提取这些信息,而随着土壤深度的增加,时间依赖性变得愈加重要,

LSTM 能够在这些深层次的数据中维持较好的预测效果。传统模型在深层土壤温度预测中的表现欠佳,使用耦合模型可以达到分别处理不同信号的目的,减少单一模型的系统误差和不确定性,更高效地处理数据间的非线性关系以提高模拟精度。

本文主要聚焦于气象因子对土壤温度的作用,而土壤类型、植被覆盖和土壤湿度等下垫面因素对土壤温度也具有重要的调控作用,不同质地的土壤在导热率和比热容上存在差异,砂质土壤温度变化更快,植被覆盖通过能量收支和蒸散作用影响地表传热过程,而土壤湿度则决定了热容量和传导性能,湿润条件下土壤对气候波动的响应更为迟滞。后期将结合更多的下垫面因素构建更综合的评价因子开展土壤温度的模拟预测研究,以提高模型的区域适用性和解释力。

3　结　论

a. 五道沟水文水资源实验站土壤温度呈显著季节性波动,表层温度波动剧烈、全年温差大,而深层温度变化平稳、振幅小。浅层土壤对气象变化反应迅速,深层土壤则响应滞后,表现出“冬季暖、夏季冷”的季节性热分布特征,同时显示出深层土壤良好的热稳定性和明显的热惯性效应。体现了土壤温度与气象条件的密切关联性。

b. 浅层土壤温度滞后气象因子时间集中于 0~3 d,中层 8~29 d,而深层则可延长至 44~89 d。不同因子的滞后效应差异显著,地表温度和气温在深层中的最佳滞后时间最长,水汽压力差和绝对湿度的最佳滞后时间相对较短,表现出差异化的时间响应特征。

c. CNN-LSTM 模型整体表现最优。在浅层,CNN、LSTM 和 CNN-LSTM 模型均能获得较高精度,但在深层,模型表现差异明显,CNN-LSTM 模型在 320 cm 深度的 R^2 达 0.941,高于 LSTM 模型的 0.807 和 CNN 的 0.650,同时其 MAE 较 CNN 模型降低约 58%。CNN-LSTM 模型对深层缓变特征拟合能力更强,尤其在面对高滞后输入条件时,能够保持稳定输出,在不同深度的时间序列拟合中展现出更高的平滑度与稳定性。

参考文献:

[1] 赵宗慈,罗勇,黄建斌. 全球气候指标、气候影响驱动因子与全球变暖[J]. 气候变化研究进展,2024,20(3):384-388. (Zhao Zongci,Luo Yong,Huang Jianbin. Global climate indicators,climatic-impact drivers and global warming[J]. Climate Change Research,2024,20(3):384-388. (in Chinese))

[2] 鞠琴,高慧滨,王国庆,等. 基于能量平衡原理的潜在蒸散发模型构建[J]. 水科学进展,2022,33(5):794-804. (Ju Qin,Gao Huibin,Wang Guoqing,et al. Modeling potential evapotranspiration based on energy balance[J]. Advances in Water Science,2022,33(5):794-804. (in Chinese))

[3] Hu Guojie,Zhao Lin,Wu Xiaodong,et al. An analytical model for estimating soil temperature profiles on the Qinghai-Tibet Plateau of China[J]. Journal of Arid Land,2016,8(2):232-240.

[4] Duc C T,Thota S K,Vahedifard F,et al. A temperature-dependent model for thermal conductivity function of unsaturated soils[M]. Reston:American Society of Civil Engineers,2021.

[5] 冯钧,邵萍萍,张继茹,等. 物理引导数据驱动方法研究综述及其在水文模型构建中的应用与展望[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(5):1-9. (Feng Jun,Shao Pingping,Zhang Jiru,et al. Research review of physics-guided data-driven methods and their application and prospects in hydrological model development[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025,53(5):1-9. (in Chinese))

[6] Wang Shaofei,Zhou Ji,Lei Tianjie,et al. Estimating land surface temperature from satellite passive microwave observations with the traditional neural network,deep belief network,and convolutional neural network[J]. Remote Sensing,2020,12(17):2691.

[7] 张观山,丁小明,何芬,等. 基于 LSTM-AT 的温室空气温度预测模型构建[J]. 农业工程学报,2024,40(18):194-201. (Zhang Guanshan,Ding Xiaoming,He Fen,et al. Predicting greenhouse air temperature using LSTM-AT[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2024,40(18):194-201. (in Chinese))

[8] Feng Yu,Cui Ningbo,Hao Weiping,et al. Estimation of soil temperature from meteorological data using different machine learning models[J]. Geoderma,2019,338:67-77.

[9] Zhang Xike,Zhang Qiuwen,Zhang Gui,et al. A novel hybrid data-driven model for daily land surface temperature forecasting using long short-term memory neural network based on ensemble empirical mode decomposition[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health,2018,15(5):1032.

[10] 朱成杰,汪正权. 基于SPA-GA-SVR模型的土壤水分及温度预测[J]. 中国农村水利水电,2024(1):30-36. (Zhu Chengjie, Wang Zhengquan. Soil moisture content and temperature prediction based on SPA-GA-SVR Model[J]. China Rural Water and Hydropower,2024(1):30-36. (in Chinese))

[11] 徐俊杰,于一雷,杨丽虎,等. 六种机器学习算法对西藏那曲草甸土土壤剖面温度的模拟效果对比[J]. 中国农业气象,2025,46(6):781-795. (Xu Junjie, Yu Yilei, Yang Lihu, et al. Comparative simulation of six machine learning algorithms on soil profile temperature in Naqu, Xizang[J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2025,46(6):781-795. (in Chinese))

[12] 谭晓晴,罗斯琼,舒乐乐,等. 基于机器学习的土壤温度预估研究综述[J]. 高原气象,2022,41(2):268-281. (Tan Xiaoqing, Luo Siqiong, Shu Lele, et al. A review of soil temperature estimation research based on machine learning[J]. Plateau Meteorology,2022,41(2):268-281. (in Chinese))

[13] 杨晓霞,贾嵩,张承明,等. 一种基于神经网络的土壤湿度预测方法[J]. 江苏农业科学,2018,46(10):232-236. (Yang Xiaoxia, Jia Song, Zhang Chengming, et al. A soil moisture prediction algorithm based on artificial neural network[J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2018,46(10):232-236. (in Chinese))

[14] 秦红灵,高旺盛,李春阳. 北方农牧交错带免耕对农田耕层土壤温度的影响[J]. 农业工程学报,2007,23(1):40-47. (Qin Hongling, Gao Wangsheng, Li Chunyang. Impacts of no-tillage on soil temperature of field in Ecotone of North China[J]. Transactions of the CSAE,2007,23(1):40-47. (in Chinese))

[15] 张燕,张振华,姚付启,等. 土壤温度相对于气象因子的滞后效应分析[J]. 农业现代化研究,2008,29(4):468-470. (Zhang Yan, Zhang Zhenhua, Yao Fuqi, et al. Analysis on time lag effect of soil temperature compared to meteorological factors[J]. Research of Agricultural Modernization,2008,29(4):468-470. (in Chinese))

[16] Kala S, Jose B R, Mathew J, et al. High-performance CNN accelerator on FPGA using unified Winograd-GEMM architecture[J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems,2019,27(12):2816-2828.

[17] 刘永伟,王文,刘元波,等. 水文模型模拟预报的多源数据同化方法及应用研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(6):483-491. (Liu Yongwei, Wang Wen, Liu Yuanbo, et al. Advances in multi-source data assimilation approach and application in simulation and forecast of hydrological model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(6):483-491. (in Chinese))

[18] Ruan Diwang, Wang Jin, Yan Jianping, et al. CNN parameter design based on fault signal analysis and its application in bearing fault diagnosis[J]. Advanced Engineering Informatics,2023,55:101877.

[19] 刘东,姜宸一,张亮亮,等. 基于GA-CNN的农业旱灾恢复力及影响因素[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2024,22(4):672-683. (Liu Dong, Jiang Chenyi, Zhang Liangliang, et al. Agricultural drought resilience and influencing factors based on optimized convolutional neural network of genetic algorithm[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2024,22(4):672-683. (in Chinese))

[20] Kotaridis I, Lazaridou M. Cnns in land cover mapping with remote sensing imagery:a review and meta-analysis[J]. International Journal of Remote Sensing,2023,44(19):5896-5935.

[21] 鞠琴,吴金雨,王兴平,等. 机器学习算法在降水和气温多模式集成中的应用[J]. 水资源保护,2024,40(3):106-115. (Ju Qin, Wu Jinyu, Wang Xingping, et al. Application of machine learning algorithms in multimodal integration of precipitation and temperature[J]. Water Resources Protection,2024,40(3):106-115. (in Chinese))

[22] 周涛,李成林,殷峻暹,等. 改进的多层LSTM深圳道路积水大数据预测模型[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2025,23(1):66-71. (Zhou Tao, Li Chenglin, Yin Junxian, et al. Big data-driven waterlogging prediction model based on improved multi-layer LSTM in Shenzhen[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2025, 23(1): 66-71. (in Chinese))

[23] Lees T, Buechel M, Anderson B, et al. Benchmarking data-driven rainfall-runoff models in Great Britain:a comparison of long short-term memory (LSTM)-based models with four lumped conceptual models[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2021,25(10):5517-5534.

[24] 郭明辰,张润润,闻余华. 基于PSO-LSTM模型的平原河网汛期水位预测[J]. 水利水电科技进展,2024,44(6):64-70. (Guo Mingchen, Zhang Runrun, Wen Yuhua. Prediction of water level of plain river network during flood season based on PSO-LSTM model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(6):64-70. (in Chinese))

[25] Hou Jingwei, Wang Yanjuan, Zhou Ji, et al. Prediction of hourly air temperature based on CNN-LSTM[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk,2022,13(1):1962-1986.

(下转第90页)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.05.006

基于多通道偏振与双分支 Transformer 的水下图像复原

许馨月,霍冠英,孔伟丰,彭 超,苏 勇

(河海大学信息科学与工程学院)

摘要:针对水下浑浊环境引起的图像对比度低、色彩失真及细节模糊问题,提出一种基于多通道偏振与双分支 Transformer 的水下图像复原网络。该网络采用基于 Stokes 矢量的偏振特征自适应融合模块提取水体偏振物理特征,然后通过构建空间-偏振双分支架构,利用动态门控机制自适应融合偏振强度、偏振度和偏振角等多源信息与空间特征,克服单一模态信息表征不全面的局限,且网络主干采用集成多尺度特征交互、通道注意力及多尺度空间 Transformer 模块的编解码结构,强化退化表征与全局细节还原能力。实验结果表明,该方法在结构还原、细节保持和色彩校正方面优势显著(SSIM 为 0.854 0,PSNR 为 32.93 dB,感知指标 LPIPS 为 0.363 3),能显著提升复原图像的清晰度、对比度和色彩保真度。

关键词:水下图像复原;多通道偏振;Transformer;自适应融合;门控机制;偏振物理先验

中图分类号:TP391.41 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-1980(2026)05-0049-11

Underwater image restoration based on multi-channel polarization and dual-branch Transformer

Xu Xinyue, Huo Guanying, Kong Weifeng, Peng Chao, Su Yong

(*College of Information Science and Engineering, Hohai University*)

Abstract: To address the problems of low image contrast, color distortion, and blurred details caused by turbid underwater environments, an underwater image restoration network based on multi-channel polarization and a dual-branch Transformer was proposed. A polarization feature adaptive fusion module based on the Stokes vector was used to extract the physical polarization features of water. A spatial-polarization dual-branch architecture was constructed, and a dynamic gating mechanism was utilized to adaptively fuse multi-source information, such as polarization intensity, degree of polarization, and polarization angle, with spatial features, overcoming the limitation of incomplete representation by single-modality information. An encoder-decoder structure integrating multi-scale feature interaction, channel attention, and multi-scale spatial Transformer modules was adopted for the network backbone to enhance the capabilities of degradation representation and global detail restoration. The experimental results show that this method has significant advantages in structure restoration, detail preservation, and color correction (SSIM: 0.854 0, PSNR: 32.93 dB, perceptual metric LPIPS: 0.363 3), and can significantly improve the clarity, contrast, and color fidelity of the restored images.

Key words: underwater image restoration; multi-channel polarization; Transformer; adaptive fusion; gating mechanism; polarization physical prior

水下光学成像广泛应用于目标检测、三维重建、环境监测和自动导航等领域[1]。然而,由于水下光线衰减以及散射现象严重,水下成像系统所采集到的图像存在严重的色彩失真、曝光度不足和图像模糊等问题[2],极大地限制了后续高层视觉任务的准确性和鲁棒性。因此,如何有效提升浑浊水下环境的图像质量,实现高保真度图像复原,已成为当前水下视觉领域亟须解决的关键科学问题。

目前,水下图像复原的主流方法分为基于物理模型和基于深度学习两类。基于物理模型的复原方法通过优化像素映射关系提升效果[3]。例如:Yi 等[4]提出自适应色彩校正、耦合性解耦增强及暗通道加速架构,

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFB3907203);国家自然科学基金"叶企孙"科学基金项目(U2441254);中央高校基本科研业务费专项资金项目(B250201257)

作者简介:许馨月(2000—),女,硕士研究生,主要从事水下图像处理研究。E-mail:hhuxxy@hhu.edu.cn

通信作者:霍冠英(1979—),男,教授,博士,主要从事水下声呐图像处理研究。E-mail:huoguanying@hhu.edu.cn

协同优化色彩保真度、边缘细节与实时性;许丽等[5]通过设计梯度驱动多尺度自适应算法平衡颜色保真与细节增强;Sun 等[6]利用隐式表征协同机制抑制暗区伪影与色偏。基于深度学习的复原方法通过学习退化特征映射改善复原质量。例如:Liu 等[7]在 Retinex-NET 嵌入通道注意力机制,联合去噪损失和颜色损失,提出了一种改进的弱光照图像增强算法;Jiang 等[8]设计了三阶段级联 DEANET++架构治理退化模式与噪声残留;杨海潮等[9]采用双分支 CycleGAN 进行解耦内容与亮度增强;Cui 等[10]基于可分离卷积实现轻量化 ConvIR 架构,降低了 75%的计算负载;Ouyang 等[11]提出了 Transformer-卷积混合的 UformerGAN 范式实现端到端重建。上述方法虽各有突破,但物理模型受限于复杂退化建模能力,单一特征深度学习方法缺乏物理光学信息,难以区分真实结构与噪声,复原效果均有局限。同时,现有方法未充分融入场景光学特性,复原质量仍有提升空间,设计高效鲁棒的多源信息融合高保真复原方法是当前亟待解决的关键问题。

鉴于此,本文在传统卷积模型与单一特征输入网络的基础上进行改进[12],构建了基于多通道偏振与双分支 Transformer 的融合网络:设计了基于 Stokes 矢量[13]的偏振特征自适应融合模块,构建了以多通道 Stokes 矢量为核心输入的空间-偏振双分支架构,以实现端到端的水下退化建模与复原;同时,提出动态门控自适应融合机制,利用可学习的门控函数[14]动态加权融合偏振物理特征与空间分支特征,以解决多源信息干扰与单一模态表征不全面的问题;此外,引入全局-多尺度特征增强机制,通过多头自注意力、多尺度特征交互与通道注意力的协同设计,集成全局依赖建模、局部细节感知与通道信息筛选能力,以强化退化表征与全局细节还原能力。

1 研究方法

1.1 网络总体结构

本文提出的水下图像复原网络以多通道偏振特征为输入,采用双分支编码-解码架构,由偏振特征自适应融合模块、空间分支、门控融合模块、编解码模块、全局-多尺度特征增强模块构成,整体结构如图 1 所示,图中 B 为批量样本数,H、W 分别为特征图的高度与宽度。

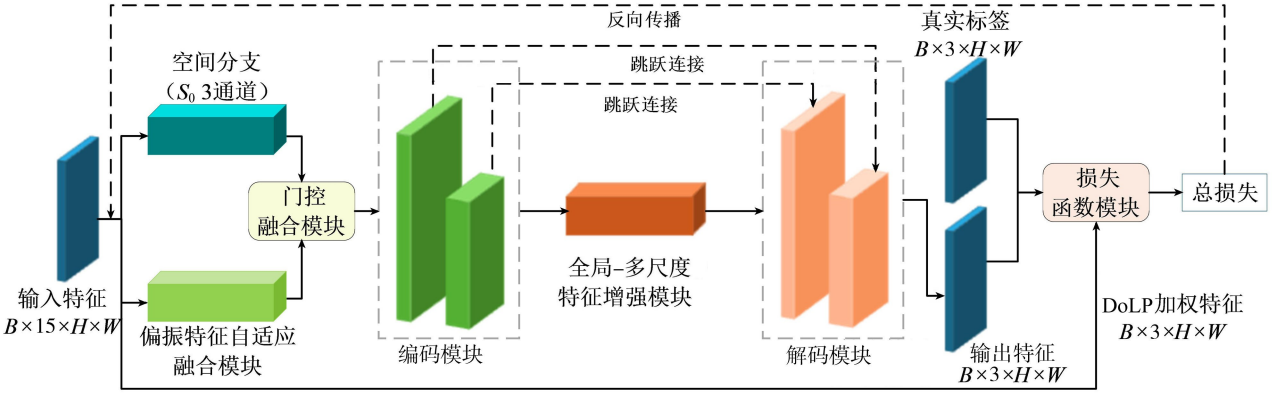


图 1 网络架构

Fig. 1 Network architecture diagram

图像复原核心流程为:①基于 0°、45°、90°和 135°四角度偏振图像计算得到多维度偏振物理特征,构建 15 通道高维输入张量(表 1);②通过偏振特征自适应融合模块完成偏振信息的特征提炼,同时由空间分支提取基础空间结构特征;③双分支特征经编码后送入门控融合模块,实现偏振物理信息与空间信息的自适应加权融合;④融合特征经全局-多尺度特征增强模块进一步强化,从而提升全局依赖建模与多尺度上下文表达能力;⑤通过解码模块逐步恢复空间分辨率,输出复原图像。网络采用端到端方式训练,通过多分量损失函数约束全局结构一致性与细节还原效果。

表 1 15 通道特征张量构成

Table 1 Composition of 15-channel feature tensor

通道索引	特征	物理意义	数据维度
0~2	S_0	总光强度,包含 RGB 三通道	3 通道
3~5	S_1	水平与垂直偏振分量的差异	3 通道
6~8	S_2	45°与 135°偏振分量的差异	3 通道
9~11	DoLP	线偏振度,反映偏振强度	3 通道
12~14	AOP	偏振角度,反映偏振方向	3 通道

1.2 偏振特征自适应融合模块

为缓解浑浊水体下偏振信息利用不充分的问题,本文设计了偏振特征自适应融合模块(图 2)。模块以

0°、45°、90°和 135°偏振方向的水下图像的辐射光强 I_0、I_{45}、I_{90} 和 I_{135} 作为输入,通过式(1)~(3)计算得到 Stokes 参数(S_0、S_1、S_2)以及线偏振度(D_{oLP})与偏振角(A_{OP})。

$$\boldsymbol{S}=\begin{bmatrix}S_0\\S_1\\S_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}I_0+I_{90}\\I_0-I_{90}\\I_{45}-I_{135}\end{bmatrix} \tag{1}$$

$$D_{oLP}=\sqrt{S_1^2+S_2^2}/S_0 \tag{2}$$

$$A_{OP}=\frac{1}{2}\arctan(S_2/S_1) \tag{3}$$

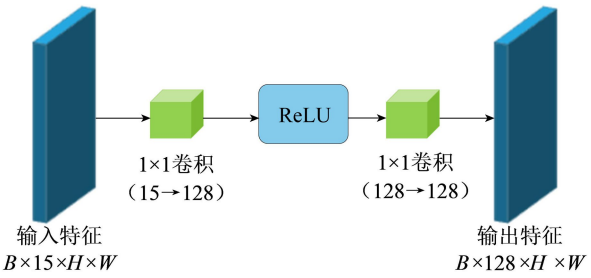


图 2　偏振特征自适应融合模块

Fig. 2　Polarization feature adaptive fusion module

偏振特征自适应融合模块的核心运算是将上述所有物理量连接形成高维张量 $\boldsymbol{X}\in\boldsymbol{R}^{C\times H\times W}$,之后再通过两级 1×1 卷积与 ReLU 激活函数的非线性变换处理获得高维特征表达。1×1 卷积核的权重在训练过程中会根据水下图像复原效果不断调整,从而使得输出特征在高维空间中能够更好地表达与任务相关的偏振信息。ReLU 激活函数则进一步引入非线性,有助于提升模型的表达能力和鲁棒性。最终,经过该模块处理后的特征不仅融合了多种偏振信息,还具备了更强的判别能力,为后续的门控融合等模块提供了高质量的输入。

1.3　门控融合模块

为实现空间分支与偏振特征自适应融合模块的深度互补融合,本文设计了门控融合模块(图 3)。该模块通过引入门控机制,能够根据输入特征的空间分布和内容差异,自适应调整两路特征的融合比例,从而提升网络对多源信息的利用效率和特征选择能力。

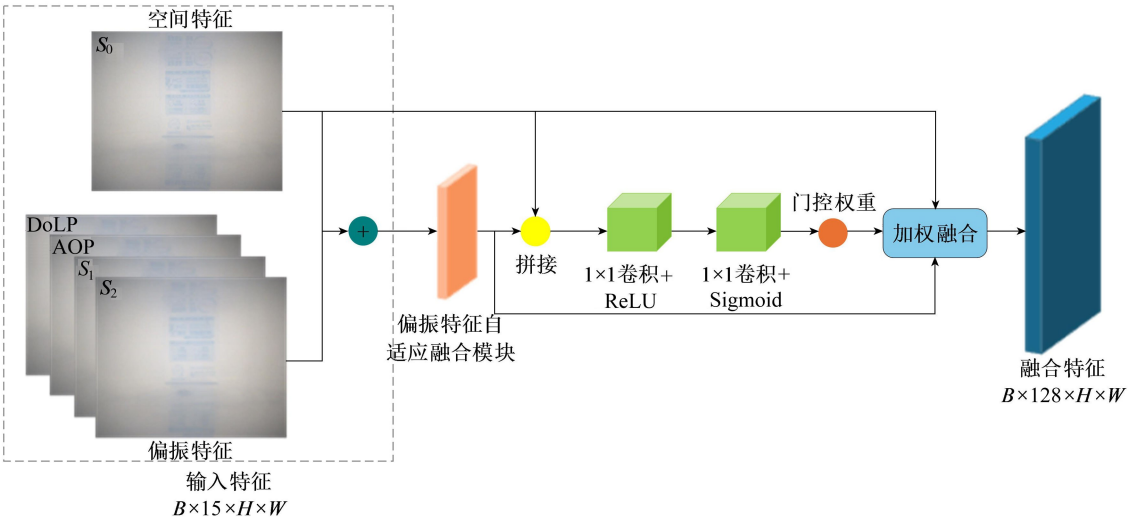


图 3　门控融合模块

Fig. 3　Gated fusion module

设空间分支特征为 $\boldsymbol{F}_{spatial}\in\boldsymbol{R}^{C\times H\times W}$($C$ 为空间分支特征图通道数),偏振特征自适应融合输出 $\boldsymbol{F}_{polar}\in\boldsymbol{R}^{C\times H\times W}$。首先,将 $\boldsymbol{F}_{spatial}$ 和 $\boldsymbol{F}_{polar}$ 在通道维度拼接,获得融合特征 $\boldsymbol{F}_{cat}$。然后,依次通过 1×1 卷积和 ReLU 激活、1×1 卷积和 Sigmoid 函数[15],生成门控权重图 $\boldsymbol{G}\in\boldsymbol{R}^{1\times H\times W}$。门控权重 $\boldsymbol{G}$ 是通过卷积和 Sigmoid 激活动态生成的,能针对不同输入自适应分配信息流,取值范围为[0,1],反映了在不同空间位置对偏振特征的偏好程度,用于自适应调节两路特征的融合。最后,融合输出特征 $\boldsymbol{F}_{fuse}$ 由门控加权相加获得,即:

$$\boldsymbol{F}_{fuse}=\boldsymbol{G}\odot\boldsymbol{F}_{polar}+(1-\boldsymbol{G})\odot\boldsymbol{F}_{spatial} \tag{4}$$

式中:⊙表示逐元素乘法。

门控融合模块的设计核心在于其自适应融合机制。加权方式由 $\boldsymbol{G}$ 和 $1-\boldsymbol{G}$ 动态调节,能够根据特征图的不同空间位置,自适应选择更优的特征来源,可有效实现空间特征信息 $\boldsymbol{F}_{spatial}$ 与偏振物理信息 $\boldsymbol{F}_{polar}$ 的互补与融合。门控融合模块通过可学习的门控权重 $\boldsymbol{G}$,提升网络对多源特征的选择和表达能力。相较简单拼接或

元素加和,该机制能依据输入局部特性灵活调整融合策略,增强网络对复杂水下退化场景的适应性与鲁棒性。

1.4 编解码模块

为实现退化图像从特征提取到结果重建的完整过程,本文构建编解码模块,该模块主要用于提取多尺度特征并逐步恢复图像空间分辨率。

1.4.1 编码模块

编码模块的设计如图4所示,是本文主干网络中用于多尺度特征提取和空间信息压缩的关键结构。该模块通过多层残差卷积块与下采样操作的交替堆叠,实现对输入特征的逐步抽象和高层表达。每个残差卷积块后均接入2×2平均池化实现空间下采样。编码模块通过多层残差卷积块与下采样的交替堆叠,可有效提升网络对复杂水下场景的特征抽象和多尺度表达能力。

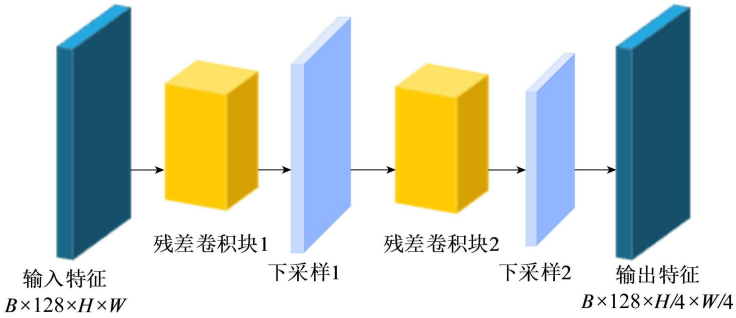


图4 编码模块

Fig. 4 Encoder module

残差卷积块结构如图5所示,包含两层3×3卷积、批归一化、ReLU激活和残差连接,能够有效缓解梯度消失,提升特征表达能力,其具体流程为:输入特征先经第一层3×3卷积提取特征,依次通过批归一化与ReLU激活得到中间特征;再经第二层3×3卷积与批归一化运算后,与原始输入特征完成残差加和,最终经ReLU激活输出。若输入输出通道数不匹配,可通过1×1卷积完成维度适配。

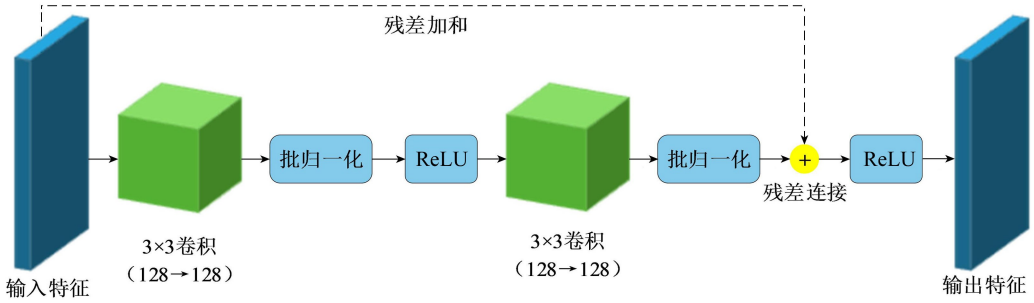


图5 残差卷积块结构

Fig. 5 Structure of residual convolutional block

1.4.2 解码模块

解码模块的设计如图6所示,是本文主干网络实现逐步恢复空间分辨率和细节信息的关键结构,其核心是通过多层上采样与残差卷积块的交替堆叠,并结合编码模块的跳跃连接,实现高分辨率特征的有效重建与多尺度信息的融合。解码采用两级上采样拼接架构,残差卷积块1将上采样1、拼接编码器特征后的256通道特征压缩至128通道,完成第一级特征重建;输出特征经上采样2恢复至原始图像空间尺寸,再次与对应层级的编码器跳跃连接特征拼接,得到256通道融合特征后送入残差卷积块2,处理后输出128通道全分辨

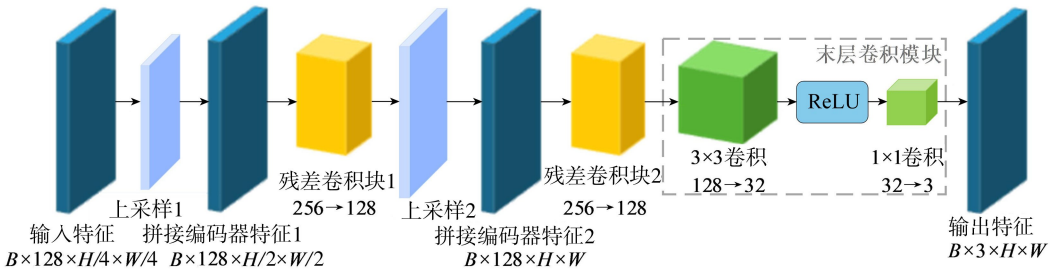


图6 解码模块

Fig. 6 Decoder module

率特征。随后特征进入末层卷积模块,先通过 3×3 卷积将通道数从 128 降至 32,经 ReLU 激活后,再由 1×1 卷积映射为 3 通道,最终输出复原图像。

综上,编解码模块通过多尺度特征提取与逐步重建,实现了退化图像从高层语义到空间细节的有效恢复,从而为复原结果的整体质量提升提供了主体支撑。

1.5　全局-多尺度特征增强模块

为进一步改善复杂浑浊场景下的细节模糊问题,本文设计全局-多尺度特征增强模块(GMFEM),如图 7 所示。该模块主要通过增强不同尺度特征交互,兼顾全局上下文与局部细节信息,从而提高对目标轮廓、边缘区域和纹理细节的恢复能力。具体流程为:输入特征首先经过位置编码后展平为二维序列,随后输入 Transformer 模块完成全局信息交互。在 Transformer 模块内部,特征通过多头自注意力机制[16]建立全局依赖关系,再经由前馈网络与残差连接进一步强化特征表达能力,每一层均配置层归一化[17]以保障训练过程的稳定性与特征传递效率,Transformer 模块输出的特征会被还原为原始空间结构,以适配后续的卷积操作。

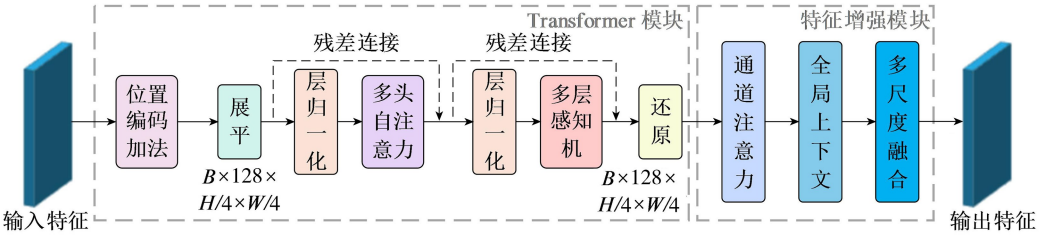


图 7　全局-多尺度特征增强模块

Fig. 7　Global-multi-scale feature enhancement module

完成全局建模后的特征进入多分支特征增强模块,该模块包含通道注意力、全局上下文与多尺度融合 3 个并行的特征增强支路。通道注意力支路通过全局平均池化聚合空间信息,再经由两层全连接层自适应生成各通道的权重,以此突出关键特征通道并抑制冗余信息。全局上下文支路利用全局池化结合卷积运算提取全局语义信息,生成对应的权重图后与原特征相乘,实现全局信息的自适应融合,强化特征的全局感知能力。多尺度融合支路则采用 1×1、2×2、4×4 尺度的自适应池化操作,将多尺度下采样得到的特征统一上采样至原始空间尺寸后进行拼接,最终通过 1×1 卷积完成多尺度特征的融合,提升模型对不同水下浑浊区域的环境适应性。经过全局-多尺度特征增强模块处理后的特征同时具备全局建模能力与多尺度上下文信息,能够为后续解码器提供更丰富且判别性更强的特征表达。

1.6　损失函数模块

为保证网络训练过程中复原结果在颜色恢复和细节保持之间取得较好平衡,本文设置损失函数模块,如图 8 所示。该模块通过 L_1 损失(L_{L1})、基于结构相似性指数(structural similarity index measure, SSIM)的损失以及基于线偏振度(DoLP)的加权机制对网络进行监督,以引导模型学习更加稳定的图像复原映射关系。

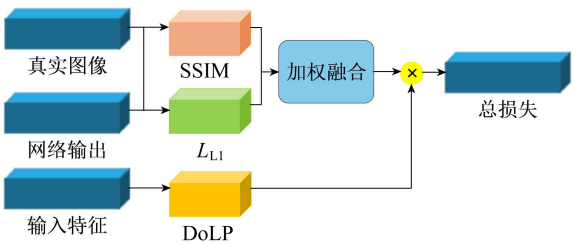


图 8　损失函数模块

Fig. 8　Loss function module

设第 i 个像素位置的预测值为 $\hat{Y}_i$,真实值为 Y_i,N 表示参与计算的像素总数,则 L_1 像素级损失 L_{L1}:

$$L_{L1} = \sum_{i=1}^{N} | \hat{Y}_i - Y_i | / N \tag{5}$$

SSIM 损失(L_{SSIM}),用于衡量预测图像与真实图像在结构上的一致性,其定义为:

$$L_{SSIM} = 1 - M(\hat{Y}, Y) \tag{6}$$

式中:$M(\cdot)$为结构相似性指数,取值范围为[0,1],值越接近 1 表示结构越相似。由于训练目标是最小化损失,因此采用其互补形式,此时越接近 0 表示结构越相似。

DoLP 特征由输入特征第 9~11 通道得到,记为 $D = \mathrm{mean}(F_{9\sim11})$。由于 DoLP 能够反映目标区域的偏振强度,对比度较高的区域往往对应强反射表面。因此,相比 S_0、S_1、S_2 等基础分量,DoLP 在区分目标反射与

后向散射方面更具鲁棒性和信息优势。基于这一物理先验,本文选用第9~11通道DoLP特征作为损失加权因子,以引导网络更加关注物理信息丰富的区域。加权损失定义为 L_{weighted}:

$$L_{\text{weighted}} = (\alpha L_{\text{L1}} + \beta L_{\text{SSIM}})(1 + 0.5\text{mean}(D)) \tag{7}$$

式中:mean(D)为对DoLP权重图进行全局平均;α、β 为 L_1 损失与SSIM损失的平衡权重,本文统一取 $\alpha=\beta=0.5$。综上,本文总损失函数为 $L_{\text{total}} = L_{\text{weighted}}$。损失函数模块通过联合多种约束项对网络进行监督,使模型在训练过程中能够兼顾颜色恢复、结构保持和细节重建,从而提升了复原结果的稳定性和整体质量。

2 实例验证

2.1 数据集获取与实验设置

通过搭建的水下偏振成像平台采集退化的水下偏振图像,实验在一个小型玻璃水箱中进行,水箱内注满水,并放置目标物体和封装好的偏振相机。为模拟真实的水下环境,向水箱中加入适量牛奶以制造浑浊效果。为确保清晰水下图像与浑浊水下图像之间的一一对应关系,实验过程中严格保持目标物体和相机的位置不变。共拍摄了50组图像,涵盖了多个浑浊度等级。每组图像的采集流程如下:①拍摄一组清晰的水下偏振图像,作为真值(GT);②通过多次缓慢加入少量牛奶溶液并充分搅拌,逐步增加水体的浑浊度。每次调整浑浊度后,均使用工具确保水体浊度均匀,然后拍摄当前条件下的水下偏振图像。实验使用的偏振相机型号为LUCIDTRI050S-QC,配备索尼IMX250MYR传感器、微透镜阵列和偏振透镜,能够同时采集4个偏振方向(0°、45°、90°、135°)的图像,分辨率为1 224×1 024像素,像素尺寸为3.45 μm×3.45 μm。通过该平台,共采集了362组清晰-浑浊图像对,并按照8∶2的比例划分为训练集和测试集。

硬件平台为CPU为Intel(R) Xeon(R) Gold 6152CPU@2.10GHzCPU和NVIDIA RTX4090GPU设备,深度学习框架采用PyTorch1.12.1+CU113,CUDA版本为11.3,并启用AMP混合精度加速训练。优化器使用AdamW(adaptive moment estimation with weight decay),初始学习率为 1×10^{-3},权重衰减系数设为 1×10^{-4},批处理大小为1,考虑到模型中包含Transformer结构,为保证模型充分收敛,设定训练300个epoch,并通过验证集早停策略选取最佳模型。数据预处理包括图像除以255归一化至[0,1];随机水平/垂直翻转、90°倍数旋转和颜色抖动增强;基于偏振物理原理计算Stokes参数,并获得DoLP与AOP,最终形成 S_0、S_1、S_2、DoLP、AOP各三通道的15通道输入张量。

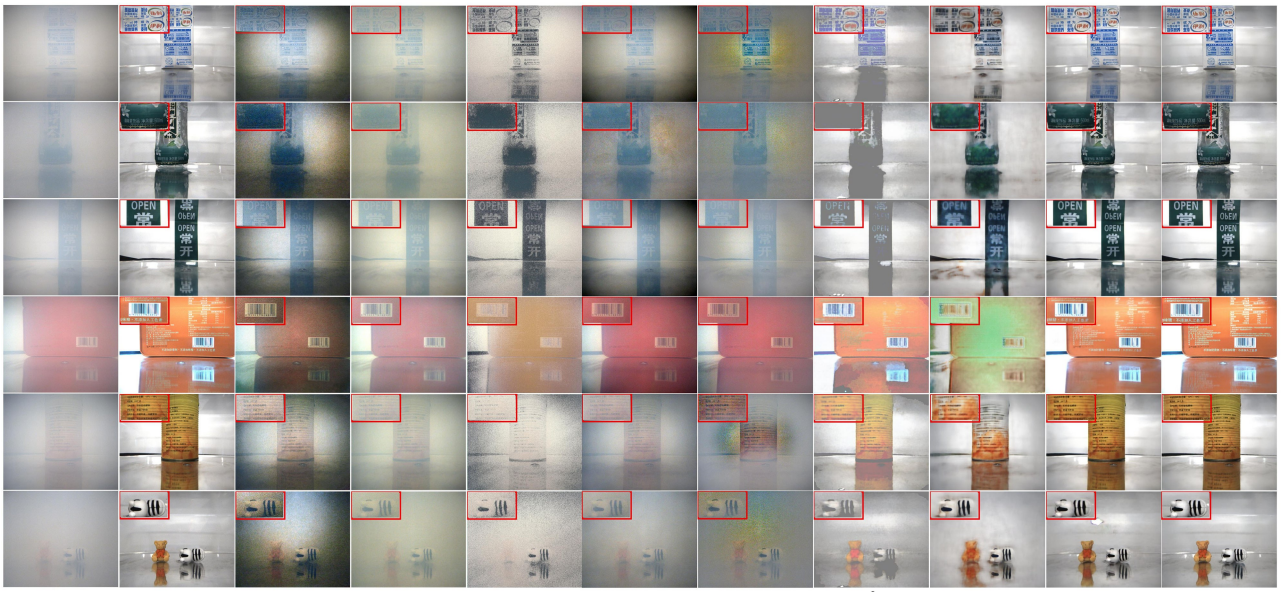
2.2 评价指标

本文采用SSIM、峰值信噪比(peak signal-to-noise ratio, PSNR)和学习感知图像块相似度(learned perceptual image patch similarity, LPIPS)评估复原效果。SSIM综合亮度、对比度与结构信息衡量图像间的结构相似程度,SSIM越接近1,表示复原图像与参考图像在结构分布上越一致,结构保持效果越好,对结构失真的反映能力越强。PSNR是基于像素级均方误差计算得到的经典全参考保真指标,反映复原图像与参考图像之间的误差水平,通常以分贝(dB)为单位,PSNR值越高,说明复原图像与参考图像之间的像素误差越小,整体失真越弱、保真度越高。LPIPS基于AlexNet提取高层深度特征,从感知层面衡量图像语义差异,输入经归一化与尺寸对齐后计算,LPIPS值越低表示两图感知相似度越高,对细节质量评价更敏感。

2.3 水下图像复原效果分析

为了验证本文所提方法的有效性,从测试集中选取6组涵盖不同目标材质的典型水下偏振图像为测试样本,将本文方法与近年来应用广泛的水下图像复原方法(USID-Net[18]、HALP[19]、PSD-NET[20]、YOLY[21]、SwinIR[22]、U^{2}PNet[23]、DA-NET[24]和DBGAN[25])进行比较,结果如图9和表2所示。

由图9和表2可知,各方法在浑浊水下图像复原中的表现呈现明显差异。USID-Net、HALP和SwinIR仅能在一定程度上改善图像能见度,对严重浑浊区域的处理效果有限,且部分结果存在颜色过饱和或失真问题;YOLY、PSD-Net和U^{2}PNet的画面清晰度提升更为显著,但仍残留部分浑浊感,同时在纹理细节处易出现过度锐化或伪影现象;DA-NET和DBGAN展现出较强的水下复原能力,但在部分图像上存在轻度颜色偏移,或在平滑区域产生不自然纹理。本文方法在视觉效果上最接近真实清晰水下图像,不仅有效去除了严重浑浊干扰,恢复了清晰的物体轮廓和细节,并且色彩还原更为真实自然,整体画面通透、细节丰富;量化指标同样全面最优,SSIM达到0.854 0,PSNR达32.93 dB,LPIPS低至0.363 3,大幅优于次优方法,表明其在结构完整性、整体保真度、复杂纹理保真度及目标轮廓清晰度等方面均实现了最佳复原效果。



(a) 原图　(b) GT　(c) USID-Net　(d) HALP　(e) SwinIR　(f) YOLY　(g) PSD-NET　(h) U^{2}PNet　(i)DA-NET　(j) DBGAN　(k)本文方法

图 9　不同方法在测试集上的复原效果对比

Fig. 9　Comparison of restoration performance of different methods on test set

表 2　不同方法的效率与视觉质量评估指标对比

Table 2　Comparison of efficiency and visual quality evaluation metrics of different methods

方法	参数量/10^6 个	FLOPs/10^{12} 次	推理时间/s	显存占用/G	SSIM	PSNR/dB	LPIPS
USID-Net	14.40	0.139	2.08	14.80	0.350 3	11.50	0.704 0
HALP	0	0.121	0.86	0.72	0.546 3	18.44	0.499 1
SwinIR	11.87	4.709	90.50	20.40	0.549 5	19.46	0.636 7
YOLY	10.52	0.198	34.32	8.30	0.665 0	17.10	0.728 2
PSD-Net	7.64	0.238	42.36	8.90	0.688 6	13.54	0.737 0
U^{2}PNet	7.24	0.374	39.28	9.50	0.751 1	23.91	0.532 5
DA-NET	0.79	0.137	3.24	1.33	0.760 6	21.99	0.476 9
DBGAN	6.07	0.672	7.73	0.95	0.825 5	30.45	0.459 1
本文方法	2.55	1.479	34.91	5.83	0.854 0	32.93	0.363 3

此外,尽管本文方法在输入模态上包含偏振特征,但通过 RGB-only 对照与等信息量消融实验验证,性能提升主要来源于偏振物理信息的有效利用,而非输入维度差异,充分验证了本文方法在浑浊水下区域的优越性能。需要说明的是,HALP 是基于 MATLAB 的传统先验方法,不依赖可训练权重,所以其参数量记为 0,而 FLOPs 和时间消耗反映的是算法复杂度,而非神经网络推理。

2.4　模型效率与参数量分析

为评估模型在实际部署中的效率与可扩展性,本文分析了模型在不同输入尺寸下的推理效率特性,使用数据集中原始分辨率为 1 224×1 024 像素的偏振图像,通过双线性插值将输入特征调整至不同尺寸,测试分辨率涵盖 256×256 像素至 1 920×1 080 像素共 9 种常见尺寸。测试过程中,每个分辨率进行 50 次推理取平均值,测试结果仅包含模型前向传播时间,不包括数据加载与预处理开销,结果见表 3。

由表 3 可知,模型的 FLOPs 与输入图像的像素数量呈现出高度线性的增长关系。当分辨率从 256×256 像素增至 1 920×1 080 像素(像素数约增加到原来的 31.6 倍)时,FLOPs 从 77.31×10^9 次同步增长至 2 446.27×10^9 次(约 31.6 倍),表明模型成功避免了标

表 3　不同输入尺寸下推理时间和效率对比

Table 3　Comparison of inference time and efficiency under different input sizes

图像大小/像素	FLOPs/10^9 次	推理时间/s	显存占用/MB
256×256	77.31	1.62	325.60
512×512	309.26	6.93	1 239.85
642×480	362.41	8.09	1 448.60
800×600	566.27	13.05	2 255.15
1 024×768	927.77	21.33	3 669.85
1 024×1024	1 237.03	28.56	4 883.85
1 224×1 024	1 478.63	34.94	5 834.10
1 280×720	1 087.23	25.28	4 296.10
1 920×1 080	2 446.27	60.77	9 641.13

准 Transformer 架构中常见的计算复杂度二次方增长问题,具备了良好的可扩展性基础。推理时间的变化与计算复杂度趋势基本一致,但增长曲线更为平缓。分辨率提升至原来的 31.6 倍时,推理时间从 1.62 s 增加至 60.77 s(约为 37.5 倍),时间缩放效率(像素数增幅/时间增幅)约为 0.84。在 512×512 像素及 642×480 像素等中等分辨率下,推理时间分别为 6.93 s 和 8.09 s;而在 1024×768 像素分辨率下为 21.33 s,表明模型在当前实现阶段适用于对实时性要求不高的离线图像处理任务。若要满足更高帧率的实时视频处理,则需通过进一步的模型优化或硬件加速来实现。显存占用方面,本文方法同样表现出优异的可管理性。显存需求从 325.60 MB(256×256 像素)增长至 9641.13 MB(1920×1080 像素)(约 29.6 倍),略低于像素数量的增长比例,体现了其亚线性的显存增长特性。

综上,本文方法在不同输入尺寸下均展现出可预测且可控的计算资源增长规律,在效率和性能之间实现了更优平衡,为在不同计算资源约束下的实际应用提供了良好的可扩展性。

2.5 消融实验

为分析本文方法中不同设计对复原性能的影响,在统一训练配置下设计两组消融实验:一组对网络结构设计进行消融分析,另一组针对损失函数设计进行消融分析。

2.5.1 网络结构设计

网络结构设计主要包括输入特征消融和核心模块消融,实验设置了基线模型、基线模型+偏振自适应融合模块、基线模型+门控融合模块、基线模型+全局-多尺度特征增强模块及所有模块联合使用(本文方法),结果如图 10 所示。单 RGB 图像作为输入模型时,复原结果整体偏暗、细节模糊,红框区域内文字与条形码均难以辨认,对应 SSIM、PSNR 和 LPIPS 分别为 0.7215、24.38 dB 和 0.4872,3 项指标均为最差,表明单 RGB 输入在浑浊水体场景下难以起到理想的复原效果。图 10(d)对应基线模型,整体亮度与可视性较单 RGB 输入有所改善,但细节与色彩恢复仍有限,红框内文字、条形码依旧模糊,对应 3 项指标分别为 0.7436、25.59 dB 和 0.4367,说明偏振多通道信息可有效补充特征、提升基础复原性能,但基础卷积结构仍难以应对浑浊水体场景。引入偏振自适应融合模块后,图 10(e)的图像质量提升显著,红框内文字边缘更清晰、条形码辨识度明显提高,该模块带来的量化提升幅度同样最大,SSIM 升至 0.7992,PSNR 升至 28.51 dB,LPIPS 降至 0.3853,验证了其在特征重组与动态加权上的优势,可有效增强边缘提取与细节恢复能力。引入门控融合模块后,图 10(f)清晰度较基线模型进一步提升,但罐头标签“OPEN”字符边缘仍有轻微扭曲,对应 SSIM、PSNR 和 LPIPS 分别为 0.7660、26.63 dB 和 0.4194,说明门控机制通过选择性信息传递优化了特征表达,但细粒度结构保护仍有优化空间。引入全局-多尺度特征增强模块后,图 10(g)细节恢复与边缘锐利度表现突出,但绿茶瓶底部仍存在倒影噪声,对应 SSIM 为 0.7738、PSNR 为 26.52 dB、LPIPS 为 0.4057,表明多尺度特征融合强化了细节复原能力,但对真实边缘与噪声的区分能力仍需加强。整合全部核心模块后,图 10(h)取得了最佳复原效果:视觉层面,图像整体清晰自然、色彩真实,既消除了字符边缘畸变,也显著抑制了倒影噪声,牛奶盒纹理、瓶身光泽、泰迪熊毛发等细节还原准确;量化层面,本文方法呈现出显著的协同增益效应,SSIM、PSNR 和 LPIPS 分别达到 0.8540、32.93 dB 和 0.3633,3 项指标均为最优,充分验证了各模块在特征融合、信息筛选、多尺度建模上的互补性与有效性。综上,本文方法能够稳定生成高质量复原图像,实现了网络输出质量与整体性能的显著提升。

2.5.2 损失函数设计

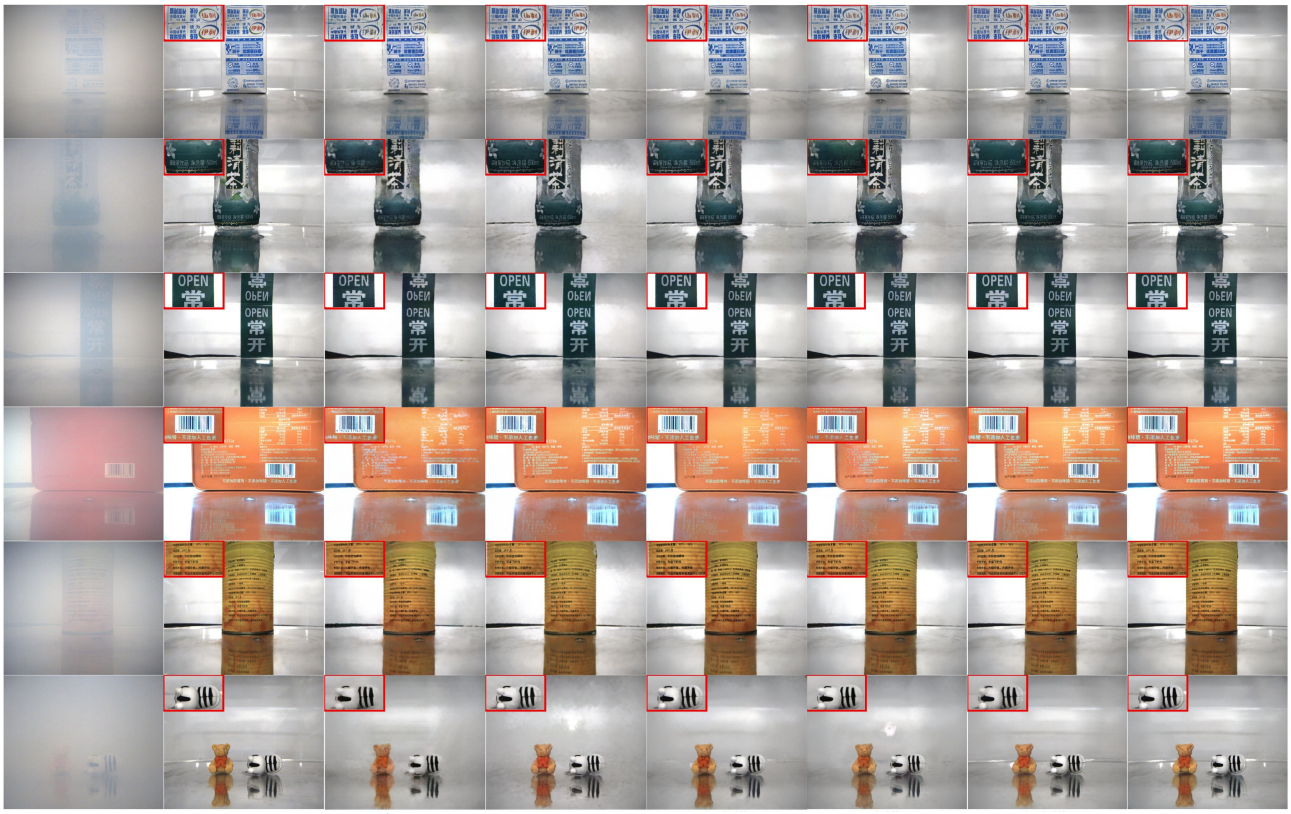
为分析损失函数构造对模型复原性能的影响,本文围绕损失权重设置和 DoLP 加权策略开展消融实验。由表 4 可知,不同权重组合会对模型的复原性能产生明显影响。当 $\alpha=\beta=0.5$ 时,模型在 SSIM、PSNR 和 LPIPS 3 项指标上分别达到 0.8540、32.93 dB 和 0.3633,综合表现优于 $\alpha=0.3$、$\beta=0.7$ 和 $\alpha=0.7$、$\beta=0.3$ 两组配置。该结果表明,像素级重建约束与结构相似性约束在等权重设置下能够取得较好的平衡,从而使模型在保持图像整体保真度的同时兼顾结构一致性。若过度偏向某一项损失,容易导致模型对另一类约束的关注不足,进而影响复原结果的综合质量。

表 4 权重敏感性分析结果

Table 4 Results of weight sensitivity analysis

α	β	SSIM	PSNR/dB	LPIPS
0.7	0.3	0.8501	32.67	0.3689
0.5	0.5	0.8540	32.93	0.3633
0.3	0.7	0.8480	32.45	0.3712

在 $L_{L1}+L_{SSIM}$ 的基础上引入 DoLP 加权后,模型在 SSIM、PSNR 和 LPIPS 3 项指标上均有所改善,SSIM 由



（a）原图　（b）GT　（c）单RGB图像输入模型　（d）基线模型　（e）基线模型+PFAFM　（f）基线模型+GFM　（g）基线模型+GMFEM　（h）本文方法

注:PFAFM 为偏振自适应融合模块,GFM 为门控融合模块,GMFEM 为全局-多尺度特征增强模块,下同。

图 10　输入特征与核心模块消融实验对比

Fig. 10　Comparison of ablation experiments on input features and core modules

0.832 1 提升至 0.854 0,PSNR 由 31.85 dB 提升至 32.93 dB,LPIPS 由 0.385 6 降至 0.363 3。该结果说明,DoLP 加权策略能够有效增强损失函数对偏振物理信息的利用能力,使网络在训练过程中更加关注物理信息丰富且结构特征明显的区域。

综上,合理的权重设置能够协调像素级重建与结构保持之间的关系,而 DoLP 加权策略则增强了模型对偏振先验的响应能力,二者共同作用,增强了损失函数对图像复原过程的约束能力。

2.6　模型可解释性

为深入解析模型的决策机制并验证网络架构的有效性,实验在测试集中选取 3 组具有不同材质特性的图像样本,从通道重要性、Grad-CAM 热力图及 Transformer 注意力分布 3 个维度,对模型开展可解释性分析,以系统评估模型在多样化场景下的感知一致性。

2.6.1　通道重要性分析

为评估各通道对最终性能的贡献,提取通道注意力模块的权重分布,并对测试样本的通道权重取平均。表 5 为权重排名前 10 的通道,Top10 通道的平均权重达到 0.73,表明约 30%的通道对复原性能具有显著影响。通道 15、78、24 的权重分别为 0.787、0.748、0.746,显著高于其他通道,说明通道注意力机制能够有效识别关键通道,自适应地增强重要特征并抑制噪声。

表 5　通道重要性统计表(前 10)

Table 5　Channel importance statistics (Top 10)

排名	通道编号	平均注意力权重	排名	通道编号	平均注意力权重
1	15	0.787	6	2	0.709
2	78	0.748	7	10	0.701
3	24	0.746	8	83	0.692
4	122	0.729	9	28	0.684
5	25	0.722	10	8	0.680

2.6.2　Grad-CAM 决策区域分析

为识别模型决策所关注的关键区域,采用 Grad-CAM 生成热力图。通过计算特征图对输出的梯度权重,与特征图加权求和并经 ReLU 激活后上采样,叠加至输入图像的 S_0 通道。如图 11 所示,热力图高响应区域

主要覆盖产品文字信息、物体整体轮廓与边缘细节,背景响应强度低,可有效抑制噪声。模型决策区域与人类视觉感知基本一致,能够从模糊输入图像中准确识别和定位关键特征。

2.6.3 Transformer 注意力可视化

为解析 Transformer 的全局建模机制,提取多头自注意力权重,经平均、重构与上采样生成热力图,如图 12 所示。

Transformer 注意力集中于产品文字标签、物体边缘轮廓等关键结构区域,即使输入模糊仍可实现精准定位,同时显著抑制背景区域注意力以突出关键信息。实验结果表明,Transformer 能在浑浊度变化显著区域建立长程空间依赖,聚焦复原效果的关键部位,对全局一致性恢复具有重要作用。

可解释性分析从机制层面验证了本文模型设计的合理性与有效性:通道注意力机制可自适应筛选关键特征通道,凸显特征优化能力;Grad-CAM 结果表明模型决策与人类视觉感知相契合,解释了感知质量指标 LPIPS 的提升原因;Transformer 可建立长程空间依赖,聚焦关键复原区域。各模块协同作用是实现良好复原性能的根本原因,也为后续方法的进一步优化提供了理论依据。

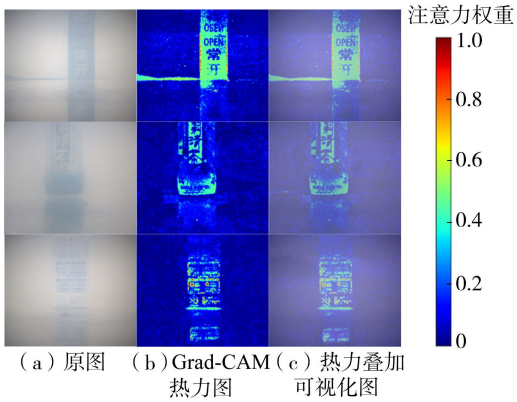


图 11 Grad-CAM 注意力热力图

Fig. 11 Grad-CAM attention heatmap

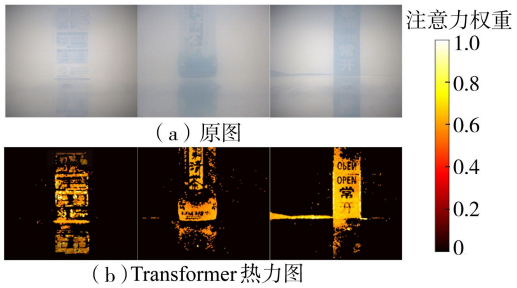


图 12 Transformer 注意力热力图

Fig. 12 Transformer attention heatmap

3 结 语

本文提出了一种面向偏振图像复原的多分支融合深度网络方法。针对偏振图像多通道特性与复原任务的实际需求,设计偏振特征自适应融合模块以提升偏振信息利用率,构建双分支结构并引入动态门控融合模块实现偏振与空间分支特征的自适应加权融合,集成 Transformer 全局建模与多尺度特征融合模块以弥补卷积网络局部感受野不足的问题,结合通道注意力与全局上下文建模增强特征关注与全局一致性,提出偏振感知损失函数保障偏振特征还原与物理一致性。实验表明,该方法有效提升了复原图像的视觉质量和物理一致性,显著优于传统方法和基础网络结构;但在深海弱光、非均匀强浑浊环境等超复杂水下场景的性能表现及低算力设备的实时应用场景中仍需进一步验证,未来将持续丰富多场景偏振图像的采集与标注以提升模型场景普适性,探索轻量化网络架构与高效推理策略,并尝试与水下三维重建等任务的融合以拓展技术应用边界。

参考文献:

[1] Song Wei, Liu Yaling, Huang Dongmei, et al. From shallow sea to deep sea: research progress in underwater image restoration [J]. Frontiers in Marine Science, 2023, 10: 1163831.

[2] Guo Yecai, Li Hanyu, Zhuang Peixian. Underwater image enhancement using a multiscale dense generative adversarial network [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2020, 45(3): 862-870.

[3] Kong Weifeng, Huo Guanying. Application research of polarization imaging technology in inhomogeneous media/material: a review [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2025, 194: 109113.

[4] Yi Xunpeng, Xu Han, Zhang Hao, et al. Diff-Retinex: rethinking low-light image enhancement with a generative diffusion model [C]//2023 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). Paris: IEEE, 2023: 12268-12277.

[5] 许丽,陆桂明,邱贞光. 结合细节信息的自适应 Retinex 算法水下图像增强[J]. 计算机工程与应用, 2022, 58(11): 224-233. (Xu Li, Lu Guiming, Qiu Zhenguang. Adaptive Retinex algorithm based on detail selection used in underwater image enhancement[J]. Computer Engineering and Applications, 2022, 58(11): 224-233. (in Chinese))

[6] Sun Yue, Jin Yutao, Chen Xiaoyan, et al. Unsupervised detail and color restorer for Retinex-based low-light image enhancement [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2025, 153: 110867.

[7] Liu Mingzhu, Chen Junyu, Han Xiaofei. Research on Retinex algorithm combining with attention mechanism for image

enhancement[J]. Electronics,2022,11(22):3695.
[8] Jiang Yonglong,Zhu Jiahe,Li Liangliang,et al. A joint network for low-light image enhancement based on Retinex[J]. Cognitive Computation,2024,16(6):3241-3259.
[9] 杨海潮,李新凯,张宏立,等. 结合亮度约束的双分支结构暗光图像增强算法[J]. 计算机工程与应用,2025,61(8):250-259. (Yang Haichao,Li Xinkai,Zhang Hongli,et al. Dual-branch structure low-light image enhancement algorithm combined with brightness constraint[J]. Computer Engineering and Applications,2025,61(8):250-259. (in Chinese))
[10] Cui Yuning,Ren Wenqi,Cao Xiaochun,et al. Revitalizing convolutional network for image restoration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2024,46(12):9423-9438.
[11] Ouyang Xu,Chen Ying,Zhu Kaiyue,et al. Image restoration refinement with Uformer GAN[C]//2024 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW). Seattle:IEEE,2024:5919-5928.
[12] 白岗岗,侯精明,韩浩,等. 基于深度学习的道路积水智能监测方法[J]. 水资源保护,2021,37(5):75-80. (Bai Ganggang,Hou Jingming,Han Hao,et al. Intelligent monitoring method for road inundation based on deep learning[J]. Water Resources Protection,2021,37(5):75-80. (in Chinese))
[13] 曾诚,尹雨然,周婕,等. 基于二阶规则波模拟的数值波浪水槽优化[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(4):33-40. (Zeng Cheng,Yin Yuran,Zhou Jie,et al. Optimization of a numerical wave tank based on simulations of 2nd order regular waves[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(4):33-40. (in Chinese))
[14] 朱跃龙,赵群,余宇峰,等. 基于时空特征挖掘的流量过程智能模拟方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):7-12. (Zhu Yuelong,Zhao Qun,Yu Yufeng,et al. Intelligent simulation method of runoff process based on spatiotemporal feature mining[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(1):7-12. (in Chinese))
[15] 王红瑞,魏豪杉,胡立堂,等. 基于遗传算法的 SVM-AR 改进模型与应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(6):488-497. (Wang Hongrui,Wei Haoshan,Hu Litang,et al. Improved model and application of SVM-AR based on genetic algorithm [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(6):488-497. (in Chinese))
[16] 李凡,刘晨阳,孙智博,等. 基于端到端深度学习网络的大容量图像隐写算法[J]. 北京航空航天大学学报,2026,52(7):2621-2629. (Li Fan,Liu Chenyang,Sun Zhibo,et al. A high-capacity image steganography algorithm based on end-to-end deep learning networks[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2026,52(7):2621-2629. (in Chinese))
[17] 张珂,牛杰帆,李曦,等. 洪水预报智能模型在中国半干旱半湿润区的应用对比[J]. 水资源保护,2021,37(1):28-35. (Zhang Ke,Niu Jiefan,Li Xi,et al. Comparison of artificial intelligence flood forecasting models in China's semi-arid and semi-humid regions[J]. Water Resources Protection,2021,37(1):28-35. (in Chinese))
[18] Li Jiafeng,Li Yaopeng,Zhuo Li,et al. USID-Net:unsupervised single image dehazing network via disentangled representations [J]. IEEE Transactions on Multimedia,2023,25:3587-3601.
[19] He Yufeng,Li Cuili,Li Xu. Remote sensing image dehazing using heterogeneous atmospheric light prior[J]. IEEE Access,2023,11:18805-18820.
[20] Shi Yingjie,Guo Enlai,Bai Lianfa,et al. Polarization-based haze removal using self-supervised network[J]. Frontiers in Physics,2022,9:789232.
[21] Li Boyun,Gou Yuanbiao,Gu Shuhang,et al. You only look yourself:unsupervised and untrained single image dehazing neural network[J]. International Journal of Computer Vision,2021,129(5):1754-1767.
[22] Liang Jingyun,Cao Jiezhang,Sun Guolei,et al. SwinIR:image restoration using Swin transformer[C]//Proceedings of the 2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshops(ICCVW). Montreal:IEEE,2021:1833-1844.
[23] Shen Linghao,Xia Haisheng,Zhang Xun,et al. U^2PNet:an unsupervised underwater image-restoration network using polarization [J]. IEEE Transactions on Cybernetics,2024,54(9):5164-5177.
[24] Kim N,Choi I S,Han S S,et al. DA-Net:dual attention network for haze removal in remote sensing image[J]. IEEE Access,2024,12:136297-136312.
[25] Desai C,Tabib R S,Reddy S S,et al. RUIG:realistic underwater image generation towards restoration[C]//Proceedings of the 2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW). Nashville:IEEE,2021:2181-2189.

(收稿日期:2025-07-31　编辑:刘晓艳)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.05.007

空化工况下喷水推进泵非稳定流动及熵产分析

张 睿,王正欣,邢静艺,徐 辉,丁旭洁,李剑平,陈邦华,李 森

(河海大学农业科学与工程学院)

摘要:为探究空化对喷水推进泵内部非稳定流动及能量损失特性的影响,基于非定常雷诺时均方程(URANS),采用 FBM-CC 湍流模型和 ZGB 空化模型对其内部空化流场进行了非定常计算,结合边界涡量流诊断和熵产理论分析了典型空化工况下的非稳定流动及能量损失特性。结果表明:所采用的数值模拟方法对喷水推进泵空化流动计算具有良好的精度;随着汽蚀余量降低,空化从间隙空化发展至楔形空化,在深度空化工况时(汽蚀余量为 11.32 m),空化几乎覆盖整个叶片吸力面,诱发叶顶泄漏涡发生断裂并形成堵塞流道的空化诱导涡,空化末端存在强逆压梯度,叶顶尾缘出现流线扭曲与流动分离;空化初期能量损失以壁面摩擦为主,在深度空化工况时湍流耗散成为主要贡献项且湍流耗散熵产占比较初始空化提升 5%,此时尾流的流动分离及空化引起的涡流成为能量损失的主要来源。

关键词:喷水推进泵;空化;非稳定流动;熵产;数值模拟

中图分类号:TV136.2 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-1980(2026)05-0060-09

Analysis of unsteady flow and entropy generation in a water-jet pump under cavitating conditions

Zhang Rui, Wang Zhengxin, Xing Jingyi, Xu Hui, Ding Xujie, Li Jianping, Chen Banghua, Li Sen

(*College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University*)

Abstract: To investigate the impact of cavitation on the unsteady flow and energy loss characteristics in a water-jet pump, the unsteady calculations of its internal cavitating flow field were carried out based on the unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes (URANS) equations, adopting the FBM-CC turbulence model and ZGB cavitation model. The unsteady flow and energy loss characteristics under typical cavitation conditions were analyzed by combining the boundary vorticity flux diagnosis and entropy generation theory. The results show: The adopted numerical simulation method has good accuracy for the calculation of cavitating flow in the water-jet pump; as the net positive suction head decreases, cavitation develops from clearance cavitation to wedge-shaped cavitation; under the deep cavitation condition (the net positive suction head is 11.32 m), cavitation covers almost the entire blade suction surface, inducing the fracture of the tip leakage vortex and the formation of cavitation-induced vortices that block the flow passage; a strong adverse pressure gradient exists at the cavitation end, and streamline distortion and flow separation appear at the tip trailing edge; in the initial stage of cavitation, the energy loss is dominated by wall friction; under the deep cavitation condition, turbulent dissipation becomes the main contributor, and the entropy generation of turbulent dissipation increases by 5% compared to the initial cavitation; at this time, the flow separation of the wake and the vortex caused by cavitation become the main sources of energy loss.

Key words: water-jet pump; cavitation; unsteady flow; entropy generation; numerical simulation

喷水推进凭借其优异的高速水动力性能和推进倒航的双重功能,在军用舰艇及高性能船舶上得到较为广泛的应用[1]。作为喷水推进器的核心部件,喷水推进泵的水动力性能,无论是过流能力、功率密度,还是效率和抗空化能力较通用水泵具有更高的要求。空化是喷水推进泵内部常见水力现象,会导致喷水推进泵性能下降、产生振动与噪声[2],若喷水推进泵长期在空化工况下运行,还会造成叶片表面剥蚀损坏,严重危及喷水推进泵运行安全和使用寿命[3-4]。

空化的产生会对喷水推进泵内部流动的稳定性等产生不利影响。Chen 等[5]探讨了轴流式喷水推进泵的空蚀破坏机理,发现空化破裂与叶片吸力面上的附着空化相关,空化破坏与叶片吸力面上附着的空化快速膨胀至叶片重叠区域有关。Zhao 等[6]结合试验和数值模拟研究喷水推进泵的空化流动特性,结果表明随着

基金项目:国家自然科学基金项目(51809081)

作者简介:张睿(1984—),男,副教授,博士,主要从事水能开发利用研究。E-mail:gulie1984@163.com

空化数的降低,叶片表面空化逐渐扩大并且堵塞了叶轮通道,进而改变了压力梯度分布和流速均匀程度。徐顺等[7]模拟了空化工况下的喷水推进泵内部流场,发现当空化数达到临界值时,空化开始堵塞流道,导致泵外特性参数下降,并结合涡量输运方程发现涡拉伸项极大程度影响了流场的涡量分布,黏性耗散项在叶顶间隙处数值较大。喷水推进泵内流体的黏性及湍流脉动会产生能量损失,因此能量损失与泵内不良流动现象之间存在关联。Yang 等[8-9]利用熵产理论对轴流泵能量损失特性进行分析,发现叶轮段的能量损失占比最大,湍流耗散熵产在总熵产中占据主导地位,流动冲击、流动分离、漩涡和回流是能量损失的主要来源。严春飞等[10]基于熵产理论对离心泵流场能量特性进行分析,发现叶轮区的主要能量损耗形式为湍流熵产与壁面熵产;温度升高加剧空化发展,进而增大能量损失,该损失主要分布于空泡下游区域、局部流动分离区及漩涡区。郭嫱等[11]研究发现随着空化加剧,喷水推进泵叶轮段在熵产贡献中越发占据主导地位,其中湍流耗散与壁面耗散尤为突出。许哲等[12]研究表明双向低扬程卧式轴流泵中叶轮区域的熵产贡献最为显著,这主要归因于其内部较大的速度梯度及强烈的动静干涉效应。Yu 等[13]基于熵产理论分析,发现空化诱导的轴流泵叶轮吸力侧流动分离引发局部高能量耗散,随着空化加剧,分离区从叶尖向轮毂扩展,进一步加剧能量损失并促进叶尖分离泄漏涡的发展。

现有研究对空化工况下喷水推进泵的流动与能量损失特性之间的定量关系尚缺乏深入探讨,因此为研究空化工况下喷水推进泵非稳定流动机理以及泵内能量损失特性,本文采用 FBM-CC 湍流模型和 ZGB 空化模型对其内部流场进行非定常计算,分析不同空化工况下叶轮通道及叶片表面流动特性的演变规律,并基于熵产理论探究空化工况下泵内能量损失特性,以期为优化喷水推进泵空化性能提供新的研究思路和有力的理论支撑。

1　数值模拟方法

1.1　几何模型与网格划分

本文所研究的喷水推进泵三维几何模型如图 1(a)所示,其计算域包括进水管、叶轮室、导叶体、出水管。喷水推进泵的主要几何及性能参数为:叶轮叶片数为 6、导叶叶片数为 8、进水管直径 D_1 为 304.8 mm、出口管直径 D_2 为 213.4 mm、叶轮转速 n 为 2 000 r/min、设计流量 Q_d 为 0.802 m^3/s、叶顶间隙尺寸 δ 为 0.51 mm。喷水推进泵计算网格如图 1(b)所示,采用六面体结构化网格,其中叶轮叶片采用 H 型拓扑结构,叶顶近壁面采用 O 型拓扑并局部加密以保证间隙泄漏涡所在区域的网格离散度较高。采用基于理查德森外推法的 GCI 方法,引入无量纲化的扬程系数 H^*、功率系数 P^* 以及效率 η 进行网格误差评估:

$$H^* = \frac{P_2 - P_1}{\rho(nD_1)^2} \tag{1}$$

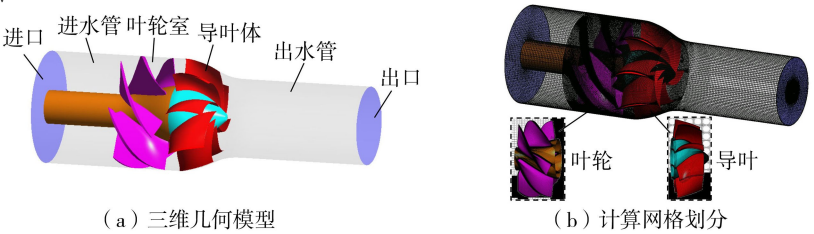
$$P^* = \frac{2\pi nM}{\rho n^3 D_1^5} \tag{2}$$

$$\eta = \frac{Q^* H^*}{P^*} \tag{3}$$

其中

$$Q^* = \frac{Q_v}{nD_1^3}$$

式中:P_1、P_2 分别为喷水推进泵进、出口断面总压;ρ 为常温水的密度,997 kg/m^3;M 为泵轴扭矩;Q^* 为无量纲化的流量系数;Q_v 为泵的体积流量。



(a) 三维几何模型　　(b) 计算网格划分

图 1　喷水推进泵的三维几何模型及计算网格示意图

Fig. 1　Schematic diagram of three-dimensional geometric model and computational mesh for a water-jet pump

选取3套网格方案,网格数分别为 $N_1=1\,584\,976$,$N_2=3\,502\,472$,$N_3=8\,023\,792$。以设计流量(Q_d)工况的非空化流场为例进行网格无关性验证,计算得到的 H^*、P^* 以及 η 的网格收敛指数分别为1.04%、0.77%和1.26%,均小于1.5%[14],由此确定满足收敛准则计算方案的网格数为8 023 792。

1.2 计算方法与边界条件设置

本文基于非定常雷诺时均方程(URANS)、采用FBM-CC湍流模型[15]和ZGB空化模型[16]对喷水推进泵内部非稳定多尺度空化流动进行数值计算。喷水推进泵内的空化程度可根据汽蚀余量[17]确定,在进行喷水推进泵非稳态空化流动的计算时,不断降低汽蚀余量直至喷水推进泵内部空化发生和发展。

对于边界条件,流体介质为25℃时的水,计算域的进口边界采用总压进口、出口边界为流量出口,其中本文以设计流量工况为例进行研究,故出口流量为 Q_d。计算域内动静交界面采用瞬态转子-静子模型,固壁采用无滑移壁面条件,采用可缩放壁面函数处理近壁面流动。非定常计算时间步长为 8.33×10^{-5} s(叶轮旋转1°),计算总时长为15个叶轮旋转周期,将最后5个旋转周期内获取的速度、压力、湍动能等流场物理量进行时均处理。

2 计算结果与分析

2.1 计算结果验证

图2所示的是试验测量[18]和本文数值模拟计算获得的喷水推进泵空化性能对比。由图2可知,当汽蚀余量由20 m降至12.54 m时,喷水推进泵的空化性能基本保持不变;随着汽蚀余量持续降低,效率开始呈现显著下降趋势;数值模拟结果与试验测量曲线吻合效果较好且误差在3%以内,因此本文所采用的数值模拟方法具有良好的预测精度。为了进一步分析不同空化工况下喷水推进泵内部流动及能量损失特性,分别选取3个典型的空化工况点:汽蚀余量分别为15.37 m(初始空化)、12.54 m(临界空化)、11.32 m(深度空化)进行研究。

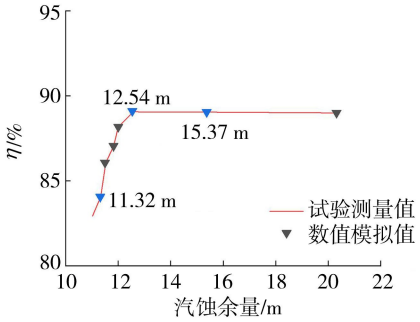


图2 喷水推进泵的空化性能对比

Fig. 2 Comparison of cavitation performance of a water-jet pump

2.2 空化流动特性分析

图3为试验测量[18]和数值模拟获得的3种典型工况下的叶轮室内的空化形态,其中空化区域由汽相体积分数 $\alpha_v=0.1$ 的等值面显示。由图3可知,汽蚀余量为15.37 m时,间隙空化产生并逐渐向下游发展;汽蚀余量为12.54 m时,间隙空化的长度约为叶顶弦长的1/2(红色虚线所示),吸力面前缘及间隙区域内出现空化,从试验结果中可以观测到明显的泄漏涡空化现象;汽蚀余量为11.32 m时,空化区域持续增大,吸力面的叶片表面空化迅速扩大,形成明显的楔形空化区域。3种典型工况下叶片吸力面的空化面积变化规律如图4所示,汽蚀余量为15.37 m时吸力面无明显空化,此时空化形态主要体现为间隙空化;随着汽蚀余量的减小,叶片吸力面空化范围持续扩大,当汽蚀余量为11.32 m时,叶片表面空化程度加剧,叶片吸力面空化范围已



图3 不同空化工况下的空化形态

Fig. 3 Cavitation morphology under different cavitation conditions

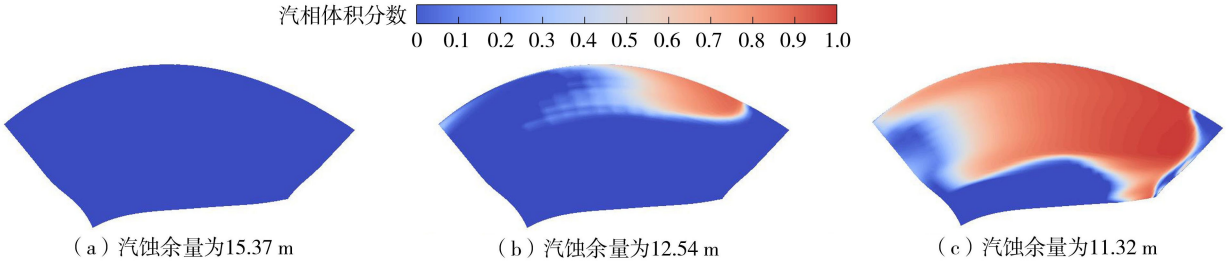


图 4　不同空化工况下吸力面空化分布

Fig. 4　Cavitation distribution on suction surface under different cavitation conditions

经延伸至尾缘处。

图 5 为不同空化工况叶顶间隙泄漏涡形态及三维流线分布,涡形态采用 λ_2 的等值面[19]显示。由图 5 可知,汽蚀余量为 15.37 m 时,叶顶处流线表现出螺旋结构,同时受到尾涡影响(黑色虚线)尾缘区域的流速降低;汽蚀余量为 12.54 m 时,结合图 3 可知,叶顶间隙空化程度加剧,促使叶顶泄漏涡强度增大,进而使得叶顶间隙流线扭曲程度增强,同时叶片吸力面中后部出现游离涡;汽蚀余量为 11.32 m 时,叶顶间隙处空化与涡相互作用使得间隙泄漏涡发生断裂,叶片尾缘处出现空化诱导涡(红色实线)且其向相邻叶片迁移过程中造成流道堵塞,从而导致喷水推进泵的性能迅速下降。随着汽蚀余量的减小,叶顶间隙空化程度加剧,势必会对叶顶间隙内的流动产生影响。选取单个叶片,对其叶顶间隙界面进行时均质量流量积分以获取单个叶片的泄漏流量值。统计分析发现,当汽蚀余量分别为 15.37、12.54、11.32 m 时,单个叶片叶顶间隙泄漏流量为 1.47、1.42、1.25 L/s。因此,随着汽蚀余量减小,叶顶间隙泄漏流量呈现下降趋势。

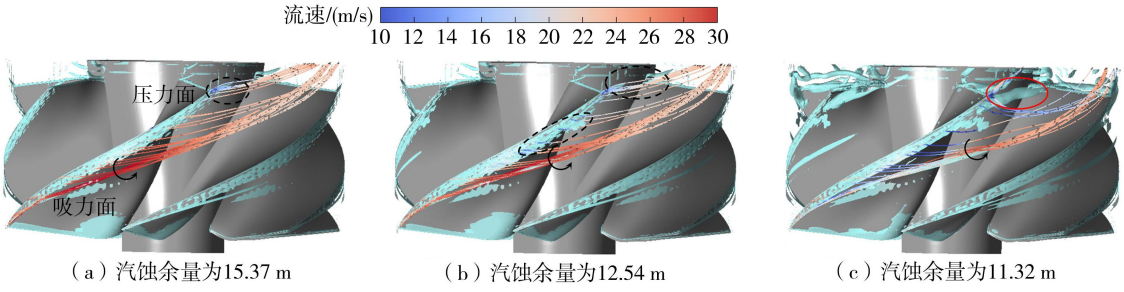


图 5　不同空化工况下叶顶间隙泄漏涡流结构($\lambda_2=-2\times10^6\ s^{-2}$)

Fig. 5　Vortex structures of tip clearance leakage under different cavitation conditions ($\lambda_2=-2\times10^6\ s^{-2}$)

为进一步研究空化对叶轮内部非稳定流动特性的影响,选取不同弦长位置截面,对流速与湍动能进行分析,如图 6 和图 7 所示,图中对叶片总弦长 l 作无量纲化处理,c/l 的取值范围为[0,1],表示从叶片前缘到尾缘。随着空化的发展,下游截面的低速区域增加,流速分布不均,湍动能增加,低速区及湍动能峰值集中在空化涡附近。结合图 5 可知,间隙分离涡处于湍动能峰值区域。泄漏射流区及吸力面一侧的主流区流速较大,但湍动能较小;两者之间的泄漏剪切区域流速较小,但湍动能取峰值,说明流速与湍动能大小关联性较低。当汽蚀余量为 11.32 m 时,在 $c/l=1.0$ 截面位置处,叶片表面空化形成的低速区扩大(图 6 中红色实线),低

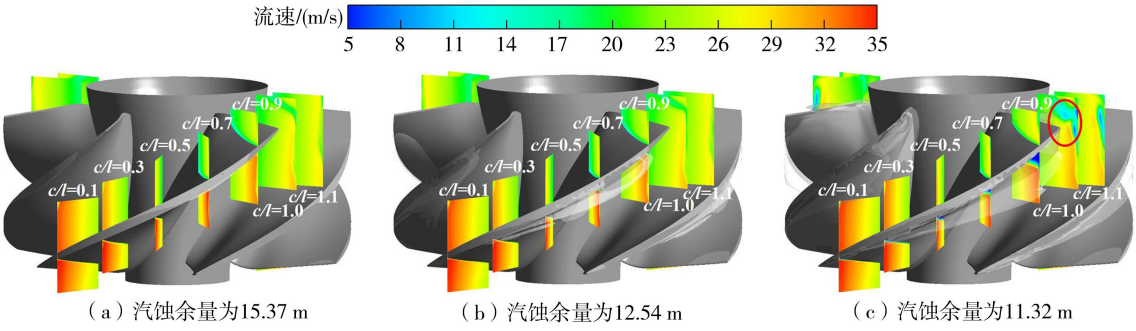
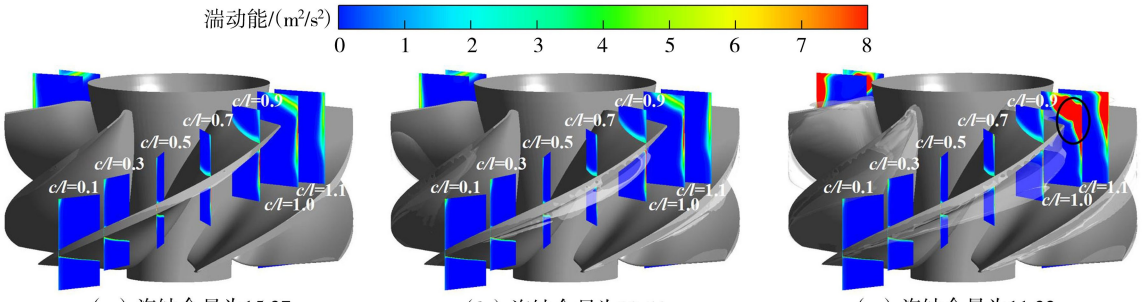


图 6　不同弦长位置截面的流速分布

Fig. 6　Flow velocity distribution of cross-sections at different chord length positions

速区边界对应汽液交界面,其与楔形空化区形成的低速区导致涡旋堆叠,同时由于空泡占据了原泄漏流与主流对流的位置,削弱湍动能的发展,如图7(c)中黑色实线所示。



(a)汽蚀余量为15.37 m (b)汽蚀余量为12.54 m (c)汽蚀余量为11.32 m

图7 不同弦长位置截面的湍动能分布

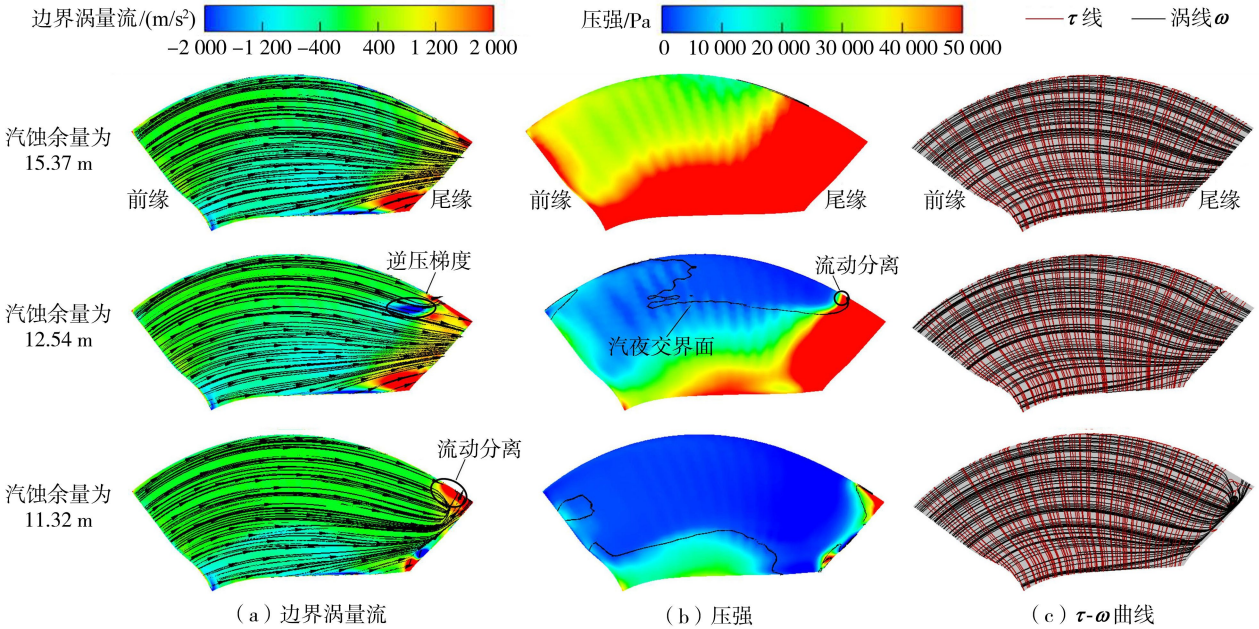
Fig. 7 Turbulent kinetic energy distribution of cross-sections at different chord length positions

为分析不同空化工况对喷水推进泵叶片表面流动的影响机理,引入边界涡量流[20]诊断方法。边界涡量流表征边界上涡量的生成速率,可用以分析叶片表面的流态,判断不良流态及叶片的做功能力,其表达式参见文献[20]。判断流动分离的一个重要依据是表面摩擦力 $\boldsymbol{\tau}$,当 $\boldsymbol{\tau}$ 线汇聚,涡线 $\boldsymbol{\omega}$ 呈高曲率且具有局部极大值时则存在流动分离,而涡线 $\boldsymbol{\omega}$ 与 $\boldsymbol{\tau}$ 线平行则是流动分离的前兆。$\boldsymbol{\tau}$ 的表达式为:

$$\boldsymbol{\tau} = \mu\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{n} \tag{4}$$

式中:μ 为动力黏性系数;$\boldsymbol{n}$ 为壁面位置流体表面的外法线方向。

由图8可知,汽蚀余量为15.37 m时,吸力面的边界涡量流峰值区域集中在尾缘与轮毂,靠近叶顶的吸力面形成局部低压区,并逐渐向叶根方向与下游方向延伸;叶片表面涡线 $\boldsymbol{\omega}$ 与 $\boldsymbol{\tau}$ 线呈现正交分布,流线相对平顺,尚未出现流动分离。伴随着空化不断发展,汽蚀余量为12.54 m时,空化末端的汽液交界面存在边界涡量流负峰值区域(黑线圈出),此处逆压梯度较大;同时靠近尾缘的叶顶位置边界涡量流变化为正峰值,$\boldsymbol{\tau}$ 线出现较大的曲率变化,流线扭曲,产生流动分离。当汽蚀余量为11.32 m时,空化区域基本覆盖叶片表面,流线在叶片尾缘汇聚,涡线 $\boldsymbol{\omega}$ 与 $\boldsymbol{\tau}$ 线弯曲汇聚,流动分离现象进一步加剧。



(a)边界涡量流 (b)压强 (c)τ-ω曲线

图8 不同空化工况下叶片吸力面边界涡量流、压强及 τ-ω 曲线分布

Fig. 8 Distribution of boundary vorticity flux, pressure, and τ-ω curves on suction surface of blades under different cavitation conditions

为消除进口条件和转速等因素的影响,引入无量纲化参数压力系数 C_P[21]。图9为不同空化工况下不同叶高系数 R^* 下叶片表面的 C_P 分布,图中横坐标通过总弦长 l 做无量纲处理。C_P 和 R^* 定义分别为

$$C_P = \frac{2(P - P_{\text{in}})}{\rho v_{\text{tip}}^2} \tag{5}$$

$$R^* = \frac{R_i - R_{\text{h}}}{R_{\text{s}} - R_{\text{h}}} \tag{6}$$

式中:P 为所测位置的压力;P_{in} 为泵进口截面平均压力;v_{tip} 为叶顶周向速度;R_i 为 i 处的半径;R_{h}、R_{s} 分别为轮毂和轮缘的半径。

由图 9 可知,当汽蚀余量为 15.37、12.54 m 时,在叶片中间截面(R^* = 0.50)及近轮毂处(R^* = 0.10)的 C_P 分布差别不大,随着空化程度加剧,当汽蚀余量为 11.32 m 时,叶片表面各截面的 C_P 均有所下降。此外,各叶高截面的 C_P 突变区域主要发生在前缘、尾缘及吸力面中后部(黑色虚线)。其中,当汽蚀余量为 15.37 m 时,压力分布较为平顺,叶片做功能力稳定;当汽蚀余量为 12.54 m 时,R^* = 0.95 截面吸力面 c/l = 0.8 处 C_P 发生突跃,结合图 3(b)可知,间隙空化及叶片表面空化已经严重影响靠近轮缘处的吸力面压力分布;当汽蚀余量为 11.32 m 时,压力面的 C_P 减小,各叶高截面的叶片吸力面保持低压状态,影响叶片载荷特性及有效做功能力。

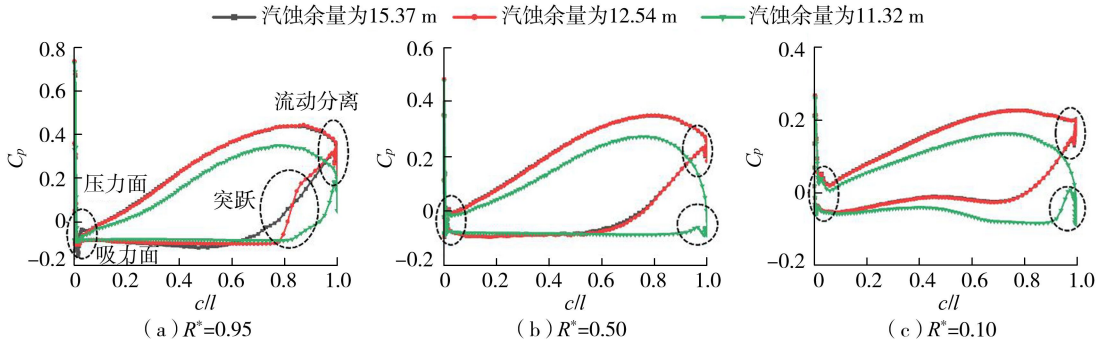


图 9　不同空化工况、不同叶高系数下叶片表面的 C_P 分布

Fig. 9　Distribution of C_P on blade surface under different cavitation conditions and blade height coefficients

由图 10 可知,c/l 大于 0.2 时,叶片吸力面的轴向速度 v_{a} 大于压力面,反之则小于。汽蚀余量为 15.37 m 时,压力面与吸力面的 v_{a} 分布较为均匀,仅在前缘与尾缘存在波动;汽蚀余量为 12.54 m 时与初始空化阶段存在一定相似性,主要区别在于 R^* = 0.95、c/l = 0.8 处存在明显的低速区;汽蚀余量为 11.32 m 时,叶片表面呈现高速流态,尤其是吸力面中后段 v_{a} 大幅上升,这是由于叶片表面空化基本覆盖整个吸力面所致。因此,随着汽蚀余量下降,叶片前缘周围的空化延缓吸力面前缘的速度上升,吸力面尾缘附近形成了低速回流区且其范围向轮毂及尾缘方向扩大发展。

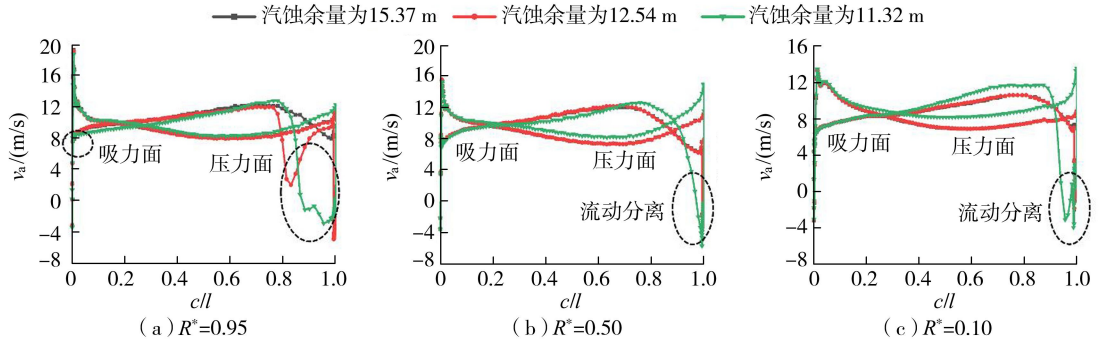


图 10　不同空化工况、不同叶高系数下轴向速度 v_{a} 分布

Fig. 10　Distribution of axial velocity v_{a} under different cavitation conditions and blade height coefficients

2.3　熵产分析

为分析喷水推进泵在不同空化工况下的能量损失特性,引入熵产理论[22-24]探究泵内产生能量损失的位置及主要类型。熵产主要是由时均速度产生的直接耗散熵产 S_1、脉动速度造成的湍流耗散熵产 S_2 以及壁面摩擦导致的壁面熵产 S_3 三部分组成。对喷水推进泵空化工况的计算中不考虑温度变化,因此可忽略热交换

引起的熵产。总熵产 S 和熵产率 $\dot{S}$ 计算公式为:

$$S = S_1 + S_2 + S_3 \tag{7}$$

$$\dot{S} = \dot{Q}/T \tag{8}$$

式中:$\dot{Q}$ 为能量耗散率;T 为开尔文温度,取 298.15 K。

对于湍流运动,由时均速度引起的局部直接熵产率 $\dot{S}_1$ 与脉动速度引起的湍流耗散导致的局部脉动熵产率 $\dot{S}_2$ 共同组成局部熵产率。$\dot{S}_1$、$\dot{S}_2$ 以及壁面熵产率 $\dot{S}_3$ 的数学表达式分别为:

$$\dot{S}_1 = \frac{2\mu}{T}\left[\left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial z}\right)^2\right] + \frac{\mu}{T}\left[\left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial y}\right)^2\right] \tag{9}$$

$$\dot{S}_2 = \rho\varepsilon/T \tag{10}$$

$$\dot{S}_3 = \tau^* v/T \tag{11}$$

式中:$\bar{u}$、$\bar{v}$、$\bar{w}$ 为平均速度在 x、y、z 方向上的分量;ε 为湍动能耗散率;τ^* 为壁面剪切应力;v 为近壁面首层网格中心相对速度。

为分析不同空化工况下喷水推进泵各过流部件的能量损失演变规律,分别计算进水管、叶轮室、导叶体、出水管区域的熵产比率 R_{pi}:

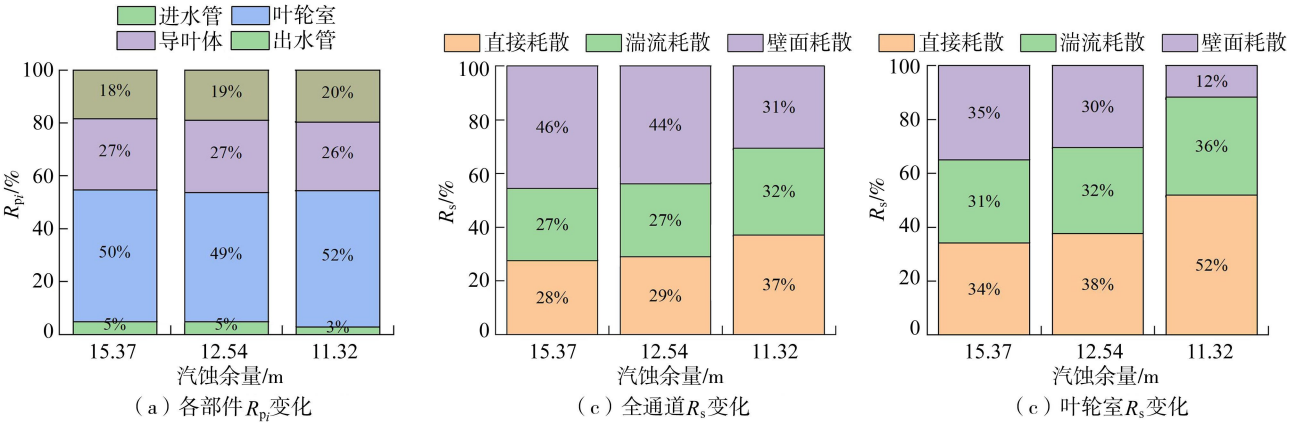
$$R_{pi} = \frac{S_{pi}}{S} \times 100\% \tag{12}$$

式中:S_{pi} 是第 i 部分的熵产值,下标 i=1,2,3,4 分别表示进水管、叶轮室、导叶体、出水管区域。

进一步统计各空化工况下 S 中 S_1、S_2、S_3 组分的熵产占比 R_s:

$$R_s = \frac{S_j}{S} \times 100\% \tag{13}$$

图 11 显示了 3 种典型工况下喷水推进泵的熵产分布统计的变化规律。由图 11(a)可知,叶轮室熵产比率 R_{p2} 最大,占整个泵流道熵产值的 50%左右,导叶体与出水管区域次之,进口段熵产比率 R_{p4} 最低。当汽蚀余量为 12.54 m 时,泵内空化程度较轻,此时各过流部件的熵产比率保持相对稳定。图 11(b)和(c)分别展示全通道和叶轮室内 R_s 在空化工况不同时的变化规律。当汽蚀余量为 12.54 m 时,壁面熵产 S_3 是全通道内能量损失的主要贡献项,全通道内的熵产占比相对稳定。随着汽蚀余量减小,直接耗散熵产 S_1 与湍流耗散熵产 S_2 占比高于壁面熵产 S_3,这一现象在叶轮室内熵产占比变化中更为明显。空化流动的流速变化增强导致湍流流场变得更加紊乱,因此导致深度空化时湍流耗散熵产占比较初始空化提升 5%。



(a)各部件 R_{pi} 变化 (c)全通道 R_s 变化 (c)叶轮室 R_s 变化

图 11 不同空化工况下熵产分布统计

Fig. 11 Statistics of entropy generation distribution under different cavitation conditions

图 12 为 3 种典型工况下各叶高截面局部熵产率($\dot{S}_1$+$\dot{S}_2$)的分布云图,图中汽液交界面用黑线表示。当汽蚀余量为 15.37、12.54 m 时,两者局部熵产率分布规律较为相似,局部熵产率峰值区主要位于叶片尾流,叶顶间隙区域的泄漏涡周围及靠近吸力面尾缘的范围内的局部熵产率较大。当汽蚀余量为 11.32 m 时,楔形空化区域尾部边界区域产生流动分离,并从叶顶向叶根发展,在 R^*=0.50 和 R^*=0.90 截面可观测到局部熵产率出现较大值(黑色虚线所示)。通过对比分析,汽蚀余量较大时,能量损失主要来源于尾流;汽蚀余

量降低至楔形空化区域形成之后,尾流的流动分离及空化引起的涡流成为流量损失的主要贡献项。

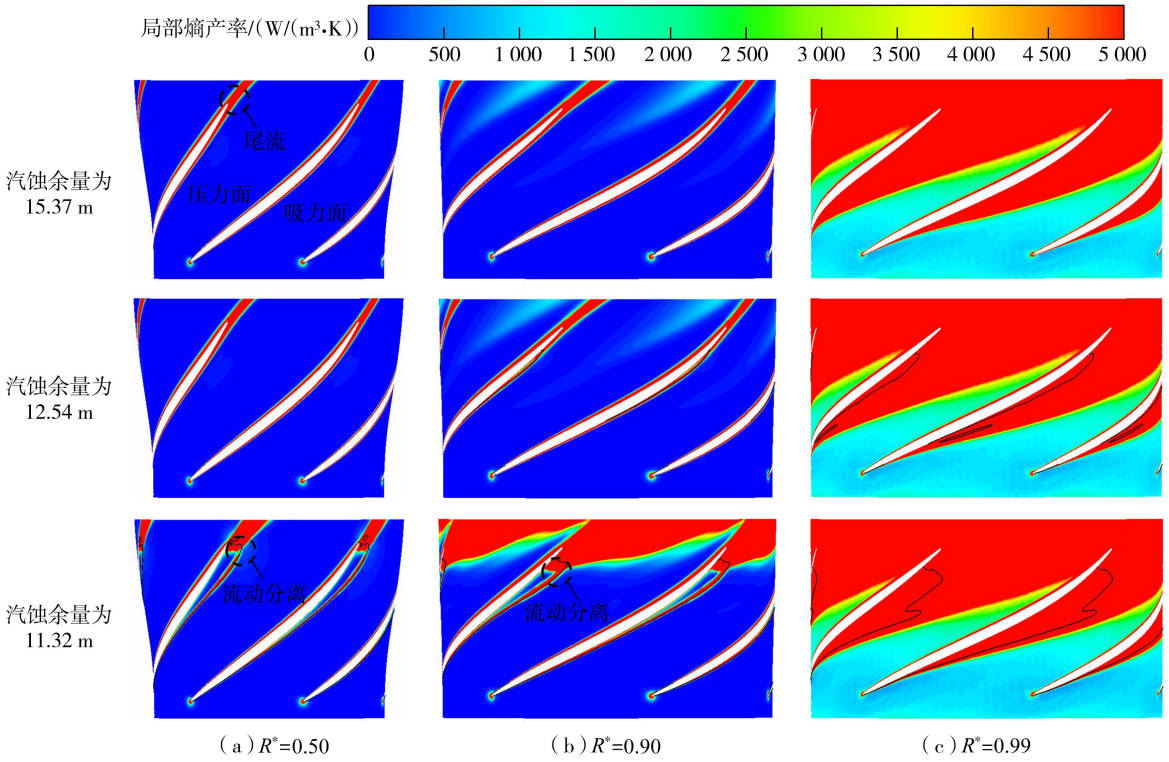


图 12　不同叶高截面局部熵产率分布云图

Fig. 12　Contour map of local entropy generation rate of cross-sections at different blade heights

3　结　论

a. 基于 URANS 方法,采用 FBM-CC 湍流模型和 ZGB 空化模型对喷水推进泵空化流动进行数值模拟,通过与试验测量结果进行对比分析发现,所采用的数值模拟方法不仅能够有效捕捉到典型空化工况下的叶片表面空化形态,同时与试验测量得到的空化性能曲线较为吻合且误差在 3%以内,表明所采用的数值模拟方法具有良好的计算精度。

b. 随着汽蚀余量降低,叶片空化形态从间隙空化发展为楔形空化,叶顶间隙泄漏流量减小,流速与湍动能分布不均性加剧,空化逐渐恶化泵内流动稳定性。尤其在深度空化工况(汽蚀余量 11.32 m)时,空化覆盖整个叶片吸力面,诱发叶顶泄漏涡断裂及空化诱导涡堵塞流道,空化末端存在强逆压梯度,叶顶尾缘边界涡量流正峰值区出现流线扭曲和流动分离,伴随尾缘压力系数突变及低速回流区范围扩大。

c. 经熵产理论分析,发现叶轮段是能量损失的核心区域。空化初期壁面摩擦引起的损失为泵内能量损失的主要来源;随着汽蚀余量减小,时均速度与脉动速度伴随显著熵增,导致湍流引起的耗散损失成为泵内能量损失的主要贡献项。局部熵产分布表明,在楔形空化形成前,能量损失集中于尾流区;随着空化加剧,湍流耗散熵产占比较初始空化提升 5%,此时尾流的流动分离及空化引起的涡流成为能量损失的主要来源。

参考文献:

[1] 王立祥. 喷水推进技术及工程设计[M]. 北京:国防工业出版社,2021.

[2] 杨琼方,王永生,吴杰长. 泵类推进器振动和噪声控制机理[M]. 上海:上海交通大学出版社,2021.

[3] Lyu Shujian, Wang Xincheng, Cheng Huaiyu, et al. Numerical investigation of tip leakage vortex cavitating flow in a waterjet pump with emphasis on flow characteristics and energy features[J]. Energies, 2022, 15(19): 6916.

[4] Jiao Weixuan, Chen Hongjun, Cheng Li, et al. Experimental study on flow evolution and pressure fluctuation characteristics of the underwater suction vortex of water jet propulsion pump unit in shallow water[J]. Ocean Engineering, 2022, 266(Pt 1): 112569.

[5] Chen Huang, Doeller N, Li Yuanchao, et al. Experimental investigations of cavitation performance breakdown in an axial waterjet pump[J]. Journal of Fluids Engineering, 2020, 142(9): 091204.

[6] Zhao Guoshou, Liang Ning, Zhang Yu, et al. Dynamic behaviors of blade cavitation in a water jet pump with inlet guide vanes: effects of inflow non-uniformity and unsteadiness[J]. Applied Ocean Research, 2021, 117: 102889.

[7] 徐顺, 龙新平, 季斌, 等. 轴流式喷水推进泵内涡与空化相互作用[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(7): 951-957. (Xu Shun, Long Xinping, Ji Bin, et al. Investigation on the mechanism between vortex and cavitation in an axial waterjet pump[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, 41(7): 951-957. (in Chinese))

[8] Yang Fan, Chang Pengcheng, Cai Yiping, et al. Analysis of energy loss characteristics of vertical axial flow pump based on entropy production method under partial conditions[J]. Entropy, 2022, 24(9): 1200.

[9] Yang Fan, Li Zhongbin, Cai Yiping, et al. Numerical study for flow loss characteristic of an axial-flow pump as turbine via entropy production analysis[J]. Processes, 2022, 10(9): 1695.

[10] 严春飞, 陈燕, 郭嫱, 等. 温度影响下的离心泵空化特性数值模拟研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2025, 40(2): 361-366. (Yan Chunfei, Chen Yan, Guo Qiang, et al. Numerical simulation study on cavitation characteristics of centrifugal pump under temperature influence[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2025, 40(2): 361-366. (in Chinese))

[11] 郭嫱, 费宗岳, 黄先北, 等. 基于熵产分析的喷水推进泵空化特性研究[J]. 船舶力学, 2024, 28(10): 1507-1515. (Guo Qiang, Fei Zongyue, Hunag Xianbei, et al. Cavitation characteristics of water-jet pump based on entropy production analysis[J]. Journal of Ship Mechanics, 2024, 28(10): 1507-1515. (in Chinese))

[12] 许哲, 郑源, 阚阚, 等. 基于熵产理论的超低扬程双向卧式轴流泵装置飞逸特性[J]. 农业工程学报, 2021, 37(17): 49-57. (Xu Zhe, Zheng Yuan, Kan Kan, et al. Runaway characteristics of bidirectional horizontal axial flow pump with super low head based on entropy production theory[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(17): 49-57. (in Chinese))

[13] Yu Lei, Cheng Li, Sheng Weigao, et al. Research on the energy characteristics of the turning region in the cavitation performance curve of an axial flow pump based on energy flow density and entropy production[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2025, 19(1): 2499132.

[14] 张睿, 丁旭洁, 牟童, 等. 喷水推进泵叶顶间隙泄漏流动特性研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2022, 37(5): 743-750. (Zhang Rui, Ding Xujie, Mou Tong, et al. Research on leakage flow characteristics in blade tip of water jet pump[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2022, 37(5): 743-750. (in Chinese))

[15] Zhang Rui. Evaluation and analysis of curvature-corrected filter-based turbulent model[J]. International Journal of Turbo & Jet-Engines, 2017, 34(3): 269-277.

[16] Zwart P, Gerber A G, Belamri T. A two-phase model for predicting cavitation dynamics[C]//Proceedings of the 5th International Conference on Multiphase Flow. Yokohama: JSMF, 2004.

[17] 王福军. 水泵与泵站流动分析方法[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.

[18] Chesnakas C J, Donnelly M J, Pfitsch D W, et al. Performance evaluation of the ONR axial waterjet 2 (AxWJ-2)[R]. West Bethesda: Carderock Division, Naval Surface Warfare Center, 2009.

[19] 赵斌娟, 谢昀彤, 廖文言, 等. 第二代涡识别方法在混流泵内部流场中的适用性分析[J]. 机械工程学报, 2020, 56(14): 216-223. (Zhao Binjuan, Xie Yuntong, Liao Wenyan, et al. Adaptability analysis of second generation vortex recognition method in internal flow field of mixed-flow pumps[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(14): 216-223. (in Chinese))

[20] Wu Jiezhi, Ma Huiyang, Zhou Mingde. Vorticity and vortex dynamics[M]. Berlin: Springer, 2006.

[21] 张睿, 江扬阳, 谢锋, 等. 旋流沉砂池除砂特性分析及优化[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(6): 53-59. (Zhang Rui, Jiang Yangyang, Xie Feng, et al. Analysis and optimization of sand removal characteristics of vortex-type grit chamber[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(6): 53-59. (in Chinese))

[22] 冯建军, 张钰, 朱国俊, 等. 采用熵产理论的离心泵断电过渡过程特性[J]. 农业工程学报, 2020, 36(4): 10-17. (Feng Jianjun, Zhang Yu, Zhu Guojun, et al. Transition process characteristics of centrifugal pump with power-off based on entropy production theory[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(4): 10-17. (in Chinese))

[23] 张睿, 谭舒翊, 丁旭洁, 等. 基于熵产理论的竖井贯流泵流动损失特性[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(2): 6-12. (Zhang Rui, Tan Shuyi, Ding Xujie, et al. Flow loss characteristics of a shaft tubular pump based on entropy production theory[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(2): 6-12. (in Chinese))

[24] 周罗香, 张志兵, 孙政, 等. 基于熵产理论的水泵水轮机驼峰区内部水力损失特性研究[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(1): 62-67. (Zhou Luoxiang, Zhang Zhibing, Sun Zheng, et al. Study on internal hydraulic loss characteristics of pump-turbine hump region based on entropy generation theory[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(1): 62-67. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-08-07 编辑: 刘晓艳)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.05.008

黄河下游河道冲淤的综合水沙条件研究

孙嘉悦,张 曼,周建军

(清华大学水利水电工程系)

摘要:高效水沙调控是黄河下游减淤的关键。受水库拦沙与自然变化影响,径流、泥沙及水沙关系已发生了显著改变,对下游淤积起主导作用的粗沙在中游重点侵蚀区治理中也得到高度重视,但三门峡工程投入运行以来,针对主要造成下游持续淤积的粗沙拦控仍显不足。本文基于黄河"多来多排"规律与河流动力学基本原理,对钱宁公式进行了改进,将泥沙粒径因子纳入水沙指标。采用 1952—2020 年实测资料率定,结果表明该公式能够模拟变化条件下(尤其泥沙级配变化后)的下游河道冲淤过程。按改进公式分析,发现水库拦粗沙可显著提升下游水流输沙能力进而加大减淤。因此,通过优化调控尽量拦粗排细能够促进下游减淤并维护水库防洪库容。

关键词:河道冲淤;水沙关系;输沙能力;减淤;黄河下游

中图分类号:TV147;TV882.1 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-1980(2026)05-0069-10

A comprehensive flow-sediment indicator to the lower Yellow River siltation

Sun Jiayue, Zhang Man, Zhou Jianjun

(*Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University*)

Abstract: Effective flood-sediment regulation is critical for the lower Yellow River (LYR) de-siltation. Owing to dams trapping and natural changes, runoff, sediment and their relationship have changed dramatically, key role of the coarse sediment (CS) on the LYR deposition has been emphasized in controlling erosion in the middle Yellow River (MYR), however, it is still inadequate in trapping the CS that is important for the LYR continuous siltation after operation of the Sanmenxia project in 1960. Based on the specific feature called "more sediment in, more sediment out" and general fluvial dynamics, a revised Chien's formula is proposed to integrate size factor of sediment into the flow-sediment index. After calibration with measured data from 1952 to 2020, the formula was demonstrated capable of simulating erosion and deposition under changed conditions, particularly, in size gradations. It was indicated that trapping of the CS by reservoirs can amplify sediment transport capacity significantly, thereby de-silt more in the LYR. Therefore, to optimize regulation via trapping more CS with the fine fractions delivered down as much as possible can promote de-siltation and preservation of the reservoirs' flood control storage capacity.

Key words: sediment deposition; runoff-sediment relationship; transport capacity; de-siltation; lower Yellow River

黄河水少沙多,水沙关系不协调,下游为地上悬河,水库和下游河道持续淤积直接影响防洪安全与生态环境[1]。近年来,受水库拦沙、水沙调控及引水引沙等工程与人类活动的综合影响,黄河下游河道淤积态势得到一定缓解[2]。然而,这也导致下游来水来沙量大幅锐减,水沙搭配比例及泥沙颗粒级配等水文特征发生了显著变化,这些变化综合影响下游河道的输沙能力与冲淤规律[3-5]。在小浪底工程投入运行前,尽管下游泥沙比 1960 年前大幅度减少,但下游淤积量和河槽淤积比例明显增大[6],河槽淤积萎缩、形成"二级悬河",平滩流量急剧减小[7-9]。小浪底水库拦沙显著降低了下游河槽,然而 2018—2020 年汛期水库降低水位排沙,进入下游的平均沙量仅 4.46 亿 t/a,却导致大范围淤积,表明下游河道输沙能力已经严重降低。因此,在水沙条件变化下,依靠水沙调控提升输沙能力、减少淤积,并保障下游当前及长远的防洪安全,正面临新的挑战。

黄河下游河道冲淤在很大程度上取决于输沙水量和输沙量。径流、沙量及其组合搭配,始终是黄河水沙调控的核心。大量研究[10-12]通过建立下游冲淤与水沙量之间的关系,提出了维持下游河道总体冲淤平衡的临界调控条件。目前,来沙系数(ζ)被广泛用作衡量下游水沙关系的重要指标[13]。钱宁等[14]利用黄河"多

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3202701)

作者简介:孙嘉悦(1998—),女,博士研究生,主要从事河流动力学研究。E-mail:jiayuesun1998@163.com

通信作者:周建军(1960—),男,教授,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:zhoujj@tsinghua.edu.cn

来多排”输沙特性建立的经验冲淤公式可明确体现来沙系数及其变化对下游河道冲淤的作用和影响,在下游河道冲淤调控中得到广泛应用[15]。也有研究[16-18]基于来沙系数分析下游河段冲淤对水沙条件变化的响应关系,并将其作为判定冲淤平衡的关键指标。悬沙粗细同样是影响下游河道冲淤的关键因素。换言之,黄河下游的水沙关系应由水、沙及泥沙级配共同界定。粗细泥沙在沉降与输移特性上的差异,决定了其对下游冲淤过程的不同贡献。粗沙作为下游河槽淤积的主体,一直是黄河中游水土保持治理的重点[19-21],其对下游淤积的关键作用已有广泛共识[22-24]。现有模型与方法,包括分组泥沙冲淤计算[25-26]和不均匀泥沙数学模型[27-30],均将粒径分组作为重要参数,理论上可区分不同粒径组的冲淤效应,在冲淤模拟、评价及水沙变化影响分析中发挥了重要作用。但必须指出,这些方法仍难以避开经验参数及人为处理(如一维模型中的河宽及横向冲淤分布、二维模型中的挟沙能力等)带来的不确定性,既难以形成可直接用于调控的综合指标,也无法在变化水沙条件下提供明确的决策支持。另一方面,河道型水库虽具有分选功能[31],理应拦粗排细,但实测数据显示,三门峡水库建成后,花园口断面悬沙中值粒径反而呈增大趋势,这与减淤目标背道而驰。基于上述问题,亟须深入开展水沙条件变化下黄河下游冲淤规律的演变研究,构建一套能兼顾输沙水量、输沙量及泥沙级配变化,且简明实用、可用于实际调控的冲淤计算方法与判断指标体系。

本文基于输沙平衡关系,结合黄河下游“多来多排”输沙特性及泥沙运动力学中的普适挟沙能力公式,对钱宁等[14]提出的下游河道冲淤公式进行修订,采用1952年以来长期实测的场次洪水冲淤资料进行率定,推求得到物理意义明确、能够适应水沙条件全面变化的下游河道冲淤公式及冲淤平衡判据,并以此为基础初步探讨防洪减淤水库通过“拦粗排细”优化调度的减淤效果,以期为工程水沙调控与下游河道防洪减淤实践提供参考。

1 数据来源和研究方法

1.1 数据来源

本文采用的黄河下游干流花园口和利津站1952—2020年逐日径流与输沙数据来自《中华人民共和国水文年鉴》,三门峡出入库、小浪底、花园口和利津等站的1955(1960)—2020年悬沙级配数据来自黄河水利委员会。黄河流域悬沙粒径测量方法于1979年发生变更,1979年以前采用粒径计法,1980年开始改用吸管法,导致前后数据存在系统性差异。鉴于标准粒径(吸管法粒径)未能反映细泥沙在静水中的吸附絮凝作用及其对泥沙沉速和水流挟沙能力的影响,而现有泥沙运动理论及公式多建立在沉降粒径基础上,因此本文依据改正方法[20],将1980年以来的分组粒径统一还原为粒径计法粒径,以保证数据序列的一致性与理论适用性。

此外受实测资料限制,本文采用年均悬沙级配代表该年份内场次洪水的悬沙级配。对于黄河下游而言,一般年份洪水期间输沙量占绝对数量,年均悬沙级配主要由洪水期间输沙决定,因此采用年均悬沙级配基本可以反映场次洪水悬沙粗细变化特征及其对河道输沙能力的宏观影响。

1.2 场次洪水统计与实测冲淤强度

基于花园口与利津站1952—2020年日均流量过程,选取花园口站各年洪峰流量超过2 500 m^3/s且能完整演进至利津站的洪水过程(不含最大洪峰流量超过10 000 m^3/s大漫滩洪水)共245场次。这些场次洪水能体现天然和人工调控下的水沙组合和泥沙级配变化。洪水演进到花园口和利津站的起止时间不同,但统计时需保证各站洪水历时相同,以便后续采用沙量平衡法计算冲淤强度[31]。按沙量平衡,从花园口到利津河段的场次洪水冲淤强度为:

$$D_{sm} = (W_{s1} - W_{s2} + \Delta W_{s1-2})/T \tag{1}$$

式中:D_{sm}为河段在场次洪水中的实测冲淤强度(即日冲淤量),万t/d;W_{s1}、W_{s2}分别为河段进口(花园口)和出口(利津)断面输沙量,万t;ΔW_{s1-2}为区间沙量,万t;T为洪水历时,d。

由于花园口至利津河段几乎没有主要支流汇入,且该河段引黄主要集中在春灌期,而本文统计的场次洪水多发生在汛期,因此可认为场次洪水区间沙量可忽略。245场实测洪水平均流量范围为700~7 000 m^3/s、含沙量范围为0~250 kg/m^3,冲淤强度范围为-1 200万~4 600万t/d(图1)。

1.3 水沙特征

黄河下游水沙条件发生的剧烈变化(图2)与大型水库的建设与运行密切相关。天然时期(1952—1959年)来水、来沙量较大,但下游河道(花园口—利津段)淤积相对较少(输沙量法计算的淤积比为

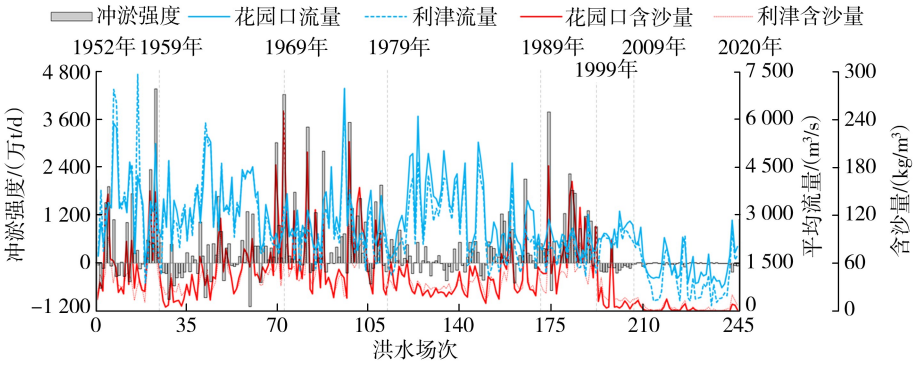
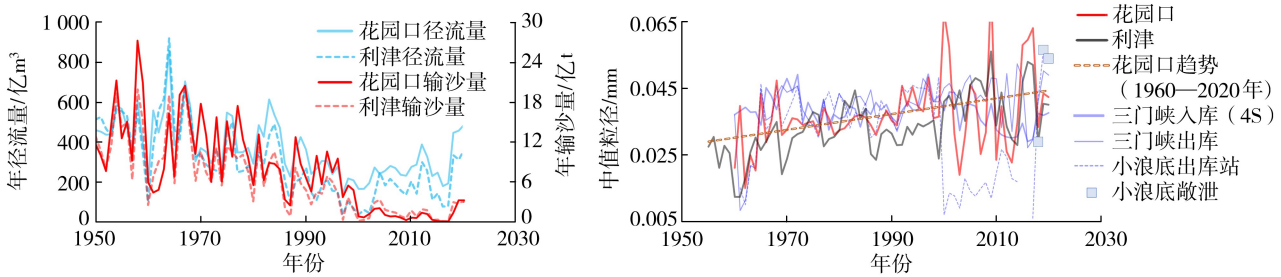


图 1　花园口—利津河段 1952—2020 年 245 场洪水的场次平均流量、含沙量和冲淤强度

Fig. 1　The 245 floods with flow discharge, sediment load and erosion-deposition intensity in 1952-2020

18.7%)。1961—1964 年三门峡蓄水运行期间大量拦沙[32]，花园口、利津多年平均悬沙粒径分别为 0.024、0.022 mm，下游河道冲刷量约为 15.2 亿 m^3。1965—1973 年三门峡改为滞洪排沙运用方式，蓄水位大幅降低，前期水库内淤积的泥沙被冲刷出库，出库悬沙粒径显著增加，下游河道回淤 23.3 亿 m^3；1974—1985 年三门峡改蓄清排浑运用方式，水库“拦粗排细”作用减弱，下游来沙量偏小，河道时段淤积量约为 6 亿 m^3，其中后期冲刷为主、利津悬沙粒径明显变粗，主河槽有较多冲刷。1986 年龙羊峡水库建成投入运行，汛期削峰、非汛期调平流量，加之气候变化和中游水保工程[33]，下游水沙量逐步减小，花园口悬沙粒径缓慢变粗、接近三门峡入库粒径。2000 年小浪底水库投入运用，下泄清水或低含沙水流，进入下游的水量持平但沙量急剧减少，小浪底出库泥沙很细，但花园口悬沙粒径迅速回升，截至 2017 年下游冲刷 14.75 亿 m^3；2018—2020 年小浪底水库汛期降低水位，下泄沙量略有增加(平均输沙量为 4.46 亿 t/a)，库中淤积的粗沙被冲刷出库，小浪底出库悬沙中值粒径超过历史最大值，下游输沙能力显著降低，较多河段淤积。2000 年后花园口与利津悬沙粒径整体变粗，其中利津多年平均悬沙中值粒径达到 0.042 mm，为历史最大值。



(a) 年径流量和输沙量　　(b) 三门峡出入库及下游悬沙的中值粒径

注：三门峡入库(4S)悬沙粒径是龙门、华县、河津和状头干支流 4 站加权平均。

图 2　1952—2020 年黄河下游水沙变化

Fig. 2　Variations of flow, sediment and its medium size D_{50} in LYR

可见，1952—2020 年期间黄河下游水沙条件的变化不仅体现在径流量和输沙量的减少上，悬沙粒径亦发生了显著改变。尽管同期三门峡入库泥沙呈细化趋势，但基于线性趋势分析，三门峡工程以来花园口泥沙粒径整体上是增加的，1999 年以后花园口悬沙中值粒径较此前时段的增幅约为 25%。泥沙粒径变化对下游河道冲淤规律及输沙能力调整的影响不容忽视。因此，在黄河水沙变化与冲淤调控研究中，亟须将泥沙级配纳入考量。

1.4　河道冲淤计算公式的修正

钱宁等[14]基于“多来多排”输沙特性，利用天然时段(1952—1959 年)及 1969—1974 年实测场次洪水冲淤数据，选取未发生普遍漫滩的场次进行统计分析，构建了场次洪水冲淤强度公式：

$$D_s = 137Q^2\left[\frac{S}{Q} - 0.33\left(\frac{S}{Q}\right)^{0.75}\right] \tag{2}$$

式中：D_s 为下游冲淤强度，万 t/d；S 为场次洪水平均含沙量，kg/m^3；Q 为场次洪水平均流量，m^3/s。

式(2)能够依据上游水沙条件，对下游河道冲淤状况进行宏观估算，其形式简洁、实用性强，已被广泛应

用于黄河下游冲淤研究及河道治理实践[15],尤其对水库调水调沙具有重要指导意义。然而,式(2)主要依靠经验统计方法建立,缺少详细的理论依据和明确的物理含义,且主要依据为1974年前的实测场次洪水冲淤数据。1986年以来,受上游水库调控影响,黄河下游水沙条件发生显著变化,尤其是来沙粒径组成明显改变。在此背景下,式(2)已难以有效反映上述变化,导致计算可靠性下降,需要进一步完善。完善前应先明确理解式(2)中各相关项的河流动力学含义,然后基于充分的理论依据和更多实测资料进行统计分析。首先将式(2)改写为一般形式:

$$D_s = \alpha(QS - \beta_0 S^{0.75} Q^{1.25}) \tag{3}$$

式中:α、β_0 为系数。式(3)中第一项 QS 为河道上游进口断面的输沙率,因此式(3)实质上为河道上下断面间的沙量平衡关系,则后一项代表出口断面的输沙率。按此理解,α 应是输沙率与冲淤强度之间的量纲转换系数,即 $\alpha = D_s/QS = 10^4 \times 10^3/24/3\,600 = 116$。虽然与式(2)中的回归系数137接近(也说明原统计回归系数具有一定的合理性),但作为量纲转换系数的意义更明确,不会造成来沙系数(S/Q)较大时淤积量计算值明显偏大的不合理现象。式(3)后一项实质上是假设出口断面输沙率与下游河道输沙能力成正比。在洪水调度中,一般难以得知河段冲淤量和出口断面输沙量,因此用输沙能力度量河段冲淤程度是合理的。由于黄河下游河道输沙具有"多来多排"输沙特性,输沙能力与上游来沙含沙量具有正比关系[34]:

$$Q_s = kS_u^a Q^b \tag{4}$$

式中:Q_s 为输沙能力,kg/s;a、b 为经验指数,$a = 0.7 \sim 0.9$,$b = 1.1 \sim 1.3$;k 为比例系数,与河床边界条件及来沙颗粒组成等有关。赵业安等[34]认为 S_u 为上游进口断面床沙质含沙量,这不能反映总悬浮细沙对综合沉降的影响,故本文采用钱宁等[14]观点,认为它是全沙含沙量。因此,假设出口断面输沙量与输沙能力成正比即得到式(3)的后一项,其中 β_0 根据实测资料率定。

另一方面,水流输沙能力 $Q_s = Q\Phi$,其中挟沙能力 Φ 是反映河道输沙特征的重要指标。根据泥沙运动力学中常用的挟沙力公式[35],河流挟沙能力与水沙条件的关系为:

$$\Phi = K\left(\frac{U^3}{gH\omega}\right)^m \tag{5}$$

式中:U 为断面平均流速,m/s;H 为水深,m;ω 为混合沙加权平均沉速,m/s;g 为重力加速度,m/s^2;K、m 分别为挟沙能力系数和指数,对于黄河干支流而言 $m = 0.77$[35]。可见河流输沙能力受悬沙沉速(与悬沙粒径有关)影响,式(2)只能在来沙粗细变化不大的情况下成立。对于黄河下游而言,河道纵向坡降随时间变化不大,在给定坡降(J)和糙率系数($n \propto D_{65}^{1/6}$,D_{65} 为河床表面泥沙中小于该粒径泥沙占比为65%的粒径)条件下,考虑到河道平均宽度满足河相关系[36] $B \propto Q^{0.5}$,由式(5)和水流谢才公式[35]可得到河流输沙能力:

$$Q_s \propto K\left(\frac{J}{n^2}\right)^{1.2m} \frac{Q^{1+0.3m}}{\omega^m} \tag{6}$$

黄河下游含大量细颗粒的混合沙,其沉降特性与一般粒径较粗的高含沙水流存在显著差异[34]。在较低含沙量条件下,细沙絮凝作用可增大颗粒沉速;而当含沙量升高时,絮凝结构逐渐发展为网状,致使颗粒间沉降相互阻碍,综合沉速反而减小。钱意颖等[37]针对混合沙静水群体沉降随含沙量变化的规律,开展了多组试验,发现较粗混合沙的沉降特性与一般高含沙水流基本一致,而较细混合沙(中值粒径为0.042 mm)则表现出显著的絮凝效应。若忽略极低含沙量情形,试验数据表明黄河混合沙平均沉速与含沙量成反比关系:

$$\omega \propto w/S_u^c \tag{7}$$

式中:w 为静水沉速,$w = \sum p_i w_i$,m/s;c 为指数;p_i、w_i 分别为分组 i 的悬沙比例和沉速[38]。黄河泥沙中含有一定比例的黏性细颗粒,式(7)显示沉速在低含沙量时增大(甚至超过静水沉速)和高含沙量时剧烈减小,符合一般絮凝作用的规律[35]。将式(7)代入式(6),并令 $a = cm$、$b = 1 + 0.3m$、$K_1 = K(J/n^2)^{1.2m}$,得到与式(4)相似的另一种"多来多排"输沙能力公式:

$$Q_s = \frac{K_1}{w^m} S_u^a Q^b \tag{8}$$

指数 $c = 0.94 \sim 1.00$ 时,平均沉速式(7)可拟合钱意颖等[37]较细混合沙的试验结果。取 $m = 0.77$ 时,可得 $a = 0.724 \sim 0.77$ 和 $b = 1.231$。由此得到的式(8)与式(4)指数完全一致,且包含泥沙粗细变化,二者在理

论上完全等效,只是式(4)是在近似假设泥沙粗细不变的特殊条件下得到的。将式(2)对应时段(1952—1959 年,1969—1974 年)的平均静水沉速记为 w_0,可将式(8)更明确表示为:

$$Q_s = K_0\left(\frac{w_0}{w}\right)^m S_u^a Q^b \tag{9}$$

式中:K_0 为挟沙能力系数,由此可得到既与一般河流泥沙运动规律相吻合、又能兼容式(4)中"多来多排"输沙特性的输沙能力公式。假设出口断面输沙率与输沙能力成正比,用式(9)的输沙能力替代式(3)的出口断面输沙率则得到修订的下游冲淤强度:

$$D_s = \alpha\left[QS - \beta\left(\frac{w_0}{w}\right)^m S_{du}^a Q_d^b\right] \tag{10}$$

式中:Q_d 为出口断面流量,m^3/s;β 为比例系数;S_{du} 为出口断面的上游来水含沙量,kg/m^3。计算 S_{du} 时,可采用距利津站较近的泺口站或直接采用利津站含沙量作为"多来多排"因子,反映出口输沙特征。因此,修订后的冲淤强度公式(式(10))包含了沉速变化,能够反映悬沙粒径整体粗细变化对河道输沙能力的影响,可计算在水沙量与泥沙级配共同变化下的河道冲淤强度。

1.5　确定 β

式(10)的比例系数 β 需通过实测资料率定。采用最小二乘法,定义式(1)计算实测淤积强度(D_{sm})与式(10)计算冲淤强度(D_s)的误差为:

$$\varepsilon = \sum\{\alpha[QS - \beta(w_0/w)^m S_{du}^a Q_d^b] - D_{sm}\}^2 \tag{11}$$

当拟合误差最小时($d\varepsilon/d\beta=0$)可得 β:

$$\beta = \frac{\sum(\alpha QS - D_{sm})(w_0/w)^m S_{du}^a Q_d^b}{\alpha\sum[(w_0/w)^m S_{du}^a Q_d^b]^2} \tag{12}$$

基于式(12),分别根据式(2)对应时段(1952—1959 年,1969—1974 年)和三门峡蓄水后(1961—2020 年)实测场次洪水水沙资料可率定得到式(3)与式(10)的系数 β_0 与 β。

2　公式验证与讨论

2.1　公式验证

利用不同公式(表 1)对黄河下游 1952—2020 年场次洪水冲淤强度进行模拟计算,其中算例 0 完全采用原经验参数。各算例的冲淤强度计算值与实测值如图 3 所示,整体和各时段计算结果与实测值的 R^2 见表 2。由表 2 可知,修订公式不仅物理意义更为明确,且 R^2($R^2=0.80$ 和 0.84、0.81)都较式(2)($R^2=0.74$)有所提高。其中式(3)的拟合效果优于式(2)表明采用具有物理意义的量纲转换系数 $\alpha=116$ 更符合实际情况;而式(10)进一步引入沉速项,与实测资料拟合相关性更高。

表 1　黄河下游 245 场洪水冲淤模拟计算和效果对比方案

Table 1　Comparison schemes of the simulated erosion-deposition in 245 floods

公式	算例编号	S_{du} 计算断面	Q_d 计算断面	相关参数	β_0 或 β
式(2)	0	花园口	花园口	$\alpha=137, a=0.75, b=1.25$	0.33
式(3)	1	泺口	利津	$\alpha=116, a=0.75, b=1.25$	0.39
式(10)	2	泺口	利津	$\alpha=116, c=1, m=0.77$	0.41
	3	利津	利津	$a=0.75, b=1.25$	0.38

从时段的拟合效果看,天然时段(1952—1959 年)和下游淤积为主(1965—1974 年和 1986—1999 年)时段的拟合效果更好,在冲刷为主时段(1960—1964 年、1975—1985 年和 2000 年以后)则相对较差。冲刷条件下,下游河道泥沙恢复饱和受床沙粗细等边界条件限制,致使出口输沙量与输沙能力之间存在较大偏差。一方面,冲刷引起的床沙粗化会削弱河道输沙能力;另一方面,冲刷导致的河道纵坡降调平亦将进一步降低输沙能力。为此,合理的处理方式应将糙率、坡降等因素纳入修正因子进行统一率定。然而,相关实测资料严重匮乏,率定工作面临较大困难。为考察冲刷条件下河道输沙能力的降低效应,在算例 2 和 3 中将比例系数减小 10%,以模拟出口输沙能力降低 10%对计算结果的影响。结果表明,两算例各时段的相关系数均有提

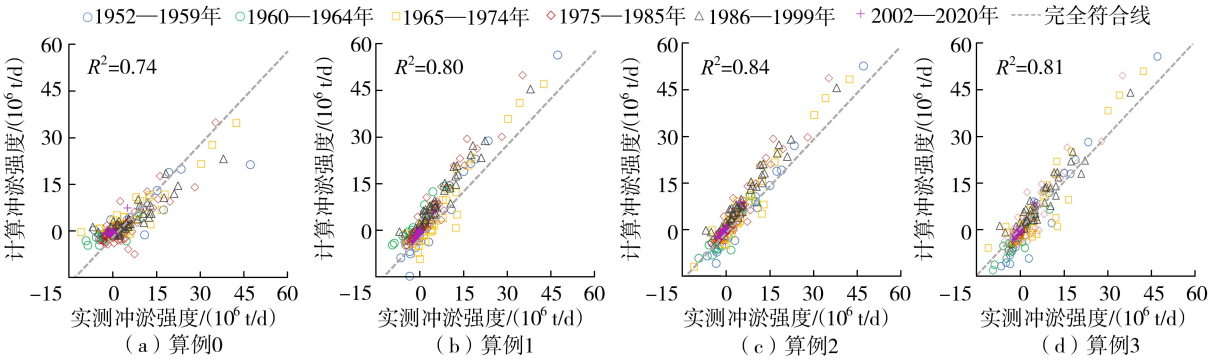


图3 花园口—利津河段1952—2020年洪水冲淤强度模拟值与实测值对比

Fig. 3 Comparison between simulated and measured erosion-deposition intensity (1952-2020)

表2 黄河下游冲淤公式基于1952—2020年资料率定和分时段水沙条件拟合效果比较

Table 2 Calibration of Eq. (10) with all data in 1952-2020 and the fitting comparisons for sub-periods in different flow-sediment conditions

时间段	D_{50}/mm	w/(cm/s)	R^2					
			算例0	算例1	算例2	算例2*	算例3	算例3*
1952—2020年	0.034	0.181	0.74	0.80	0.84	0.85	0.81	0.82
1952—1959年	0.027	0.131	0.74	0.88	0.93	0.95	0.86	0.87
1960—1964年	0.022	0.127	0.58	0.52	0.64	0.75	0.61	0.71
1965—1974年	0.029	0.135	0.82	0.86	0.90	0.90	0.83	0.83
1975—1985年	0.036	0.156	0.66	0.75	0.79	0.80	0.77	0.78
1986—1999年	0.030	0.140	0.72	0.85	0.85	0.85	0.89	0.89
2000—2020年	0.042	0.213	0.52	0.49	0.74	0.75	0.66	0.70

注:*算例是计算时将β减小10%的结果。

高。据此可见,在实际应用中,冲刷阶段适当减小该比例系数,可取得更好的模拟效果。当然,若要实现冲刷情景的严格定量计算,仍需进一步获取床沙粗化程度、糙率系数等实测数据。

根据上述比较,黄河下游洪水冲淤与包括泥沙级配变化因素在内的水沙条件相关性更高,修订公式能更全面地反映水沙变化对下游河道冲淤的综合影响,物理意义更为明确。近几十年来和今后相当长时期内,黄河下游水沙都受到水库调度控制,泥沙级配变化尤为显著,因此引入平均沉速作为修正因子更符合实际情况且更能适应下游实际冲淤计算的需要。这对工程控制下的黄河下游水沙调控和河道淤积控制具有重要意义。

2.2 讨论与分析

2.2.1 修订公式的应用问题

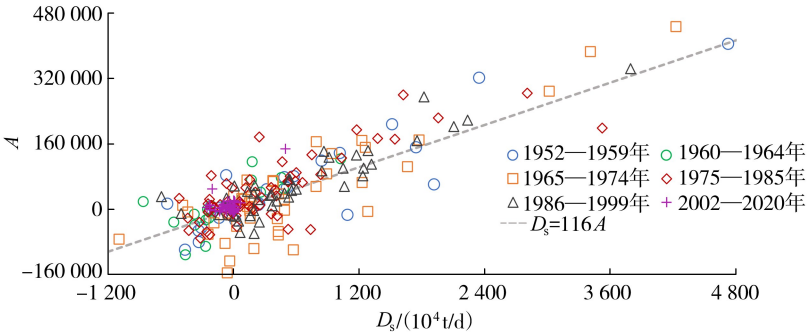
式(10)第2项在计算时采用下游实测资料,但是在实际应用中下游水沙资料一般未知,直接应用还存在困难,这也是钱宁等[14]采用进口水沙资料的主要原因。在水沙调控体系下,防洪一般需要控制下游洪水漫滩,在调度决策中假设下游沿程取水汇流量较小也是合理的。因此,可假设场次洪水上下游平均流量不变,只需考虑河道冲淤对下游泥沙含沙量修正。根据输沙平衡,扣除冲淤量即可得出口含沙量$S_d = S - D_s/\alpha Q$,考虑到下游河道相对冲淤强度($D_s/\alpha QS$)较小,$(1 - D_s/\alpha QS)^a \approx 1 - aD_s/\alpha QS$,因此在$a = 0.75$和$b = 1.25$条件下可以得到一个完全依据上游水沙资料计算的近似公式:

$$D_s = \alpha\varphi QS\left[1 - \frac{\beta}{\zeta^{0.25}}\left(\frac{w_0}{w}\right)^m\right] \tag{13}$$

式中$\varphi = [1 - 0.75(\beta/\zeta^{0.25})(w_0/w)^m]^{-1}$。近似修订公式(13)相比于式(2)在理论层面上更具合理性。但是需要强调的是,式(13)只在下游淤积相对于来沙量较小时候成立,在较严重冲刷时由于出口泥沙主要不受进口泥沙控制,不建议采用。为评价采用进口资料计算的效果,采用式(13)和0.9β计算冲刷情景,得到所有场次洪水下游平均冲淤强度与综合来水来沙条件的关系(图4)。如果仍然与实测的冲淤资料对比,式(13)的相关程度降低($R^2 = 0.65$),由于没有考虑实际洪水中沿途水沙变化,R^2降低是合理的。实际洪水调度中,在可假设沿岸流量不变的条件下,用式(13)可以得到合理且比较准确的下游冲淤预测结果。

2.2.2 综合来沙系数

水沙关系是影响下游河道冲淤的重要因素,来沙系数通常被作为定量反映水沙关系和判断冲淤的重要



注:$A=QS[1-\beta(w_0/w)^{0.77}\zeta^{-0.25}]\varphi$。

图 4　公式(13)计算场次洪水平均冲淤强度与来水来沙条件参数的关系

Fig. 4　The relationship between erosion-deposition intensity and the comprehensive flow-sediment parameter

指标[39]。由式(2),当下游河道处于冲淤平衡时$\zeta=0.012$,这与一般通过来沙系数判断下游冲淤平衡的临界来沙系数($0.01\leqslant\zeta_c\leqslant0.015$[39])一致。根据式(13),假设泥沙沉速$w\approx w_0$,则在冲淤平衡时可得$\zeta=0.021\sim0.028$,比上述界限值略大。但是考虑到沉降速度影响,式(13)给出的临界来沙系数应该是$\zeta_c=\beta^4(w_0/w)^{4m}$。由于 1960 年以来黄河下游(花园口)泥沙粒径有增加趋势(图 2(b)),考虑到实际的沉速变化后,由式(13)给出的冲淤平衡来沙系数仍与原来的经验来沙系数的变化范围基本一致。作为一般情况,式(13)在考虑泥沙级配变化后,影响下游河道冲淤的综合来沙系数应为:

$$\xi=\zeta\left(\frac{w}{w_0}\right)^{4m} \tag{14}$$

综合来沙系数在原来水沙条件基础上,可进一步反映泥沙级配变化对下游河道冲淤的影响。

2.2.3　水库拦粗排细减淤等作用

在正常和合理调度下,河道型防洪减淤水库都具有明显的泥沙分选作用[30]。粗沙一般会在库尾变动回水段优先淤积,细沙则主要淤积到永久回水库段和坝前,适当控制坝前水位可使细沙大量排出水库。式(14)表明水库拦粗沙不仅可以减小下游来沙量,而且还可通过减小下泄悬沙粒径、降低沉速,进一步减小综合来沙系数,从而对下游河道发挥更大的减淤作用。

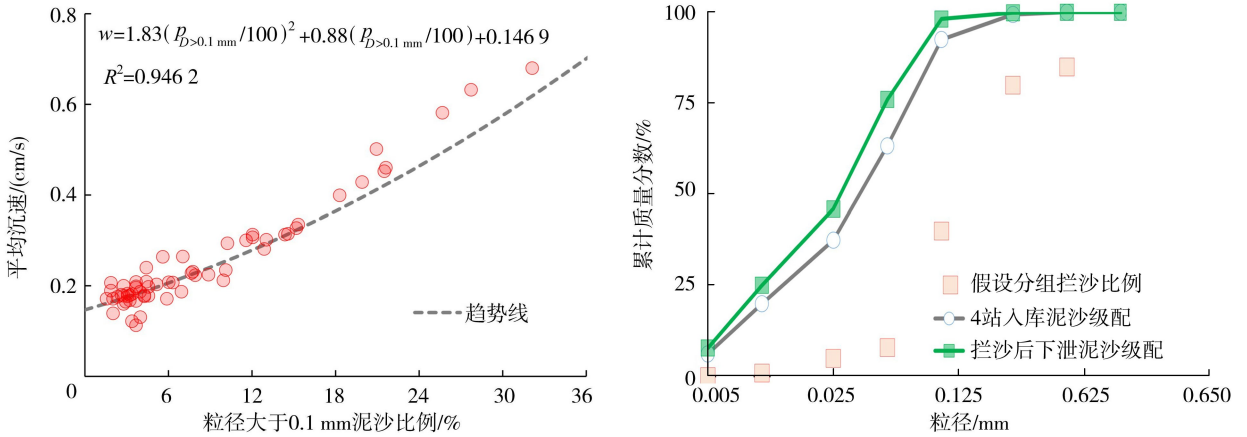
泥沙的粗细程度通常由中值粒径(D_{50})与平均沉速(w)综合表征。其中,平均沉速是反映泥沙沉积特性的关键物理参数。为进一步揭示粗沙对下游冲淤的主导作用,表 3 统计对比了 1960—2020 年花园口所有年份分组泥沙比例与 D_{50} 和 w 的线性相关性。D_{50} 与粒径小于 0.01 mm 分组泥沙比例的 R^2 最高,细沙比例很大程度决定了 D_{50},相关性较高的粗沙是 0.05~0.1 mm 分组比例。与 w 相关度最高的分组泥沙比例是粒径范围为 0.1~0.25 mm 的粗沙,$R^2=0.958$;小于 0.01 mm 分组泥沙比例的 R^2 较小,0.05~0.1 mm 分组比例的 R^2 为 0.274,粒径小于 0.05 mm 泥沙比例的 R^2 为负;0.25 mm 以上分组比例很小,R^2 反而降低;w 与粒径大于 0.1 mm 粗沙比例的二次拟合 R^2 达到 0.946 2(图 5(a),D 为粒径)。因此,粒径大于 0.1 mm 的粗沙比例几乎可以决定下游泥沙的平均沉速,成为影响综合来沙系数的主要因素,对下游河道冲淤构成重要的作用。

表 3　花园口各分组泥沙与 D_{50} 和 w 的相关程度比较($m=0.77$)

Table 3　Correlation degree of different size fractions of Huayuankou sediment with their medium diameter (D_{50}) and average full velocity (w)

泥沙分组	分组粒径/mm	p_i/%	R^2	
			D_{50}	w
1	<0.01	23.80	−0.843	−0.477
2	0.01~0.025	15.90	−0.749	−0.618
3	0.025~0.05	22.20	−0.173	−0.624
4	0.05~0.1	29.60	0.699	0.274
5	0.1~0.25	7.72	0.681	0.958
6	≥0.25	0.65	0.495	0.843

以三门峡某年入库泥沙级配为例(图 5(b)),假设水库拦截 0.25~0.5、0.1~0.25、0.05~0.1、0.025~0.05 和 0.01~0.025 mm 分组的 85%、80%、40%、8%、5%和 1%(按防洪减淤定位的水库完全可以做到)、总拦沙率 21%,则出库泥沙细化、平均沉速减小(入库和出库 w 分别为 0.239、0.135 cm/s)。如果仍以临界来沙系数 $\zeta_c=\beta^4(w_0/w)^{4m}$ 计算,上述水库拦粗沙调度可将下游河道同流量条件下不淤泥沙的含沙量提高 4.8 倍,这意味着即使水库尽量下泄泥沙,下游河道的淤积强度也可得到显著降低。黄河中游大型工程以防



(a) 1960—2020年花园口实测泥沙年平均沉速与粒径大于0.1 mm泥沙比例的关系

(b) 对某年三门峡蓄水入库泥沙级配,假设水库拦截各组粗沙比例(水库综合排沙比是79%)可明显细化下泄泥沙级配

图5 黄河下游悬沙平均沉速的决定因素和水库拦粗沙细化下游泥沙的示例

Fig. 5 Average fall velocity determinant and an example of CS trappings in fining the LYR sediment

洪减淤为核心建设目标,除特大洪水情形外,常规运行下"拦粗排细"与预留防洪库容的防洪目标高度一致,防洪能力可得到充分保障。水库排沙效果与坝前水位密切相关,若能依据减淤定位合理确定汛限水位,则上述优化调度完全可以实现。同时,黄河泥沙具有较强的吸附能力,且富含磷等生源物质,是黄河水域及邻近海洋初级生产力的重要营养来源,这也是黄河以有限径流支撑广阔流域生境的关键原因。然而,干流大型水库的大量拦沙已显著改变了泥沙及磷等物质的河流通量[40-42],大坝拦截使得原本输向下游和海洋的生源物质滞留于河流上游,转化为潜在的污染源,这是大坝对河流生态环境的主要影响之一[43-44]。按前述优化调度原则,可在保障下游减淤的前提下尽可能多排细沙,促进磷等物质通量趋于平衡。因此,优化调度不仅对当前和长远防洪安全具有重要意义,也是水利工程面向流域生态环境保护、切实降低不利影响的重要发展方向。

3 结 论

a. 钱宁等提出的黄河下游冲淤公式(式(2))简明、对河道冲淤评估十分重要,但公式局限于经验统计和短期资料,不能反映下游泥沙级配变化的影响。本文基于此提出物理意义更为明确、能全面体现水沙关系及其综合作用的修订公式,利用1952—2020年245场洪水冲淤资料对公式系数进行率定,得到统一的参数和系数,全时段和分段冲淤计算相关性都得到提高(在以冲刷为主时段的相关性相对较差,但理论框架可给出主要原因,通过调整经验参数适当降低冲刷期间输沙能力可以显著提高相关性)。

b. 来沙系数是表征黄河水沙关系及判别河道冲淤状态的重要指标。本文基于修订后的冲淤公式,提出了能够综合反映水沙总量与悬沙级配变化的综合来沙系数;其中,代表冲淤平衡的临界来沙系数更能体现变化条件下河道冲淤的发展趋势。综合来沙系数更合理和全面反映河流粗沙对下游河流淤积的作用,可以为保障防洪减淤工程切实按照"拦粗排细"调度运行提供定量调控指标。

c. 水库拦蓄粗泥沙,可显著提高黄河下游河道冲淤平衡的临界来沙系数,并增强河道的输沙能力。在当前来水量持续减少和未来流域侵蚀趋势不确定的背景下,通过水库拦截粗沙以延缓工程拦沙寿命和节约下游输沙用水,具有重要的现实意义。

参考文献:

[1] 陈艳萍,蒋倩倩,刘晶婕. 黄河流域"水资源生态保护高质量发展"空间均衡性诊断[J]. 水利经济,2024,42(1):14-20. (Chen Yanping,Jiang Qianqian,Liu Jingjie. Spatial equilibrium diagnosis of "water resources-ecological protection-high-quality development" in the Yellow River Basin[J]. Journal of Economics of Water Resources,2024,42(1):14-20. (in Chinese))

[2] Chu Zhongxin. The dramatic changes and anthropogenic causes of erosion and deposition in the Lower Yellow (Huanghe) River since 1952[J]. Geomorphology,2014,216:171-179.

[3] Wang Shuai, Fu Bojie, Piao Shilong, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes[J]. Nature Geoscience, 2016, 9(1): 38-41.

[4] Cheng Yifei, Xia Junqiang, Zhou Mirong, et al. Recent variation in channel erosion efficiency of the Lower Yellow river with different channel patterns[J]. Journal of Hydrology, 2022, 610: 127962.

[5] 吴腾,申孙平,李涛,等. 三盛公水库运用对下游河道输沙的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(5):401-405. (Wu Teng, Shen Sunping, Li Tao, et al. Influence of operation of Sanshenggong Reservoir on sediment transport in the downstream river[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(5): 401-405. (in Chinese))

[6] Zhang Min, Huang Heqing, Carling P A, et al. Sedimentation of overbank floods in the confined complex channel-floodplain system of the Lower Yellow River, China[J]. Hydrological Processes, 2017, 31(20): 3472-3488.

[7] 张金良,仝亮,王卿,等. 黄河下游治理方略演变及综合治理前沿技术[J]. 水利水电科技进展,2022,42(2):41-49. (Zhang Jinliang, Tong Liang, Wang Qing, et al. Evolution of regulation strategy for lower Yellow River and its cutting-edge technology of comprehensive management[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(2): 41-49. (in Chinese))

[8] 端木礼明,张遂芹. 河南黄河二级悬河形成及治理对策[J]. 中国水利,2003(12):58-59. (Duanmu Liming, Zhang Suiqin. Forming, present condition and control measures of secondary suspended rivers of the Yellow River in Henan Province[J]. China Water Resources, 2003(12): 58-59. (in Chinese))

[9] 张金良. 黄河下游滩区再造与生态治理[J]. 人民黄河,2017,39(6):24-27. (Zhang Jinliang. Reconstruction and ecological management of the Lower Yellow River floodplain[J]. Yellow River, 2017, 39(6): 24-27. (in Chinese))

[10] 胡春宏. 黄河水沙变化与治理方略研究[J]. 水力发电学报,2016,35(10):1-11. (Hu Chunhong. Changes in runoff and sediment loads of the Yellow River and its management strategies[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(10): 1-11. (in Chinese))

[11] 安催花,鲁俊,吴默溪,等. 黄河下游河道平衡输沙的沙量阈值研究[J]. 水利学报,2020,51(4):402-409. (An Cuihua, Lu Jun, Wu Moxi, et al. The threshold value of equilibrium sediment transport in the Lower Yellow River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(4): 402-409. (in Chinese))

[12] 陈翠霞,朱呈浩,赵翔,等. 小浪底水库调控后黄河下游冲淤规律与水沙调控指标[J]. 水科学进展,2024,35(4):606-616. (Chen Cuixia, Zhu Chenghao, Zhao Xiang, et al. Scouring and silting law of the Lower Yellow River and water and sediment regulation indicators after the regulation of Xiaolangdi Reservoir[J]. Advances in Water Science, 2024, 35(4): 606-616. (in Chinese))

[13] Wu Baosheng, Xia Junqiang, Fu Xudong, et al. Effect of altered flow regime on bankfull area of the Lower Yellow River, China[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2008, 33(10): 1585-1601.

[14] 钱宁,张仁,赵业安,等. 从黄河下游的河床演变规律来看河道治理中的调水调沙问题[J]. 地理学报,1978,33(1):13-24. (Chien Ning, Zhang Ren, Zhao Ye'an, et al. The improvements of the Lower Yellow River[J]. Acta Geographica Sinica, 1978, 33(1): 13-24. (in Chinese))

[15] 赵文林. 黄河泥沙[M]. 郑州:黄河水利出版社,1996.

[16] 陈界仁,官学文. 黄河下游河道萎缩过程初步分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2003,31(5):501-504. (Chen Jieren, Guan Xuewen. Analysis of lower Yellow River shrinkage[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2003, 31(5): 501-504. (in Chinese))

[17] 许炯心. 黄河下游洪水的输沙效率及其与水沙组合和河床形态的关系[J]. 泥沙研究,2009(4):45-50. (Xu Jiongxin. Sediment transport efficiency of floods in the Lower Yellow River in relation with water-sediment combination and channel geometry[J]. Journal of Sediment Research, 2009(4): 45-50. (in Chinese))

[18] 张金良,练继建,张远生,等. 黄河水沙关系协调度与骨干水库的调节作用[J]. 水利学报,2020,51(8):897-905. (Zhang Jinliang, Lian Jijian, Zhang Yuansheng, et al. Coordination degree of water-sediment relationship of the Yellow River and regulating effect of the backbone reservoir[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(8): 897-905. (in Chinese))

[19] 钱宁,王可钦,阎林德,等. 黄河中游粗沙来源区及其对黄河下游冲淤的影响[C]//河流泥沙国际学术讨论会论文集. 北京:光华出版社,1980: 184-195.

[20] 徐建华,吕光圻,张胜利,等. 黄河中游多沙粗沙区区域界定及产沙输沙规律研究[M]. 郑州:黄河水利出版社,2000.

[21] 徐建华,林银平,吴成基,等. 黄河中游粗泥沙集中来源区界定研究[M]. 郑州:黄河水利出版社,2006.

[22] Xu Jiongxin, Hu Chunhong, Chen Jianguo. Effect of suspended sediment grain size on channel sedimentation in the lower Yellow River and some implications[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 52(8): 2330-2339.

[23] 姚文艺,郜国明. 黄河下游洪水冲淤相对平衡的分组含沙量阈值探讨[J]. 水科学进展,2008,19(4):467-474. (Yao Wenyi, Gao Guoming. Study on threshold of grouping sediment concentration about floods scouring and silting relative balance in

the Lower Yellow River[J]. Advances in Water Science,2008,19(4):467-474. (in Chinese))
[24] 高璐,徐向舟,张红武. 持续冲刷期内黄河下游河床演变特点分析[J]. 水利水电科技进展,2024,44(3):73-79. (Gao Lu, Xu Xiangzhou, Zhang Hongwu. Characteristics of channel adjustment in Lower Yellow River during continuously scouring period [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(3):73-79. (in Chinese))
[25] 程亦菲,夏军强,周美蓉,等. 黄河下游不同河段分组悬沙输移对河床冲淤的影响[J]. 水科学进展,2022,33(3):506-517. (Cheng Yifei, Xia Junqiang, Zhou Meirong, et al. Effects of grouped suspended sediment transport on channel evolution in the Lower Yellow River[J]. Advances in Water Science,2022,33(3):506-517. (in Chinese))
[26] 申冠卿,张原锋. 黄河高含沙洪水调控与局部河段滞沙研究[M]. 郑州:黄河水利出版社,2017.
[27] 李肖男,钟德钰,王彦君,等. 变化环境下黄河下游治理模式对河床冲淤的影响[J]. 水力发电学报,2017,36(9):60-74. (Li Xiaonan, Zhong Deyu, Wang Yanjun, et al. Effect of training strategies on fluvial process in Lower Yellow main stream under hydrological changes[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2017,36(9):60-74. (in Chinese))
[28] Van Maren D S, Winterwerp J C, Wu B S, et al. Modelling hyperconcentrated flow in the Yellow River[J]. Earth Surface Processes and Landforms,2009,34(4):596-612.
[29] 张防修,史玉品,王明,等. 黄河下游河道冲淤模型的构建与验证[J]. 人民黄河,2019,41(3):26-30. (Zhang Fangxiu, Shi Yupin, Wang Ming, et al. Construction and verification of the channel scouring and siltation model in the Lower Yellow River[J]. Yellow River,2019,41(3):26-30. (in Chinese))
[30] Zhou Jianjun, Zhang Man, Cao Huiqun. Removing coarse sediment by sorting of reservoirs[J]. Science China Technological Sciences,2011,54(4):903-913.
[31] 申冠卿,张原峰,尚红霞. 黄河下游河道对洪水的响应机理与泥沙输移规律[M]. 郑州:黄河水利出版社,2008.
[32] 唐德善. 三门峡水库对黄河冲淤分析[J]. 河海大学学报,1996,24(6):77-82. (Tang Deshan. Analysis of Sanmenxia Reservoir-induced sourcing and silting in the trunk of the Yellow River[J]. Journal of Hohai University,1996,24(6):77-82. (in Chinese))
[33] Wang Junjie, Shi Bing, Zhao Enjin, et al. The long-term spatial and temporal variations of sediment loads and their causes of the Yellow River Basin[J]. Catena,2022,209:105850.
[34] 赵业安,潘贤弟,樊左英,等. 黄河下游河道冲淤情况及基本规律[C]//黄河水利委员会水利科学研究所. 科学研究论文集(第1集):泥沙、水土保持. 郑州:河南科学技术出版社,1989.
[35] 钱宁,万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社,1991.
[36] Leopold L B, Maddock T J. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications[M]. Washington: U. S. Government Printing Office,1953.
[37] 钱意颖,杨文海,赵文林,等. 高含沙水流的基本特性[C]//中国水利学会. 河流泥沙国际学术讨论会论文集. 北京:光华出版社,1980(1): 184-195.
[38] SL 42—2010 河流泥沙颗粒分析规程[S].
[39] 胡春宏. 黄河水沙过程变异及河道的复杂响应[M]. 北京:科学出版社,2005.
[40] Syvitski J P M, Vörömarty C J, Kettner A J, et al. Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean [J]. Science,308(5720):376-380.
[41] Maavara T, Parsons C T, Ridenour C, et al. Global phosphorus retention by river damming[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2015,112(51):15603-15608.
[42] 顾艳林,刘畅,陈开雯,等. 黄河下游流域行洪输沙社会经济生态环境系统耦合协调分析[J]. 水资源保护,2025,41(4):87-93. (Gu Yanlin, Liu Chang, Chen Kaiwen, et al. Coupling coordination analysis of flood and sediment transport-social economy-ecological environment system in the lower Yellow River Basin[J]. Water Resources Protection,2025,41(4):87-93. (in Chinese))
[43] Zhou Jianjun, Zhang Man, Lu Pingyu. The effect of dams on phosphorus in the Middle and Lower Yangtze river[J]. Water Resources Research,2013,49(6):3659-3669.
[44] 周建军,张曼. 当前长江生态环境主要问题与修复重点[J]. 环境保护,2017,45(15):17-24. (Zhou Jianjun, Zhang Man. On the forefront ecological and environmental problems of the current Yangtze River and restoration priorities[J]. Environmental Protection,2017,45(15):17-24. (in Chinese))

(收稿日期:2025-02-12 编辑:刘晓艳)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.05.009

知识图谱与大语言模型协同的河涌整治方案智能决策方法

张凯博[1],叶 枫[1,2],许 栋[2],李彬权[3],窦身堂[4]

(1. 河海大学计算机与软件学院; 2. 河海大学水利部水循环与水动力系统重点实验室;
3. 河海大学水文水资源学院; 4. 黄河水利科学研究院)

摘要:针对当前河涌整治方案决策中多源数据整合不足、系统级关联缺失及决策可解释性弱等问题,提出了一种知识图谱与大语言模型协同的河涌整治方案智能决策方法。该方法通过整合河涌、水闸工况、联围拓扑等多源数据构建了河涌整治知识图谱,设计了两阶段分类模型(阶段 1 基于随机森林建模物理特征与工程比值参数;阶段 2 从知识图谱中提取拓扑关系,采用 Node2Vec 算法生成 64 维图嵌入特征输入逻辑回归模型优化决策边界),开发了基于 DeepSeek-R1 的生成式评估引擎,结合领域知识增强的提示学习,通过多步推理生成可解释推理链,用于方案可行性评估与改进建议生成,并通过多标签分类性能对比和消融实验对该方法进行了验证。广州市南沙区 228 条河涌实例验证结果表明:该方法可有效缓解传统方法中多源数据整合不足、系统级关联分析缺失、决策过程可解释性弱的问题,其 F1 值(精确率与召回率的调和平均数)达 0.853,准确率达 0.921,整体性能优于所列基线模型;拓扑嵌入和领域知识增强的多步推理机制均能有效改善方法的性能,本文方法取得了最高的 F1 值和最低的汉明损失,验证了各关键模块的有效性。

关键词:河涌整治;知识图谱;大语言模型;系统关联分析;可解释决策;方案优选

中图分类号:TV85 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-1980(2026)05-0079-12

Intelligent decision-making method for river regulation schemes via collaboration of knowledge graph and large language model

Zhang Kaibo[1], **Ye Feng**[1,2], **Xu Dong**[2], **Li Binquan**[3], **Dou Shentang**[4]

(1. *College of Computer Science and Software Engineering, Hohai University*;
2. *Key Laboratory of Hydrologic-cycle and Hydrodynamic System of Ministry of Water Resources, Hohai University*;
3. *College of Hydrology and Water Resources, Hohai University*; 4. *Yellow River Institute of Hydraulic Research*)

Abstract: To address problems such as insufficient multi-source data integration, lacking system-level association analysis, and weak decision interpretability in current decision-making of river regulation schemes, an intelligent decision-making method for river regulation schemes via collaboration of knowledge graph and large language model was proposed. In this method, a knowledge graph for river regulation was constructed by integrating multi-source data such as river channels, sluice operating conditions, and dyke-cluster topology. A two-stage classification model was designed (Stage 1 modeled physical features and engineering ratio parameters based on random forests; Stage 2 extracted topological relationships from the knowledge graph and utilized the Node2Vec algorithm to generate 64-dimensional graph embedding features input into a logistic regression model for optimizing decision boundary). A generative evaluation engine based on DeepSeek-R1 was developed, which combined domain-knowledge-enhanced prompt learning to generate interpretable reasoning chains through multi-step reasoning for scheme feasibility assessment and improvement recommendation generation. The proposed method was validated through multi-label classification performance comparison and ablation experiments. Verification results of 228 river channels in Nansha District, Guangzhou indicate that this method can effectively alleviate the problems of insufficient multi-source data integration, missing system-level association analysis, and weak interpretability of decision-making process in traditional methods. Its F1 score (the harmonic mean of precision and recall) reaches 0.853, and the accuracy reaches 0.921, indicating that its overall performance is superior to that of the baseline models considered. Both the topological embedding and

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3202600);国家自然科学基金项目(U2443219);广州市南沙区防洪潮安全系统提升关键技术研究项目(823005916)

作者简介:张凯博(2002—),男,硕士研究生,主要从事知识工程研究。E-mail:zhangkaibo@hhu.edu.cn

通信作者:叶枫(1980—),男,讲师,博士,主要从事水利信息化与数字孪生研究。E-mail:yefeng1022@hhu.edu.cn

the domain-knowledge-enhanced multi-step reasoning mechanism can effectively improve method performance. The proposed method achieves the highest F1 score and the lowest Hamming loss, verifying the effectiveness of each key module.

Key words: river regulation; knowledge graph; large language model; system association analysis; interpretable decision; scheme optimization

本文所指的河涌是珠江三角洲城市内的河汊、支流及人工渠化河道,在城市水系中承担着排涝、水质净化和生态景观等重要职责[1]。城市化进程加速导致河涌淤积、断面缩窄,防洪能力持续下降;叠加极端天气频发,城市内涝风险显著增加,易引发交通瘫痪、基础设施损毁及公共卫生风险[2-5]。因此,科学整治河涌对提升城市水系管理效能具有关键意义[6-7]。

为强化城市对抗内涝灾害的韧性,减小其造成的损害与波及范围,国内外学者围绕城市内涝防灾与河涌整治开展了系列研究。马超等[8]将示踪方法与水力计算耦合揭示排水分区间水量关联性并提出防灾方案,使方案制定时聚焦区域积水量,降低规划成本;Wang 等[9]结合 CMIP6 数据模拟未来城市降雨和内涝情景,为城市排涝规划提供依据;徐存东等[10]提出一种基于信息熵权的改进 TOPSIS 综合评价模型,并将其应用于乌海市摩尔沟河道整治方案的优选中;李慧宁等[11]采用 Infoworks ICM 水力模型分析城市的排水防涝体系,剖析内涝成因并提出治理方案;王凌河等[12]结合雅砻江流域内的调水工程,选择多指标表征生态环境,设置多种调水方案,利用模糊优选方法对雅砻江调水方案进行优化选择。然而,现有研究多依赖独立数据库,缺乏对多源实体数据(如河涌、水闸、联围等)的动态关联建模。使用传统的水动力数学模型和机器学习模型虽能通过数据分析和评估提出一种可行性高的河涌整治方案,但是未考虑方案组合对河涌整治的影响,并且评估机制具有黑箱性,无法生成领域适配的推理链。

随着人工智能的快速发展,神经网络[13-14]、知识图谱(knowledge graph, KG)[15]、大语言模型(large language model, LLM)[16]等开始广泛应用于水利信息化领域的研究中。Wang 等[17]利用图卷积神经网络(graph convolutional network, GCN),以低成本、高精度、广覆盖和细粒度的方式实现了城市内涝监测;Waqas 等[18]将长短期记忆网络(long short-term memory, LSTM)和循环神经网络(recurrent neural network, RNN)与小波变换(wavelet transform, WT)相结合,在季节性降雨预测中比传统 LSTM 模型具有更高的预测精度;冯钧等[19]提出了基于 LLM 的水工程调度知识图谱构建法,能高效提炼规则文本,完成数据集与图谱的构建;杨燕等[20]融合 LangChain 和提示学习,提出了面向数字孪生水利领域的 LLM 知识抽取方法,确保了知识图谱构建质量,实现了该领域图谱的构建。然而,知识图谱与大语言模型在河涌整治中的潜力尚未充分挖掘。

本文以广州市南沙区的河涌为研究对象,提出了一种知识图谱与大语言模型协同的河涌整治方案智能决策方法(以下称为 KG-TS2-LLM),构建了“全域感知-知识融合-动态评估”的全链条决策框架。区别于单一数据驱动方法,本文决策框架通过知识图谱实现结构化工程参数与拓扑关系的系统整合,采用随机森林[21]与 Node2Vec 算法[22]构建两阶段分类模型,并结合 DeepSeek-R1[23]设计领域知识增强的提示学习,进行多维度、多步骤评分修正的评估与优化,筛选高质量方案。需说明的是,本文方法与当前主流的检索增强生成(retrieval-augmented generation, RAG)[24]范式不同,RAG 依赖单向知识检索辅助生成,而本文方法通过“物理特征→拓扑约束→语义验证”协同机制,知识图谱提供拓扑关联约束,驱动两阶段分类模型动态优化决策边界,LLM 则受思维链(chain-of-thought, CoT)[25-26]技术启发,通过针对性提示工程模块,以知识图谱信息为事实锚点、评估标准为考量依据,生成可解释推理链并反馈修正模型输出,形成完整优化链路;同时,针对水利工程数据量受限的场景,Node2Vec 算法与随机森林的高效计算特性有助于降低对训练样本量的依赖,结合提示学习注入的防洪排涝标准等先验知识,可为河涌整治建立系统关联约束下的动态决策框架。

1 关键技术基础

1.1 Binary Relevance

Binary Relevance[27]即二元相关性,通过将多标签分类问题转化为多个二元分类问题简化问题的复杂度,其中每个二元分类器对应一个待预测的标签。该方法适用于因变量之间不存在相关依赖关系的情况,便于快速处理河涌整治多标签决策场景。

1.2 随机森林

随机森林是一种机器学习算法,它通过构建大量决策树进行分类或回归任务,并通过聚合这些树的预测

结果提高整体模型的准确性和鲁棒性。选择随机森林作为基分类器,是因其具有强非线性拟合能力,抗噪声鲁棒性强,可捕捉河涌物理参数与整治方案间的复杂关系。

1.3　Node2Vec 算法

Node2Vec 算法是一种基于随机游走的节点嵌入方法,通过对图中节点进行采样,并利用这些采样结果训练能够表示节点的嵌入向量。这些向量不仅能保留节点的局部邻域信息,还能反映节点在整个图中的全局位置。Node2Vec 算法能平衡捕捉水系网络的局部结构与全局层级关联,较动态图神经网络更具计算效率与工程适配性,能有效解决数据量限制下的系统级关联建模难题。

1.4　逻辑回归模型

逻辑回归模型[28]使用一个参数化函数(式(1))计算给定输入变量的输出概率。该函数称为 sigmoid 函数,它将输入变量的线性组合映射到 0~1 间的数值,表示预测样本属于正例的概率。sigmoid 函数的特性使其能够将任意实数映射到(0,1)区间,故适用于二分类问题的概率预测。

$$\sigma(x)=\frac{1}{1+\mathrm{e}^{-x}} \tag{1}$$

式中:x 为逻辑回归模型的线性预测量;$\sigma(\cdot)$为 sigmoid 函数。

1.5　DeepSeek-R1

DeepSeek-R1 是基于 Transformer 的千亿参数大语言模型,具有推理性能优异、自我演化等特点,采用基于规则的强化学习方法,可观察输出内容,使用预定义的规则计算每个输出的奖励,从而训练模型生成首选方案。由于不使用神经模型生成奖励,该方法简化并降低了训练成本。其中,思维链作为 DeepSeek-R1 的重要推理增强机制,是一种模拟人类逻辑推理过程的技术,它将复杂问题拆解为一系列连续的、具有因果关联的中间推理步骤,通过逐步推导最终得出结论。采用该链式设计,可使复杂决策的逻辑清晰、可追溯,提升推理的准确性。

2　河涌整治方案智能决策方法

河涌整治方案智能决策方法包括知识图谱构建、多模态特征融合、生成式评估优化 3 个核心模块,可完成从原始数据到决策方案的全流程处理。

2.1　双驱动协同决策体系架构

双驱动机制即数据驱动与知识驱动的协同:数据驱动聚焦物理参数建模,为知识驱动提供数据基础;知识驱动则通过知识图谱编码拓扑关系约束,以修正数据驱动的结果。双驱动协同决策体系架构,自顶向下分别为感知层、认知层和决策层(图 1):①感知层整合多源异构数据,包括河涌信息、水闸分布统计、政府排涝规划等数据,通过知识图谱实现知识对齐;②认知层采用两阶段多标签分类器,阶段 1 基于物理参数生成基础方案概率,阶段 2 引入图嵌入特征优化决策边界;③决策层设计领域知识引导的 LLM 评估引擎,对认知层中得到的方案进行多维评估和多步推理,融合数据特征与知识图谱关系,通过评分机制评估并优化方案,从而得到最优整治方案。

2.2　河涌整治知识图谱构建

知识图谱在逻辑架构上分为模式层和实例层,模式层在实例层之上,是知识图谱的核心[29]。河涌整治知识图谱采用自顶向下与自底向上结合的研究范式构建领域知识图谱(图 2)。①进行模式层构建。模式层采用自顶向下的方式,结合专家经验、业务机理、产业准则等领域知识,设计出河涌整治所涉及的实体、实体属性和关系,实现河涌整治知识图谱的本体设计和模式层构建。②进行实例层构建。实例层采用自底向上的方式,对河涌断面观测统计、防洪排涝规划等多源异构数据进行收集和预处理,从中抽取实体及关系,利用 DeepSeek-R1 进行知识融合与加工,实现知识对齐,完成实例层的构建。

2.2.1　模式层构建

本体是一个描述性的形式化概念体系,是知识图谱的模式层,包含点类型、点类型属性以及边类型、边类型属性。领域本体是指领域概念体系的形式化规范定义。本文关注河涌整治领域的相关知识,采用七步法构建该领域的本体模型(图 3),结合领域知识定义了河涌、水闸、排涝片、联围、镇街、整治方案 6 种本体类(实体类型),以及各本体类的属性(表 1)和本体类之间的关系(表 2)。

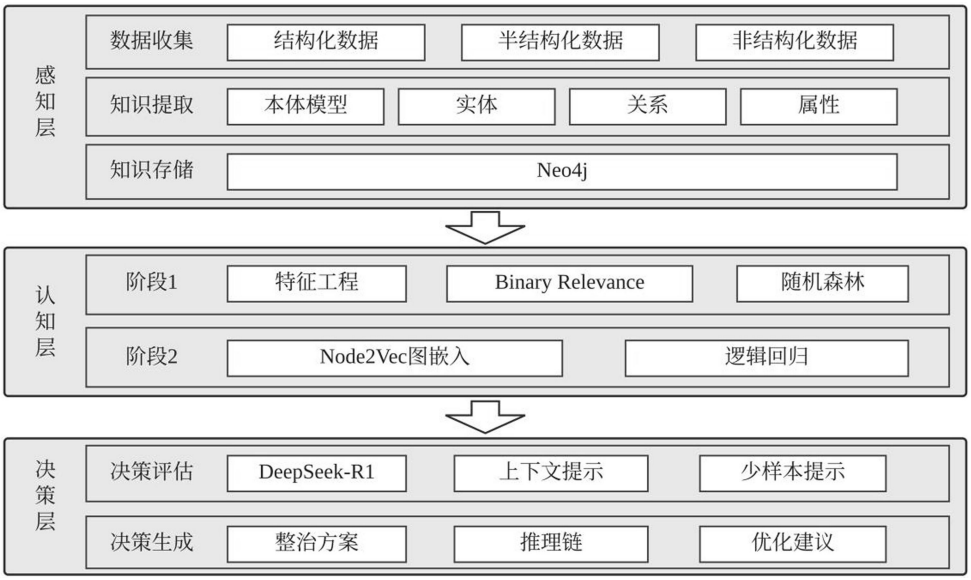


图1 双驱动协同决策体系架构

Fig. 1 Dual-driven collaborative decision-making system architecture

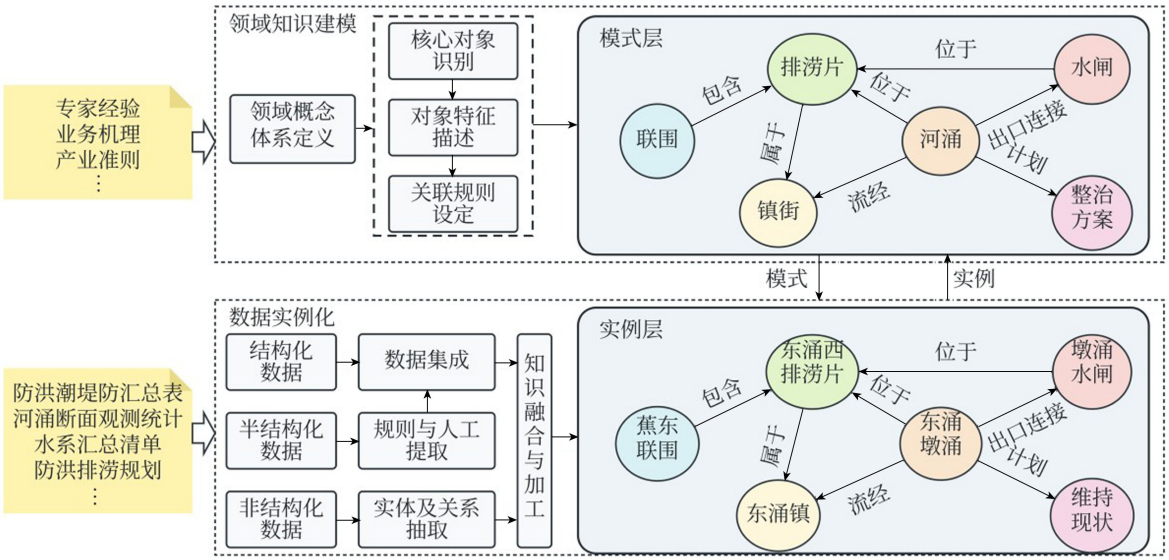


图2 河涌整治知识图谱构建框架

Fig. 2 Construction framework of knowledge graph for river regulation

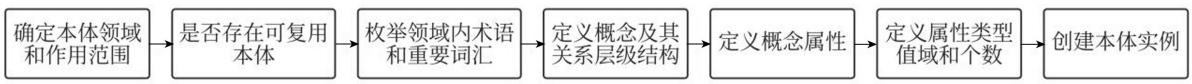


图3 七步法构建本体模型流程

Fig. 3 Seven-step process for constructing ontology model

表1 模式层本体类及其属性

Table 1 Ontology classes and their attributes in the schema layer

本体类(实体类型)	属性
河涌	ID、名称、河底高程、河长、河口宽、河底宽、水深、流速、过流能力、天然来水、是否满足排峰要求
水闸	ID、名称、净宽、闸底板高程、过流能力、天然来水、是否满足排峰要求
排涝片	ID、名称、最高水位、水面率、泵站流量、规划排涝标准
联围	ID、名称、总面积、围内面积、河涌面积、围内河涌水面率、堤防长度、岸线长度
镇街	ID、名称、负责人、联系电话
整治方案	ID、名称、推理链

2.2.2 实例层构建

知识图谱的实例层一般以三元组为基本单位,用于存储具体的数据信息[30],一般表示为:

$$G = \{E, R, F\} \tag{2}$$

式中:G 为知识图谱;E、R、F 分别为实体集合$\{e_1, e_2, \cdots, e_{n_E}\}$、关系集合$\{r_1, r_2, \cdots, r_{n_R}\}$和事实集合$\{f_1, f_2, \cdots, f_{n_F}\}$。$F$ 中每个事实均表示为一个三元组(h, r, t),其中,h 为头实体,r 为关系边,t 为尾实体。

表 2　模式层本体类之间的关系

Table 2　Relationships among ontology classes in the schema layer

头实体类型	关系类型	尾实体类型
河涌	出口连接	水闸
河涌	流经	镇街
河涌	计划	整治方案
河涌	位于	排涝片
水闸	位于	排涝片
排涝片	属于	镇街
联围	包含	排涝片

收集的数据类型包括结构化数据、半结构化数据和非结构化数据,如图 4 所示。结构化数据为表格形式的数据,如河涌信息汇总表、现状涝片最高水位统计表等;半结构化数据为嵌入在文本里的表格和具有固定格式的文本;非结构化数据为排涝分析报告和河涌水系规划等文本内容。



图 4　与河涌整治相关的多模态数据类型

Fig. 4　Multimodal data types related to river regulation

对于结构化数据,结合本体模型批量提取关键信息。对于半结构化数据,通过定义正则表达式从固定格式的文本中提取关键信息,人工抽取文本中的表格。对于非结构化数据,利用 DeepSeek-R1 通过少样本提示和上下文提示的方式,根据本体模型提取文本中的关键信息。具体流程如下:①降噪处理。对非结构化数据进行降噪处理,保留文本内容,并利用切片做到“文章→段落”,把得到的段落内容存入 JSON 格式文件中。②段落分析与填充。发挥 DeepSeek-R1 的长上下文推理能力,通过深度语义理解,将段落中“该河道”“如上措施”等模糊指代词汇精准映射为具体名称。③实体与关系抽取。调用 DeepSeek-R1 对已经处理好的段落进行实体识别并提取出它的名称和类型,结合本体模型,构造 Prompt 进行提示学习(图 5),将输出的实体以 JSON 格式进行保存。④知识融合与加工。将抽取的三元组经过 DeepSeek-R1 过滤,剔除同义和近义的表达。

Prompt设计模版

假设你是一名资深的水利领域信息抽取专家，请根据以下的本体模型和示例，严格按照输出格式进行知识抽取：

【本体模型】

实体1：河涌；实体属性：河涌ID、名称、河底高程/m、河长/m、河口宽/m、河底宽/m、水深/m、流速/(m/s)、过流能力/(m³/s)、天然来水/(m³/s)、是否满足排峰要求

实体2：水闸；实体属性：水闸ID、名称、净宽/m、闸底板高程/m、过流能力/(m³/s)、天然来水/(m³/s)、是否满足排峰要求

实体3：排涝片；实体属性：排涝片ID、名称、最高水位/m、水面率/%、流量/(m³/s)、规划排涝标准

实体4：联围；实体属性：联围ID、名称、总面积/km²、围内面积/km²、河涌面积/km²、围内河涌水面率/%、堤防长度/km、岸线长度/km

实体5：镇街；实体属性：镇街ID、名称、负责人、联系电话

实体6：整治方案；实体属性：整治决策ID、名称、推理链

关系（<头实体，关系，尾实体>）：<河涌，出口连接，水闸>、<河涌，流经，镇街>、<河涌，计划，整治方案>、<河涌，位于，排涝片>、<水闸，位于，排涝片>、<排涝片，属于，镇街>、<联围，包含，排涝片>

【示例】

输入：东涌墩涌的出口处有一个名为墩涌水闸的水闸，其出口水闸底高程为-2 m，过流能力34.1 m³/s。该河涌的水深为19.4 m，流速为0.73 m/s，位于东涌镇，属于东涌西排涝片。

输出：<东涌墩涌，出口连接，墩涌水闸>、<墩涌水闸，闸底板高程/m，13.6>、<墩涌水闸，过流能力/(m3/s)，34.1>、<东涌河涌，水深/m，19.4>、<东涌河涌，流速/(m/s)，0.73>、<东涌河涌，流经，东涌镇>、<东涌河涌，位于，东涌西排涝片>、<墩涌水闸，位于，东涌西排涝片>、<东涌西排涝片，属于，东涌镇>

图 5　Prompt 设计模板

Fig. 5　Prompt design template

对提取的知识进行融合与加工之后,将 JSON 格式的实体-属性、实体-关系三元组存入 Neo4j 图数据库中,实现对河涌整治知识图谱的构建与存储。

2.3 拓扑嵌入的两阶段分类模型

构建两阶段分类模型,通过物理特征与拓扑嵌入的级联融合,输出9种预定义整治方案的多标签概率分布。其中,拓扑嵌入指从知识图谱提取拓扑关系(如河涌-水闸连接),通过Node2Vec算法编码为64维向量的过程;预定义的整治方案参照《广州市南沙新区防洪(潮)排涝规划标准》,包括维持现状、清淤、拓宽、延伸、部分调整、局部改道、改道、开挖为人工湖、开挖为水库。如图6所示,模型采用"物理特征→拓扑嵌入"的双阶段特征传递机制:阶段1为物理特征分类,采用Binary Relevance分解多标签任务,通过随机森林学习河涌特征与方案间的映射关系,基于水文参数生成基础概率分布;阶段2为拓扑特征融合,融合知识图谱的拓扑特征进行方案修正,将阶段1输出的概率向量与Node2Vec算法生成的图嵌入拼接,利用逻辑回归建模系统级约束。

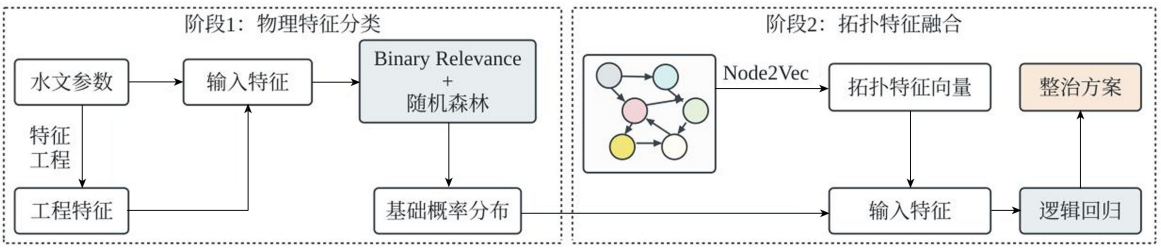


图6 两阶段分类模型框架

Fig. 6 Framework of two-stage classification model

2.3.1 物理特征分类

阶段1的基本输入特征为河涌参数(表1),输出的概率分布为各种预定义方案的可能性。由于在河涌整治实践中经常出现组合型决策(如清淤并拓宽),故整治方案具有多标签特性。为此,本模型设计为多标签分类任务,以实现对复合整治方案的识别与概率量化。在完成去除缺失值、重复值、异常值的数据清洗后,需要根据数据特征进行特征工程的处理。根据水利领域知识,新增断面形态系数(S)、流速效率(V_e)、过流容纳率(ρ_{cn})3项特征:

$$S=\frac{W_b}{W_{ot}} \qquad V_e=\frac{v}{\sqrt{gh_1}} \qquad \rho_{cn}=\frac{Q_c}{Q_n} \tag{3}$$

式中:W_b、W_{ot}分别为河底宽和河口宽;v为流速;g为重力加速度(取9.8 m/s^2);h_1为水深;Q_c为过流能力;Q_n为天然来水量。

阶段1将Binary Relevance多标签分类方法与随机森林模型结合,共同预测河涌整治方案的基础概率分布。Binary Relevance将多标签任务分解为M个相互独立的二分类子任务。给定N个样本,对第j个标签训练随机森林分类器,则样本i对应的预测概率及二值预测结果表示为:

$$p_{ij}=f_j(\boldsymbol{x}_i) \qquad \hat{y}_{ij}=\boldsymbol{I}(p_{ij}\geqslant\tau) \qquad (i=1,2,\cdots,N,\ j=1,2,\cdots,M) \tag{4}$$

式中:N为样本数;M为标签数;$\boldsymbol{x}_i\in\mathbb{R}_{d_p}$为样本$i$的物理特征向量;$d_p=12$为物理特征维数;$f_j(\cdot)$为第$j$个标签对应的随机森林概率预测函数;$p_{ij}\in[0,1]$为预测概率;$\hat{y}_{ij}\in\{0,1\}$为预测结果;$\boldsymbol{I}(\cdot)$为示性函数,当括号内条件成立时取1,否则取0;$\tau=0.5$为分类阈值。

融合河涌的水文参数和领域知识引导的新增特征参数作为输入特征,采用表3中参数,利用Binary Relevance和随机森林得到阶段1的基础概率分布$\boldsymbol{P}$:

$$\boldsymbol{P}=f_{\text{BR-RF}}(\boldsymbol{X}_{\text{phys}})=(p_{ij})_{N\times M} \tag{5}$$

式中:$f_{\text{BR-RF}}(\cdot)$为Binary Relevance与随机森林组合模型的整体概率预测映射;$\boldsymbol{X}_{\text{phys}}\in\mathbb{R}_{N\times d_p}$为物理特征矩阵;$\boldsymbol{P}\in[0,1]_{N\times M}$为基础概率矩阵。

表3 阶段1关键参数

Table 3 Key parameters of Stage 1

参数	取值	作用
决策树数量	200	平衡精度与计算成本
最大深度	10	控制过拟合,经交叉验证确定
类别权重	'balanced'	缓解类别不平衡问题

2.3.2 拓扑特征融合

阶段2的输入特征为阶段1得到的基础概率分布$\boldsymbol{P}$和河涌的拓扑特征,其中拓扑特征即为河涌在知识图谱中的关联信息。对于拓扑特征的提炼,首先通过图数据库查询语言Cypher从Neo4j中提取有关该河涌

的关联信息,包括其出口连接的水闸,所处的排涝片等信息;其次,由于传统的机器学习方法难以直接处理图数据,故引入 Node2Vec 算法,将节点映射为低维向量,使其能够被应用到分类任务中。需要说明的是,“河涌-计划-整治方案”关系仅在决策完成后用于存储输出结果,不参与 Node2Vec 训练及阶段 2 的特征构建;Node2Vec 仅利用河涌与水闸、排涝片、联围和镇街之间的既有拓扑关系生成图嵌入。此外,采用逻辑回归作为阶段 2 的分类算法,由于该算法适用于二分类问题,故本研究将其与 Binary Relevance 相结合,使算法能够适用于多标签分类任务。在得到图嵌入矩阵 $\boldsymbol{Z}\in\mathbb{R}_{N\times d_e}$($d_e$ 为图嵌入特征维数,$d_e=64$)后,将其与基础概率矩阵 $\boldsymbol{P}$ 进行水平拼接,并输入逻辑回归模型,基于表 4 中参数得到最终多标签预测矩阵 $\hat{\boldsymbol{Y}}$:

$$\hat{\boldsymbol{Y}}=\boldsymbol{I}\{\sigma[\mathrm{Concat}(\boldsymbol{P},\boldsymbol{Z})\boldsymbol{W}+\boldsymbol{b}]\geqslant\tau\} \tag{6}$$

式中:Concat(·)为矩阵水平拼接;$\boldsymbol{W}\in\mathbb{R}_{(M+d_e)\times M}$ 为权重矩阵;$\boldsymbol{b}\in\mathbb{R}_M$ 为偏置向量,并按样本维度逐行参与运算;$\sigma(\cdot)$为逐元素作用的 sigmoid 函数;$\hat{\boldsymbol{Y}}\in\{0,1\}_{N\times M}$ 为最终预测矩阵。

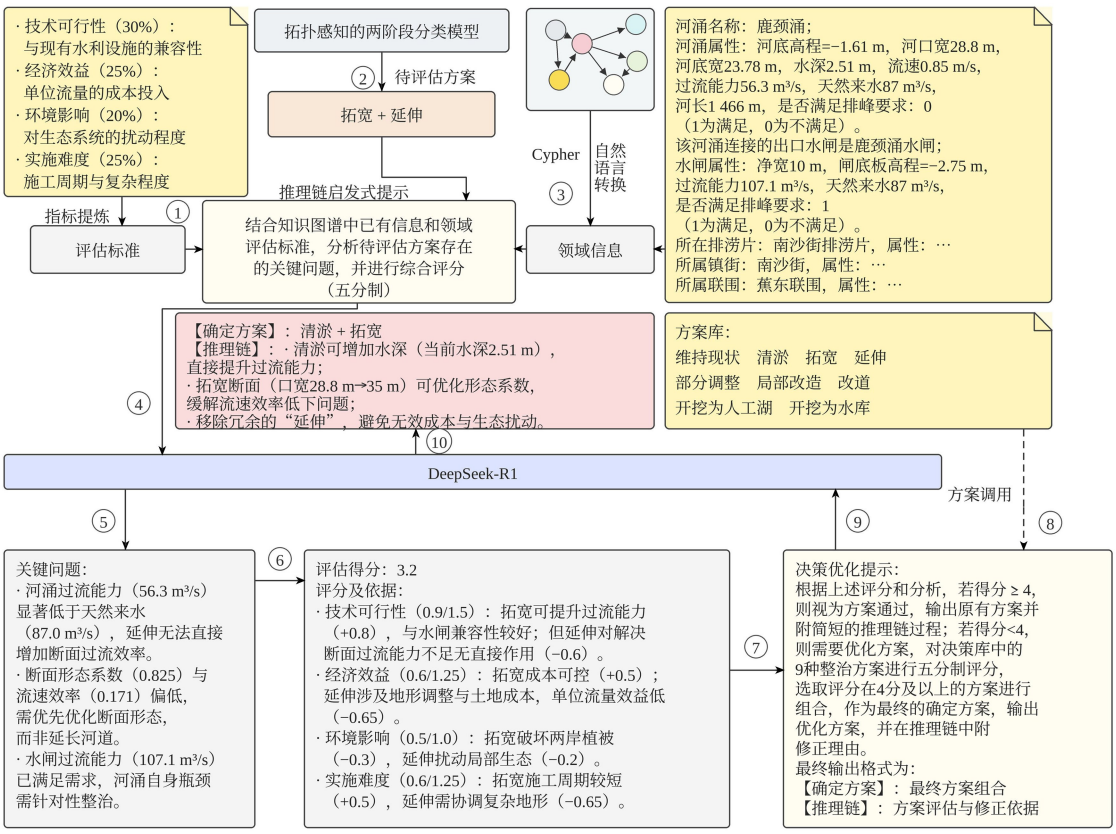
表 4　阶段 2 关键参数

Table 4　Key parameters of Stage 2

参数	取值	作用
图嵌入维度	64	平衡信息量与维度灾难
节点遍历的步长	20	反映平均路径长度
随机游走的次数	10	生成一系列随机游走路径,这些路径将用于训练模型
惩罚项	l1	特征选择,提升模型可解释性
正则化系数	0.1	控制正则化强度,防止过拟合

2.4　生成式决策评估优化引擎

基于 DeepSeek-R1 的生成式决策评估优化引擎,通过自然语言推理与领域知识注入,引入思维链技术,将评估过程分解为多步推理,通过提示学习对 DeepSeek-R1 进行启发式引导,为方案的可行性论证提供依据。图 7 为生成式决策评估优化引擎的流程框架。



注：箭头旁序号表示信息流转顺序；步骤①~③为并行的信息准备环节；步骤⑦~⑨仅在评估得分低于4分时执行，步骤⑩为最终输出。

图 7　生成式决策评估优化引擎流程框架

Fig. 7　Process framework of generative decision evaluation and optimization engine

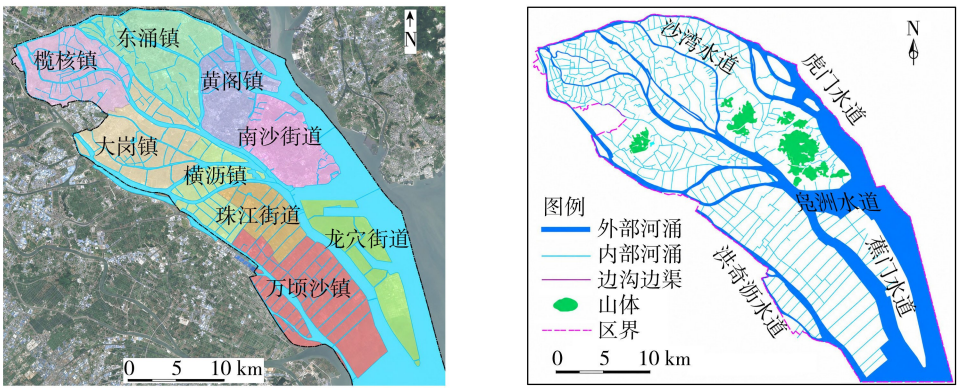
从认知层中得到两阶段分类模型给出的结果,将其作为待评估的决策方案;并从感知层中通过 Cypher 语法提取有关河涌的关联信息,包括河涌的属性、出口水闸、联围等,将这些关联信息转换成自然语言作为接下来评估的领域信息依据。此外,从《广州市防洪排涝建设标准》中提炼 4 个关键点,包括技术可行性、经济效益、环境影响和实施难度,将其作为评估标准。

受 CoT 技术的启发,提出推理链启发式提示策略。模型在推理过程中以知识图谱中的信息为事实锚点,以评估标准为考量依据,采用多步推理的方式,首先根据领域信息和评估标准给出待评估方案存在的关键问题;其次,基于关键问题的严重性、方案的可行性与河涌及周边设施的现状对方案进行综合性评分(五分制)。若评分在 4 分及以上,则视为方案通过,推理链需要总结推理过程,给出简短且具有可解释性的评估理由;若评分在 4 分以下,则需要结合河涌现状和方案存在的问题,对决策库中的 9 种整治方案进行五分制的评分,选取评分在 4 分及以上的方案进行组合,作为最终的确定方案,并在推理链中给出修正理由。

3 实例验证

3.1 研究区概况

南沙区位于广州市最南端,珠江虎门水道西岸,是西江、北江、东江三江汇流入海口,东邻东莞,西接中山、佛山,南濒伶仃洋,总面积 803 km^2(其中陆域 570 km^2,水域 233 km^2),其概况如图 8 所示。地属亚热带季风气候,年均降水量达 1 700 mm,汛期占全年 80%以上,且 7—9 月台风多发,最大风力超 9 级。区域内河涌众多,共有 228 条,但是水面率仅 3.64%,调蓄能力有限。作为粤港澳大湾区核心枢纽,南沙区亟须通过优化系统性防洪排涝规划,提升城市韧性,以支撑其国际化滨海新城的定位。



(a)区位图 (b)水系图

图 8 南沙区概况

Fig. 8 Overview of Nansha District

3.2 实验数据与环境

实验选用广州市南沙区截至 2022 年底的水利数据,涵盖河涌、水闸、排涝片、联围、镇街及整治方案等信息,来源于 106 个结构化表格和非结构化文档。基于上述数据构建的南沙区河涌整治知识图谱包含 509 个实体节点,其中河涌 228 个、水闸 228 个、排涝片 25 个、联围 11 个、镇街 8 个、整治方案 9 个;包含 1 237 条关系边,如出口连接、流经等,以及 4 401 个属性字段,如名称、底高程、过流能力等。在感知层中,上述数据经融合后存储于 Neo4j 图数据库。针对两阶段分类模型,将数据集按照 7∶3 随机划分为训练集和测试集。实验所用的实际方案(即真实值)由水利领域专家小组制定,方案已经过为期一年的观察调研,具有极高的可行性。

实验在 Windows 10 操作系统下进行,具体的实验环境有:Intel(R) Core(TM) i7-10750H CPU @ 2.60 GHz;GPU 型号:NVIDIA GeForce GTX 1650 Ti;编程工具、语言和关键库包括:PyCharm 2024.3.3、Neo4j Community 5.26.3、Python 3.12、scikit-learn 1.6.1、py2neo 2021.2.4、node2vec 0.5.0、networkx 3.4.2、numpy 1.26.4、pandas 2.2.3。其中,生成式决策评估优化引擎通过 API 调用 DeepSeek-R1 模型。

3.3 评价指标

为了综合考量实验方法的效果,采用准确率、精确率、召回率、F1 值(精确率与召回率的调和平均数)、汉

明损失[31]对实验的结果进行分析。汉明损失是多标签分类问题中的一种评价指标,用于衡量预测结果与实际标签之间的差异。它定义为预测错误的标签比例,即错误标签的个数占总标签数量的比值。汉明损失的取值范围为[0,1],值越小表示预测越准确。本文采用样本级 Jaccard 准确率,精确率和召回率采用宏平均方式计算,F1 值由宏平均精确率与宏平均召回率的调和平均得到,汉明损失按照全部样本和标签中错误标签所占的比例计算。

3.4　基线对比实验

在基线模型的选择上,鉴于南沙区河涌的数据量限制,难以充分训练深度学习模型参数,故主要参考常见的多标签分类模型,在神经网络的基线选取上仅选择 GNN-MLP。所选的基线模型如下:①BR-RF,融合二元关联法和随机森林,将多标签任务分解为多个独立的二分类问题,每个标签单独训练一个随机森林模型;②CC-LR,融合分类器链和逻辑回归,将标签预测顺序串联,每个逻辑回归模型输入包含原始特征及前面标签的预测结果;③ML-KNN[32],多标签 K_{NN} 近邻算法,即在多标签场景下,根据 K_{NN} 个近邻样本的标签分布预测目标样本标签;④RAkEL,即随机标签子集集成方法,每次随机选择包含 K_{sub} 个标签的子集构建 Label Powerset 分类器,并通过投票得到最终结果;⑤GNN-MLP,即融合图神经网络和多层感知机。将 KG-TS2-LLM 与以上 5 种基线模型进行对比实验,结果见表 5。

表 5　不同模型性能对比

Table 5　Performance comparison of different models

模型	准确率	精确率	召回率	F1 值	汉明损失
GNN-MLP	0.610	0.462	0.314	0.374	0.073
CC-LR	0.654	0.700	0.507	0.588	0.061
BR-RF	0.807	0.820	0.686	0.747	0.029
ML-KNN	0.846	0.726	0.769	0.747	0.037
RAkEL	0.864	0.811	0.708	0.756	0.026
KG-TS2-LLM	0.921	0.885	0.823	0.853	0.011

由表 5 可知,KG-TS2-LLM 表现出较为明显的优势,其准确率达 0.921,F1 值为 0.853,能够精准识别正类方案并减少误判,使输出结果更接近真实情况。相比之下,GNN-MLP 由于数据量限制导致过拟合,学习能力受限,导致各项指标表现不佳;CC-LR 由于标签预测误差累积影响精度;BR-RF 仅仅将多标签任务独立分解,导致召回率低影响 F1 值;ML-KNN 因邻域统计难以捕捉复杂关联特征,致使精度与 KG-TS2-LLM 相比有所差距;RAkEL 随机选择标签子集构建分类器的方式在数据量有限时无法充分利用标签信息,不能很好代表数据集特征,整体性能不如 KG-TS2-LLM。因此,KG-TS2-LLM 通过整合多源数据构建知识图谱实现图嵌入、设计两阶段分类模型、开发生成式评估引擎等措施,实现系统性风险量化与决策逻辑透明化,性能优于其他基线模型。

3.5　消融实验

为验证 KG-TS2-LLM 各关键组成部分对整体性能的贡献,分别开展感知-认知层消融实验和决策层消融实验。

感知-认知层消融实验是将感知层中构建的领域知识图谱与认知层中的两阶段分类模型相结合,探究图嵌入在多标签分类中的关键作用。实验设计了 3 种变体模型:①BR-RF,仅保留阶段 1 中的 Binary Relevance 和随机森林,针对河涌基本水文参数进行建模;②FC-BR-RF,在①模型的基础上添加特征工程(式(3));③KG-TS2,即本文方法,在②模型的基础上引入 Node2Vec 图嵌入技术。将 KG-TS2 与以上两种变体模型进行对比,实验结果如图 9(a)所示。

决策层消融实验的目的是探究生成式评估引擎中各个环节对整体性能的影响。本实验的待评估方案统一为 KG-TS2 方法的输出内容。实验设计了 3 种变体模型:①LLM,直接使用 DeepSeek-R1 生成最终确定方案;②KG-LLM,在①模型的基础上引入感知层中的领域知识图谱,生成最终确定方案;③KG-TS2-LLM,即最终方法,在②模型的基础上结合领域知识增强的提示学习,通过多步推理,生成最终确定方案和可解释推理链。将 KG-TS2-LLM 与以上两种变体模型进行对比,实验结果如图 9(b)所示。

通过上述实验,清晰地揭示了本文方法中各关键部分对整体性能的影响。认知层中物理特征与图嵌入的融合显著扩展了特征空间并提升决策准确率,决策层中 LLM 利用其语义推理与自然语言生成能力,构建

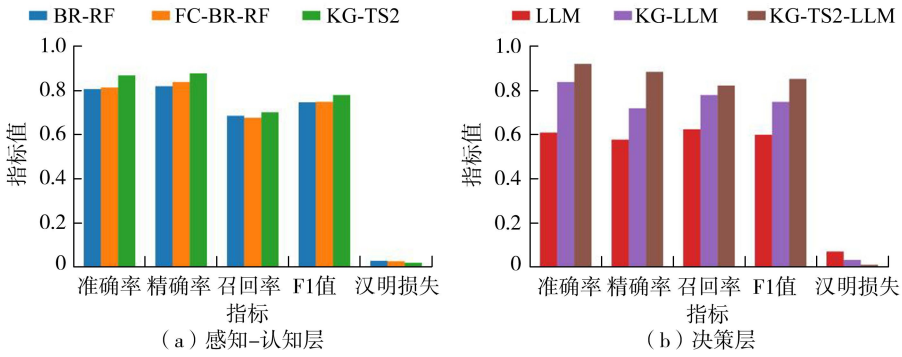


图9 消融实验结果

Fig. 9 Ablation experiments results

可解释的决策方案及推理链,提供透明化决策依据。而领域知识增强的提示学习通过将结构化知识注入提示模板并约束分步推理过程,有助于降低LLM生成无依据内容的风险,提升方案修正可靠性。

4 结 论

a. 构建的河涌整治知识图谱通过整合多源异构数据,可实现跨部门数据动态对齐,缓解了传统方法中多源数据整合不足的难题,为后续分析提供了结构化知识基础。

b. 融合物理特征与拓扑嵌入的两阶段分类模型,在当前数据量限制下有效提升了整治方案的决策精度。相较于单一随机森林模型,其通过拓扑嵌入机制捕捉系统级关联,感知-认知层消融实验验证了小数据场景下经典技术的适配性。

c. 基于DeepSeek-R1和领域知识增强的生成式评估引擎实现了可解释决策优化。该引擎结合知识图谱和预定义的评估标准,对认知层输出的方案进行多步推理和多维评估,生成包含具体扣分/加分项和修正建议的可解释推理链。决策层消融实验表明,该引擎可有助于降低LLM生成无依据内容的风险。

d. 提出的知识图谱与LLM协同的河涌整治方案智能决策方法,可有效缓解传统方法中多源数据整合不足、系统级关联分析缺失、决策过程可解释性弱的问题。实验验证了本文方法在静态数据集上的有效性(F1值达0.853,准确率达0.921),较基线模型提升显著,为河涌整治提供了可解释、可扩展的智能决策范式。但是其基于Node2Vec静态图算法的特性,难以捕捉河涌水系随季节、气候、城市发展的动态演变。

e. 为拓展框架在长周期、前瞻性决策中的应用,未来可从两方面优化:①接入实时传感器数据构建时序知识图谱,引入动态图神经网络捕捉水系拓扑的时序变化;②在数据量充足时,将两阶段分类模型升级为深度学习框架(如Transformer),结合注意力机制增强复杂关联特征的提取能力。

参考文献:

[1] 谭超,刘达,黄本胜,等. 基于河涌纳污能力的特大城市中心城区初期雨水截流标准[J]. 水电能源科学,2024,42(2):125-128. (Tan Chao,Liu Da,Huang Bensheng,et al. Initial rainwater interception standard for central urban area of megacities based on river in welling capacity[J]. Water Resources and Power,2024,42(2):125-128. (in Chinese))

[2] 刘丁蓉,杨凯,孙仕. 珠三角城市群内涝灾害韧性综合评估及障碍因子识别[J]. 水利经济,2024,42(4):23-29. (Liu Dingrong,Yang Kai,Sun Shi. Comprehensive assessment and obstacle factor recognition of waterlogging disaster resilience in Pearl River Delta urban agglomeration[J]. Journal of Economics of Water Resources,2024,42(4):23-29. (in Chinese))

[3] 徐宗学,卢兴超,施奇妙. 城市暴雨洪涝灾害特征与风险评估研究进展[J]. 水利水电科技进展,2025,45(1):1-9. (Xu Zongxue,Lu Xingchao,Shi Qimiao. Research progress on urban flooding disaster characteristics and risk assessment[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2025,45(1):1-9. (in Chinese))

[4] 徐宗学,叶陈雷. 城市暴雨洪涝模拟:原理 模型与展望[J]. 水利学报,2021,52(4):381-392. (Xu Zongxue,Ye Chenlei. Simulation of urban flooding/waterlogging processes:principle,models and prospects[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2021,52(4):381-392. (in Chinese))

[5] 张金良,罗秋实,王冰洁,等. 城市极端暴雨洪涝灾害成因及对策研究进展[J]. 水资源保护,2024,40(1):6-15. (Zhang Jinliang,Luo Qiushi,Wang Bingjie,et al. Research progress on causes and countermeasures for extreme rainstorm-induced urban

flood disasters[J]. Water Resources Protection,2024,40(1):6-15. (in Chinese))
[6] Wang Yongheng,Li Chunlin,Liu Miao,et al. Spatial characteristics and driving factors of urban flooding in Chinese megacities [J]. Journal of Hydrology,2022,613:128464.
[7] Wang Shuo,Peng Hui. Multiple spatio-temporal scale runoff forecasting and driving mechanism exploration by K-means optimized XGBoost and SHAP[J]. Journal of Hydrology,2024,630:130650.
[8] 马超,赵凯,齐文超,等. 基于示踪方法的沿海城市内涝防灾方案研究[J]. 水资源保护,2022,38(1):91-99. (Ma Chao, Zhao Kai,Qi Wenchao,et al. Formulation of flood mitigation scheme in coastal cities based on source tracking method[J]. Water Resources Protection,2022,38(1):91-99. (in Chinese))
[9] Wang Yiwen,Zhang Zhiming,Zhao Zhiyong,et al. Prediction of future urban rainfall and waterlogging scenarios based on CMIP6: a case study of Beijing urban area[J]. Water,2023,15(11):2045.
[10] 徐存东,翟东辉,张硕,等. 改进的 TOPSIS 综合评价模型在河道整治方案优选中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2013,41(3):222-228. (Xu Cundong,Zhai Donghui,Zhang Shuo,et al. Application of improved TOPSIS comprehensive evaluation model to optimization of river regulation schemes[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2013,41(3):222-228. (in Chinese))
[11] 李慧宁,毛斌,解铭,等. 基于 Infoworks ICM 模型的老城区排涝安全研究:以中部某城市为例[J]. 环境工程,2023,41(增刊 2):1137-1140. (Li Huining,Mao Bin,Xie Ming,et al. Study on the drainage safety of old urban areas based on Infoworks ICM model:taking a city in central China as an example[J]. Environmental Engineering,2023,41(S2):1137-1140. (in Chinese))
[12] 王凌河,王浩,周惠成,等. 基于模糊优选方法的雅砻江调水方案优化[J]. 南水北调与水利科技,2015,13(5):990-994. (Wang Linghe,Wang Hao,Zhou Huicheng,et al. Scheme optimization of water transfer in the Yalong River based on fuzzy optimization method [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2015,13(5):990-994. (in Chinese))
[13] 周飞燕,金林鹏,董军. 卷积神经网络研究综述[J]. 计算机学报,2017,40(6):1229-1251. (Zhou Feiyan,Jin Linpeng,Dong Jun. Review of convolutional neural network[J]. Chinese Journal of Computers,2017,40(6):1229-1251. (in Chinese))
[14] 张驰,郭媛,黎明. 人工神经网络模型发展及应用综述[J]. 计算机工程与应用,2021,57(11):57-69. (Zhang Chi,Guo Yuan,Li Ming. Review of development and application of artificial neural network models [J]. Computer Engineering and Applications,2021,57(11):57-69. (in Chinese))
[15] 王萌,王昊奋,李博涵,等. 新一代知识图谱关键技术综述[J]. 计算机研究与发展,2022,59(9):1947-1965. (Wang Meng,Wang Haofen,Li Bohan,et al. Survey on key technologies of new generation knowledge graph[J]. Journal of Computer Research and Development,2022,59(9):1947-1965. (in Chinese))
[16] 刘学博,户保田,陈科海,等. 大模型关键技术与未来发展方向:从 ChatGPT 谈起[J]. 中国科学基金,2023,37(5):758-766. (Liu Xuebo,Hu Baotian,Chen Kehai,et al. Key technologies and future development directions of large language models: insights from ChatGPT[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China,2023,37(5):758-766. (in Chinese))
[17] Wang Jingbin,Zhang Weijie,Yu Zhiyong,et al. Route selection for opportunity-sensing and prediction of waterlogging[J]. Frontiers of Computer Science,2024,18(4):184503.
[18] Waqas M,Humphries U W,Hlaing P T,et al. Seasonal WaveNet-LSTM:a deep learning framework for precipitation forecasting with integrated large scale climate drivers[J]. Water,2024,16(22):3194.
[19] 冯钧,畅阳红,陆佳民,等. 基于大语言模型的水工程调度知识图谱的构建与应用[J]. 计算机科学与探索,2024,18(6):1637-1647. (Feng Jun,Chang Yanghong,Lu Jiamin,et al. Construction and application of knowledge graph for water engineering scheduling based on large language model[J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology,2024,18(6):1637-1647. (in Chinese))
[20] 杨燕,叶枫,许栋,等. 融合大语言模型和提示学习的数字孪生水利知识图谱构建[J]. 计算机应用,2025,45(3):785-793. (Yang Yan,Ye Feng,Xu Dong,et al. Construction of digital twin water conservancy knowledge graph integrating large language model and prompt learning[J]. Journal of Computer Applications,2025,45(3):785-793. (in Chinese))
[21] Breiman L. Random forests[J]. Machine Learning,2001,45(1):5-32.
[22] Grover A,Leskovec J. Node2vec: scalable feature learning for networks [C]//Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. San Francisco:ACM,2016:855-864.
[23] Guo D,Yang D,Zhang H,et al. DeepSeek-R1 incentivizes reasoning in LLMs through reinforcement learning[J]. Nature,2025,645:633-638.
[24] 文森,钱力,胡懋地,等. 基于大语言模型的问答技术研究进展综述[J]. 数据分析与知识发现,2024,8(6):16-29. (Wen

Sen, Qian Li, Hu Maodi, et al. Review of research progress on question-answering techniques based on large language models[J]. Data Analysis and Knowledge Discovery, 2024, 8(6): 16-29. (in Chinese))

[25] Li Binglei, Liu Tong, Ma Jian, et al. Evolving chain-of-thought and automatic text annotation based intent classification method for wireless network[J]. Computer Networks, 2025, 259: 111074.

[26] 刘畅成,桑磊,李炜,等. 大语言模型驱动的多元关系知识图谱补全方法[J]. 计算机科学, 2025, 52(1): 94-101. (Liu Changcheng, Sang Lei, Li Wei, et al. Large language model driven multi-relational knowledge graph completion method[J]. Computer Science, 2025, 52(1): 94-101. (in Chinese))

[27] Zhang Minling, Li Yukun, Liu Xuying, et al. Binary relevance for multi-label learning: an overview[J]. Frontiers of Computer Science, 2018, 12(2): 191-202.

[28] Lavalley M P. Logistic regression[J]. Circulation, 2008, 117(18): 2395-2399.

[29] 张才科,李小龙,郑胜,等. 基于大语言模型的知识图谱构建及应用研究[J]. 计算机科学与探索, 2024, 18(10): 2656-2667. (Zhang Caike, Li Xiaolong, Zheng Sheng, et al. Research on construction and application of knowledge graph based on large language model[J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2024, 18(10): 2656-2667. (in Chinese))

[30] Wang Yu, Ye Feng, Li Binquan, et al. UrbanFloodKG: an urban flood knowledge graph system for risk assessment[C]// Proceedings of the 32nd ACM International Conference on Information and Knowledge Management. Birmingham: ACM, 2023: 2574-2584.

[31] Butucea C, Ndaoud M, Stepanova N A, et al. Variable selection with Hamming loss[J]. The Annals of Statistics, 2018, 46(5): 1837-1875.

[32] Zhang Minling, Zhou Zhihua. ML-KNN: a lazy learning approach to multi-label learning[J]. Pattern Recognition, 2007, 40(7): 2038-2048.

(收稿日期:2025-07-04 编辑:刘晓艳)

(上接第48页)

[26] Elmaz F, Eyckerman R, Casteels W, et al. CNN-LSTM architecture for predictive indoor temperature modeling[J]. Building and Environment, 2021, 206: 108327.

[27] Ishida K, Ercan A, Nagasato T, et al. Use of one-dimensional CNN for input data size reduction in LSTM for improved computational efficiency and accuracy in hourly rainfall-runoff modeling[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 359: 120931.

[28] 黄克威,王根绪,宋春林,等. 基于LSTM的青藏高原冻土区典型小流域径流模拟及预测[J]. 冰川冻土, 2021, 43(4): 1144-1156. (Huang Kewei, Wang Genxu, Song Chunlin, et al. Runoff simulation and prediction of a typical small watershed in permafrost region of the Qinghai-Tibet Plateau based on LSTM[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(4): 1144-1156. (in Chinese))

[29] Zhang Tianpeng, Huang J C, Lei Qiuliang, et al. Empirical estimation of soil temperature and its controlling factors in Australia: implication for interaction between geographic setting and air temperature[J]. CATENA, 2022, 208: 105696.

[30] 蔡哲,段里成,郭瑞鸽,等. 江西省土壤温度变化特征及其与气象要素的关系[J]. 中国农学通报, 2024, 40(4): 118-125. (Cai Zhe, Duan Licheng, Guo Ruige, et al. Characteristics of soil temperature variation in Jiangxi province and its relationship with meteorological elements[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2024, 40(4): 118-125. (in Chinese))

[31] 刘娣,孙佳倩,余钟波. 基于机器学习模型的多层土壤湿度反演[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(3): 7-14. (Liu Di, Sun Jiaqian, Yu Zhongbo. Multi-layer soil moisture inversion based on machine learning models[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(3): 7-14. (in Chinese))

(收稿日期:2025-09-06 编辑:刘晓艳)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.05.010

融合机器学习与贝叶斯模型平均的水电站来水预测方法

陈 凯[1],罗煜宁[2,3,4,5],张 珂[2,3,6,7,8],吴 南[2,3],吴星宇[2,3],王宇昊[2,3],王有香[1],彭 晶[1]

(1. 云南电网有限责任公司电力科学研究院; 2. 河海大学水灾害防御全国重点实验室; 3. 河海大学水文水资源学院; 4. 水利部水文仪器及岩土工程仪器质量监督检验测试中心; 5. 水利部南京水利水文自动化研究所; 6. 河海大学长江保护与绿色发展研究院; 7. 中国气象局水文气象重点开放实验室; 8. 水利部水利大数据重点实验室)

摘要:针对水文模型在复杂环境条件下易出现建模不充分或未建模行为导致的模拟偏差问题,提出了一种融合机器学习与贝叶斯模型平均(BMA)的水电站来水预测方法。该融合方法以 Hydromad 模型为基础计算来水及其残差序列,利用随机森林(RF)模型、XGBoost 模型和支持向量回归(SVR)模型捕捉残差的非线性特征,并通过 BMA 融合多模型预测结果,实现模拟误差后处理修正与不确定性评估。金沙江梨园水电站实例分析结果表明,提出的方法可以显著提升 Hydromad 模型在洪峰响应和涨、退水阶段的拟合精度,修正后来水预测的 NSE、KGE 等指标显著提升,水量偏差得到有效控制,整体预测精度明显改善,可为水电站来水预测及调度决策提供更科学的技术支撑。

关键词:来水预测;贝叶斯模型平均;机器学习;Hydromad 模型;不确定性评估;金沙江梨园水电站

中图分类号:P338^{+}.2 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-1980(2026)05-0091-08

Inflow forecasting method for hydropower stations by integrating machine learning and Bayesian model averaging

Chen Kai[1], **Luo Yuning**[2,3,4,5], **Zhang Ke**[2,3,6,7,8], **Wu Nan**[2,3], **Wu Xingyu**[2,3], **Wang Yuhao**[2,3], **Wang Youxiang**[1], **Peng Jing**[1]

(1. *Electric Power Research Institute, Yunnan Power Grid Co., Ltd.*;
2. *State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University*;
3. *College of Hydrology and Water Resources, Hohai University*;
4. *MWR Inspecting and Testing Centre for Hydrological & Geotechnical Instruments' Quality*;
5. *Nanjing Research Institute of Hydrology and Water Conservation Automation, Ministry of Water Resources*;
6. *Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University*;
7. *Key Laboratory of Hydro-Meteorology China Meteorological Administration*;
8. *Key Laboratory of Water Big Data Technology of Ministry of Water Resources*)

Abstract: To address the issue of simulation bias in hydrological models caused by insufficient modeling or unmodeled behaviors under complex environmental conditions, an inflow forecasting method for hydropower stations based on machine learning and Bayesian model averaging (BMA) was proposed. Based on the Hydromad model, the inflow and residual sequences were calculated; three machine learning models, namely random forest (RF) model, XGBoost model, and support vector regression (SVR) model, were used to capture the nonlinear characteristics of the residuals. Subsequently, the multi-model prediction results were fused via BMA to achieve post-processing error correction and uncertainty assessment of the simulation errors. The case study results of Liyuan Hydropower Station on Jinsha River indicate that the proposed method can significantly improve the fitting accuracy of the Hydromad model in peak flood responses and the rising and falling water stages. After correction, indicators of inflow prediction such as NSE and KGE are significantly improved; the water volume bias is effectively controlled; the overall prediction accuracy is obviously improved. This method can provide more scientific technical support for inflow forecasting and operational decision-making of hydropower stations.

Key words: inflow forecasting; Bayesian model averaging; machine learning; Hydromad model; uncertainty assessment; Liyuan Hydropower Station on Jinsha River

---

基金项目:中国南方电网云南电网有限责任公司科技项目(YNKJXM20222329);国家重点研发计划项目(2023YFC3006500)

作者简介:陈凯(1990—),男,工程师,博士,主要从事电力电量平衡技术和水电优化调度研究。E-mail:chenkai09@yn.csg.cn

通信作者:罗煜宁(1999—),女,工程师,博士,主要从事水文预报研究。E-mail:yuning_lynn@163.com

随着经济社会的发展,水资源利用效率不断提升,对水电站入库流量模拟和预报精度的要求也日益提高[1]。水文模型在流域径流预测中扮演着关键角色,而准确的径流预报后处理对优化水电调度至关重要[2-3],尤其在青藏高原等水能资源丰富的大江大河源区,水文模拟的偏差直接影响调度方案制定与水能利用效率[4-5]。然而,由于降水过程具有高度复杂性和不确定性[6-8]及存在建模不充分或未建模的问题,在汛期或下垫面条件复杂的流域中[9],水文模型常常低估极端高流量事件的发生频率与强度[10-12],模拟结果存在与实测值之间的系统性残差,尤其在复杂的降雨-融雪径流过程中更为明显,水电站来水预测工作仍面临挑战。

近年来学者们开始关注基于残差的建模(即对水文模型模拟误差进行建模)方法[13-14]。残差是水文模型模拟结果与实测数据之间的差异,蕴含了模型未能捕捉的过程信息。通过对残差进行统计建模和预测,可以在保留原有物理模型的基础上校正其模拟结果,从而提升预测精度。然而,传统回归方法往往难以刻画残差的非线性和时序性特征,因此亟须引入数据驱动方法对残差进行建模与修正,以提升预测的稳定性与可信度。例如:Li 等[15]将长短期记忆神经网络(LSTM)用于分布式水文模型的残差建模,成功削弱了残差的异方差性并消除了几乎所有自相关结构;蒋晓蕾等[16]采用考虑误差异分布的 HRD 方法估计误差的概率分布,对赣江流域开展了径流概率预报。尽管上述机器学习方法和统计方法在提升水文模型精度方面取得了一定的成效[17],但仍存在一定的局限性:一方面,残差误差的统计特征可能因时间、空间或来水条件而变化[18],传统方法难以动态适应误差结构的变化;另一方面,不同方法的残差建模结果通常缺乏系统性的融合机制[19],容易造成模型偏信或协同不足,从而影响径流预报精度。对此贝叶斯方法为残差建模提供了一种更为灵活且理论完备的处理框架,通过先验信息与观测数据,不断更新模型认知,从而获得更可信的预测结果。在多模型融合策略中,贝叶斯模型平均(Bayesian model averaging, BMA)[20-23]作为一种经典的贝叶斯集成方法,能够在兼顾多个模型模拟能力的同时,为每个模型依据后验概率分配权重,实现信息的最优融合。近年来,该方法已被广泛应用于气象、水文等领域[24]的预报修正和不确定性量化。例如:Zhao 等[25]构建了基于完全集合经验模态分解和 BMA 方法的降水集合预测模型(CEEMDAN-BMA),并在北京和广州站的月降水预估中取得了良好效果;周婷等[26]利用 BMA 对 3 种机器学习模型的中长期日径流预测结果进行融合,并开展预测不确定性评估,结果显示,经 BMA 融合后的模型较单一模型具备更高的预测精度。然而,当前 BMA 应用多集中于对流量或降水结果的直接后处理,面向残差修正的融合策略尚未得到深入研究。因此,开展基于 BMA 方法的水文模型残差建模与融合修正研究,尤其是通过集成多种机器学习模型捕捉残差的非线性特征[27],并在此基础上进行来水预测的不确定性评估,可提升 BMA 在修正模拟误差和提高来水预测精度方面的应用能力。

本文基于 Hydromad 模型的模拟结果构建残差序列,利用多种机器学习模型对残差序列进行预测,并通过 BMA 方法对预测结果进行融合修正,从而提升来水预测精度并实现不确定性评估。

1 基于机器学习的水文模拟残差订正与 BMA 融合方法

本文基于自动优化率定的 Hydromad 模型生成的模拟径流结果,提取其与实测径流之间的残差序列,构建融合滞后特征的机器学习残差订正模型,以当前降水量、气温、模型模拟流量与历史残差信息作为输入特征,分别采用随机森林(RF)、XGBoost 和支持向量回归(SVR)3 种回归模型对残差进行预测。所有模型均在训练集上进行训练,并在测试集上评估其预测性能。随后,采用 BMA 方法融合 3 种模型预测的结果,以各模型在测试集上的性能作为先验概率,并结合模型残差的似然函数计算后验权重。在此基础上,对验证集数据的预测采用加权融合策略,生成残差预测值,与原模型模拟值叠加从而获得修正后的来水预测值,并通过模型融合过程中样本方差的估算获得不确定性区间,给出残差预测的上下界,从而实现对水电站来水过程不确定性的定量评估。

1.1 基于 Hydromad 模型的径流预测

IHACRES 模型是一个集总式径流模型,通过将实测降雨转化为有效降雨,再由线性水库模块生成径流,适用于资料有限流域的径流模拟与预测。该模型对数据需求低,输入参数少且模拟精度高,可反映不同气候条件下的流域响应,在不同干湿气候区得到广泛应用[28-30];缺点是物理机制简单,对强人类活动干扰的流域预测精度有限。本文采用由 Andrews 等[31]开发的 Hydromad 模型进行径流预测,该集成模型包含多个模型,

如 IHACRES 和度日因子模型[32],并支持多模型的集成和参数自动优化率定。其中,度日因子模型基于气温与融雪量的线性关系,假设气温高于阈值时,积雪按一定"度日因子"融化,融水进入产流过程,适用于以积雪融水为主要补给的高寒山区,尤其是在缺乏详细能量平衡数据时。Hydromad 模型的主要模块与参数物理意义见表 1。

1.2　基于滞后特征的机器学习模型

为对 Hydromad 模型产生的残差进行修正,本文引入 3 种机器学习模型对模拟残差进行预测。

a. RF 模型[33]。RF 是一种基于决策树集成的非参数回归模型,通过构建多个决策树并对其结果进行平均以提升预测性能和稳定性。它在处理非线性关系、多变量输入及高噪声数据方面具有良好的鲁棒性,同时能有效缓解过拟合问题。

b. XGBoost 模型。XGBoost 是一种高效的梯度提升树模型,采用加权迭代的方式逐步拟合残差项,从而提升整体预测精度。它在建模过程中引入正则化项,具有良好的泛化能力,适用于对水文模型中的系统误差进行建模。

表 1　Hydromad 模型主要模块及参数

Table 1　Main modules and parameters of Hydromad model

模块	参数	单位	物理意义
非线性产流	τ_w	d	参考温度下流域变干速率
	f	℃	变干速率的温度调节因子
	C	mm	流域水量平衡系数
线性汇流	α_q		快速径流消退系数
	α_s		慢速径流消退系数
	β_q		快速径流洪峰响应系数
融雪	T_{melt}	℃	融化阈值
	c_s		融雪修正系数
	k_d	mm·℃/d	融化度日因子
	k_f	mm·℃/d	再冻结度日因子
	r		液态水消退系数

c. SVR 模型[34]。SVR 通过引入核函数将输入特征映射到高维空间,并在该空间中构造最优回归超平面。SVR 能够有效捕捉非线性关系,且对异常值不敏感,适用于对具有一定波动性的流量残差序列进行建模。

为评估各模型残差预测精度,本文采用平均绝对误差(MAE)、均方误差(MSE)和决定系数(R^2)作为误差评价指标。

1.3　基于 BMA 的水电站来水预测方法

为综合上述 3 种机器学习模型对残差的预测能力,本文引入 BMA 方法对残差预测结果进行融合。该方法在保留各模型信息贡献的基础上,依据其预测能力进行加权,从而提升总体预测的稳健性与准确性。设第 t 天第 m 个残差模型预测的残差为 $\hat{\varepsilon}_{mt}$,对应的后验概率权重为 w_m,融合残差预测值 $\hat{\varepsilon}_t$ 表示为:

$$\hat{\varepsilon}_t = \sum_{m=1}^{3} w_m \hat{\varepsilon}_{mt} \tag{1}$$

模型的后验概率权重 w_m 由其先验概率 P_m 与似然函数 L_m 共同确定:

$$w_m = \frac{P_m L_m}{\sum_{j=1}^{3} P_j L_j} \tag{2}$$

式中:P_j、L_j 分别为求和项中第 j 个残差模型的先验概率和似然函数。先验概率 P_m 基于各模型在测试集上的决定系数 R^2 归一化得到:

$$P_m = \frac{R_m^2}{\sum_{j=1}^{3} R_j^2} \tag{3}$$

式中:R_m^2 为第 m 个残差模型在测试集上的决定系数;R_j^2 为求和项中第 j 个残差模型在测试集上的决定系数。模型似然函数 L_m 假设残差服从正态分布 $N(\mu_m, \sigma_m^2)$,可由下式表示:

$$L_m = \prod_{t=1}^{n} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_m^2}} \exp\left[-\frac{(\varepsilon_t - \hat{\varepsilon}_{mt})^2}{2\sigma_m^2} \right] \tag{4}$$

式中:ε_t 为实际残差;$\bar{\mu}_m$、σ_m^2 分别为机器学习模型残差的均值与方差;n 为测试集中残差观测的总天数。

将融合残差与 Hydromad 模型模拟值叠加,可得修正后的预测流量 $\hat{Q}_{corr,t}$:

$$\hat{Q}_{corr,t} = Q_{sim,t} + \hat{\varepsilon}_t \tag{5}$$

式中:$\hat{Q}_{corr,t}$ 为修正后的预测流量,m^3/s;$Q_{sim,t}$ 为修正前的模拟流量,m^3/s。同时,为评估预测结果的不确定

性,引入残差方差融合估计,综合3个模型预测残差的方差可得水电站径流预测不确定性范围:

$$\sigma^2 = \sum_{m=1}^{3} w_m^2 \sigma_m^2 \tag{6}$$

$$\begin{cases} Q_{\mathrm{cl},t} = \hat{Q}_{\mathrm{corr},t} - 1.96\sigma \\ Q_{\mathrm{cu},t} = \hat{Q}_{\mathrm{corr},t} + 1.96\sigma \end{cases} \tag{7}$$

式中:σ^2 为BMA融合预测残差的总体方差;σ 为BMA的标准差;$Q_{\mathrm{cl},t}$、$Q_{\mathrm{cu},t}$ 分别为第 t 天校正径流预测值95%置信区间的下界和上界。

2 实例分析

2.1 研究区概况

金沙江梨园水电站以上流域(26°38′N~35°53′N,90°34′E~100°24′E)地处青藏高原中东部,流域面积21.42万 km^2,占金沙江流域面积的42.7%,是该流域主要的产流区,水能资源丰富。流域地势呈北高南低,平均海拔4 500 m以上,气候类型为高原大陆性气候,境内涵盖半湿润和半干旱区。水系发育良好,多年平均降水量为452.6 mm,多年平均气温为1.5℃。由于地理位置和气候条件的独特性,流域内降水形式具有显著的季节性规律:非汛期以降雪为主,夏季降水集中且丰沛。然而,由于横断山脉的阻隔作用,研究区属于少雨区,尤其是玉树巴塘河口至石鼓区间的金沙江纵向河谷地带,降水量的空间分布较为不均匀,这增加了水电站径流模拟与预测的难度。流域概况如图1所示。

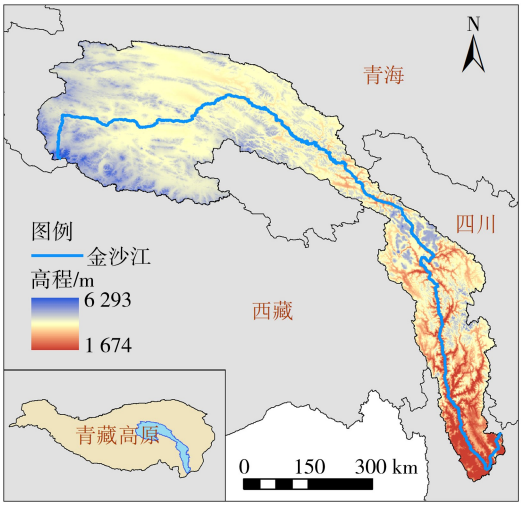


图1 研究区地理位置及高程分布

Fig. 1 Geographical location and elevation distribution of study area

2.2 数据来源及预处理

本文采用的输入数据包括日尺度降水、气温和实测入库流量,用于驱动Hydromad模型并构建残差建模数据集。降水和气温数据来源于国家气候中心研发的气候系统模式CMA_CPSv3(https://data.cma.cn/),经国家气候中心降尺度处理后,时间分辨率为1 d,空间分辨率为0.05°×0.05°;日径流数据来源于梨园水电站实测入库流量。采用双线性插值法计算流域面平均降水量和气温。

选取2010—2022年的日尺度观测数据进行建模与验证,采用纳什效率系数(NSE)和克林-古普塔效率系数(KGE)评价模型模拟性能,其中NSE反映模拟值与实测值的整体拟合程度,KGE综合衡量相关性、偏差和变异性。模型NSE为0.91,KGE为0.89,模型参数率定结果如下:$\tau_w = 25$ d,$f = 1.34$℃,$C = 0.55$ mm,$\alpha_q = 0.96$,$\alpha_s = 0.99$,$\beta_q = 0.545$,$T_{\mathrm{melt}} = 0$℃,$c_s = 0.8$,$k_d = 5.5$ mm·℃/d,$k_f = 0.361$ mm·℃/d,$r = 0$。将2011—2020年作为3种机器学习模型的训练与测试期(按照7∶3比例划分),用于训练和测试RF、XGBoost和SVR 3种模型;2021—2022年作为验证期,采用MBA方法对预测残差进行加权融合,进一步完成对模拟误差的校正,并评估修正后来水预测结果的不确定性。

2.3 机器学习模型残差预测结果

为评估不同机器学习模型对Hydromad模型残差的预测能力,本文在训练完成后选取测试期数据进行精度验证与对比分析,3种机器学习模型的残差预测性能如表2所示。由表2可知,XGBoost模型表现最优,R^2 为0.79,RF模型次之,且性能表现与XGBoost相近,R^2 为0.78,而支持向量机模型的性能最差,R^2 仅为0.53。

表2 3种机器学习模型测试期残差预测性能

Table 2 Residual prediction performance of three machine learning models during testing period

模型	MAE/(m^3/s)	MSE/(m^3/s)^2	R^2
RF	289.69	186 784.47	0.78
XGBoost	283.34	177 742.00	0.79
SVR	357.94	232 110.40	0.53

图 2 为 3 种机器学习模型在测试期对 Hydromad 模型模拟残差的预测结果与实际残差对比,可以看出,RF 模型和 XGBoost 模型整体上能够较好地拟合残差的时序变化趋势,有效捕捉残差的波动,预测曲线与真实值在大多数低值区以及大部分高值区较为贴合。而 SVR 模型的预测存在明显高频震荡现象,且在多个峰值和突变点附近拟合误差较大。此外,相较于 RF 模型,XGBoost 模型在部分极值时段的拟合略好,表现出更强的泛化能力,例如在第 319 步时,XGBoost 模型的模拟值远高于 RF 模型和 SVR 模型,与实际残差更为贴近;而 SVR 模型对非线性残差响应不足,难以准确捕捉复杂结构误差。综合残差时序趋势与表 2 中指标值可知,XGBoost 模型在残差预测中综合性能最佳,其次为 RF 模型,SVR 模型拟合能力相对有限。

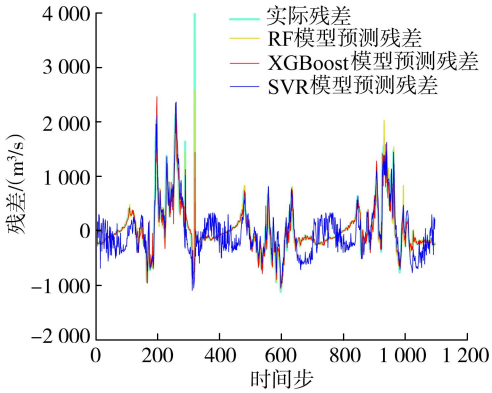


图 2　不同机器学习模型预测残差与实际残差对比

Fig. 2　Comparison between predicted residuals of different machine learning models and actual residuals

2.4　BMA 方法残差融合结果及水电站来水不确定性分析

为提升残差预测的稳健性并对预测结果的不确定性进行量化,以 3 种机器学习模型在测试期中的性能表现(R^2)作为先验概率,根据式(3)计算得到 RF 模型、XGBoost 模型和 SVR 模型的先验概率分别为 0.373、0.376、0.251。为估计模型的似然函数 L_m,本文在高斯误差假设下,使用 2021—2022 年验证期中各机器学习模型的残差序列,分别拟合其误差分布。假设各机器学习模型预测误差服从独立同分布的正态分布,则似然函数可表示为预测误差在该分布下的联合概率密度函数积。图 3 为 3 种机器学习模型残差误差分布直方图及正态分布拟合结果。

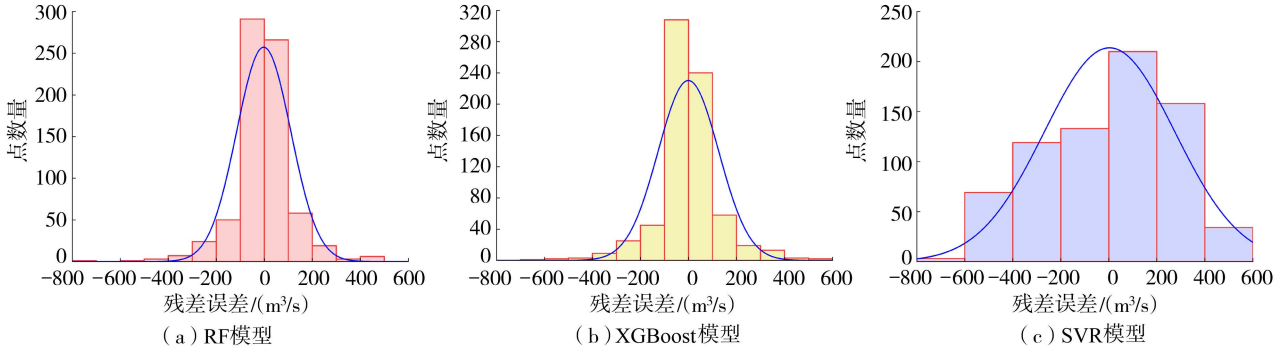


图 3　不同机器学习模型残差误差分布直方图

Fig. 3　Histogram of residual error distribution of different machine learning models

从图 3 可以看出,RF 模型与 XGBoost 模型的残差误差分布基本呈对称性,拟合曲线形态接近正态分布,均值分别为−2.25 m^3/s 和−0.21 m^3/s,标准差分别为 113.05 m^3/s 和 126.30 m^3/s,二者在残差预测中波动较小,误差集中度较高。而 SVR 模型的残差误差分布较为离散,拟合正态分布曲线宽而扁平,标准差达 272.08 m^3/s,远高于其他两个模型,且均值偏正,表明其预测结果在多个时间步存在系统性高估。

在验证期(2021—2022 年)中,为评估这 3 种模型在水电站来水预测中的表现,进一步采用 BMA 方法对其残差预测结果进行加权融合。由于 BMA 方法综合考虑模型的先验能力与残差误差的置信程度,根据式(2)计算得到 RF 模型、XGBoost 模型和 SVR 模型的贝叶斯后验概率权重分别为 0.393、0.401、0.206。图 4 为残差预测结果及其 95%置信区间,可以看出,BMA 融合残差在大多数时间步上能够较好地模拟真实残差的变化趋势,尤其在残差波动剧烈的时段(如第 250~300 步和第 600~650 步),模型仍能保持稳定拟合能力,表明 BMA 融合残差具有较高可信度。

图 5 为 2021—2022 年验证期内梨园水电站来水模拟值与实测值的对比,可以看出,Hydromad 模型模拟结果在大部分时间段能够捕捉来水过程的总体趋势,但在多个高流量阶段,特别是丰水期,存在明显滞后或偏低现象,反映出一定的系统性偏差。经 BMA 融合残差修正后,流量过程线在绝大多数时间段内更接近实

测值,尤其是在4次主要洪峰过程(2021年7月中旬和8月下旬、2022年6月下旬和9月上旬)中,BMA融合残差在峰值响应、涨落趋势和退水过程上均较Hydromad模型拟合更为精细。相比初始模拟值的"矮胖"滞后特性,BMA融合方法能够更灵敏地反映实测流量的快速变化过程,增强了模型对极端来水事件的捕捉能力。

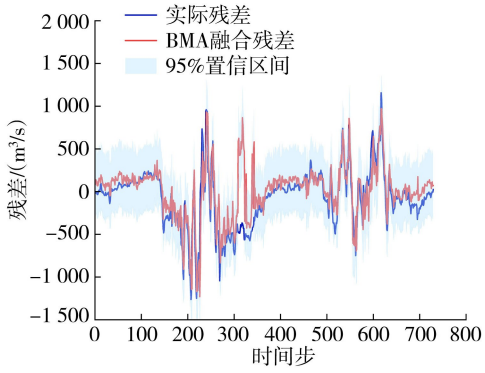


图4 残差预测结果及其95%置信区间

Fig. 4 Residual prediction results and their 95% confidence intervals

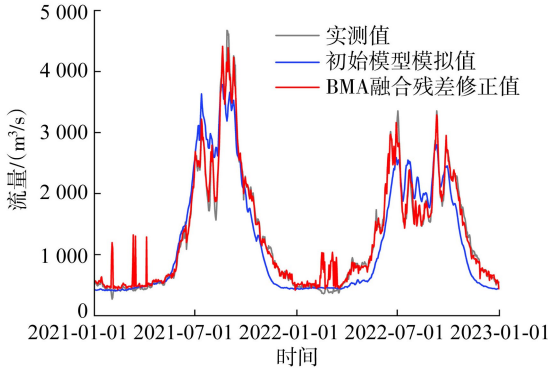


图5 梨园水电站来水模拟值与实测值对比

Fig. 5 Comparison of inflow simulated and measured value of Liyuan Hydropower Station

选取水文领域常见的NSE、KGE以及百分比偏差(PBIAS)作为评价指标,结果(表3)显示,经BMA融合残差对原模拟值修正后,NSE由0.832提高至0.983,KGE由0.866提升至0.987,说明该方法在拟合精度、相关性、一致性等方面均表现出更强的模拟能力;同时,PBIAS由原始模型的4.05%显著降低至-0.03%,表明系统性偏差被有效消除,预测结果在整体水量控制上更为准确。

表3 BMA方法修正前后Hydromad模型预测性能对比

Table 3 Comparison of prediction performance of Hydromad model before and after correction by BMA method

BMA方法	NSE	KGE	PBIAS/%
修正前	0.832	0.866	4.05
修正后	0.983	0.987	-0.03

综上研究结果表明,3种机器学习模型对Hydromad模型残差序列的预测性能呈现较大差异,XGBoost模型在MAE、MSE和R^2等评价指标中均表现最优,RF模型次之,SVR模型的模拟残差波动相对较大,预测性能相对较弱。综合利用XGBoost模型的强非线性拟合能力和RF模型的稳健性,并减少SVR模型在高频波动区段的误差,可以显著提升来水预测精度。

3 结 语

本文提出了一种融合机器学习模型与贝叶斯模型平均的水电站来水预测方法,并以金沙江梨园水电站2021—2022年实测数据为例进行了残差建模修正与水电站来水预测不确定性评估。评估结果表明:①3种机器学习模型在残差预测中表现出不同的性能特征,其中XGBoost模型对复杂非线性残差拟合能力较强,RF模型具有较好的稳健性和泛化能力,SVR模型在高频波动区段易产生误差,BMA融合方法能够综合不同模型的预测优势,降低预测误差;②验证期内BMA融合残差修正结果在多个洪峰时段具有较好的响应能力,可识别复杂误差结构,提高水电站来水模拟精度,为水库调度提供更可靠的预测依据。

本文方法具有较强的通用性,可应用于任意水文模型的残差序列处理,并可进一步拓展至其他机器学习方法。但BMA方法权重分配受验证期数据质量和规模影响,未来可通过引入多源观测数据并开展跨区域、多情景的验证,进一步提升模型的适用性与推广潜力。

参考文献:

[1] 丁紫玉,方国华,毛莺池,等. 考虑发电与弃水风险的梯级水电站水库风险调度模型[J]. 水资源保护,2024,40(2):100-106. (Ding Ziyu,Fang Guohua,Mao Yingchi,et al. Risk dispatching model of cascade hydropower station reservoirs considering power generation and water abandonment risks[J]. Water Resources Protection,2024,40(2):100-106. (in Chinese))

[2] 许月萍,陆豪楠,于欣廷,等. 基于深度学习集合预报的水库闸门防洪优化调度[J]. 水科学进展,2024,35(6):900-913.

(Xu Yueping, Lu Haonan, Yu Xinting, et al. Optimization of gate operation for reservoir flood control based on deep learning ensemble forecasting[J]. Advances in Water Science, 2024, 35(6): 900-913. (in Chinese))

[3] 钟加星,董增川,孟金玉,等. 基于机器学习的黄河上游梯级水库群多目标优化调度规则提取[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(6):30-37. (Zhong Jiaxing, Dong Zengchuan, Meng Jinyu, et al. Extracting multi-objective optimal operation rules of cascade reservoirs in upper reaches of Yellow River based on machine learning[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(6): 30-37. (in Chinese))

[4] 罗煜宁,张珂,王宇昊,等. 金沙江上游降雨-融雪径流模拟与洪水风险评估[J]. 水资源保护,2025,41(3):93-100. (Luo Yuning, Zhang Ke, Wang Yuhao, et al. Simulation of rainfall-snowmelt runoff and flood risk assessment in upper reaches of the Jinsha River[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(3): 93-100. (in Chinese))

[5] 郭珈源,孙旭杨,刘金涛,等. 基于 Budyko 理论的高寒山区流域径流演变归因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(3):22-29. (Guo Jiayuan, Sun Xuyang, Liu Jintao, et al. Attribution analysis of runoff evolution in cold alpine catchment based on Budyko theory[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(3): 22-29. (in Chinese))

[6] 鞠琴,吴金雨,王兴平,等. 机器学习算法在降水和气温多模式集成中的应用[J]. 水资源保护,2024,40(3):106-115. (Ju Qin, Wu Jinyu, Wang Xingping, et al. Application of machine learning algorithms in multimodal integration of precipitation and temperature[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(3): 106-115. (in Chinese))

[7] 肖渝,孙若辰,王倩,等. 不同降水驱动的 SWAT 模型参数不确定性研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(2):43-52. (Xiao Yu, Sun Ruochen, Wang Qian, et al. Study on parameter uncertainty in SWAT model driven by different precipitation[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(2): 43-52. (in Chinese))

[8] 李新,陈馨蕾,周义斌,等. 黄淮海和江淮平原小时极端降水时空演变及归因分析[J]. 水资源保护,2025,41(5):285-295. (Li Xin, Chen Xinlei, Zhou Yibin, et al. Spatiotemporal evolution and attribution analysis of hourly extreme precipitation in the Huang-Huai-Hai Plain and Jiang-Huai Plain[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(5): 285-295. (in Chinese))

[9] 陈靖凯,张志才,陈喜,等. 喀斯特流域降雨-径流过程及其对干湿条件变化响应的模拟分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(1):41-49. (Chen Jingkai, Zhang Zhicai, Chen Xi, et al. Simulation and analysis of rainfall-runoff processes in karst catchment and their response to changes in dry-wet conditions[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(1): 41-49. (in Chinese))

[10] 邓超,孙培源,尹鑫,等. 基于概念性水文模型与长短时记忆模型耦合的汉江上游流域径流模拟[J]. 湖泊科学,2025,37(1):279-292. (Deng Chao, Sun Peiyuan, Yin Xin, et al. Runoff simulation in the upper Han River Basin using physics-informed machine learning model[J]. Journal of Lake Sciences, 2025, 37(1): 279-292. (in Chinese))

[11] 杨肖丽,张佳乐,黄星怡,等. 气候变化和人类活动对长江流域极端径流的影响[J]. 水资源保护,2025,41(4):1-9. (Yang Xiaoli, Zhang Jiale, Huang Xingyi, et al. Impacts of climate change and human activities on extreme runoff in the Yangtze River Basin[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(4): 1-9. (in Chinese))

[12] 张媛媛,姚成,王容,等. 基于地表地下双拦蓄网格模型的清水河流域“23·7”洪水模拟复盘[J]. 河海大学学报(自然科学版),2026,54(4):61-68. (Zhang Yuanyuan, Yao Cheng, Wang Rong, et al. Retrospective simulation of “23·7” flood event in Qingshui River Basin based on surface-subsurface dual retention grid model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2026, 54(4): 61-68. (in Chinese))

[13] 张俊,冯宝飞,牛文静,等. 基于误差分布估计的三峡水库入库洪水概率预报方法[J]. 湖泊科学,2023,35(2):722-729. (Zhang Jun, Feng Baofei, Niu Wenjing, et al. Probability forecasting method of Three Gorges Reservoir inflow flood based on error distribution estimation[J]. Journal of Lake Sciences, 2023, 35(2): 722-729. (in Chinese))

[14] Jiang Xiaolei, Gupta H V, Liang Zhongmin, et al. Toward improved probabilistic predictions for flood forecasts generated using deterministic models[J]. Water Resources Research, 2019, 55(11): 9519-9543.

[15] Li Dayang, Marshall L, Liang Zhongmin, et al. Characterizing distributed hydrological model residual errors using a probabilistic long short-term memory network[J]. Journal of Hydrology, 2021, 603: 126888.

[16] 蒋晓蕾,沈静,郭洛夫杰,等. 考虑误差异分布的赣江流域径流概率预报[J]. 水文,2025,45(3):32-39. (Jiang Xiaolei, Shen Jing, Guo Luofujie, et al. Probability streamflow forecasting of Ganjiang River Basin considering the heterogeneous distribution characteristic of forecasting errors[J]. Journal of China Hydrology, 2025, 45(3): 32-39. (in Chinese))

[17] 管亚硕,连炎清,金君良,等. 基于多模型神经网络的径流缺失数据重建[J]. 河海大学学报(自然科学版),2026,54(2):38-44. (Guan Yashuo, Lian Yanqing, Jin Junliang, et al. Reconstruction of missing runoff data based on multi-model neural networks[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2026, 54(2): 38-44. (in Chinese))

[18] 贺新月,曾献奎,王栋. 融合 AR 模型和 MCMC 方法的水文模拟不确定性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48

(2):116-122. (He Xinyue, Zeng Xiankui, Wang Dong. Uncertainty analysis of hydrological simulation with auto regressive model and MCMC method[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(2): 116-122. (in Chinese))

[19] 徐嘉远,邹磊,夏军,等. TVGM-LSTM 耦合模型及其径流模拟效果分析[J]. 水资源保护,2023,39(6):104-110. (Xu Jiayuan, Zou Lei, Xia Jun, et al. TVGM-LSTM coupling model and its runoff simulation effect analysis[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(6): 104-110. (in Chinese))

[20] Zhong Yixuan, Guo Shenglian, Ba Huanhuan, et al. Evaluation of the BMA probabilistic inflow forecasts using TIGGE numeric precipitation predictions based on artificial neural network[J]. Hydrology Research, 2018, 49(5): 1417-1433.

[21] 刘章君,郭生练,许新发,等. 贝叶斯概率水文预报研究进展与展望[J]. 水利学报,2019,50(12):1467-1478. (Liu Zhangjun, Guo Shenglian, Xu Xinfa, et al. Bayesian probabilistic hydrological forecasting: progress and prospects[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(12): 1467-1478. (in Chinese))

[22] Madadgar S, Moradkhani H. Improved Bayesian multimodeling: integration of copulas and Bayesian model averaging[J]. Water Resources Research, 2014, 50(12): 9586-9603.

[23] 祁海霞,彭涛,林春泽,等. 清江流域降水的多模式 BMA 概率预报试验[J]. 气象,2020,46(1):108-118. (Qi Haixia, Peng Tao, Lin Chunze, et al. Probabilistic forecasting of precipitation over the Qingjiang River Basin using BMA multimodel ensemble technique[J]. Meteorological Monthly, 2020, 46(1): 108-118. (in Chinese))

[24] 尹家波,郭生练,王俊,等. 基于贝叶斯模式平均方法融合多源数据的水文模拟研究[J]. 水利学报,2020,51(11):1335-1346. (Yin Jiabo, Guo Shenglian, Wang Jun, et al. Blending multi-source data in hydrological simulations based on BMA method [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(11): 1335-1346. (in Chinese))

[25] Zhao Youyi, Luo Shangxue, Cai Jiafang, et al. Monthly precipitation prediction based on the CEEMDAN-BMA model[J]. Water Resources Management, 2024, 38(14): 5661-5681.

[26] 周婷,温小虎,冯起,等. 基于 BMA 多模型组合的疏勒河径流预测研究[J]. 冰川冻土,2022,44(5):1606-1619. (Zhou Ting, Wen Xiaohu, Feng Qi, et al. Study on runoff prediction of Shule River based on BMA multi-model combination[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(5): 1606-1619. (in Chinese))

[27] 欧阳文宇,叶磊,顾学志,等. 深度学习水文预报研究进展综述Ⅱ:研究进展及展望[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2022,20(5):862-875. (Ouyang Wenyu, Ye Lei, Gu Xuezhi, et al. Review of deep learning for hydrological forecasting Ⅱ: research progress and prospect[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(5): 862-875. (in Chinese))

[28] 梁瀚续,宋克超,张丹,等. IHACRES 模型在不同干湿气候区小流域的应用研究[J]. 水文,2023,43(5):76-83. (Liang Hanxu, Song Kechao, Zhang Dan, et al. Application of IHACRES model in small basins of different dry and wet climatic regions [J]. Journal of China Hydrology, 2023, 43(5): 76-83. (in Chinese))

[29] Croke B F W, Jakeman A J. Use of the IHACRES rainfall-runoff model in arid and semi-arid regions[M]//Wheater H, Sorooshian S, Sharma K D. Hydrological Modelling in Arid and Semi-Arid Areas. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 41-48.

[30] Jaberzadeh M, Saremi A, Ghorbanizadeh Kharazi H, et al. SWAT and IHACRES models for the simulation of rainfall-runoff of Dez watershed[J]. Climate Dynamics, 2024, 62(4): 2823-2835.

[31] Andrews F T, Croke B F W, Jakeman A J. An open software environment for hydrological model assessment and development[J]. Environmental Modelling & Software, 2011, 26(10): 1171-1185.

[32] Kokkonen T, Koivusalo H, Jakeman T, et al. Construction of a degree-day snow model in the light of the "ten iterative steps in model development"[C]//Proceedings of the IEMSs Third Biennial Meeting: Summit on Environmental Modelling and Software. Burlington: IEMSs, 2006.

[33] Breiman L. Random forests[J]. Machine Learning, 2001, 45(1): 5-32.

[34] Smola A J, Schölkopf B. A tutorial on support vector regression[J]. Statistics and Computing, 2004, 14(3): 199-222.

(收稿日期:2025-05-12 编辑:熊水斌)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.05.011

暗管排水对江苏沿海滩涂垦区土壤脱盐改良影响的试验研究

吴 为[1],金 秋[2]

(1. 江苏汇智工程技术有限公司; 2. 南京水利科学研究院农村水利研究所)

摘要:针对江苏沿海滩涂垦区土壤含盐量高的现状,为合理利用降雨并采用暗管排水设施实现滩涂土壤脱盐的改良目的,选择典型区域开展了暗管排水试验,通过测试不同暗管埋设间距条件下试验区不同深度(0~80 cm)土壤的含盐量分析了土壤剖面盐分的动态变化规律。结果表明:无暗管的对照区不同深度土壤含盐量呈上升趋势,埋设暗管的区域不同深度土壤含盐量呈总体下降趋势;不同暗管埋设间距条件下不同深度土壤含盐量变化趋势大致相同,但变化幅度有差异,暗管埋设间距越小则土壤脱盐效果越明显;暗管埋设间距相同时土壤脱盐的效果随着土层深度的增加而减弱。

关键词:沿海滩涂垦区;土壤脱盐;暗管排水;埋设间距;江苏省

中图分类号:S156.4⁺2;S276.7⁺2 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-1980(2026)05-099-07

Experiment study on effect of underground pipe drainage on soil desalinization improvement in coastal tidal flat reclamation area of Jiangsu Province

Wu Wei[1], **Jin Qiu**[2]

(1. *Jiangsu Huizhi Engineering Technology Co., Ltd.*;
2. *Department of Rural Water Management, Nanjing Hydraulic Research Institute*)

Abstract: There is high salt content in soil in the coastal tidal flat reclamation area of Jiangsu Province. In order to make rational use of rainfall and adopt underground pipe drainage facilities to improve the desalinization of soil in the tidal flat, an underground pipe drainage experiment was carried out in a typical area. By conducting tests under different underground pipe spacings, the analysis of soil's salt content at different depths (0-80 cm) in the experimental area was carried out to study the dynamic change pattern of salinity in the soil profile. The results show that in the control area without underground pipes, the salt content of the soil at different depths shows an upward trend, while in the area with underground pipes, the salt content of the soil at different depths shows a general downward trend. Under different underground pipe spacing, the variation of the soil's salt content at different depths is roughly the same, but the amplitude is different. A smaller underground pipe spacing indicates a more obvious soil desalinization effect; when the underground pipe spacing is the same, the soil desalinization effect will weaken as the depth of the soil layer increases.

Key words: coastal tidal flat reclamation area; soil desalinization; underground pipe drainage; underground pipe spacing; Jiangsu Province

暗管排水脱盐技术遵循“盐随水来、盐随水去”的原理,将具有渗水功能的管道埋设于地下适当深度的土壤中,在自然降水或者人工灌溉的过程中,土壤中可溶于水的盐分随入渗水流向下迁移进入暗管并通过管道排出,从而实现降低土壤盐分、治理盐碱地、有效促进作物生长的目的。

我国对暗管排水开展相关技术研究的区域主要集中在山东、江苏、宁夏、山西、新疆和黑龙江等省(区)[1-4]。江苏省地处我国长江中下游沿海地区,有大量的盐碱地及围垦滩涂,在利用暗管排水系统调控地下水位以减少降水对农作物的影响以及对盐碱地进行脱盐改良以增加优质耕地和提升耕地农业生产水平等方面取得了大量的研究成果[5-16]。例如:邵孝侯等[17]在田间埋设塑料波纹暗管,探讨了塑料暗管对冬小麦土壤水分的调控和节水效能,结果表明,在小麦生育期通过塑料暗管控制灌溉和排水可起到保墒、增温、节水和降渍作用,小麦增产增质效果显著;朱成立等[18]从经济效益、土壤质量、生态环境 3 个方面构建了滨海盐

基金项目:江苏省水利科技项目(2024048)

作者简介:吴为(1988—),男,工程师,主要从事水利工程与水土保持研究。E-mail:693322566@qq.com

通信作者:金秋(1983—),男,高级工程师,博士,主要从事农田水利和水土保持研究。E-mail:fengyuwuzujq@163.com

碱地暗管排水改碱效应评价指标体系,综合评价了滨海盐碱地改良综合效应;丁中兵等[19]在江苏省射阳县盐渍土地区进行棉花种植试验,通过暗管排水系统创造适宜的水分环境,土壤脱盐率达到61.9%~63.2%,棉花增产14.9%~28.9%;周明耀等[20]将暗管排水系统应用于江苏省响水县的滨海沙性盐土地区水稻田,得出土壤水溶解氧含量在有暗管区域比无暗管区域高1~2倍的结论;张展羽等[21]对滩涂洗盐种稻暗管工程技术参数进行了研究,得出不同脱盐标准条件下暗管埋设深度、埋设间距以及管径的确定方法;陈瑾等[22]根据江苏沿海垦区特点,构建了分析不同暗管排水条件下土壤盐分变化过程的盐分动态模型,建立了盐渍土脱盐效果与排水强度之间的关系;朱海波等[23]模拟了灌水洗盐和降雨洗盐等方式下暗管排水效果以及排水含盐量变化,结果表明暗管间距越小、埋深越大,初始排水盐度和电导率也越大。

由于盐碱地具有地域特征,不同地区的土壤性质、水文气象因素、地下水埋深等各不相同,已有的很多研究成果具有特定的地域属性。本文选择具有悠久围垦利用历史[24-25]又具备中国滨海盐碱地典型特征[26-27]的江苏沿海滩涂作为研究对象,通过测试不同暗管埋设间距条件下试验区不同深度土壤的含盐量来探究土壤剖面盐分的动态变化规律,观察分析土壤的脱盐效果,以期为进一步开展沿海滩涂垦区的土壤脱盐改良工作提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于江苏省东台市弶港镇,属于典型的滨海平原区,是亚热带和暖温带的过渡区,季风显著,四季分明。试验区多年平均降水量1055.7 mm,多年平均气温14℃左右,年内降水主要集中在5—9月,多年平均蒸发量约1200 mm。

试验区地势平坦,地面高程为3.30~4.77 m(黄海高程),土壤为受海潮顶托及盐分凝聚作用回溯沉降的浅海泥沙,质地为砂壤土(在江苏沿海平原具有一定的代表性)。深度0~80 cm的土壤中含盐量(质量比,下同)为4.4 g/kg,平均干密度为1.46 g/cm^3,孔隙度为30.1%,pH值为7.9。0~20 cm的耕作层有机质含量(质量比,下同)约为11.0 g/kg,速效钾含量为212 mg/kg,有效磷含量为5.4 mg/kg。

1.2 试验处理设计

试验场地呈长方形,总面积约6.67 hm^2(100亩)。在土壤一定深度埋设不同间距的暗管,测试暗管排水系统对土壤排水脱盐效果的影响。将试验区分隔为7个试区,其中试区1~6埋设数量不同的暗管(暗管间距及布置情况见图1和表1),试区7为对照区,未埋设暗管。

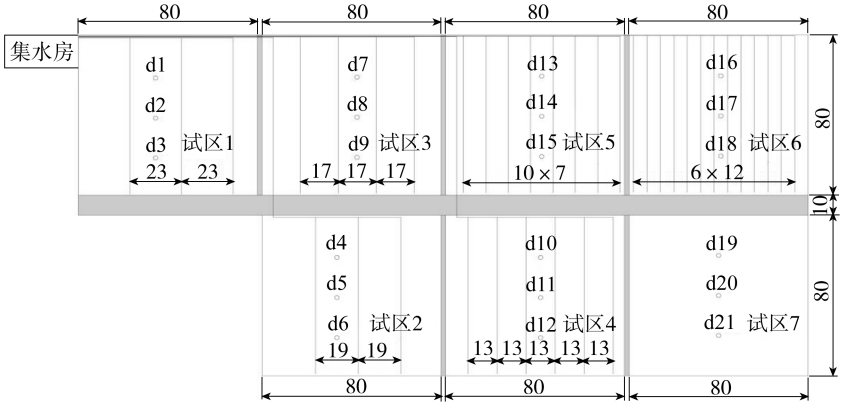


图1 试验区平面布置示意图(单位:m)

Fig. 1 Layout of experimental area (unit: m)

表1 试验区暗管布置情况

Table 1 Layout of underground pipes in experimental area

试区编号	暗管埋设间距/m	暗管数/根
1	23	3
2	19	3
3	17	4
4	13	6
5	10	8
6	6	13

试区1~6各布置3个盐分监测点(图1),均布置于各试区中部2条相邻暗管的中间位置;试区7(空白对照试验区)布置的3个盐分监测点位于对照区中部。暗管平均埋深约90 cm,坡降为1/1000,暗管起始端埋深为85 cm,出水口埋深为95 cm。

采用单壁波纹吸水管吸水、集水管汇流的两级暗管排水管网布置暗管排水区,分隔的7个试区均为80 m×80 m的标准格田,各试区之间设置田埂,同时还垂直铺设厚0.25 mm、深1.5 m的PE膜料,阻断各试区

之间的土壤水分流通。试区 1~6 的排水汇集于控制设施的小井中,再通过连接多个控制设施的排水管汇入集水房中,然后用水泵排出试验区。

1.3　观测分析方法

1.3.1　暗管排水量及矿化度测定

在试区 1~6 的暗管排水口末端安装电磁流量计测定排水量,每天 8:00 到集水房开启暗管排水阀并记录电磁流量计读数,同时用取样瓶采集 300 mL 水样,封瓶后带回实验室进行含盐量测定,用电导率笔测定水样矿化度。电导率值对应的暗管排出水矿化度计算公式为

$$y = -0.0902x^2 + 1.772x + 0.0583 \quad (1)$$

式中:y 为暗管排出水矿化度,g/L;x 为电导率值的 1/100,μs/cm。

1.3.2　土样采集方法

试验时间为 2018 年 6 月 2 日至 11 月 28 日,每隔 7 d 取样 1 次,在每个试区的 3 个取样点用土钻取样,每个点取 4 个剖面深度(0~20、>20~40、>40~60、>60~80 cm(为简洁表达,下文统一删掉“>”号))的土样。将土钻顺时针转动并下钻进入相应深度取样,竖直向上提取土样。采用多点混合土样采集法,将每个试区中 3 个取样点 4 个剖面深度的土样混合,保证每个深度的混合土样质量大于 1 kg。

1.3.3　土壤含盐量测定方法

2018 年 6 月 2 日至 11 月 28 日每隔 7 d 测定 1 次土壤含盐量。参照《土壤农化分析》[28] 配置土壤 1∶5 浸出液,用电导率笔测定其电导率。根据电导率推算出相应的土壤浸出液盐分含量,再乘以 5 即为土壤盐分含量。

1.3.4　数据处理及分析方法

土壤盐碱性指标参考《土壤农化分析》[28] 的方法进行试验分析,数据整理和图表制作采用 Excel 表格处理,变量之间的相关性采用 SPSS 软件进行分析处理。

2　结果与分析

2.1　试验区初始盐分分析

在暗管排水脱盐试验之前,对试验区各监测点所在位置不同剖面深度的土壤含盐量进行测定,了解各试区不同深度土壤的本底盐分分布情况,结果见表 2。

表 2　试验区土壤本底含盐量

Table 2　Background salt content of soil in experimental area

试区	测点	不同深度土壤含盐量/(g/kg)			
		0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	60~80 cm
1	d1	3.52	3.09	2.70	2.05
	d2	3.71	3.35	2.89	2.26
	d3	3.78	3.22	2.66	2.05
2	d4	3.54	3.24	2.86	2.47
	d5	3.59	3.40	2.73	2.49
	d6	3.63	3.14	2.90	2.13
3	d7	3.80	3.39	2.68	2.27
	d8	3.76	3.08	2.83	2.45
	d9	3.78	3.09	2.85	2.00
4	d10	3.56	3.04	2.78	2.16
	d11	3.73	3.05	2.66	2.36
	d12	3.70	3.21	2.88	2.39
5	d13	3.50	3.38	2.61	2.30
	d14	3.62	3.10	2.90	2.44
	d15	3.79	3.14	2.64	2.23
6	d16	3.77	3.12	2.78	2.29
	d17	3.52	3.07	2.90	2.41
	d18	3.65	3.20	2.63	2.12
7	d19	4.29	4.02	3.44	3.07
	d20	4.45	4.08	3.33	2.86
	d21	4.33	3.95	3.43	2.77

按照盐渍土划分标准,土壤含盐量小于 1.27 g/kg 的属于轻度盐渍土,1.27~3.84 g/kg 范围的属于中度盐渍土,>3.84~11.53 g/kg 范围的属于重度盐渍土,大于 11.53 g/kg 的属于超重度盐渍土。对照可知,埋设暗管区域(试区 1~6),0~80 cm 深度土壤均属于中度盐渍土;未埋设暗管区域(试区 7),0~40 cm 深度土壤属于重度盐渍土,40~80 cm 深度土壤属于中度盐渍土。总体而言,该试验区本底土壤含盐量处于较高水平,达不到农作物适宜生长的标准。21 个测点监测的 84 个土壤样品含盐量在 2.00~4.45 g/kg 范围。从水平方向看,由于试验区域面积相对不大且地势较平整,各试区相同深度土层的土壤含盐量变化不大;竖直方向看,同一测点位置处土壤含盐量随着土壤深度的增大而减小。

2.2　土壤含盐量变化规律

2.2.1　0~20 cm 深度土壤含盐量变化

表层土壤的含盐量易受降雨、蒸发的影响,与其他剖面深度的土壤相比,表层土壤的含盐量受水文气象等因素影响而产生的变化比较频繁。暗管排水脱盐试验期间(2018 年 6 月 2 日至 11 月 28 日)0~20 cm 深度

土壤含盐量变化在整个土壤含盐量变化中最明显,其土壤含盐量变化曲线如图2所示。

由图2可知,试区1~6的土壤初始含盐量差别不大,试区7的初始含盐量稍高。试验初期(6—8月),试验区降雨频次高且降水量充足,0~20 cm深度土壤中易溶于水的盐分随着降雨淋洗而溶入雨水中,并随雨水下降至埋深90 cm的暗管中,通过暗管排至集水池,经历此过程后土壤中的含盐量逐渐减小,这段时期土壤的含盐量下降明显。8月末至9月,表层土壤含盐量达到试验期间相对低值,此阶段降雨频次低且强度弱,土壤含盐量变化受降雨影响小,转而主要受蒸发作用影响,土壤中的含水量减少,从而在毛细管力作用下导致地下水上升到土壤中,并在蒸发作用下使得土壤含盐量呈小幅度缓慢上升趋势。

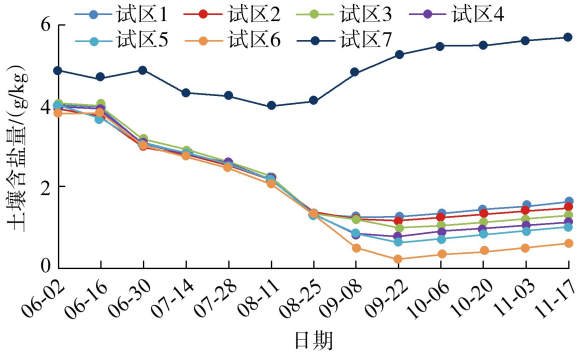


图2 0~20 cm深度土壤含盐量变化曲线

Fig. 2 Variation of soil's salt content at a depth of 0-20 cm

暗管排水条件下,试验末期(11月)土壤表层含盐量比初期(6月)显著降低。11月末试区1~6中0~20 cm深度土壤的含盐量分别为1.68、1.55、1.39、1.20、1.11、0.71 g/kg,分别比6月下降了1.99、2.04、2.39、2.46、2.53、2.94 g/kg。无暗管的对照区(试区7)11月末0~20 cm深度土壤的含盐量为5.76 g/kg,比6月上升了1.40 g/kg。以上结果表明,暗管排水技术能有效降低深度小于20 cm的土壤含盐量并且随着试验区中暗管埋设间距的减小(暗管数量增加),相应的土壤脱盐效果逐渐增强。

2.2.2 20~40 cm深度土壤含盐量变化

作物的耕作层深度一般在地下20~40 cm范围,通过暗管排水设施可以降低土壤耕作层的含盐量,从而改善作物的生长环境、增加作物产量。图3为20~40 cm深度土壤含盐量变化曲线。

由图3可知,在埋设暗管情况下,20~40 cm深度土壤含盐量总体呈现下降趋势。试验初期,6月降雨频繁且雨量较大,20~40 cm深度土壤中易溶于水的盐分在降雨淋洗作用下溶于雨水中,并随着雨水下降至地下约90 cm处埋设的暗管中,然后流入集水池,这期间土壤含盐量逐渐下降;7月20~40 cm深度土壤层含盐量呈上升状态,原因在于7月与6月相比降雨频次相对低并且以小雨居多,土壤中的盐分在雨水携带作用下从上层土壤转移到下层但并未从土壤中排出,导致下层土壤积盐且含盐量有所上升。8月降雨充足,20~40 cm深度土壤含盐量在雨水淋溶作用下大幅度下降,于9月中下旬达到试验期间的最低值,此时试区1~6的20~40 cm深度土壤含盐量分别为1.68、1.55、1.39、1.20、1.11、0.71 g/kg。9月降雨频率及降雨强度下降,蒸发作用的影响开始明显,土壤含盐量下降趋势减弱并逐渐转为上升趋势。

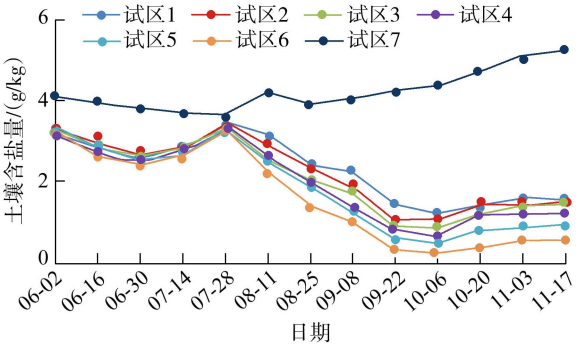


图3 20~40 cm深度土壤含盐量变化曲线

Fig. 3 Variation of soil's salt content at a depth of 20-40 cm

埋设暗管的区域,11月20~40 cm深度土壤含盐量比试验初期(6月)显著降低。11月试区1~6的20~40 cm深度土壤含盐量分别为1.56、1.44、1.35、1.21、0.88、0.53 g/kg,比6月分别下降了1.66、1.82、1.84、1.89、2.33、2.60 g/kg。试区7的20~40 cm深度土壤11月含盐量为5.56 g/kg,比6月上升了1.54 g/kg。以上结果表明,暗管排水技术能有效降低20~40 cm深度土壤含盐量,并且随着试验区暗管埋设数量增加、间距减小,土壤脱盐效果会相应增强。

2.2.3 40~60 cm深度土壤含盐量变化

由图4可知,试验时段埋设不同间距暗管的6个试区40~60 cm深度土壤含盐量变化总体趋势与20~40 cm深度的大概一致,表现为埋设暗管后土壤含盐量最终呈现降低趋势。

埋设暗管的区域,11月40~60 cm深度土壤含盐量比试验初期(6月)显著降低,11月试区1~6的40~

60 cm 深度土壤含盐量分别为 2.01、1.89、1.79、1.64、1.48、1.31 g/kg,比 6 月分别下降了 0.74、0.94、0.98、1.13、1.24、1.46 g/kg。无暗管的对照区(试区 7)40~60 cm 深度土壤含盐量 11 月为 5.28 g/kg,比 6 月上升了 1.88 g/kg。以上结果表明,暗管排水技术能有效降低 40~60 cm 深度土壤含盐量,并且随着试验区暗管埋设数量增加、间距减小,土壤脱盐效果会相应增强。

2.2.4　60~80 cm 深度土壤含盐量变化

由图 5 可知,埋设暗管的 6 个试区 60~80 cm 深度土壤含盐量变化与上层土壤的含盐量变化趋势基本一致,表现为埋设暗管后土壤含盐量最终呈现降低趋势。

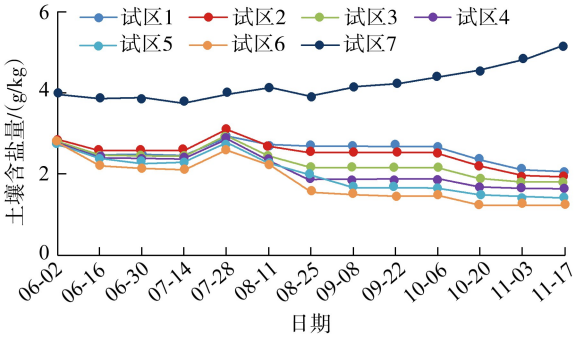


图 4　40~60 cm 深度土壤含盐量变化曲线

Fig. 4　Variation of soil's salt content at a depth of 40-60 cm

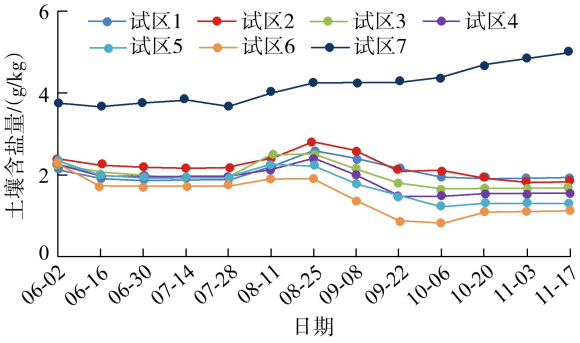


图 5　60~80 cm 深度土壤含盐量变化曲线

Fig. 5　Variation of soil's salt content at a depth of 60-80 cm

埋设暗管的区域,11 月 60~80 cm 深度土壤含盐量比试验初期(6 月)显著降低,11 月试区 1~6 的 60~80 cm 深度土壤含盐量分别为 1.91、1.79、1.67、1.52、1.31、1.13 g/kg,比 6 月分别下降了 0.21、0.57、0.57、0.78、1.01、1.14 g/kg。无暗管的对照区(试区 7)60~80 cm 深度土壤含盐量 11 月为 5.16 g/kg,比 6 月上升了 2.26 g/kg。以上结果表明,暗管排水技术能有效降低 60~80 cm 深度土壤含盐量,并且随着试验区暗管埋设数量增加、间距减小,土壤脱盐效果会相应增强。

2.3　土壤纵剖面脱盐规律

图 6 为各试区不同深度土壤的脱盐率,可见在埋设暗管后 0~80 cm 深度的土壤中,不同深度土壤脱盐率变化趋势大致相同,基本上随着暗管埋设间距的减小而有所增大,其中试区 6 的 0~20 cm 深度土壤含盐量下降最明显,脱盐率最高(80.49%);试区 1 的 60~80 cm 深度土壤脱盐率最低(37.97%)。从竖直方向看,整个暗管埋设区内,0~20、20~40、40~60、60~80 cm 深度土壤脱盐率分别为 67.21%、63.60%、40.31%、31.25%,表明在有暗管排水条件下,土壤脱盐率随着土壤深度的增加呈逐渐变小的趋势。无暗管的试区 7 土壤含盐量随着深度增加总体呈现上升趋势,在试验末期(11 月)土壤的含盐量比试验初期(6 月)上升了 37.02%。以上结果表明,埋设暗管有助于降低土壤的含盐量。

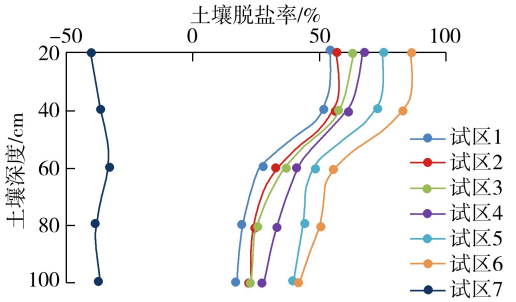


图 6　试验区土壤脱盐率

Fig. 6　Soil desalinization rate in experimental area

3　结　论

a. 有暗管排水区域不同深度土壤含盐量均呈下降趋势,无暗管排水区域呈上升趋势。

b. 0~80 cm 深度土壤中不同深度(0~20、20~40、40~60、60~80 cm)土壤含盐量,在暗管埋设间距不同的情况下变化趋势大致相同,但变化幅度有差异,埋设暗管的间距越小土壤含盐量下降幅度越大、脱盐效果越明显。

c. 0~80 cm 深度土壤中在暗管埋设间距相同的条件下,土壤的脱盐效果随着土层深度的增加而减弱。

参考文献:

[1] 谭攀,王士超,付同刚,等. 我国暗管排水技术发展历史、现状与展望[J]. 中国生态农业学报(中英文),2021,29(4):633-639. (Tan Pan,Wang Shichao,Fu Tonggang,et al. Development history,present situation,and the prospect of subsurface drainage technology in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2021,29(4):633-639. (in Chinese))

[2] 刘建刚,罗纨,贾忠华. 银南灌区控制排水实施效果分析[J]. 水利水电科技进展,2009,29(1):40-43. (Liu Jiangang,Luo Wan,Jia Zhonghua. Implementation effect analysis of controlled drainage in Yinnan Irrigation District[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2009,29(1):40-43. (in Chinese))

[3] 高正夏. 宁夏青铜峡河西灌区灌排模式对比研究(二)[J]. 水资源保护,2003,19(1):32-35. (Gao Zhengxia. Comparative analysis of irrigation and drainage modes for west irrigated area of Qingtong Gorge of Ningxia[J]. Water Resources Protection,2003,19(1):32-35. (in Chinese))

[4] 吴明洲,王锦国,陈舟. 沿海滩涂淤泥质黏土水盐迁移试验分析[J]. 水资源保护,2016,32(3):137-142. (Wu Mingzhou,Wang Jinguo,Chen Zhou. Experimental analysis on soil water and salt migration of mucky clay in coastal shoal[J]. Water Resources Protection,2016,32(3):137-142. (in Chinese))

[5] 张长宽,陈欣迪. 海岸带滩涂资源的开发利用与保护研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(1):25-33. (Zhang Changkuan,Chen Xindi. Advances in development,utilization,and protection of coastal tidal flats[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2016,44(1):25-33. (in Chinese))

[6] 陈欣迪,陈君,张长宽. 盐城市沿海大规模滩涂开发利用评估[J]. 水利水电科技进展,2016,36(2):53-58. (Chen Xindi,Chen Jun,Zhang Changkuan. Evaluation of large-scale development and utilization of coastal tidal flats in Yancheng City[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2016,36(2):53-58. (in Chinese))

[7] 许艳,濮励杰,张润森,等. 江苏沿海滩涂围垦耕地质量演变趋势分析[J]. 地理学报,2017,72(11):2032-2046. (Xu Yan,Pu Lijie,Zhang Runsen,et al. Cropland quality evolution following coastal reclamation at the prograding tidal flats of Jiangsu Province,China[J]. Acta Geographica Sinica,2017,72(11):2032-2046. (in Chinese))

[8] 孙立才,崔士友,张蛟,等. 江苏滨海盐土脱盐技术及应用前景[J]. 农学学报,2021,11(1):27-31. (Sun Licai,Cui Shiyou,Zhang Jiao,et al. Coastal saline soil in Jiangsu:desalting technologies and application prospect[J]. Journal of Agriculture,2021,11(1):27-31. (in Chinese))

[9] 方仁建,沈永明,时海东. 基于围垦特征的海滨地区景观格局变化研究:以盐城海岸为例[J]. 生态学报,2015,35(3):641-651. (Fang Renjian,Shen Yongming,Shi Haidong. The changes of coastal wetland landscape pattern based on the characteristics of reclamation:a case study in coastal wetland of Yancheng,Jiangsu Province,China[J]. Acta Ecologica Sinica,2015,35(3):641-651. (in Chinese))

[10] 陈诚,罗纨,贾忠华,等. 江苏沿海滩涂农田高降渍保证率暗管排水系统布局[J]. 农业工程学报,2017,33(12):122-129. (Chen Cheng,Luo Wan,Jia Zhonghua,et al. Subsurface drainage system layout to meet high assurance rate of waterlogging control in coastal mud-flat farmlands in Jiangsu[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2017,33(12):122-129. (in Chinese))

[11] 宋翘楚. 基于GIS和地统计学的土壤盐分时空变异特征研究[D]. 南京:河海大学,2019.

[12] 周煜,余夏杨,周廷璋,等. 采用高密度电法仪监测围垦区土壤盐分变化[J]. 水资源保护,2018,34(2):96-101. (Zhou Yu,Yu Xiayang,Zhou Tingzhang,et al. Monitoring on change of soil salinity with high-density resistivity instrument in a reclaimed area[J]. Water Resources Protection,2018,34(2):96-101. (in Chinese))

[13] 罗锋,常曼,宋晓村,等. 江苏沿海滩涂开发利用对策研究[J]. 水利经济,2016,34(4):1-3. (Luo Feng,Chang Man,Song Xiaocun,et al. Development and strategy of coastal beaches in Jiangsu Province[J]. Journal of Economics of Water Resources,2016,34(4):1-3. (in Chinese))

[14] 陈军冰,王乘,郑垂勇,等. 沿海滩涂大规模围垦及保护关键技术研究概述[J]. 水利经济,2012,30(3):1-5. (Chen Junbing,Wang Cheng,Zheng Chuiyong,et al. Key technologies for large-scale reclamation and protection of tidal flats in coastal areas[J]. Journal of Economics of Water Resources,2012,30(3):1-5. (in Chinese))

[15] 钱争,冯绍元,庄旭东,等. 基于主成分分析的土壤盐碱化特征研究[J]. 中国农村水利水电,2022(5):119-124. (Qian Zheng,Feng Shaoyuan,Zhuang Xudong,et al. Research on the soil salinization and alkalization characteristics based on principal component analysis[J]. China Rural Water and Hydropower,2022(5):119-124. (in Chinese))

[16] 韩冬,姚宇阗,陈超,等. 向日葵种植和灌排淋洗改良滨海盐碱地的协同效应研究[J]. 节水灌溉,2023(7):90-95. (Han Dong,Yao Yutian,Chen Chao,et al. Evaluation on the synergistic effect of sunflower and subsurface drainage on reducing salinity

in coastal saline alkali land[J]. Water Saving Irrigation,2023(7):90-95. (in Chinese))

[17] 邵孝侯,郭相平,戴振伟,等. 塑料暗管排灌对麦田土壤水分调控的试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2000,28(2):32-35. (Shao Xiaohou,Guo Xiangping,Dai Zhenwei,et al. Study of effect of drainage and irrigation by plastic subpipes on soil moisture controlling in winter wheat fields[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2000,28(2):32-35. (in Chinese))

[18] 朱成立,陈婕,冯宝平,等. 基于投影寻踪的滨海盐碱地改良综合效应评价[J]. 水利水电科技进展,2013,33(2):20-25. (Zhu Chengli,Chen Jie,Feng Baoping,et al. Evaluation of the combined effect of coastal saline-alkali soil reclaim based on the theory of projection pursuit[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2013,33(2):20-25. (in Chinese))

[19] 丁中兵,倪同坤. 盐渍土地区暗管排水效应试验研究[J]. 南昌水专学报,2004,23(1):59-62. (Ding Zhongbing,Ni Tongku. An experimental study of pipe drainage effect in saline soil area[J]. Journal of Nanchang College of Water Conservancy and Hydroelectric Power,2004,23(1):59-62. (in Chinese))

[20] 周明耀,陈朝如,毛春生,等. 滨海盐土地区稻田暗管排水效果试验研究[J]. 农业工程学报,2000,16(2):54-57. (Zhou Mingyao,Chen Chaoru,Mao Chunsheng,et al. Experiment and research on seepage effect by underground pipe drainage system of paddy field in saline soil coastland[J]. Transactions of the CSAE,2000,16(2):54-57. (in Chinese))

[21] 张展羽,郭相平,汤建熙,等. 滩涂洗盐种稻暗管工程技术参数的研究[J]. 水利学报,1999,30(4):30-34. (Zhang Zhanyu,Guo Xiangping,Tang Jianxi,et al. Study on technical parameters of buried pipe system for salt leaching in beach area[J]. Journal of Hydraulic Engineering,1999,30(4):30-34. (in Chinese))

[22] 陈瑾,罗纨,贾忠华,等. 江苏沿海垦区土壤脱盐过程受排水条件影响的模拟研究[J]. 中国农村水利水电,2021(7):185-191. (Chen Jin,Luo Wan,Jia Zhonghua,et al. Simulating the rainfall leaching effect on coastal saline soil facilitated with subsurface drainage systems[J]. China Rural Water and Hydropower,2021(7):185-191. (in Chinese))

[23] 朱海波,俞双恩,王君. 沿海新垦区灌水和降雨条件下暗管排水洗盐效果试验研究[J]. 中国农村水利水电,2015(2):99-104. (Zhu Haibo,Yu Shuangen,Wang Jun. Experimental research on soil desalting by subsurface pipe drainage in new reclamation land of coastal areas under the condition of irrigation and rainfall[J]. China Rural Water and Hydropower,2015(2):99-104. (in Chinese))

[24] 张蛟,崔士友,冯芝祥,等. 气候因子和地表覆盖对沿海滩涂土壤盐分动态的影响[J]. 中国生态农业学报,2018,26(2):294-302. (Zhang Jiao,Cui Shiyou,Feng Zhixiang,et al. Climatic factors and mulching affect soil salinity dynamics in coastal areas[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2018,26(2):294-302. (in Chinese))

[25] 王广博,徐翠兰,黄蕊,等. 江苏沿海地区围垦动态与土地利用变化驱动力研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(2):163-170. (Wang Guangbo,Xu Cuilan,Huang Rui,et al. Research on driving forces of reclamation dynamics and land use change in coastal areas of Jiangsu Province[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(2):163-170. (in Chinese))

[26] He Bin,Cai Yongli,Ran Wenrui,et al. Spatial and seasonal variations of soil salinity following vegetation restoration in coastal saline land in eastern China[J]. Catena,2014,118:147-153.

[27] Abliz A,Tiyip T,Ghulam A,et al. Effects of shallow groundwater table and salinity on soil salt dynamics in the Keriya Oasis,Northwestern China[J]. Environmental Earth Sciences,2016,75(3):260.

[28] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,2000.

(收稿日期:2025-01-29　编辑:熊水斌)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.05.012

基于闸群联合调控的荆州沙北片河网水动力重构研究

林炜杰[1,2,3],徐 津[1,2,3],陈 瀚[1,2,3],朱 海[1,2,3],彭习渊[4],杨 卫[4],
唐洪武[3,5],王玲玲[1,2,3]

(1. 河海大学流域水循环与水安全全国重点实验室; 2. 河海大学水利水电学院;
3. 河海大学水利部水循环与水动力系统重点实验室; 4. 湖北省水利水电规划勘测设计院;
5. 华南理工大学海洋科学与工程学院)

摘要:为对引水量受限的荆州长湖水系沙北片河网进行水动力重构,提出了一种基于水闸调控响应特征与分阶段单目标优化的闸群联合调控方法,建立了一维水动力模型进行单闸调控敏感性分析,识别了河网调控中的关键水闸及其有效开度区间,并据此构建闸群联合调控优化模型,系统分析并确定了最优调控方案。结果表明:各水闸对河网不同渠道水动力影响存在差异,且单闸调控难以兼顾主支渠水动力协同改善;在日均引水流量 5 m^3/s 的条件下,得到的最优调控方案能使滞缓区流速提升 25%以上,河网平均流速提升 14.72%~22.44%,且干渠在调控过程中流速保持在 0.1 m/s 以上,有效重构了研究区域的水动力,并保障了河网的引排功能。

关键词:平原河网;水动力重构;闸群联合调控;敏感性分析;荆州沙北片河网
中图分类号:TV143 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-1980(2026)05-0106-08

Research on hydrodynamic reconstruction of Shabei River Network in Jingzhou based on joint gate group operation

Lin Weijie[1,2,3], **Xu Jin**[1,2,3], **Chen Han**[1,2,3], **Zhu Hai**[1,2,3], **Peng Xiyuan**[4], **Yang Wei**[4], **Tang Hongwu**[3,5], **Wang Lingling**[1,2,3]
(1. *State Key Laboratory of Water Cycle and Water Security, Hohai University*;
2. *College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University*;
3. *Key Laboratory of Hydrologic-Cycle and Hydrodynamic-System of Ministry of Water Resources, Hohai University*;
4. *Hubei Institute of Water Resources Survey and Design*;
5. *School of Marine Science and Engineering, South China University of Technology*)

Abstract: To reconstruct the hydrodynamics of the Shabei River Network in the Changhu water system of Jingzhou under limited water diversion, a joint gate group operation method based on gate regulation response characteristics and phased single-objective optimization was proposed. A one-dimensional hydrodynamic model was established to conduct sensitivity analysis of single-gate regulation, and key gates and their effective opening ranges were identified. Based on this, a joint gate group operation optimization model was constructed to systematically analyze and determine the optimal operation scheme. The results indicate that different gates have varying impacts on the hydrodynamics of different channels; single-gate regulation can hardly achieve coordinated improvement of hydrodynamics in both main and branch canals. Under the condition of an average daily water diversion flow of 5 m^3/s, the optimal operation scheme increased the flow velocity in stagnant flow zones by over 25%, increased the average flow velocity of the river network by 14.72%-22.44%, and maintained the flow velocity above 0.1 m/s in main canals during the regulation process, effectively reconstructing the hydrodynamics of the study area and ensuring the water diversion and drainage functions of the river network.

Key words: plain river network; hydrodynamic reconstruction; joint gate group operation; sensitivity analysis; Shabei River Network of Jingzhou

平原河网地区地势低平、河道比降小,加之频繁的人类活动(如围垦和填埋)影响,普遍存在水动力微弱、流速空间分布不均等问题[1-2]。水动力不足直接降低了水体的物质输运效率及其自净能力[3-5],导致污染物滞留、水质恶化,严重制约了平原地区水生态安全与社会经济可持续发展。因此,有效改善平原河网水

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3202600);国家自然科学基金项目(52479062);国家自然科学基金青年科学基金项目(52309086);江苏省水利科技项目(2024009,2023013)
作者简介:林炜杰(2000—),男,硕士研究生,主要从事水力学数值模拟研究。E-mail:182778387@qq.com
通信作者:王玲玲(1966—),女,教授,博士,主要从事水力学数值模拟研究。E-mail:wanglingling@hhu.edu.cn

动力条件已成为提升水质与水资源利用效率的关键。目前,平原河网主要通过水闸、泵站等水利工程来改善水动力条件[6-7],但单一工程的经验调控存在局限性,往往只能改善局部水动力条件,难以兼顾干支流、大尺度区域的整体协调[8-9]。系统整合闸站工程体系,构建使水动力局部与整体格局更为协调的联合调度策略,是近年来提出的平原河网水动力重构思路中的关键途径[10]。

闸群联合调控是实现系统化水动力重构的有效手段,其核心在于通过多工程协同调度,增强平原河网干支渠的联动性与水体交换能力[11-12]。闫毓等[13]针对上海蕴南片水系提出了包括增加泵引流量的多要素协同调控方法,使河网中多数断面流速得到提升;何健等[14]分析了扬州市河网不同水闸运行方案下的河道水动力改善效果,发现调整水流路线和增加泵引流量可以不同程度改善河网水动力条件;徐存东等[15]设计了 7 种太湖流域南浔区河网闸泵调控方案并采用水动力模型进行了模拟,发现外河开闸引水与增加泵引流量相结合的调控方案能有效提高河网水动力。上述研究表明,通过增加引水流量能在一定程度上改善河网水动力条件,但在引水流量受限的平原河网中,局部水动力的提升常以其他区域水动力削弱为代价,难以实现局部与整体协同优化。因此,如何在特定引水条件下,充分挖掘现有闸群的调控潜力,构建高效协同的闸群联合调度模型,获得水动力改善效果最优的调控方案,实现平原河网水动力局部与整体协同提升,是亟待深入研究的问题。

为重构引水流量受限的江汉平原沙北片河网水动力,本文提出了基于水闸调控响应特征与分阶段单目标优化的闸群联合调控方法,该方法通过建立一维水动力模型开展单闸调控敏感性分析和识别关键调控水闸及其有效调控区间,并进一步构建了闸群联合优化调控模型,系统探索了闸群最优调控方案,可为类似区域水网管理与调控提供参考。

1　研究区概况

沙北片河网位于湖北省荆州市中心城区,属长湖水系,区域总面积为 38.54 km^2,水系及工程特征如图 1 与表 1 所示。该河网西北通过荆襄河与长湖相连,枯水期主要依赖长湖供水,水体从横大路闸(D 闸)引入,经内部河网汇入豉湖渠,形成“西引南排”的水流格局。然而,长湖枯水期可供水量仅为 5 m^3/s,加之区域缺少统一的水闸调度规则,导致枯水期干渠与靠近闸口的渠段水动力相对较强,而部分远离闸口的渠段断面流速不足 0.03 m/s,水体滞留严重,水质多为Ⅳ类至劣Ⅴ类,存在显著的生态环境风险。为改善当前状况,亟须在 5 m^3/s 的引水条件下充分挖掘现有水闸的调控潜力,构建闸群联合调控优化模型,实现河网水动力在局

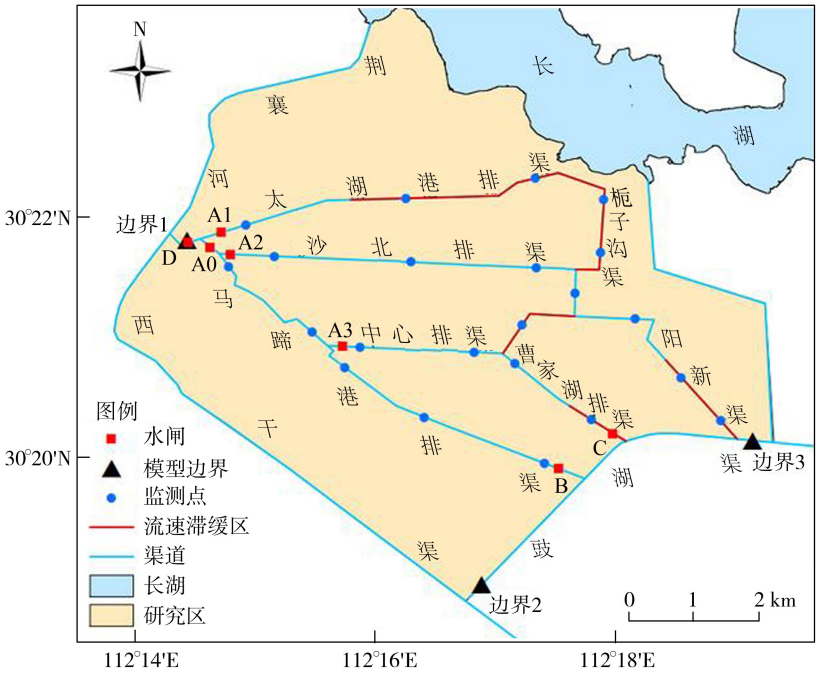


图 1　研究区水系及工程特征示意图

Fig. 1　Schematic diagram of river system and hydraulic structures in study area

表1 主要水闸信息

Table 1 Information of key gates

编号	名称	闸门数量	闸门宽度/m	闸门高度/m	闸底板高程(黄海高程)/m
A0	马蹄港排渠闸1	2	3.5	2.5	25.94
A1	太湖港排渠闸	1	3.5	2.5	27.00
A2	沙北排渠闸	2	3.5	2.5	25.92
A3	中心排渠闸	2	5.0	2.5	25.17
B	马蹄港排渠闸2	1	2.4	2.5	25.01
C	曹家湖闸	1	2.3	2.8	25.00
D	横大路闸	1	3.0	2.5	27.20

部与整体层面的协调改善。

2 模型建立与率定

2.1 水动力模型

对河网水动力过程进行模拟,并在此基础上分析工程调控对水动力格局的影响,是实现河网水动力格局重构的前提。通过构建一维水动力模型,可以量化水闸调控对河网水位、流速分布的影响,为后续优化模型提供可靠的数据基础。

2.1.1 模型原理

本文采用一维水动力模型对沙北片河网进行水动力模拟分析。模型基于一维非恒定流圣维南方程组,包括连续方程与动量方程,通过离散求解得到河道流量、水位等水动力要素的时空变化过程。

2.1.2 模型建立

建模范围覆盖沙北片区主要排水渠道,包括马蹄港排渠、太湖港排渠、豉湖渠等8条河道,总长度约34 km。区域内布设7座主要控制水闸,承担引水、节制及排水功能,构成完整的水力调控体系。在边界条件设置方面,模型以太湖港排渠上游横大路闸(边界1)和西干渠与豉湖渠交汇处(边界2)为入流边界,以豉湖渠下游、距边界2约5.3 km处(边界3)为出流边界,具体如图1所示。为保证模型计算精度与运算效率,模拟时间步长取为30 s,初始水深根据实际运行情况设为1 m。

2.1.3 参数率定

河道糙率为水动力模型的关键参数。为准确模拟沙北片河网的水动力特性,需对各河道的糙率进行率定[16],以确保模拟水位、流量过程的精度。

由于沙北片河网内部没有水位测站,缺乏历史水位监测资料。为了率定河网模型,于2024年5月6—15日开展了沙北片河网调水试验,试验期间通过横大路闸从长湖向沙北片河网引水,日均引水流量稳定控制在3.5 m^3/s,设立了监测点(图1中蓝色点)测量水动力指标,涵盖了主要渠道的流量过程和典型断面的水位过程,具有良好的代表性与完整性,可作为模型率定的依据。

在率定过程中,模型入流边界采用实测流量过程,出流边界采用实测水位过程。通过多轮糙率率定验证,最终确定太湖港排渠、栀子沟渠、沙北排渠、中心排渠、马蹄港排渠、曹家湖排渠、阳新渠和豉湖渠的糙率分别为0.035、0.035、0.036、0.025、0.023、0.022、0.036、0.028。

4个代表性断面的水位模拟与实测过程整体吻合良好(图2),各断面水位相对误差均控制在±3%以内,纳什效率系数在0.929~0.973范围内,表明所构建的模型具有良好的精度与适用性,能够有效支撑后续的联合调控模拟分析。

2.2 优化模型

优化模型通过设定目标函数、决策变量与约束条件,将水动力模拟与优化算法相结合,实现调控策略的定量寻优,为河网水动力重构提供方法支撑。

2.2.1 目标函数

已有研究揭示,水动力是控制水体复氧与污染物输移、扩散、降解过程的关键因素,提升流速能促进污染物的稀释与降解[10]。基于这一原理,本文优化模型设置两个目标函数,分别用于衡量河网流速滞缓区改善效果与水动力整体提升幅度。

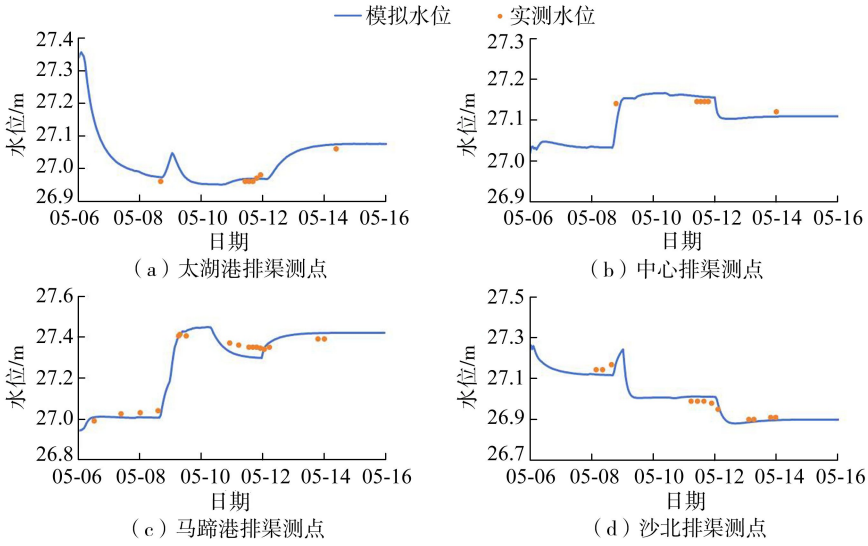


图 2　模型水位验证结果

Fig. 2　Model validation results for water levels

a. 流速滞缓区断面达标率(以下简称“断面达标率”)。当流速低于 0.03 m/s 时,水流对浮游植物生物量的抑制效果较差,与静水环境无显著差异,水体自净能力弱[17],因此将断面流速持续低于 0.03 m/s 的河段定义为滞缓区。该指标含义为:在流速滞缓区内若干断面中,流速提升幅度达到预设阈值的断面数量所占比例。该指标用于衡量调控方案在空间分布上的均衡性。将断面流速较基础工况提升 25%设定为“有效提升”的判断标准。断面达标率目标函数 F_1 如下:

$$\min F_1 = 1 - R = \left(1 - \frac{N_{25\%}}{N}\right) \times 100\% \tag{1}$$

式中:R 为断面达标率;$N_{25\%}$为调控后相对于基础工况流速提升幅度达到或超过 25%的断面数量;N 为滞缓区内断面总数。

b. 河网平均流速整体提升率(以下简称“平均流速提升率”)。在实现空间均衡优化的基础上,调控方案的全局水动力提升幅度仍然是衡量水动力重构综合效益的重要优化指标,体现了方案在全域范围内的优化效果[11]。该指标含义为:调控后河网全域平均流速相对于基础工况的提升百分比。该指标有助于在确保滞缓区局部流速提升的同时,进一步评价调控方案对整个河网水动力条件的改善程度,并作为调控方案优选的指标之一。平均流速提升率目标函数 F_2 如下:

$$\min F_2 = 1 - \eta = \left(1 - \frac{v_t - v_0}{v_0}\right) \times 100\% \tag{2}$$

式中:η 为平均流速提升率;v_t 为调控后河网平均流速,m/s;v_0 为基础工况的河网平均流速,m/s。

本文研究的首要目标是流速滞缓区的断面达标,因此在调控方案优选过程中采用分阶段单目标优化策略,即第一阶段确保断面达标率符合要求,优选出达标率高的调控方案;第二阶段在第一阶段基础上进一步优选平均流速提升率表现最优的方案,确保在优化局部水动力的同时,兼顾整体水动力有所提升。

2.2.2　决策变量与约束条件

优化模型以水闸开度作为决策变量,结合上述目标函数,建立如下优化模型:

$$\begin{cases} \min F_1 = 1 - R(e_1, e_2, \cdots, e_n) \\ \min F_2 = 1 - \eta(e_1, e_2, \cdots, e_n) \\ \text{s.t.} \begin{cases} q_{引} = Q \\ e_{i,\mathrm{LB}} \leqslant e_i \leqslant e_{i,\mathrm{UB}} \\ \bar{v}_{干} \geqslant 0.1\ \mathrm{m/s} \end{cases} \end{cases} \tag{3}$$

式中:$e_i(i=1,2,\cdots,n)$为第 i 个水闸的开度,m;$e_{i,\mathrm{LB}}$、$e_{i,\mathrm{UB}}$ 分别为第 i 个水闸开度调节的下界与上界,m;$R(e_1,e_2,\cdots,e_n)$、$\eta(e_1,e_2,\cdots,e_n)$分别为 R 和 η 关于开度的函数;$\bar{v}_{干}$为干渠的平均流速,m/s;$q_{引}$为研究区引

水流量,m^3/s;Q 为特定的引水流量,m^3/s。Tang 等[10]研究表明,维持干渠流速大于 0.1 m/s 是保障水体复氧能力与河道自净潜力的基础条件,故 $\bar{v}_{干}$ 不应低于 0.1 m/s,以确保区域引排通畅。

2.2.3 模型求解优化流程

本文采用改进型粒子群优化(IPSO)算法对闸群联合调控模型进行求解。IPSO 算法在传统粒子群基础上引入了收缩因子与自适应惯性权重,兼顾全局搜索与局部收敛。求解过程中,以不同水闸开度作为优化变量,每一组闸门开度组合视为一个粒子,依据目标函数结果不断迭代更新个体与群体最优解,最终输出满足条件的调控方案。IPSO 算法在特定引水流量下,能够高效获得闸群联合调控的最优方案。基于 IPSO 算法的优化模型求解流程如图 3 所示。

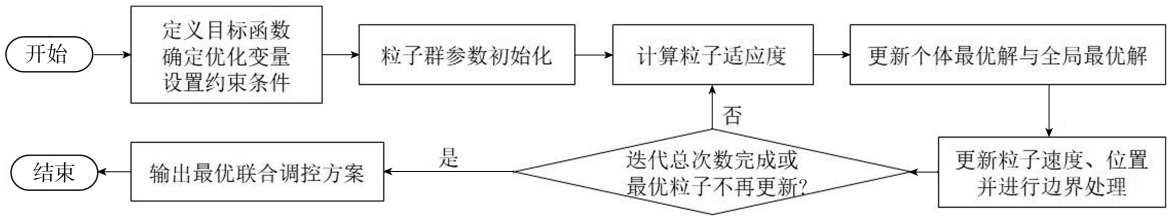


图 3 基于 IPSO 算法的优化模型求解流程

Fig. 3 Flowchart of solving optimization model based on IPSO algorithm

3 单闸调控模拟与响应特征分析

为评估各闸对沙北片河网水动力空间格局的调控作用,并为闸群联合调控优化模型的构建提供依据,在一维水动力模型基础上,开展了单闸调控响应模拟分析,挖掘水闸调控潜力。

3.1 基础工况设定与分析

基础工况设定为:横大路闸(边界 1)引水流量保持 5 m^3/s,入流边界 2、出流边界 3 分别采用调水试验实测的流量和水位,河网内其余 6 座水闸全开。

基础工况的模拟结果(太湖港排渠、沙北排渠、中心排渠、马蹄港排渠、曹家湖排渠和阳新渠的平均流速分别为 0.051、0.140、0.085、0.195、0.050、0.045 m/s)表明,马蹄港排渠与沙北排渠的平均流速显著高于其他支渠,干支渠水动力差异明显。太湖港排渠、阳新渠等支渠有约 40%河段为流速滞缓区(图 1),这些区域普遍位于支渠末端,也是水质较差河段。

3.2 调控方案设计

本文依次调节河网内部 6 座水闸的开度,每次仅调节一座水闸(其余各闸保持全开),开度以 0.1 m 为变化步长,待河网水动力稳定后再逐级增加开度,直至该闸处于全开且河网流速响应趋于稳定。通过模拟分析单个水闸开度变化对典型渠道平均流速的敏感性影响机制,明确各闸在水动力调控中的作用。为了量化流速对水闸闸门开度变化的响应程度,引入流速敏感度系数 S_v:

$$S_v = \frac{\Delta v}{\Delta G} \tag{4}$$

式中:Δv 为渠道平均流速变化量,m/s;ΔG 为水闸开度变化量,m。S_v 越大表示该水闸闸门开度的微小变化对渠道流速影响越显著,调控能力越强。

为客观确定各水闸的有效调控开度区间,设定如下规则:将敏感度系数不低于其最大值 10%(即 $S_v \geqslant 0.1S_{v,\max}$)的开度范围界定为该水闸的有效调控区间。此规则旨在筛选出对渠道流速具有显著调控能力的开度,避免将调控效果微弱的开度纳入后续优化,从而聚焦于关键调控参数。

3.3 调控响应特征分析

图 4 为流速敏感度系数热力图,具体分析如下:

a. B 闸在开度 0.3~0.6 m 时,马蹄港排渠流速敏感度系数最高可达 0.416 s^{-1}。从物理机制上看,B 闸直接控制干渠出流通道,当其开度降低时,干渠流量受限,水体被迫分流到支渠,增强了横向扩散能力,从而有效缓解了马蹄港排渠水资源过度集中问题,推动水流向阻力较大的区域扩散。A0 闸在开度 0.3~0.7 m 时,太湖港排渠流速敏感度系数最高达 0.411 s^{-1};当 A0 闸开度低于 0.3 m 时,沙北排渠和中心排渠发生倒流

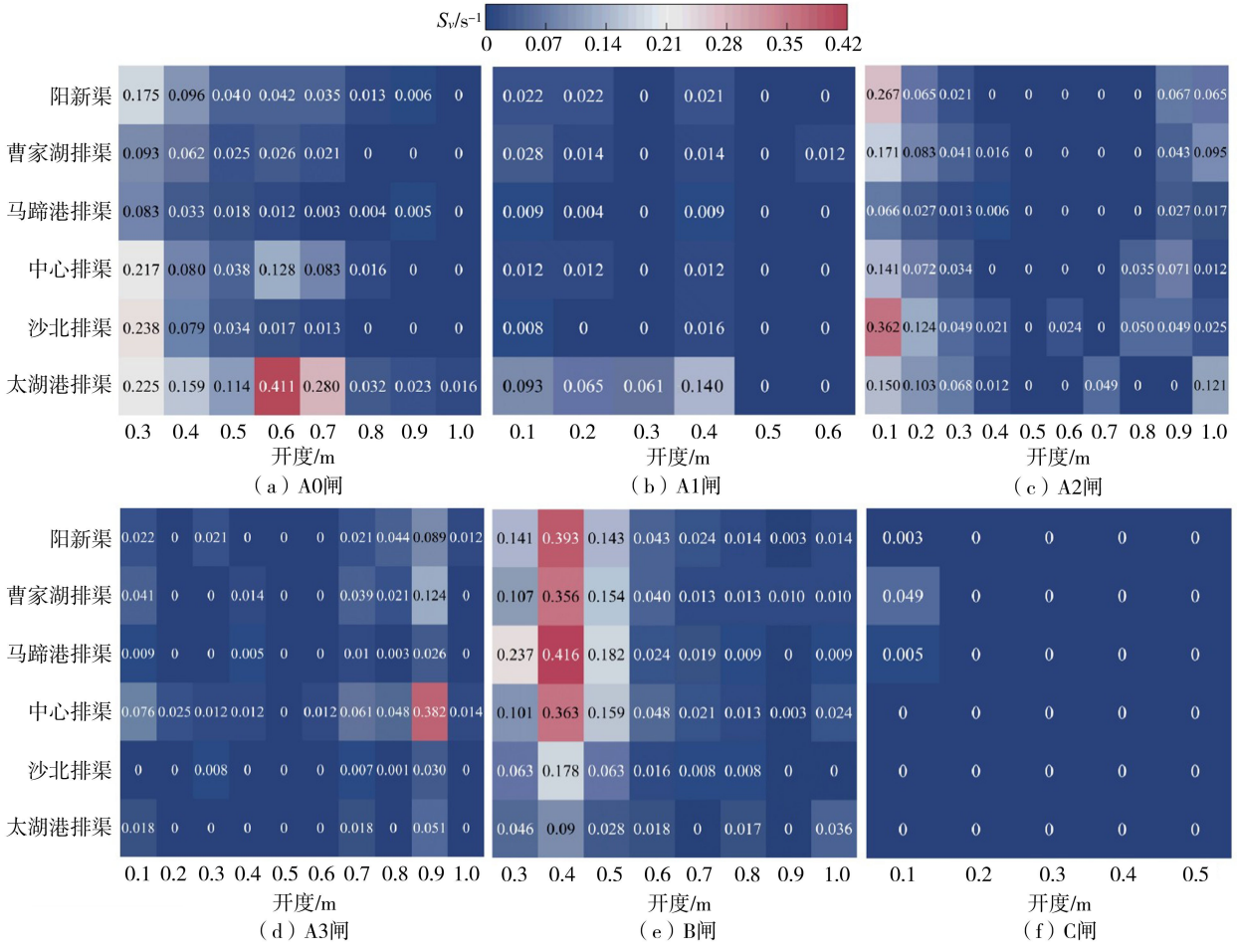


图 4　单闸调控下各渠道流速敏感度系数热力图

Fig. 4　Heatmap of flow velocity sensitivity coefficients for each channel under single-gate regulation

现象,可能因太湖港排渠水动力过强,扰乱了正常引排方向,易加剧水质恶化与排涝风险。因此,在调控过程中应避免将 A0 闸开度设定在 0.3 m 以下,以保障水动力空间格局稳定。

b. A2 闸在开度 0.1~0.3 m 时,沙北排渠流速敏感度系数最高达 0.362 s^{-1},可有效缓解其流速相对较高状态并提升其他支渠引水能力。A3 闸流速表现出一定的非线性响应,在开度为 0.7~0.9 m 区间时,中心排渠流速敏感度系数最高达 0.382 s^{-1},推测该区间内水位差较优,形成较好引流条件。此外,两闸开度变化时河网支渠的流速敏感度系数大多低于 0.100 s^{-1},表明两闸调控效果集中、干扰性较低,适合局部水动力调节。

c. A1 闸与 C 闸的调控效果较弱,调节其开度后对大多渠道流速变化影响较小,马蹄港排渠和沙北排渠流速敏感度系数在 0.02 s^{-1} 以下,而滞缓区的流速进一步降低,说明两闸对水动力空间格局的改善效果有限,这可能与其所属河段本身水动力较弱有关,对调控不敏感。因此在后续优化中,A1 闸与 C 闸保持全开,以简化调控过程。

综上,在特定引水流量下,沙北片河网不同水闸调控能力差异明显,且单闸调控难以兼顾主渠与支渠水动力条件的协调改善。通过流速敏感度系数分析,可为闸群联合调控优化提供明确的变量与约束筛选依据及物理机制。后续选取 B、A0、A2 和 A3 闸构成沙北片河网的主要调控闸群。

4　闸群联合调控优化研究

在单闸调控的基础上,进一步构建以关键水闸开度为决策变量的闸群联合调控优化模型,系统探索闸群最优调控方案。

4.1　模型设置

两个目标函数为 F_1(河网流速滞缓区改善效果)和 F_2(水动力整体提升效果),选取 B、A0、A2、A3 闸的

开度(e_1、e_2、e_3、e_4)作为决策变量,其调控区间分别为:B闸0.3~0.6 m,A0闸0.3~0.7 m,A2闸0.1~0.3 m,A3闸0.7~0.9 m。约束条件中$\bar{v}_{干}$为干渠马蹄港排渠的平均流速;$q_{引}$为横大路闸(边界1)5 m^3/s的引水流量。

4.2 优化调控结果分析

根据优化模型计算结果,绘制了断面达标率与关键水闸开度响应关系的平行坐标图,如图5所示。从整体分布来看,各调控方案的断面达标率差异显著,表明不同开度组合对滞缓区水动力影响敏感。而大量红色线条分布于图中不同位置,则说明多个调控方案能够实现100%的断面达标率,即滞缓区内各断面流速提升幅度均满足25%以上的要求,反映调控策略的多样性与操作的灵活性。这些高断面达标率方案中,B闸与A0闸的开度多集中在0.30~0.38 m,而A2闸与A3闸开度则分别分布在0.22~0.30 m和0.81~0.90 m区间内,说明尽管高达标率并非由某一单一变量区间所决定,但在满足联合调控逻辑的前提下,通过限制B闸与A0闸、提高A2闸与A3闸的过流能力能有效抑制干渠水流快速下泄,促使水体在河网内部更易于横向扩散至支渠,缓解支渠水体滞缓的问题。

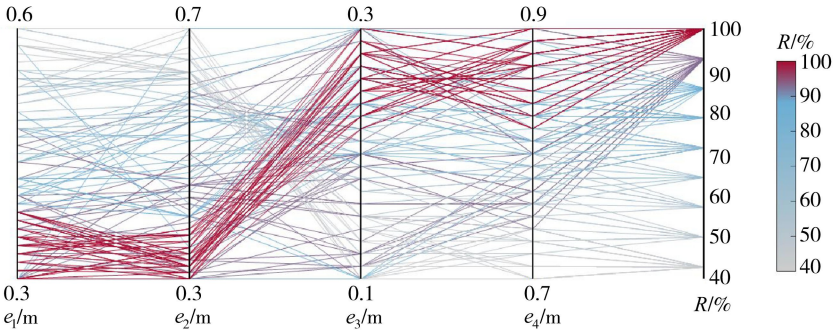


图5 断面达标率与关键水闸开度响应关系平行坐标图

Fig. 5 Parallel coordinate plot of response relationship between section compliance rate and key gate openings

进一步分析可知,这些高断面达标率方案的平均流速提升率在14.72%~22.44%之间,表明即便调控方案使得断面达标率为100%,但河网整体水动力效果仍存在差异。图6为调控区间内两项指标上解集的空间分布,二者无明显线性相关关系。同时达到最高断面达标率和最大平均流速提升率(22.44%)的调控方案为B、A0、A2、A3闸开度分别为0.32、0.30、0.29、0.88 m,该方案下滞缓区平均流速提升幅度达28.3%。

如图7所示,在最优调控方案下,原本水动力较弱的支渠平均流速均明显增大,而干渠的平均流速则仍保持在0.1 m/s以上,说明其基本引排功能仍能得到有效保障。由此可见,在特定引水条件下,合理的闸群联合调控有助于推动沙北片河网水动力格局从“主干快速流排”向“支干协调通流”转变,实现河网水动力重构。这一结果印证了分阶段单目标优化在水动力调控中的有效性,也证明了闸群联合调控优化模型在本文设定条件下具有较好的调控方案优选能力。与通过增加引水流量的传统调控方式相比,本文方法能够在特定引水条件下充分利用现有闸群的协同运作来改善水动力条件,从而提高水资源的利用效率,对类似河网的联合调控实践具有参考价值。

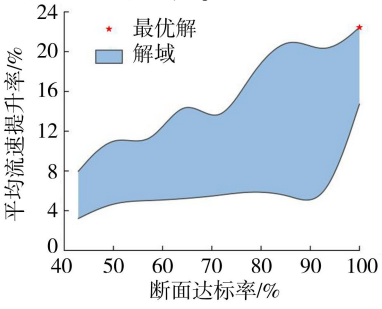


图6 闸群联合调控方案在断面达标率与平均流速提升率空间中的分布

Fig. 6 Distribution of joint gate group operation schemes in space of section compliance rate and average flow velocity increase rate

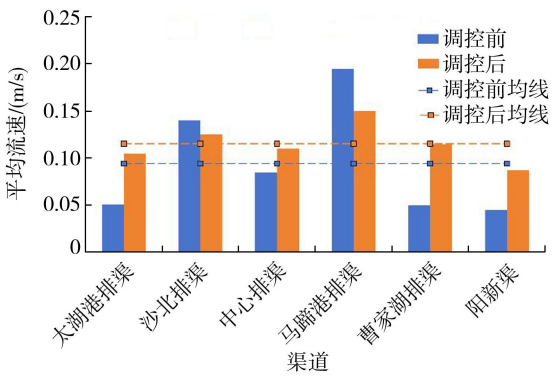


图7 最优方案调控前后各渠道平均流速对比

Fig. 7 Comparison of average flow velocity in each channel before and after regulation by optimal scheme

值得注意的是,本文研究从水动力角度展开,并且所得结果反映的是闸门开度稳定后的平均改善效果,在实际工程应用中需考虑闸门启闭时间和管理制度对方案实施的影响。未来研究可进一步耦合水质过程,拓展至动态引水情景,并综合考虑闸门操作对河道冲刷、航运及生态的潜在影响,以更全面地评估调控效果。

5　结　论

a. 基于水闸调控响应特征与分阶段单目标优化方法,构建了沙北片河网闸群联合调控优化模型,该模型能够充分挖掘现有水闸潜力,在特定引水条件下有效改善区域水动力条件,实现水动力有效提升,可为类似平原河网水动力调控提供参考。

b. 通过水闸调控响应特征分析,识别出对沙北片河网水动力重构起关键作用的水闸。其中,马蹄港排渠闸 1 与马蹄港排渠闸 2 是调控主支渠水流分配的核心闸门,沙北排渠闸与中心排渠闸在局部水动力改善方面也具有一定的潜力。各闸的调控特征可为闸群联合调控优化模型的变量选取与约束设定提供依据。

c. 得到了 5 m^3/s 引水流量下沙北片河网水动力重构的最优调控方案,实现了河网局部与整体水动力的协同提升。该方案实施后,滞缓区内各断面流速提升幅度均在 25%以上,河网整体平均流速提升 14.72%~22.44%。同时,干渠在调控过程中平均流速保持在 0.1 m/s 以上,保障了其引排功能不受影响。

参考文献:

[1] 钟子悦,余明辉,陈小齐,等. 珠江三角洲河网地形和径流条件变化对潮动力格局的影响[J]. 水资源保护,2023,39(3):213-221. (Zhong Ziyue, Yu Minghui, Chen Xiaoqi, et al. Effects of changes in river network topography and runoff on tidal dynamic pattern in Pearl River Delta[J]. Water Resources Protection,2023,39(3):213-221. (in Chinese))

[2] Coder L, Musolff A, Kronsbein M P, et al. How anthropogenic modification of riverscapes reduces the resilience of floodplain water bodies to drought[J]. Ecological Engineering,2025,219:107686.

[3] 陈庆江,丁瑞,赵海. 平原河网区活水畅流对水动力和水质的改善效果[J]. 水利水电科技进展,2020,40(3):8-13. (Chen Qingjiang, Ding Rui, Zhao Hai, Improvement effect of hydrodynamics and water quality by flowing water in plain river network area[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2020,40(3):8-13. (in Chinese))

[4] 沈志伟,张晓雷,余亮,等. 基质组配、填充方式及水力负荷对生态滤坝净化效果的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(6):37-43. (Shen Zhiwei, Zhang Xiaolei, Yu Liang, et al. Effects of substrate combination, packing arrangement and hydraulic loading on the purification performance of ecological filter dam[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(6):37-43. (in Chinese))

[5] Hua W, Zilin S, Yichuan Z, et al. Connection between anthropogenic water diversion and hydrodynamic condition in plain river network[J]. Water,2021,13(24):3596.

[6] 张晓峰,石永杰,刘俊,等. 基于 AHP-熵权法的望虞河西岸圩区活水调度方案多目标优选[J]. 水利水电科技进展,2024,44(3):80-87. (Zhang Xiaofeng, Shi Yongjie, Liu Jun, et al. Multi-objective optimization of flowing water dispatch schemes in western polder area of Wangyu River based on AHP-entropy weight method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, ,2024,44(3):80-87. (in Chinese))

[7] 陆倩,崔冬,田利勇,等. 平原河网地区泵闸合建枢纽布置形式[J]. 水利水电科技进展,2019,39(3):62-67. (Lu Qian, Cui Dong, Tian Liyong, et al. Arrangement types of a combined sluice-pump hub in plain river network region[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019,39(3):62-67. (in Chinese))

[8] 于珊,李一平,程一鑫,等. 调水引流工程对平原河网水动力调控的效果[J]. 湖泊科学,2021,33(2):462-473. (Yu Shan, Li Yiping, Cheng Yixin, et al. The impacts of water diversion on hydrodynamic regulation of plain river network[J]. Journal of Lake Sciences,2021,33(2):462-473. (in Chinese))

[9] Yan Xiaohui, Wang Yan, Fan Boyuan, et al. Data-driven modeling of sluice gate flows using a convolutional neural network[J]. Journal of Hydroinformatics,2023,25(5):1629-1647.

[10] Tang Hongwu, Yuan Saiyu, Cao Hao. Theory and practice of hydrodynamic reconstruction in plain river networks[J]. Engineering,2023,24(5):202-211.

[11] 刘曾美,曹钰帆,黎智良,等. 复杂联围内涝防治规划中雨洪模拟精度提升研究[J]. 水资源保护,2025,41(1):64-75. (Liu Zengmei, Cao Yufan, Li Zhiliang, et al. Study on accuracy improvement of stormwater simulation in waterlogging control planning for complex integrated embankment[J]. Water Resources Protection,2025,41(1): 64-75. (in Chinese))

(下转第 163 页)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.05.013

基于非离散设计的三维岩质边坡桩加固优化设计方法

郭文秀[1,2],康 斌[3],王筱萌[3],孙志彬[4],姬 建[2]

(1. 浙江如通苏湖城际铁路有限公司; 2. 河海大学土木与交通学院; 3. 中铁十五局集团第二工程有限公司;
4. 合肥工业大学汽车与交通工程学院)

摘要:针对 Hoek-Brown 准则下的三维岩质边坡加固问题,提出了一个结合力学分析与响应面方法的抗滑桩非离散多目标优化设计方法。运用极限分析上限法建立了三维桩加固边坡的稳定性模型,采用人工神经网络建立安全系数与设计参数、强度参数之间的响应面模型,快速获取可靠度评估所需的大量安全系数样本,进而以加固成本和边坡可靠度为优化目标,在连续的设计变量空间内进行非离散选点直接求解帕累托前沿。实例分析结果表明,相比于离散设计方法,非离散设计能够更全面地探索设计可行域,获得更为优化的设计方案;在最小成本与膝点两种决策策略下,非离散设计的成本分别降低约 18%和 14%;桩间距、桩径、桩位置对边坡可靠度指标均呈显著的非线性影响,其中桩设置于坡面上部时加固效果最优。

关键词:三维岩质边坡;桩加固;非离散设计;Hoek-Brown 准则;人工神经网络;帕累托优化

中图分类号:TU457;TU473.1 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-1980(2026)05-0114-07

Optimization design method for three-dimensional pile-reinforced rock slopes based on non-discrete design

Guo Wenxiu[1,2], **Kang Bin**[3], **Wang Xiaomeng**[3], **Sun Zhibin**[4], **Ji Jian**[2]

(1. *Zhejiang Rudong-Nantong-Suzhou-Huzhou Intercity Railway Co., Ltd.*;
2. *College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University*;
3. *China Railway 15th Bureau Group Second Engineering Co., Ltd.*;
4. *School of Automotive and Transportation Engineering, Hefei University of Technology*)

Abstract: For the reinforcement problem of three-dimensional rock slopes under the Hoek-Brown criterion, a non-discrete multi-objective optimization design method for anti-slide piles combining mechanical analysis and the response surface method was proposed. The stability model for three-dimensional pile-reinforced slopes was established using the upper bound limit analysis method. Artificial neural networks were adopted to establish the response surface model between the safety factor and the design and strength parameters to quickly obtain a large number of safety factor samples required for reliability evaluation. Furthermore, taking the reinforcement cost and slope reliability as optimization objectives, the Pareto front was directly solved by non-discrete point selection in the continuous design variable space. The case analysis results show that, compared with the discrete design method, the non-discrete design can more comprehensively explore the feasible design domain and obtain more optimized design schemes; under the minimum cost and knee point decision strategies, the costs of the non-discrete design decrease by approximately 18% and 14%, respectively; the pile spacing, pile diameter, and pile position all exhibit significant nonlinear effects on the slope reliability index, and the reinforcement effect is optimal when the piles are placed in the upper part of the slope face.

Key words: three-dimensional rock slope; pile reinforcement; non-discrete design; Hoek-Brown criterion; artificial neural network; Pareto optimization

岩质边坡的稳定性是高速公路、铁路等基础设施建设中需要关注的关键问题。对于发育有明显控制性节理的岩质边坡,其稳定性分析常采用岩石力学方法,重点考察节理产状、连通性等因素对整体稳定性的影响。相比之下,完整岩体或节理密集但分布均匀的岩体,则往往可简化为等效均质体处理。对于此类岩体,其强度具有显著的非线性,无法采用传统的线性破坏准则(如摩尔-库仑准则)进行分析。相比之下,Hoek-

基金项目:国家自然科学基金联合基金重点项目(U22A20594)

作者简介:郭文秀(1990—),男,工程师,硕士,主要从事交通工程管理与桥梁隧道施工技术研究。E-mail:908307893@qq.com

通信作者:姬建(1983—),男,教授,博士,主要从事岩土工程可靠度分析与边坡工程研究。E-mail:ji0003an@e.ntu.edu.sg

Brown(HB)准则通过引入岩体质量分级系数构建岩体非线性强度包络线,在遍布节理的岩质边坡稳定性评估中得到广泛应用[1-2]。

对稳定性不足的岩质边坡需要采取一定的加固措施。抗滑桩具有支挡能力强、施工便捷、扰动较小等优点,广泛用于边坡加固[3-4]。目前,常用的抗滑桩可靠度设计方法可分为确定性设计、可靠度设计和多目标优化设计 3 类[5-7]。相对于忽视了岩土内在强度随机性的确定性设计,后两种可靠度设计方法充分考虑了岩土体的显著不确定性和空间变异性,在实践中更具实用价值。其中,多目标优化设计方法建立在概率分析的基础上,通过平衡成本与风险,以期在保证安全性的前提下合理平衡工程造价。在多目标优化设计中,需对各候选设计方案进行可靠度分析,为降低计算成本,通常将设计空间离散化,以有限组合逼近连续优化问题[8-9]。然而,随着设计变量增多,即使是离散空间中的候选点数量也会显著增加,计算负担随之加重[10-11]。为了提高效率,可借助响应面方法进行可靠度分析,但常规响应面基于随机变量(如岩土体强度)的抽样构建,在多目标优化问题中,因候选点间设计参数各异,需构建多个响应面,导致计算开销依然很大。

为解决上述问题,对于满足 HB 准则的抗滑桩加固三维岩质边坡(以下简称“桩加固边坡”),可将桩设计参数(桩间距、桩径、桩位置)与 HB 准则的强度参数作为输入变量,构建边坡安全系数的响应面模型。该模型将设计参数直接纳入输入变量,无需为各候选方案重复构建响应面,能够高效评估大量设计候选点,有望获得比离散设计空间更优的帕累托解集。为此,本文在对比 3 种响应面方法的基础上,采用人工神经网络(ANN)建立基于极限分析的边坡安全系数(F_s)响应面,以大幅提高边坡安全系数样本的获得效率,并通过设计空间内的非离散设计选点获得桩设计参数的帕累托前沿,从而确定最优设计解,进而分析桩设计参数对桩加固边坡可靠度的影响规律

1　桩加固边坡的 UBLA 方法

极限分析上限法(upper bound limit analysis ,UBLA)广泛用于边坡分析[12-13],本文利用基于 UBLA 的三维牛角形破坏机构,计算桩加固边坡安全系数的半解析解。

1.1　三维破坏机构

桩加固边坡的破坏模式如图 1 所示,图中 H 为边坡高度,W 为边坡宽度,α 为坡角,OO'为旋转轴,ω 为滑坡体的角速度,一般设为 1 rad/s。抗滑桩呈一排垂直布设,桩中心距为 s_1,桩间距为 s_2,桩径为 D_p,对于没有明显节理控制的岩质边坡,可以视为均质边坡进行分析,其旋转滑动面穿过坡趾。基于 UBLA 的牛角形破坏机构可以有效地与 HB 准则结合,通过切线法求解桩加固边坡的安全系数[14-15]。

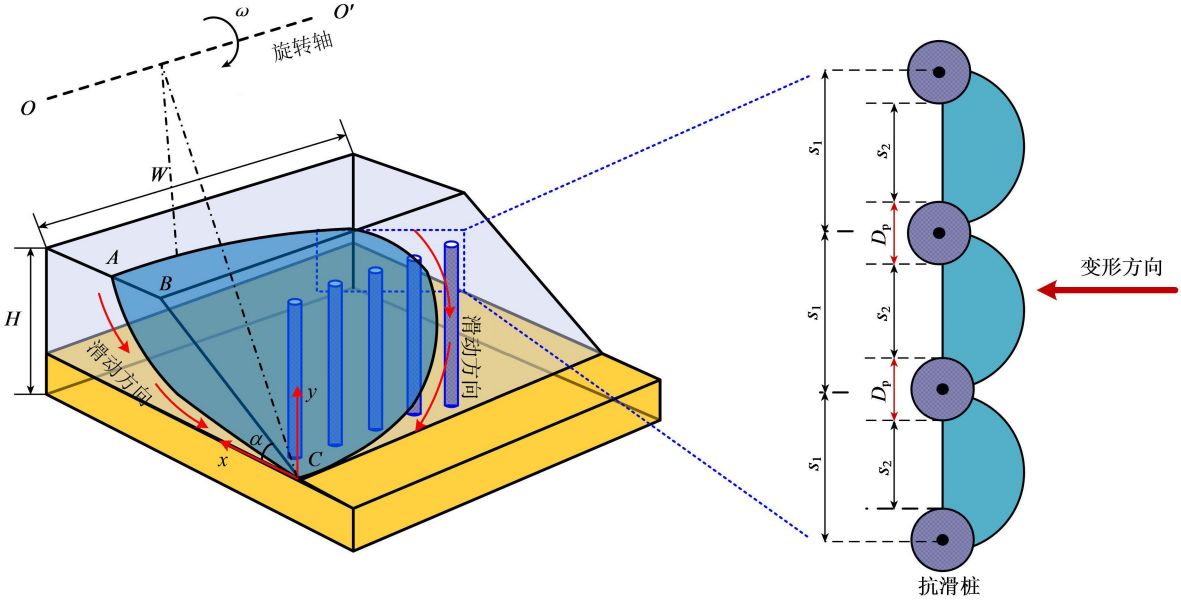


图 1　桩加固边坡及其破坏模式

Fig. 1　Pile-reinforced slope and its failure mode

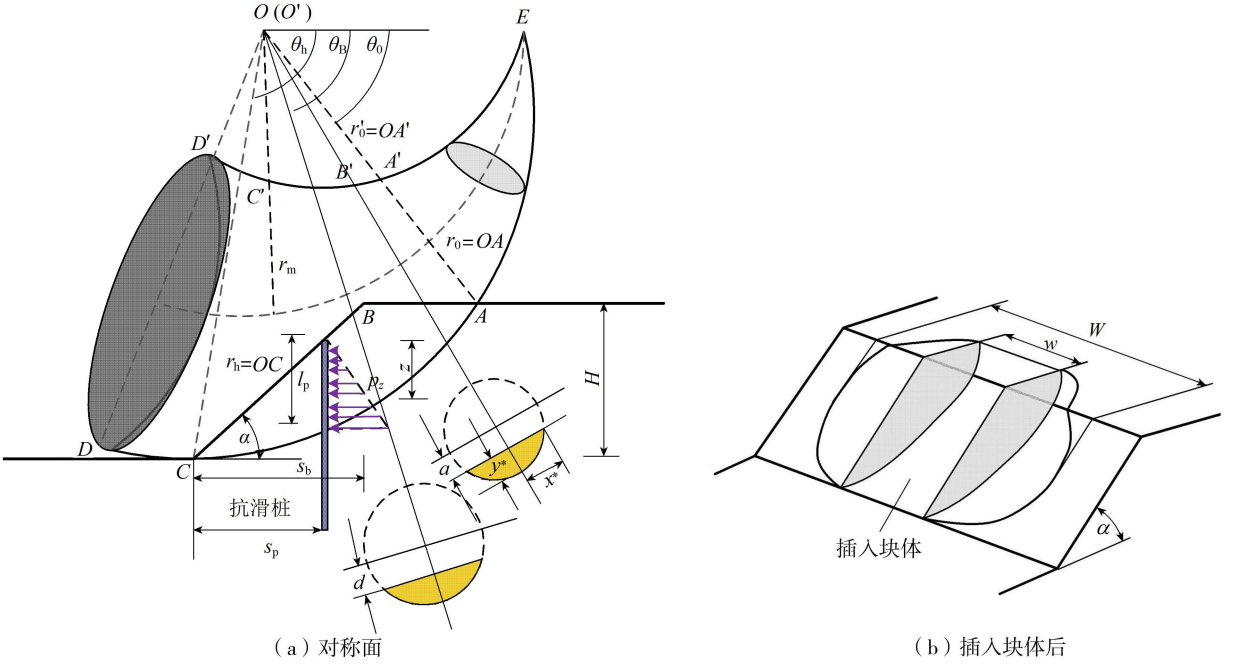
如图 2(a)所示,破坏机构对称面的上、下边界为交于 E 点的对数螺旋线,其半径 r、r'为:

$$r = r_0 e^{(\theta-\theta_0)\tan\varphi} \qquad r' = r'_0 e^{-(\theta-\theta_0)\tan\varphi} \tag{1}$$

式中:θ 为对数螺旋线矢径与过旋转轴水平线之间的夹角;θ_0 为滑动面后缘(图2(a)中 A 点)对应的 θ 值;r_0、r'_0 分别为 $\theta=\theta_0$ 处上、下对数螺旋线的半径;φ 为内摩擦角。

抗滑桩的桩位置用无量纲参数 s_r 表示,$s_r=s_p/s_b$,其中 s_p 为桩与坡趾 C 之间的水平距离,s_b 为坡趾 C 与坡肩 B 的水平距离。本文假设桩侧阻力沿深度呈三角形分布,并采用 Ito 公式计算高度 z 处的桩-土作用力 p_z[16]。

随着边坡宽度 W 的增加,边坡破坏模式从三维转变为二维。但受圆形截面性质影响,单一牛角机构的宽度无法随 W 增大。因此,需要在牛角形块体的对称平面内插入一个宽度为 w 的块体,其由二维对数螺旋线机构在宽度方向拉伸得到,如图2(b)所示。



(a) 对称面 (b) 插入块体后

图2 桩加固边坡的三维牛角形破坏机构

Fig. 2 Three-dimensional horn failure mechanism of pile-reinforced slope

1.2 破坏机构功率计算

UBLA 根据内外能耗的关系来求解安全系数。对于桩加固边坡,外部功率来源于滑坡体的自重与抗滑桩的支挡力(后者做负功),而内能耗散来源于岩土体塑性变形。在 Ito 的桩-土应力假设下,桩引起的外力功率 P_p 包括牛角块体和插入块体两部分:

$$P_p = 2\omega\int_0^{l_p}\frac{p_z}{s_1}(w_z + w)s_z\mathrm{d}z \tag{2}$$

式中:w_z 为深度 z 处(从桩位置处坡面算起)滑动块体宽度的一半;s_z 为深度 z 处桩身到旋转轴的垂直距离;l_p 为滑动面上方的桩长。

滑动块体产生的外力功率 P_g 也按照牛角形和插入块体两部分计算:

$$P_g = 2\omega\gamma\left[\int_{\theta_0}^{\theta_B}\int_0^{x^*}\int_a^{y^*}(r_m + y)^2\cos\theta\mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}\theta + \int_{\theta_B}^{\theta_h}\int_0^{x^*}\int_d^{y^*}(r_m + y)^2\cos\theta\mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}\theta\right] + w\gamma r_0^3\alpha(f_1 - f_2) \tag{3}$$

式中:γ 为岩体容重;θ_B、θ_h 分别为滑动面坡肩和坡趾对应的旋转角;r_m 为截面圆心至旋转轴距离;a、d、x^*、y^* 为横截面积分域的边界坐标(见图2);f_1、f_2 为由破坏机构几何参数确定的无量纲函数。

同理,岩土体塑性变形导致的塑性耗散功率 P_d 为:

$$P_d = -2c\omega\cot\varphi\left[r_0^2\sin^2\theta_0\int_{\theta_0}^{\theta_B}\frac{\cos\theta\sqrt{R^2 - a^2}}{\sin^3\theta}\mathrm{d}\theta + r_h^2(\sin\theta_h + \alpha)^2\int_{\theta_B}^{\theta_h}\frac{\cos(\theta + \alpha)\sqrt{R^2 - a^2}}{(\sin\theta_h + \alpha)^2}\mathrm{d}\theta\right] + \frac{cr_0^2Hw}{2\tan\varphi}[e^{2(\theta_h-\theta_0)\tan\varphi} - 1] \tag{4}$$

式中:c 为岩土体黏聚力;R 为截面圆半径;r_h 为 $\theta=\theta_h$ 处下对数螺旋线半径。

1.3　安全系数求解

桩加固边坡的安全系数 F_s 通过强度折减法计算。在此过程中,采用切线法对 HB 准则进行线性化处理时,需对瞬时内摩擦角 φ_t 进行优化。F_s 的优化过程可表示为:

$$F_s=f(\theta_0,\theta_h,r_0'/r_0,\varphi_t\mid I_{GS},m_i,D,\sigma_{ci},\gamma,H,W,\alpha) \tag{5}$$

式中:m_i 为完整岩石的 HB 常数;I_{GS} 为地质强度指标(geological strength index);D 为岩体扰动因子,本文取 $D=0$;σ_{ci} 为完整岩石的单轴抗压强度。

F_s 的求解过程为双循环结构,外层循环一般采用二分法,内层循环采用穷举方法对优化参数进行穷举搜索,以确定临界破坏机构。

1.4　UBLA 方法的验证

为了验证 UBLA 方法的准确性,将计算结果与 FLAC3D 数值模拟结果进行对比。对比桩加固边坡的参数为:$H=30\ \mathrm{m}$,$\alpha=45°$,$\gamma=25\ \mathrm{kN/m^3}$,$W/H=2$,$I_{GS}=30$,$m_i=10$,$\sigma_{ci}=2\ \mathrm{MPa}$,$s_1=3\ \mathrm{m}$,$D_p=1\ \mathrm{m}$,$s_r=0.5$。为保证验证的一致性,FLAC3D 模型中采用摩尔-库仑准则,强度参数与 UBLA 方法中单切线优化的结果保持一致。FLAC3D 模型的底部边界为完全固定约束,侧面边界为法向约束。桩体通过结构单元进行模拟,其结构参数可见文献[7]。

图 3 为有无抗滑桩两种工况下的 FLAC3D 模型模拟的最大剪应变速率云图,可清晰观察到三维滑动面。在有抗滑桩工况下,桩顶区域出现显著的位移集中区,这表明桩体在抵抗边坡滑动过程中产生了轻微变形,从而影响了周围土体的运动状态。FLAC3D 模型得到加固后边坡安全系数从 1.39 提升至 1.52,而 UBLA 方法得到的桩加固前后安全系数分别为 1.40 和 1.58,相对偏差分别为 0.7% 和 3.9%,两者结果较为接近,说明了 UBLA 方法具有较好的准确性。

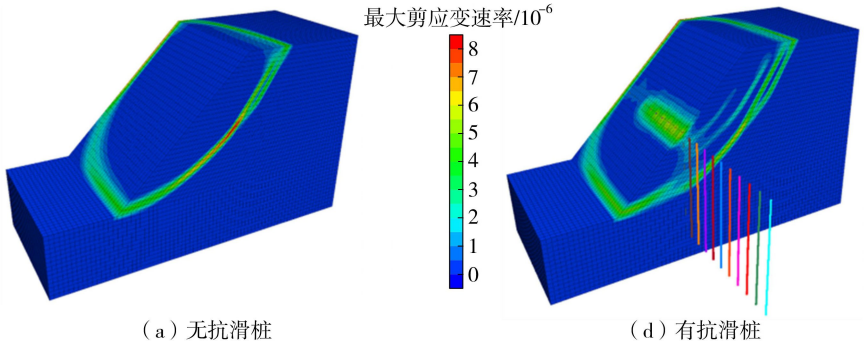


图 3　FLAC3D 模型模拟的三维岩质边坡最大剪应变速率云图

Fig. 3　Maximum shear strain rate contours of three-dimensional rock slopes simulated by FLAC3D

2　桩加固边坡安全系数响应面

多目标最优设计需要大量的安全系数样本,响应面方法可以加快计算速度[17]。本文选择二阶多项式、多项式混沌展开和 ANN 等 3 种具有代表性的响应面方法,建立设计参数(s_2、D_p、s_r)和 HB 准则的强度参数(I_{GS}、m_i、σ_{ci})与安全系数的响应面模型,以确定最为合适的方法。3 种方法的复杂程度逐渐增加。

a. 二阶多项式是处理多个自变量影响因素的经典回归方法,一般采用最小二乘原则确定二阶多项式的系数,保证预测值与实际值之间的平方误差和最小。二阶多项式计算效率高,实现相对简单,应用广泛。但由于多项式最高次数被限制在二次,导致其在逼近具有强非线性的物理过程时,预测精度会受到显著影响。

b. 多项式混沌展开是一种处理随机系统不确定性的数学工具,将随机响应表示为正交多项式的线性组合,可利用不同的正交多项式基来匹配不同概率类型的输入变量。多项式的阶数决定其非线性拟合能力,但是较大的阶数可能会导致项数呈指数增长,称为维数灾难。因此需要进行适当截断。

c. ANN 是深度学习的理论基础,其典型结构包括输入层、一个或多个隐藏层及输出层。每个神经元作为基本计算单元,接收加权输入信号,通过非线性激活函数(如 ReLU、Sigmoid 或 Tanh)进行信息转换后传递至后续层。神经网络的参数学习过程主要依赖于基于梯度下降的反向传播算法,该算法通过计算损失函数相

对于网络参数的梯度,迭代优化权重矩阵以最小化预测误差,因此具有强大的函数逼近能力和特征提取能力。

为了提供响应面样本,采用前文 UBLA 方法生成岩质边坡的 500 个安全系数样本。假设 HB 准则的强度参数满足正态分布,I_{GS}、m_i、σ_{ci} 的均值分别为 40、10 和 2 MPa,变异系数均为 0.25;桩间距 s_2 为 1~4 m,桩径 D_p 为 0.2~1.6 m,桩位置 s_r 为 0.3~0.9,在相应区间内均匀抽样,将前 400 个样本作为训练集,后 100 个样本作为测试集。利用 3 种响应面方法分别建立代理模型,并绘制预测结果的均方根误差(RMSE)随训练样本的变化情况,结果如图 4 所示。由图 4 可见,在所考虑的 400 样本量之内,3 种方法的预测误差随训练样本的增加而下降,其中二阶多项式的 RMSE 最大(约 0.06),多项式混沌展开次之,ANN 最小(约 0.018),表明 ANN 较强的非线性泛化能力在预测桩加固边坡稳定性方面具有较好的效果。为了进一步验证 ANN 方法的准确性,对 UBLA 方法生成的 2 000 个参数样本进行预测,结果如图 5 所示,得到的 RMSE 为 0.031 7(R^2=0.995 5),因此选择 ANN 作为本文的响应面方法。

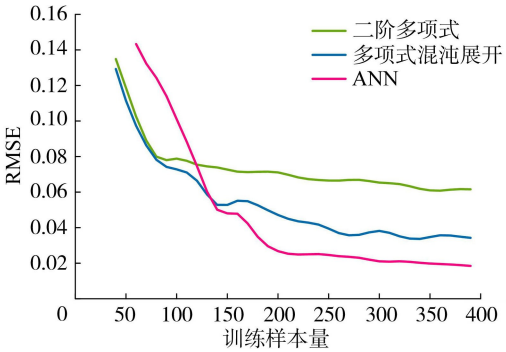


图 4 3 种响应面方法的预测误差

Fig. 4 Prediction errors of three response surface methods

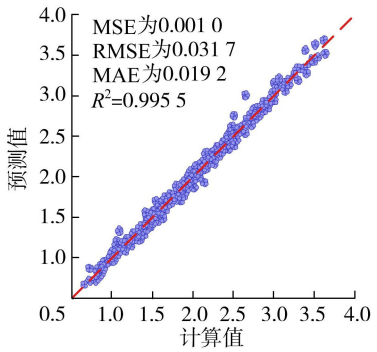


图 5 ANN 对桩加固边坡安全系数的预测值与 UBLA 方法计算值对比

Fig. 5 Comparison between ANN-predicted values and UBLA-calculated values for safety factor of pile-reinforced slope

3 设计实例分析

3.1 多目标设计

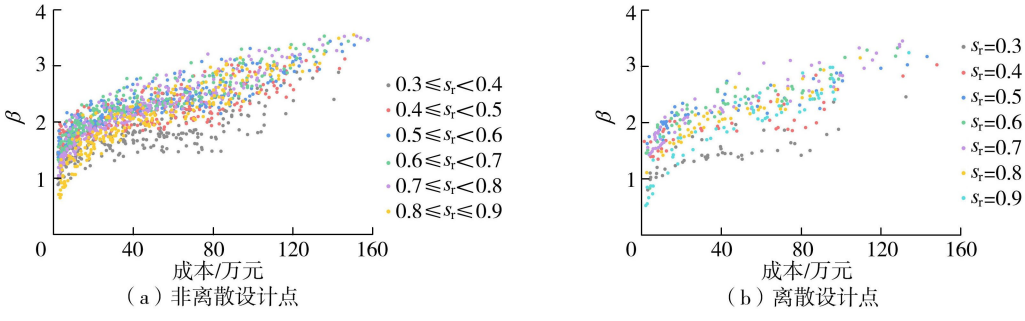
本文以一个宽度受限的均质岩质边坡桩加固设计作为示例,展示本文方法的有效性。桩加固边坡的基本参数为:H=30 m,W=120 m,α=60°,γ=22 kN/m^3,I_{GS}、m_i、σ_{ci} 与第 2 节相同。桩设计参数为:桩间距 s_2 为 1~4 m,桩径 D_p 为 0.2~1.6 m,桩位置 s_r 为 0.3~0.9。

沿边坡宽度方向,单位宽度施工成本(C)与桩设计参数的关系可表示为:

$$C = \eta \frac{\pi D_p^2 l}{4 s_1} \tag{6}$$

式中:l 为抗滑桩长度;η 为抗滑桩单位体积造价,本文取 1 200 元/m^3。抗滑桩长度应超过滑动面一定深度,为方便起见,本文将其值固定为 15 m。

基于 ANN 方法的高效优势,在设计空间内随机选取 3 000 个候选设计点。对于每个设计点,先由 ANN 模型生成 1 000 个 F_s 样本,再采用蒙特卡罗法计算其可靠度指标,并同时计算每个设计点的施工成本,结果见图 6(a)。从图 6(a)可以看到,随着施工成本的增加,可靠度指标(β)总体呈现上升趋势。相较于传统离散设



(a) 非离散设计点 (b) 离散设计点

图 6 桩加固边坡设计的可靠度指标与成本

Fig. 6 Reliability index and cost of pile-reinforced slope design

计方法的结果(图 6(b)),非离散设计能够更全面地模拟整个设计空间,从而更好地遍历整个设计可行域。

图 7 给出了离散与非离散设计方法的非支配解(帕累托前沿),其中非离散设计空间包含 61 个非支配解,而离散设计空间包含 19 个非支配解。非离散设计方法得到的非支配解普遍位于离散设计方法所得解的上方,说明前者能更充分利用设计空间,获得更优化的方案。

帕累托理论多采用 3 种设计点决策策略[18-19]:①采用可靠度指标最大的设计点,这通常也是成本最高的设计点;②成本最小化,即在满足既定可靠度设计指标的前提下选择成本最低的方案;③在客户或业主未明确表达偏好时,可以采用第三种策略,即选择与乌托邦点最近的膝点。其中后两种策略最为常用,表 1 为离散与非离散设计方法的优选设计结果。可以发现,采用 ANN 方法开展非离散设计,可在满足既定可靠度要求($\beta \geqslant 2.5$)的前提下取得更低的成本。

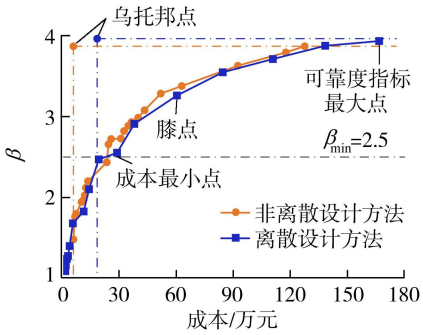


图 7　桩加固边坡设计的帕累托前沿

Fig. 7　Pareto front of pile-reinforced slope design

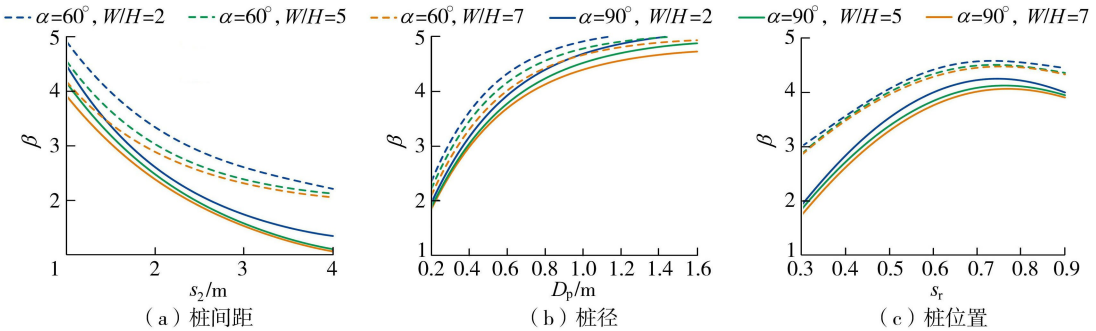
表 1　帕累托前沿的优选设计结果

Table 1　Preferred design results on Pareto front

决策策略	设计方法	费用/万元	β	s_2/m	D_p/m	s_r
最小成本	非离散	23.9	2.50	1.41	0.52	0.70
	离散	29.1	2.56	1.50	0.60	0.70
膝点	非离散	52.0	3.29	1.03	0.73	0.70
	离散	60.3	3.47	1.80	1.00	0.70

3.2　可靠度分析

为明确桩设计参数对边坡可靠度的影响,对桩间距、桩径、桩位置进行参数分析,结果如图 8 所示,其中除 α、w/H 外,桩加固边坡参数同第 3.1 节。由图 8(a)可知,增大桩间距使得边坡宽度方向的抵抗力减弱,可靠度指标随之下降,且桩间距较小时降幅尤为明显。因此在原设计桩间距较小时,应慎重增大桩间距。由图 8(b)可知,可靠度指标随桩径的增大呈近似指数增长,其变化规律基本不受 W/H 影响;此外,可靠度指标随边坡宽度增加而显著减小,表明了三维分析的必要性。由图 8(c)可知,可靠度指标大约在 $s_r=0.7$ 时达到最大值,说明桩宜安装在边坡上部。此外,边坡宽度几乎不影响最佳桩位置。



(a) 桩间距　(b) 桩径　(c) 桩位置

图 8　桩设计参数对桩加固边坡可靠度指标的影响

Fig. 8　Influence of pile design parameters on reliability index of pile-reinforced slope

4　结　论

a. 提出的桩加固边坡多目标优化设计方法结合极限分析方法与响应面模型,实现了对非离散设计空间的高效覆盖,生成了较为全面的帕累托最优解集,可为多目标决策提供科学依据。

b. 相对于二阶多项式和多项式混沌展开方法,ANN 方法在桩加固边坡安全系数响应面上具有更好的预测能力。在 2 000 个样本预测时的 RMSE 为 0.031 7,R^2 为 0.995 5。

c. 相较传统离散设计方法,非离散设计方法能够更全面地探索设计可行域,获得更优的设计方案。在最小成本和膝点的偏好设计方案中,非离散设计方法的成本分别下降了约 18%与 14%。

d. 边坡可靠度指标随桩径增大呈近似指数增长,随桩间距增加呈非线性下降。可靠度指标随桩位置变化呈单峰特性,最优桩位置通常位于坡面上部($s_r \approx 0.7$)。此外,边坡宽高比对加固效果有显著影响,证实了考虑边坡破坏三维特性的重要性。

参考文献:

[1] 邓东平,彭一航,陈浩宇,等. 局部安全系数引入下岩质边坡稳定性分析极限平衡滑面应力法[J]. 岩石力学与工程学报,2024,43(4):964-985. (Deng Dongping, Peng Yihang, Chen Haoyu, et al. Limit equilibrium method based on stresses of slip surface for stability analysis of rock slope with introduction of local factor of safety[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2024,43(4):964-985. (in Chinese))

[2] 张文莲,孙晓云,陈勇,等. 基于岩体抗压强度折减的边坡稳定性分析方法[J]. 岩土力学,2022,43(增刊2):607-615. (Zhang Wenlian, Sun Xiaoyun, Chen Yong, et al. Slope stability analysis method based on compressive strength reduction of rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics,2022,43(S2):607-615. (in Chinese))

[3] 薛德敏,李天斌,张帅. 基于位移控制的双排桩桩后滑坡推力计算方法[J]. 岩土工程学报,2023,45(9):1979-1986. (Xue Demin, Li Tianbin, Zhang Shuai. Method for calculating landslide thrusts behind double-row piles based on displacement control [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2023,45(9):1979-1986. (in Chinese))

[4] 彭秀华,刘素嘉,张涵轲,等. L型抗滑桩加固土坡特性的离心模型试验与有限元模拟研究[J]. 工程地质学报,2024,32(1):315-324. (Peng Xiuhua, Liu Sujia, Zhang Hanke, et al. Centrifuge model test and finite element analysis on L-pile reinforced slope[J]. Journal of Engineering Geology,2024,32(1):315-324. (in Chinese))

[5] Hu Yining, Ji Jian, Sun Zhibin, et al. First order reliability-based design optimization of 3D pile-reinforced slopes with Pareto optimality[J]. Computers and Geotechnics,2023,162:105635.

[6] Nazari R A, Ghanbari A. Multi-objective reliability based optimization of reinforced soil slopes with one row of piles under seismic loading conditions[J]. Geotechnical and Geological Engineering,2023,41(2):653-672.

[7] Tang Huiming, Gong Wenping, Wang Liangqing, et al. Multiobjective optimization-based design of stabilizing piles in earth slopes [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics,2019,43(7):1516-1536.

[8] Gong Wenping, Tang Huiming, Juang C H, et al. Optimization design of stabilizing piles in slopes considering spatial variability [J]. Acta Geotechnica,2020,15(11):3243-3259.

[9] Huang Yu, He Zhengying, Yashima A, et al. Multi-objective optimization design of pile-anchor structures for slopes based on reliability theory considering the spatial variability of soil properties[J]. Computers and Geotechnics,2022,147:104751.

[10] Liu Xian, Liu Yadong, Li Xueyou, et al. Efficient adaptive reliability-based design optimization for geotechnical structures with multiple design parameters[J]. Computers and Geotechnics,2023,162:105675.

[11] Wang Bowen, Sun Zhibin, Li Yongxin, et al. Efficient global optimization of 3D discretized upper-bound failure mechanisms and its application to RBDO of pile-reinforced slopes with spatial variability[J]. Computers and Geotechnics,2026,199:108339.

[12] 袁家好,鲁祖德,陈从新,等. 含双软弱夹层岩质边坡稳定性上限解[J]. 岩石力学与工程学报,2024,43(2):412-423. (Yuan Jiahao, Lu Zude, Chen Congxin, et al. Stability analysis of rock slopes with double weak interlayers based on upper bound limit analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2024,43(2):412-423. (in Chinese))

[13] 张飞,钱子晗,贾世林,等. 山区路基局部加筋作用对半挖半填边坡稳定性的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2026,54(2):170-176. (Zhang Fei, Qian Zihan, Jia Shilin, et al. Influence of local reinforcement of mountainous roadbed on stability of cut-fill slopes[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2026,54(2):170-176. (in Chinese))

[14] Michalowski R L, Drescher A. Three-dimensional stability of slopes and excavations[J]. Géotechnique,2009,59(10):839-850.

[15] 洪勇,邵珠山,石广斌,等. 基于三维极限分析法的GIM和SRM边坡安全系数计算结果对比[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(4):112-120. (Hong Yong, Shao Zhushan, Shi Guangbin, et al. Comparison of GIM and SRM calculated slope safety factor based on three-dimensional limit analysis method[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(4):112-120. (in Chinese))

[16] Ito T, Matsui T, Hong W P. Design method for stabilizing piles against landslide: one row of piles[J]. Soils and Foundations, 1981,21(1):21-37.

[17] 张哲铭,李晓瑜,姬建. 基于LS-SVM的TBM掘进参数预测模型[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(4):373-379. (Zhang Zheming, Li Xiaoyu, Ji Jian. TBM excavation parameter prediction model based on LS-SVM method[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(4):373-379. (in Chinese))

[18] Deb K, Gupta S. Understanding knee points in bicriteria problems and their implications as preferred solution principles[J]. Engineering Optimization,2011,43(11):1175-1204.

[19] Khoshnevisan S, Gong Wenping, Wang Lei, et al. Robust design in geotechnical engineering: an update[J]. Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards,2014,8(4):217-234.

(收稿日期:2025-04-15 编辑:熊水斌)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.05.014

盐蚀与动水环境下沥青混合料的直接拉伸试验研究

姚云龙[1],胡 建[1],展冰洋[2],李 浩[2],刘 鑫[1],洪宝宁[1]

(1.河海大学精细爆破全国重点实验室;2.佛山市交通科技有限公司)

摘要:为探究典型改性沥青混合料在盐蚀与动水环境下的抗裂性能,通过直接拉伸试验与数字图像相关法试验研究了 AH-70 沥青、SBS 沥青和橡胶沥青混合料的拉伸强度变化规律及主应变演化。结果表明:各类沥青混合料均表现出柔性破坏特征,裂纹多由胶结界面萌生并沿应变集中区扩展;动水循环作用显著诱发 AH-70 沥青混合料界面剥离与水损破坏,静水盐干湿循环则加剧孔隙扩展;AH-70 沥青混合料在 20% 盐溶液中干湿循环 20 d 后强度与应变能密度分别下降 41.6% 与 57.8%,动水循环后则下降 56.1% 与 69.4%,而 SBS 沥青与橡胶沥青混合料展现出更优的结构稳定性和耐久性;高浓度盐环境与干湿循环作用协同削弱沥青混合料韧性,而橡胶沥青凭借其优异黏弹性保持较高的残余强度与能量吸收能力,表现出显著的抗裂与抗剥离优势。

关键词:沥青混合料;改性沥青;动水循环;干湿循环;直接拉伸试验;数字图像相关法

中图分类号:U414.7 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-1980(2026)05-0121-08

Experimental study on direct tensile properties of asphalt mixtures under salt erosion and dynamic water conditions

Yao Yunlong[1], **Hu Jian**[1], **Zhan Bingyang**[2], **Li Hao**[2], **Liu Xin**[1], **Hong Baoning**[1]

(1. *State Key Laboratory of Precision Blasting, Hohai University*; 2. *Foshan Transportation Science and Technology Co., Ltd.*)

Abstract: To investigate the crack resistance of typical asphalt mixtures under salt erosion and dynamic water conditions, direct tensile tests combined with the digital image correlation (DIC) method were conducted to examine the tensile strength evolution and principal strain field development of AH-70, SBS-modified, and rubber-modified asphalt mixtures. The results show that all the mixtures exhibited ductile failure characteristics, with cracks mostly initiating at the binder-aggregate interface and propagating along the strain concentration zones. Dynamic water cycling markedly induced interfacial stripping and moisture damage in the AH-70 asphalt mixture, whereas static saline dry-wet cycling further exacerbated pore expansion. After 20 d of dry-wet cycling in a 20% salt solution, the tensile strength and strain energy density of the AH-70 asphalt mixture decreased by 41.6% and 57.8%, respectively, and these values decreased by 56.1% and 69.4% after dynamic water cycling. In contrast, the SBS- and rubber-modified asphalt mixtures showed superior structural stability and durability. High salinity and dry-wet cycling jointly weakened the toughness of the asphalt mixtures. However, owing to its excellent viscoelasticity, rubber-modified asphalt retained a higher residual strength and energy absorption capacity, exhibiting notable advantages in crack and stripping resistance.

Key words: asphalt mixture; modified asphalt; dynamic water cycling; dry-wet cycling; direct tensile test; digital image correlation

随着沿海地区公路建设的不断推进,道路工程面临的环境负荷日益严峻,尤其是在高盐度环境下,路面材料的耐久性问题愈加突出[1-3]。盐蚀环境溶液中的氯离子、硫酸根离子可通过毛细作用渗入沥青混合料内部,诱发一系列物理-化学变化,导致其结构性能劣化,进而影响路面的整体服役性能[4-5]。为提升沥青混合料在盐蚀环境中的抗损能力,橡胶颗粒和 SBS(苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物)被广泛用于沥青改性,其中橡胶粉可提高材料能量耗散能力,延缓裂缝扩展[6],而 SBS 改性则有助于增强材料弹性和结构稳定性[7]。

在干湿循环、温度变化等因素共同作用下,盐蚀对沥青混合料结构完整性和界面黏结性能的破坏更为显著[8-9]。闫人伟等[10]通过拉拔试验与微观结构分析,揭示了盐-冻融循环条件下“盐老化”与内膨胀压力共同作用导致沥青混合料水稳定性下降的机理,并指出氯盐破坏作用更为显著;李闯等[11]基于动水冲刷试验系

基金项目:国家自然科学基金项目(52278400,51609071);河海大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(B200202087,B200204032)

作者简介:姚云龙(1998—),男,博士研究生,主要从事路基加固与路面病害处治研究。E-mail:yaoyunlong6@hhu.edu.cn

通信作者:刘鑫(1984—),男,副教授,博士,主要从事微细结构试验及岩土体多尺度研究。E-mail:liuxin100@hhu.edu.cn

统,量化了温度、水流与盐分耦合对沥青混合料劈裂强度的损伤作用,指出冲刷荷载是损伤加剧的关键因素;赵丽华等[12]采用盐雾试验模拟滨海环境,发现高温下盐雾侵蚀显著削弱了沥青混合料的水稳定性与低温抗裂性;冯蕾等[13]结合数字图像相关法(digital image correlation,DIC)与三点弯曲试验,从应变演化和蠕变能角度分析了温拌与热拌胶粉改性沥青混合料在冻融-盐浓度作用下的开裂特性。此外,王义忠[14]通过CT技术得出盐蚀与干湿循环会促使沥青混合料平均孔径扩大、空隙体积增大,进一步验证了盐蚀对结构稳定性的破坏机制。现有研究已从宏观力学性能、微细观结构等多尺度对改性沥青和沥青混合料进行了较为系统的分析,盐蚀作用对沥青路面的损害作用不容忽视,但针对盐蚀和动水循环作用对沥青混合料直接拉伸性能影响的研究较少。

在评价沥青混合料抗拉性能测试方法中,与间接拉伸试验(劈裂试验)和弯拉试验相比,直接拉伸试验能较为真实地施加轴向拉应力,模拟路面沿行车方向产生的纵向拉应力作用,且应力分布相对均匀,在物理意义上更接近服役条件下路面的抗裂能力[15-16]。然而,直接拉伸试验在试件黏接、装夹和加载等方面存在一定的技术难度。因此,本文通过盐蚀条件下不同沥青混合料的直接拉伸试验并辅以DIC来揭示不同沥青混合料的直接拉伸强度退化规律与破坏特征,以期为沿海及盐渍地区路用材料的选择与优化设计提供参考。

1 原材料与试件制备方法

1.1 原材料

试验采用的沥青分别为AH-70重交通道路石油沥青(以下简称"AH-70沥青")、SBS改性沥青(以下简称"SBS沥青")和橡胶改性沥青(以下简称"橡胶沥青"),沥青基本性能依据JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》测定,且各项基本技术指标以JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》等相关试验规程和技术要求作为判别标准。所选的沥青性能指标如表1所示,试验结果均符合判别标准。

表1 沥青基本性能指标与试验结果

Table 1 Basic performance indicators and test results of asphalt

沥青	针入度/mm	软化点/℃	延度/cm
AH-70沥青	6.7	47.3	27.5
SBS沥青	5.3	77.0	20.2
橡胶沥青	5.0	78.0	21.5

试验使用的集料分为5~10 mm(辉绿岩)、3~5 mm(辉绿岩)和0~3 mm(石灰岩)3档,矿粉为清洁、无杂质的石灰岩矿粉。依据JTG 3432—2024《公路工程集料试验规程》)对集料和矿粉进行筛分,结果见表2。

表2 集料与矿粉筛分试验结果

Table 2 Sieve analysis results of aggregates and mineral filler

材料	通过不同筛孔尺寸方孔筛的质量占比/%								
	13.2 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm	0.075 mm
5~10 mm辉绿岩	100	97.16	2.87	1.72	1.68	1.64	1.61	1.55	1.48
3~5 mm辉绿岩	100	100	44.53	0.67	0.56	0.54	0.52	0.51	0.49
石灰岩	100	100	100	89.20	57.70	36.50	20.20	11.40	6.10
矿粉	100	100	100	100	100	99.50	97.80	89.80	83.00

根据沙庆林[17]的计算方法,选用变"K"法(临界筛孔4.75 mm)确定最佳矿料级配。根据JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》对马歇尔试件进行相关性能指标检测,试验得出AH-70沥青和改性沥青混合料的最佳油石比分别为5.1%和5.5%。

1.2 试件制备方法

橡胶沥青加热温度控制在180℃,集料、矿粉加热温度和混合料拌和温度均为190℃。按配合比称量不同规格的粗集料、细集料和矿粉并放入电热鼓风干燥箱中,持续加热5 h左右;将加热到一定时间的集料倒入已加热好的自动混合料拌和机中进行初步混合,干拌90 s;待集料混合均匀后,适时倒入预热好的沥青,拌和90 s;拌和完成后,倒入矿粉,再拌和90 s,从而完成沥青混合料的拌和。室内成型沥青混合料的试验方法选用旋转压实(superpave gyratory compactor,SGC)成型方法,在SGC试件成型冷却12 h后,先通过钻芯得到尺寸为100 mm(直径)×185 mm(高度)的圆柱体芯样;然后采用沥青混合料切割锯在芯样两端分别切割15 mm左右,保证试件高度在155 mm左右,再使用双端面磨平机将试件打磨至(150±1.5)mm,确保试件上下两面的平整光滑,便于开展后续试验。

2　试验方法

2.1　试验方案

沿海地区常出现高浓度盐雾,尤其在夏季高温下,这些盐雾会随着大气或台风飘散,遇冷后凝结在高速公路沥青路面和浅层空隙中,随后在雨水冲刷下形成盐溶液侵蚀渗入沥青路面内部。潮汐作用同样也会对沿海高速公路路面构成侵蚀风险,形成的高氯盐溶液(海水中氯离子占溶解盐总质量的百分比可高达 55%)比普通水分更易渗入沥青及其与集料界面。此外,临海地区水产养殖作业或海鲜运输车辆洒落的盐水,因蒸发作用浓缩,也会导致沥青路面局部高盐溶液腐蚀[18]。因此,室内试验主要以盐溶液形式来侵蚀沥青混合料内部结构。

2.1.1　静水盐干湿循环作用环境侵蚀试验

a. 盐溶液类型及浓度。结合已有研究可知,侵蚀沥青路面的海盐成分主要为氯盐(80%以上)和硫酸盐(10%左右),海岸线的盐水浓度(质量分数)一般在 3%~5%[5]。因此,室内试验盐溶液以 NaCl 作为溶质,自来水作为溶剂,所用的 NaCl 分子量为 58.44,含量(质量分数)不小于 99.5%,符合 GB/T 1266—2006《化学试剂　氯化钠》要求。试验设置 5 种盐溶液浓度环境:0%(纯水)、5%、10%、15%、20%(按 NaCl 与自来水的质量配比来制备),并利用光学盐度计进行测试校准。高浓度盐溶液是为了加剧盐溶液对沥青混合料的侵蚀。

b. 盐溶液侵蚀时间。考虑到高低温耦合作用的影响,室内盐溶液侵蚀采用干湿循环模式,以模拟沿海地区夏季高温多雨、湿热同期的环境作用。在室温 15℃条件下将沥青混合料试件浸泡于目标浓度盐水中 12 h,随后置于烘箱中以 40℃干燥 12 h,构成一次干湿循环。为了研究盐蚀时间对沥青混合料的影响,循环次数分别设为 10 次和 20 次。

2.1.2　动水循环作用环境侵蚀试验

为了反映动水循环作用对不同沥青混合料的影响和模拟实际服役路面受交通荷载作用并在暴雨或地下水反复冲刷条件下的典型工况,采用水热敏感性试验(moisture induced stress test,MIST)对试件施加周期性动水压力。试验仪器为美国 InstroTek 公司生产的沥青混合料 MIST 测试仪,主要由活塞机、液压泵、密封舱、加压气囊和操作台组成,可控制循环水压力、循环时间和温度。水压驱动属于气动模式,通过气囊不断充放气形成正压和常压交替作用过程,从而实现对沥青混合料内部的动水冲刷并施加周期性变化的超孔隙水压力[19]。

MIST 过程如下:将试件置于密封舱内,倒入 20~40℃纯水(或 5%盐水)完全覆盖试件表面;在注水至距离上边缘 2~4 mm 后,盖上顶部密封舱盖并拧紧 6 个螺栓密封;为了使密封舱内的空气全部排出,在舱体上方且不位于盖子中心的溢水杯中注水,直至盖子中心的溢水杯中出现水即可;试验设定温度为 60℃,施加循环压力 40 Psi(0.276 MPa),加载总次数为 3 500 次,运行时长约 6.4 h;循环结束后打开排水阀,排完内部水分后打开盖子并关闭排水阀;再向舱体内部注入自来水覆盖试件表面,降温 3~4 min 后,开启排水阀将水全部排出;取出试件并放入(25±1)℃恒温水浴 2~3 h 进行冷却。MIST 包括纯水和 5%NaCl 溶液两种介质(仅介质不同,其余参数一致),后文分别称为“动纯水循环”和“动盐水循环”。

2.2　直接拉伸强度测试方法

2.2.1　直接拉伸试件黏接

性能测试试验以直接拉伸试验为主,辅以 DIC,从而更直观地反映其拉伸强度及其开裂过程。然而,对于直接拉伸试验,现行试验规范并未对其试件尺寸及加载方法做出统一规定,而不同温度和加载速率对于沥青混合料的变形影响很大。因此,直接拉伸试验的试件直径、装夹方式等参考了 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中 T0713—2000 单轴压缩试验(圆柱体)的相关内容,标准试验温度设为 15℃,加载速率控制在 2 mm/min,以避免温度变化和加载速率波动对试验结果的干扰。

为确保拉伸试验过程中试件与加载装置之间的有效连接,采用高强度柔性胶结剂对沥青混合料试件与金属底座进行黏接。先依次组装连接头、上下止挡与金属底座,并通过插销将沥青混合料安装在万能试验机的上下两端;黏接材料选用聚氨酯结构胶,使用胶枪挤出胶液并充分混合后,均匀涂抹于金属底座表面,然后将沥青混合料试件置于胶层上方,并轻压旋转以排除气泡,确保界面均匀饱满;然后在试件顶部及上部金属

底座重复上述操作,通过升降试验机横梁使其缓慢接触并挤出多余胶液,形成稳定胶结界面;待胶层自然固化25~30 min即完成直接拉伸试件的黏接。

2.2.2 试件侧面制斑及养护

为确保DIC的测量精度和图像质量,需对试件侧面进行散斑(喷漆)处理。喷漆前给试件的底座套上保鲜膜。在试件表面充分干燥的条件下,采用白色哑光丙烯酸喷漆在试件侧面均匀喷涂一层底漆,喷涂厚度应适中,以避免底漆过厚影响后续裂缝的识别。底漆喷涂后静置3~5 min,待其自然干燥后将试件水平放置,使用黑色哑光喷漆在距试件表面水平距离约50 cm、竖直距离约30 cm的位置喷涂随机散斑图案。喷涂过程中应保持喷嘴与试件表面平行,使漆雾自然落于试件表面,避免油漆直接冲击表面造成散斑堆积或形状异常。生成的散斑应满足分布随机、大小均匀、黑白对比明显等要求,且黑白区域比例尽可能接近1∶1。完成散斑处理后,将试件置于温度稳定控制在15℃的UTM-30万能试验机中预养护5 h,养护完成后便可进行直接拉伸试验。

2.2.3 直接拉伸试验与DIC图像采集

加载试验与图像采集系统主要由ETM304C微机控制电子万能试验机、Testpilot加载控制软件、工业高速相机、补光灯、专用支架、计算机(加载控制)与DIC软件平台(3D-DIC图像采集软件、Gom Correlate数字图像后处理软件)组成,用于实现加载过程与图像采集的同步控制。试验步骤为:①将养护好的试件安装于万能试验机中;②调整固定拍摄设备和补光灯,启动MVS软件,对焦确认试件图像清晰;③加载前先施加入口力,使试件受力初始状态稳定,并将位移读数清零;④启动图像采集软件,设定参数后,同步启动图像采集和直接拉伸试验;拉伸过程完成后,保存图像和曲线数据;⑤将图像导入Gom Correlate软件,分析获取试件表面破坏后的主应变图。

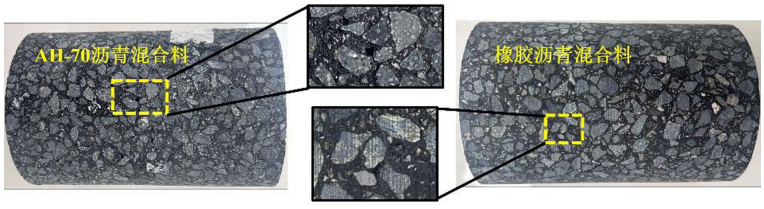
通过直接拉伸试验的荷载-位移曲线数据,并结合力学指标(抗拉强度、拉伸应变和应变能密度)来评估沥青混合料试件的拉伸强度性能。为保证数据的重复性与可比性,每一处理组的原始试件数均为3个。拉伸试验记录各试件的峰值载荷、破坏位移等参数,并据此计算各组的平均值与标准差。此外,凡是在拉伸过程中出现端面裂缝的试件,均应视为因对中偏差引起的失效,予以剔除且不计入有效数据,以避免影响拉伸强度结果的代表性和稳定性。

3 结果与分析

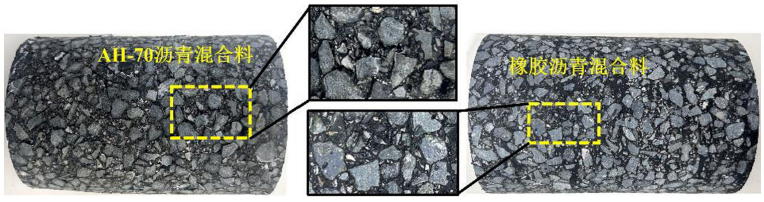
3.1 沥青混合料试件表面变化及拉伸主应变分析

3.1.1 盐蚀作用后试件表面变化

图1为盐蚀作用后沥青混合料圆柱体试件侧面形貌变化情况,其中动盐水循环作用下AH-70沥青混合料发生明显劣化。在盐浓度20%条件下干湿循环20 d后的AH-70沥青混合料试件表面亦出现较为明显的孔隙,改性沥青混合料的孔隙数量明显更少、深度明显更浅;而在60℃动盐水循环作用下,孔隙发展更为显



(a)静水盐干湿循环作用后



(b)动盐水循环作用后

图1 盐侵蚀作用后沥青混合料试件侧面形貌变化

Fig. 1 Morphological changes on the side surfaces of asphalt mixture specimens after salt erosion

著,AH-70 沥青混合料不仅数量更多,还出现部分集料剥落的现象,说明动水冲刷耦合热环境对 AH-70_5 沥青混合料的破坏作用更为剧烈。相比 AH-70 沥青混合料,橡胶沥青混合料在相同环境作用下整体结构保持较好,试件表面未出现显著裂缝,仅在动水循环作用下局部可见微小孔隙,其在不同侵蚀环境作用后仍具备良好的结构稳定性和抗老化性能。

3.1.2　拉伸试验过程主应变云图及拉伸断面形态分析

通过统计各类沥青混合料试件的拉伸断面情况可知,拉伸断面并非完全是完整横断面,沥青混合料的破坏通常始于受力最不利的位置或材料结构中最薄弱的部位,而不会在其长度或高度方向上产生均匀变形。AH-70 沥青、SBS 沥青和橡胶沥青混合料拉伸破坏主要为柔性破坏,裂缝大都出现在沥青与集料的胶结界面处。胶结界面能协同变形并共同承担荷载,初期裂缝多从该界面萌生,随着裂缝缓慢扩展,材料承载能力逐渐降低,最终破坏面通常沿胶结界面延展形成。第二强度理论认为,材料断裂源于最大拉应变,即拉应变达到某一限值时发生断裂。图 2 给出了不同试件拉伸过程中裂纹萌生(峰值荷载 50%时刻)、裂纹扩展(峰值荷载 75%时刻)和开裂破坏(峰值荷载 100%时刻)3 个典型阶段的特征主应变云图。为进一步对比分析拉伸过程中集料和胶结界面主应变和竖向位移,在一个代表性试件的胶结界面和集料位置上分别随机选取 6 个点和 4 个点,数据点的数据分析结果如图 3 所示。

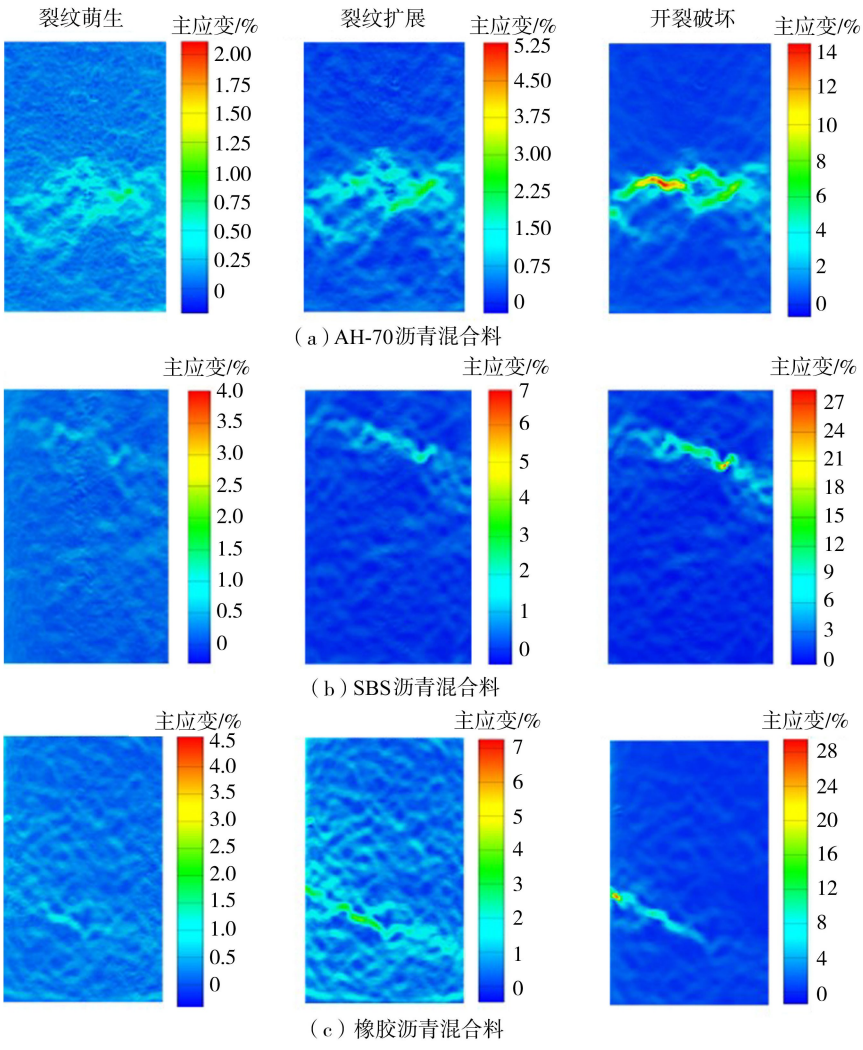


图 2　不同沥青混合料试件拉伸试验过程主应变云图

Fig. 2　Principal strain contour maps of various asphalt mixture specimens during the direct tensile test

由图 2 可见,AH-70 沥青、SBS 沥青和橡胶沥青混合料的拉应力作用过程表现为应变沿胶结界面逐步集中且集料应变相对较小的趋势,次生裂纹走向多变。由图 3 可见,沥青胶结界面的拉应变要远大于集料的拉应变,高应变区边界多分布于集料与砂浆界面处,并在其相对薄弱位置形成裂缝。裂缝路径与应变极值区域

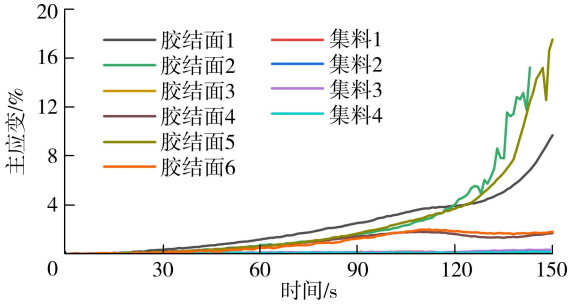


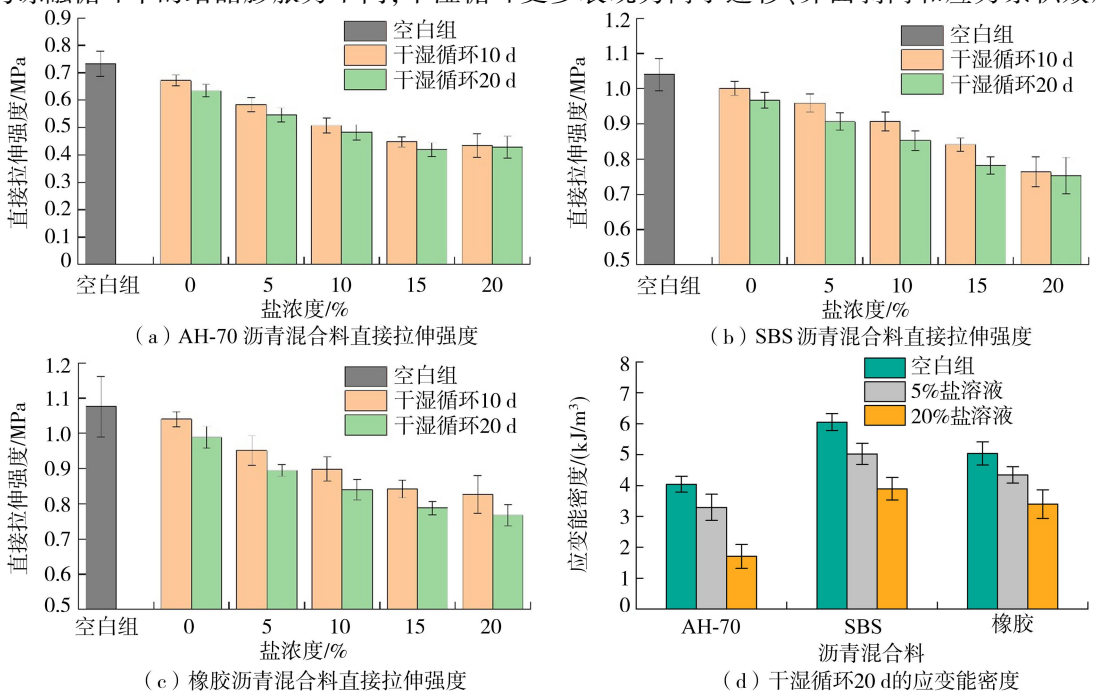
图3 胶结界面和集料的特征主应变变化

Fig. 3 Variation of principal strain at characteristic points on the binder-aggregate interface and within aggregates

高度吻合,胶结界面的变形使其成为裂纹萌生和扩展的主控位置,且裂纹扩展具有一定的滞后性和路径可预测性。SBS沥青和橡胶沥青的应变集中程度要高于AH-70沥青,说明其在受拉过程中吸能能力更强,裂纹扩展所需能量更高,有利于延缓破坏的发生;尤其在裂纹扩展阶段,橡胶沥青混合料试件中应变区范围较广,应变分布呈带状扩展,表明其界面黏结性与整体韧性要优于AH-70沥青和SBS沥青混合料。

3.2 静水盐干湿循环作用对强度性能的影响

不同静水盐干湿循环作用下沥青混合料的直接拉伸强度和应变能密度变化关系曲线如图4所示。由图4可知,在20%盐溶液中干湿循环20 d后,不同沥青混合料的直接拉伸强度与韧性均同步下降。相比空白组(成型后未经任何盐溶液浸泡或动水循环,直接进行拉伸试验),AH-70沥青混合料直接拉伸强度和应变能密度降幅分别为41.6%和57.8%;其界面结构在高浓度盐和干湿循环作用下出现劣化,表面孔隙增多。SBS沥青混合料抗拉强度由1.04 MPa降至0.84 MPa,应变能密度下降35.7%;橡胶沥青混合料由1.08 MPa降至0.87 MPa,应变能密度下降32.5%。SBS沥青与橡胶沥青混合料的改性结构有效延缓了盐侵蚀所致的孔隙增多与界面脱黏,但随循环次数增加仍呈稳定退化趋势。受多孔结构影响,盐溶液易沿孔隙渗入并在混合料内部迁移扩散侵蚀,同时高盐环境削弱了沥青的界面黏附性能。根据黏附理论,水分与集料界面的亲和力强于沥青,尤其是在循环过程中,Na^+与Cl^-渗透可进一步加速沥青-集料界面的脱黏反应,降低黏结稳定性;此外,Cl^-的腐蚀作用与Na^+在集料表面形成吸附层的不稳定性,也可能在干湿循环过程中加剧界面结构损伤。与冻融循环中的结晶膨胀力不同,干湿循环更多表现为离子迁移、界面剥离和应力累积效应[20-21]。



(a) AH-70沥青混合料直接拉伸强度 (b) SBS沥青混合料直接拉伸强度

(c) 橡胶沥青混合料直接拉伸强度 (d) 干湿循环20 d的应变能密度

图4 静水盐干湿循环作用对沥青混合料直接拉伸强度与应变能密度的影响

Fig. 4 Effect of static saline dry-wet cycling on the direct tensile strength and strain energy density of asphalt mixtures

因此,可以认为盐浓度与干湿循环过程共同影响沥青混合料的劣化程度,干湿循环过程中的离子作用机制虽不涉及相变,但同样会持续削弱界面强度,降低沥青混合料整体韧性与抗裂能力。

3.3　动水循环作用对强度性能的影响

高温动水循环作用对不同沥青混合料拉伸性能和应变能密度的影响如图 5 所示。由图 5 可知,动水循环加剧了各类沥青混合料的力学性能退化,尤其是在含盐环境中表现更为显著,具体反映在主轴荷载峰值下降与主轴位移减小,在动水循环作用下,沥青膜剥离和集料界面脱黏,从而导致沥青混合料拉伸性能衰退。AH-70 沥青混合料的应变能密度下降幅度最大,从 4 043.30 J/m^3 降至 1 237.83 J/m^3,下降 69.4%;SBS 沥青与橡胶沥青混合料分别下降 6.68%与 13.2%。AH-70 沥青混合料的拉伸强度由 0.733 MPa 降至动纯水循环后的 0.421 MPa,再降至动盐水循环后的 0.322 MPa,下降达 56.1%;相较而言,SBS 沥青和橡胶沥青混合料强度分别下降 15.8%、12.9%,说明改性沥青比 AH-70 沥青更能有效缓解水压力侵蚀。橡胶沥青混合料受动水循环的影响较小,因掺有 SBS 与橡胶粉协同改性,在保持力学性能的同时,显著提升了抗水损能力。

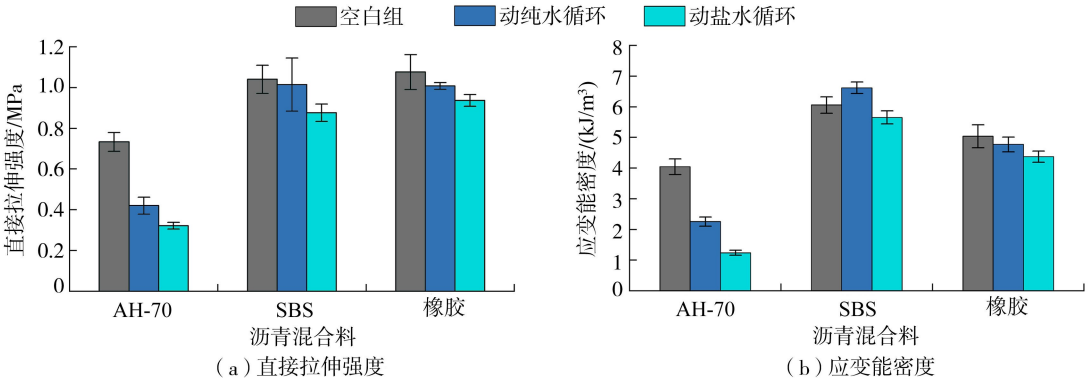


图 5　动水循环作用对沥青混合料直接拉伸强度与应变能密度的影响

Fig. 5　Effect of dynamic water cycling on the direct tensile strength and strain energy density of asphalt mixtures

4　结　论

a. 动水循环和静水盐干湿循环均可诱发裂缝、空隙与集料界面剥离等破坏形态,其中 AH-70 沥青混合料表现出显著的热疲劳开裂与水损破坏,而 SBS 沥青和橡胶沥青混合料在动水循环和静水盐干湿循环作用下仍保持良好的结构完整性。

b. AH-70 沥青、SBS 沥青和橡胶沥青混合料表现为柔性破坏特征;裂纹多自胶结界面萌生,其宏观扩展明显滞后于应变集中带的出现,应变区范围大,应变集中区与裂纹扩展路径高度吻合。沥青混合料的极限承载应变值(抗裂性能)橡胶沥青混合料最大、SBS 沥青混合料次之、AH-70 沥青混合料最小。

c. 盐浓度与干湿循环过程共同削弱沥青混合料整体韧性与抗裂能力。在 20%盐溶液中干湿循环 20 d 后,AH-70 沥青混合料强度和应变能密度分别下降 41.6%与 57.8%,表面孔隙增多;SBS 沥青和橡胶沥青混合料应变能密度分别下降 35.7%和 32.5%,表现出更强的界面稳定性与耐久性。

d. 动水循环作用下,显著削弱了 AH-70 沥青混合料界面结构完整性,诱发界面脱黏与结构剥落,表现出应变能密度与拉伸强度同步衰退趋势;AH-70 沥青混合料抗拉强度和应变能密度分别下降 56.1%与 69.4%,性能衰退最剧烈。而改性沥青混合料在动水循环作用下仍保持较高的残余强度性能,有效降低了沥青与集料剥离的可能。橡胶沥青因其优异的黏弹性表现出更强的能量吸收与应力释放能力,试验结果进一步印证其在抗裂性能与韧性方面的显著优势。

参考文献:

[1] Feng Baozhu, Wang Haoyu, Li Song, et al. The durability of asphalt mixture with the action of salt erosion: a review[J]. Construction and Building Materials, 2021, 315: 125749.

[2] Zhou Zhigang, Li Haojia, Liu Xin, et al. Investigation of sea salt erosion effect on the asphalt-aggregate interfacial system[J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2020, 13: 145-153.

[3] 王柳江,薛晨阳,扎西顿珠,等. 低温条件下心墙沥青混凝土蠕变特性试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49

(5):419-424. (Wang Liujiang, Xue Chenyang, Tashi Dunzhu, et al. Experimental study on characteristics of creep deformation of asphalt concrete used in core dam under low temperature[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021, 49(5):419-424. (in Chinese))

[4] Xiong Rui, Chu Ci, Guan Bowen, et al. Performance damage characteristics of asphalt mixture suffered from the sulphate-water-temperature-load coupling action[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2022, 23(5):1368-1377.

[5] 郭乃胜,褚召阳,房辰泽,等. 沥青及沥青混合料氯盐侵蚀损伤的多尺度研究进展[J]. 中国公路学报,2023,36(12):77-106. (Guo Naisheng, Chu Zhaoyang, Fang Chenze, et al. Progress of multi-scale research on chloride salt erosion damage of asphalt and asphalt mixture[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(12):77-106. (in Chinese))

[6] 马涛,陈葱琳,张阳,等. 胶粉应用于沥青改性技术的发展综述[J]. 中国公路学报,2021,34(10):1-16. (Ma Tao, Chen Conglin, Zhang Yang, et al. Development of using crumb rubber in asphalt modification: a review[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(10):1-16. (in Chinese))

[7] 赵爱军,寇吟松,李武伦,等. 高掺量SBS改性沥青及其混合料老化行为[J]. 广西大学学报(自然科学版),2024,49(4):751-763. (Zhao Aijun, Kou Yinsong, Li Wulun, et al. High content SBS modified asphalt and its mixtures aging behavior[J]. Journal of Guangxi University(Natural Science Edition), 2024, 49(4):751-763. (in Chinese))

[8] 褚辞,刘开平,李科宏,等. 盐蚀条件下沥青混合料路用性能研究[J]. 硅酸盐通报,2018,37(12):3906-3911. (Chu Ci, Liu Kaiping, Li Kehong, et al. Investigation on the road performance of asphalt mixture exposed to salt erosion[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(12):3906-3911. (in Chinese))

[9] Xiong Rui, Chu Ci, Qiao Ning, et al. Performance evaluation of asphalt mixture exposed to dynamic water and chlorine salt erosion[J]. Construction and Building Materials, 2019, 201:121-126.

[10] 闫人伟,师长春,彭林魏,等. 盐-冻融循环条件下沥青混合料水稳定性评价[J]. 公路,2025,70(3):50-55. (Yan Renwei, Shi Changchun, Peng Linwei, et al. Evaluation of asphalt mixture water stability under the salt-freeze-thaw cycles[J]. Highway, 2025, 70(3):50-55. (in Chinese))

[11] 李闯,熊锐,李松,等. 盐蚀-动水条件下沥青混合料性能损伤评价[J]. 材料科学与工程学报,2022,40(2):300-305. (Li Chuang, Xiong Rui, Li Song, et al. Performance damage evaluation of asphalt mixture under the condition of salt attack and dynamic water[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2022, 40(2):300-305. (in Chinese))

[12] 赵丽华,曾勇银,朱绩超. 盐雾-温度耦合作用对沥青混合料性能影响规律研究[J]. 公路,2018,63(6):253-257. (Zhao Lihua, Zeng Yongyin, Zhu Jichao. Research on impact of salt mist-temperature coupling actions on performance of asphalt mixture[J]. Highway, 2018, 63(6):253-257. (in Chinese))

[13] 冯蕾,陈征,王岚,等. 冻融循环作用下盐浓度对温拌胶粉改性沥青混合料开裂特性影响[J]. 硅酸盐通报,2021,40(5):1743-1750. (Feng Lei, Chen Zheng, Wang Lan, et al. Effect of salt concentration on CR-WMA cracking characteristics under freeze -thaw cycles[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(5):1743-1750. (in Chinese))

[14] 王义忠. 含盐高湿环境对沥青混合料的侵蚀机理研究[J]. 公路工程,2015,40(5):250-254. (Wang Yizhong. Study the erosion mechanism of the asphalt mixture on salty and humid environment[J]. Highway Engineering, 2015, 40(5):250-254. (in Chinese))

[15] 刘晋周. 中法沥青混凝土及半刚性基层材料设计指标与路用性能研究[D]. 北京:交通运输部公路科学研究所,2019.

[16] 黄兰可. 沥青路面水膜效应及临界滑水速度研究综述[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(3):118-124. (Huang Lanke. Research review on water film effect and critical hydroplaning velocity of asphalt pavement surface[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(3):118-124. (in Chinese))

[17] 沙庆林. 多碎石沥青混凝土SAC系列的设计与施工[M]. 北京:人民交通出版社,2005.

[18] 邓贤坤. 临海环境下沥青及沥青混合料盐蚀机理研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2023.

[19] Cui Peide, Wu Shaopeng, Xiao Yue, et al. 3D reconstruction of moisture damage resulted volumetric changes in porous asphalt mixture[J]. Construction and Building Materials, 2019, 228:116658.

[20] 姚华彦,王旭洋,拓明阳,等. 盐冻融循环对玄武岩纤维沥青混合料抗裂性能及微观结构的影响[J]. 材料导报,2024,38(增刊2):640-645. (Yao Huayan, Wang Xuyang, Ta Mingyang, et al. Effect of salt freeze-thaw cycle on crack resistance and microstructure of basalt fiber asphalt mixture[J]. Materials Reports, 2024, 38(S2):640-645. (in Chinese))

[21] 褚辞. 多因素作用下沥青混合料盐蚀劣化特性研究[D]. 西安:长安大学,2019.

(收稿日期:2025-07-04 编辑:熊水斌)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.05.015

木质素衍生物改良黏性土抗崩解特性及微观机理

宋泽卓,刘 瑾,姚亦姜,卜 凡,陈志昊,史昕昊

(河海大学地球科学与工程学院)

摘要:为解决浅表层黏性土在降雨、干旱等气象因素作用下抗崩解性能易劣化,传统水泥、石灰等改良材料存在脆性强、不可逆等缺陷的问题,以南京地区黏性土为研究对象,制备不同木质素衍生物掺量的改良土样开展崩解试验,并结合扫描电镜(SEM)与能谱分析(EDS)揭示木质素衍生物改良黏性土抗崩解特性的宏微观机理。结果表明:改良黏性土崩解过程分为初始饱和、快速崩解与缓速崩解 3 个阶段;1%掺量效果最优,初始饱和阶段延长至 9 min,完全崩解时间较素土延长 1 倍,平均崩解速率降低 20.13%;木质素衍生物通过在颗粒表面形成薄膜状结构,包裹并联结颗粒,减少孔隙连通性,同时引入 Ca^{2+} 增强胶结,可有效抑制水分入渗;当木质素衍生物掺量过高时薄膜聚集,颗粒间联结减弱,抗崩解性能下降。

关键词:黏性土;木质素衍生物;抗崩解特性;微观结构;改良机理

中图分类号:TU442 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-1980(2026)05-0129-09

Anti-disintegration properties and microscopic mechanism of clayey soil improved by lignin derivatives

Song Zezhuo, Liu Jin, Yao Yijiang, Bu Fan, Chen Zhihao, Shi Xinhao

(*School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University*)

Abstract: To address the problems that the anti-disintegration property of surficial clayey soils is prone to deterioration under meteorological factors such as rainfall and drought, and traditional improvement materials such as cement and lime have defects such as high brittleness and irreversibility, the clayey soil in Nanjing area was taken as the research object to prepare improved soil samples with different lignin derivative contents and conduct disintegration tests. Combined with scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive spectroscopy (EDS), the macroscopic and microscopic mechanisms of the anti-disintegration properties of clayey soils improved by lignin derivatives were revealed. The results show that the disintegration process of improved clayey soils is divided into three stages: initial saturation, rapid disintegration, and slow disintegration; the 1% content has the optimal effect, with the initial saturation stage extended to 9 min, the complete disintegration time doubled compared with that of untreated soil, and the average disintegration rate reduced by 20.13%; lignin derivatives form a film-like structure on particle surfaces to wrap and connect particles, reduce pore connectivity, introduce Ca^{2+} to enhance cementation, and inhibit water infiltration; when the lignin derivative content is too high, the films aggregate, interparticle connections weaken, and the anti-disintegration performance decreases.

Key words: clayey soil; lignin derivative; anti-disintegration property; microstructure; improvement mechanism

浅表层黏性土直接暴露于大气中,在降雨、干旱、风等气象因素作用下反复经历干湿循环和温度变化,导致其抗崩解性能显著劣化。降雨入渗使土体迅速吸水饱和,内部黏聚力降低,颗粒间联结减弱,极易发生崩解破碎。干旱蒸发则导致土体收缩开裂,加速后续降雨时的水分渗透与破坏进程。在全球气候变化背景下,暴雨与干旱交替愈发频繁,使得浅表层黏性土的抗崩解能力持续下降,整体性和稳定性随之削弱,更易发生表层崩解、剥落乃至结构失稳[1-3]。当前,交通、水利、矿山等工程建设快速发展,亟须对黏性土抗崩解机理及改良措施展开深入研究。

目前,常用的土体改良方法是通过化学手段提高土体工程特性。传统化学稳定剂如水泥、石灰、粉煤灰

基金项目:江苏省基础研究计划项目(BK20250088);国家自然科学基金青年科学基金项目(C 类)(42502264);中央高校基本科研业务费专项资金项目(B250201229,B260201077)

作者简介:宋泽卓(1995—),男,讲师,博士,主要从事环境地质工程研究。E-mail:szzhhu@163.com

通信作者:刘瑾(1983—),女,教授,博士,主要从事环境地质工程研究。E-mail:jinliu920@163.com

等[4-5],在某些工程项目中能够以合理成本提升土体强度,但针对浅表层黏性土的抗崩解性,这些材料存在明显缺陷。经水泥、石灰改良后的土体表现出较为明显的脆性特征,其屈服应变、塑性指数和延展性降低,在反复干湿循环或水流冲刷作用下更易发生开裂和崩解破坏,反而削弱了土体长期的结构稳定性[6-8]。此外,水泥、石灰等材料难以降解,其改良过程不可逆,长期赋存会改变土体的化学环境,进而影响土体颗粒间的胶结与抗崩解性能的维持[9-10]。因此,仅以提高土体强度为目标的传统改良思路,不利于实现抗崩解性的有效提升。为推进人与自然和谐共生的工程实践,遵循可持续发展原则,研究能够切实增强浅表层黏性土抗崩解性、同时兼顾生态环保与经济高效的新型改良方法和材料,具有重要的意义。

木质素作为一种天然聚合物在自然界中储量巨大,在植物组织中分布广泛,存量仅次于纤维素,具备较高碳掺量且为储量第二大的天然大分子有机资源。它由法国科学家 Anselme Payen 在木材纤维素分离试验过程中首次发现[11]。木质素同时也是工业副产品之一,主要来源于造纸行业,作为一种可再生资源,其具有产量丰富、价格低廉、结构独特等优势,在保持高性价比的同时还可顺应绿色可持续发展理念[12-13]。在木质素分离过程中,由于使用的工艺不同,会产生多种不同的衍生物,如木质素磺酸钙、乙醇木质素、盐酸木质素、木质素磺酸钠等,这些衍生物常用于污染土壤修复、水泥复合固化、土体固化与稳定等方面,国内外学者针对木质素衍生物在土体改良领域的应用开展了一系列的试验研究[14-18]。Zhang 等[19]使用木质素对粉土进行改良,构建改良土体剪切波速试验与无侧限抗压试验间的归一化模型,发现养护期间可通过剪切波速的监测数据获取改良土体强度的变化规律。贺智强等[20]采用崩解与三轴压缩试验对比分析了两类木质素衍生物对黄土的改良效果,发现木质素磺酸钙能够提升黄土工程特性。Orakoglu 等[21]使用粉煤灰与木质素纤维对黏性土进行改良,发现该改良方式能够有效减小冻融循环条件下土体强度的下降幅度。现有对木质素衍生物改良黏性土的研究主要集中于其对黏性土工程特性的影响,对其改良机理的认识多停留在单一尺度或定性层面,对于随木质素衍生物掺量变化的演化规律,以及其与土体抗崩解性之间的内在关联,仍缺乏系统验证,在一定程度上制约了其在提升黏性土抗崩解性能方面的工程应用。

本文以南京地区黏性土为研究对象,系统开展不同木质素衍生物掺量条件下改良土体的崩解试验,并结合扫描电子显微镜(SEM)与能谱分析(EDS)技术,从宏观崩解行为与微观结构特征角度揭示木质素衍生物对黏性土抗崩解特性的影响及其微观机理的表现,以期为该材料在浅表层黏性土改良中的绿色应用提供理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验使用的土体取自南京市某河道岸坡。获取土体后,对其进行烘干、粉碎,并过 2 mm 孔径筛后备用。根据 GBT 50123—2019《土工试验方法标准》对过筛后黏性土开展颗粒分析试验和基本物理性质试验,结果如下:土体颜色为黄褐色,粉粒、黏粒、砂粒的质量分数分别为 68.5%、23.8%、7.7%,天然含水率为 21.8%,天然干密度为 1.65 g/cm^3,比重为 2.71,液限为 37.7%,塑限为 19.5%,塑性指数为 18.2。

试验中使用的木质素衍生物以酸法制浆工业的蒸煮废液作为原材料,通过喷雾干燥加工形成的生物基聚合物,储量巨大,来源广泛,分子式为 $C_{20}H_{24}CaO_{10}S_2$。在自然条件下,木质素衍生物为红褐色粉末,具有木质芳香气味,分子链中富含羟基、磺酸基及苯环等活性官能团,可通过氢键作用、离子交换和络合反应与土颗粒形成稳定胶结结构。同时木质素衍生物具备抗氧化特性,使其能够被用作土体改良材料,在相关领域具有广泛应用前景。作为造纸行业副产品,木质素衍生物的回收利用可实现双重效益,在减少工业废液处理成本及污染物排放的同时,符合资源循环与低碳工程发展趋势。本文试验使用的木质素衍生物由合肥巴斯夫生物科技有限公司生产,其主要成分为木质素磺酸钙,等级为分析纯,纯度大于 98%。

1.2 试验方法

开展崩解试验时,将试样浸入水中模拟崩解过程,记录其质量变化并据此计算崩解率,用以研究各木质素衍生物掺量条件下试样崩解率的变化规律。为避免崩解过程中试样吸水导致测得质量与实际试样残余质量出现误差,试验分两组同时进行,试验装置如图 1 所示。试验过程中,将金属网悬置在精度为 0.01 g 的电子秤上,对照组在金属网下放置一塑料制托盘,避免土体散落,试验组不放置托盘,让试样自然崩解落入水箱中。通过对照组测定的试样吸水质量、试验组测定的土体损失质量,计算试样崩解率:

$$Y_i = \frac{m_0 - m_i/(1 + C_i)}{m_0} \times 100\% \tag{1}$$

其中

$$C_i = \frac{M_i - M_0}{M_0} \times 100\%$$

式中:Y_i 为 i 时刻的崩解率;m_i 为试验组 i 时刻电子秤读数;m_0 为试验组试样浸入水中瞬间电子秤读数;C_i 为对照组试样 i 时刻的含水率;M_i 为对照组 i 时刻电子秤读数;M_0 为对照组试样浸入水中瞬间电子秤读数。

试验过程中,设定变量为木质素衍生物掺量分别为 0%、0.5%、1%、2%、3%,试样含水率均为 19.1%。试样制备步骤如下:称取经过烘干、磨碎、过筛处理后的土样;称量对应试样所需质量的蒸馏水与木质素衍生物;将称量的土体与木质素衍生物进行充分混合,倒入蒸馏水进行搅拌,使水分均匀分布在土样与木质素衍生物的混合物中;将搅拌均匀的土体倒入环刀模具中,环刀模具需采用凡士林涂抹内壁,便于试样脱模;使用千斤顶对土体施加为期 4 min 的静态压力,在压制结束后进行试样脱模,获得高 20 mm,底面直径为 61.8 mm 的扁平圆柱形试样,每组试样均需制备对照组与平行样。各掺量试样均设置 3 个平行样。制样结束后,将制备的试样包裹密封,置于背光处进行为期 14 d 的养护。

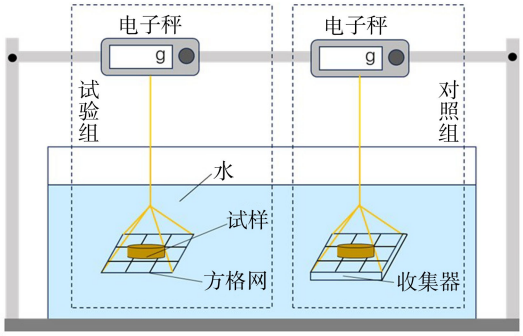


图 1　崩解装置示意图

Fig. 1　Schematic diagram of disintegration device

选取一组相同掺量的试样,分别将试样放置在崩解装置中的两个金属网上,向玻璃容器内注入蒸馏水,并将金属网置于水平面上,让两组试样同时接触水面,直至水面完全淹没试样,需确保试样不会与容器底部直接接触。试验中,崩解装置内蒸馏水的温度恒定为 25℃。崩解过程中使用数码相机进行定时拍摄,获取对应时刻下试样崩解形态。读取并记录没入水中瞬间的电子秤读数以及浸水相应时间时电子秤的读数,按式(1)计算崩解率,将对照组试样的含水率视为该时刻下试验组试样的含水率,用于减小试验误差。同一掺量平行样计算的崩解率取平均后记为该掺量试样的试验结果。结合记录的图像,研究试样崩解模式,绘制不同木质素衍生物掺量试样的崩解率变化曲线、崩解速率变化曲线、崩解持续时间图,探究试样抗崩解性能的影响因素。

2　试验结果与分析

2.1　改良黏性土崩解率

试验通过对照组消除试样崩解过程中因土体吸收水分导致的崩解率计算误差,获得不同木质素衍生物掺量试样崩解率变化。由图 2(a)可知,素土(0%掺量)与改良黏性土崩解率变化曲线均呈现出相似的变化趋势。在试验初期保持相对稳定,随着试验的进行,试样的崩解率呈现先快速增长后缓速上升的趋势,可以将曲线划分为初始饱和阶段、快速崩解阶段与缓速崩解阶段。木质素衍生物改良黏性土的崩解率曲线均低于素土,且试样崩解率随浸润时间延长产生显著差异,二者间差异主要集中于快速崩解阶段与缓速崩解阶段中试样崩解率变化。

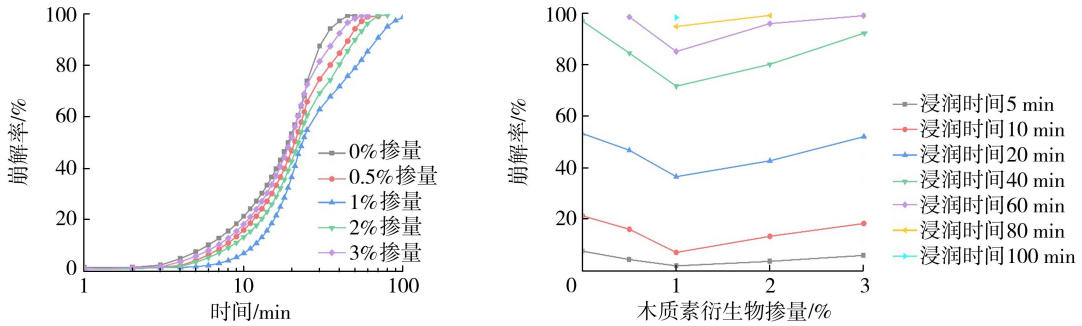
初始饱和阶段,试样崩解率保持相对稳定,曲线斜率未随浸润时间延长发生显著变化,试样崩解率为 2.4%~3.8%。由于木质素衍生物掺量的不同,各曲线存在着一定的差异。对于素土,在浸润 3 min 后,试样的崩解率出现大幅度的提升。掺入木质素衍生物试样的崩解率显著提升起始时间均晚于素土,其中 1%掺量试样延迟最为明显,延迟至 9 min。

快速崩解阶段,试样表层发生大规模土体剥落,为土体发生崩解的主要阶段。该阶段,试样均已吸水饱和,初始崩解速率较缓,但随着时间的延长,试样发生大规模崩解,崩解率曲线斜率大幅提升。素土崩解率在该阶段初始时便快速上升,表明在该阶段中试样发生长时间的大规模崩解现象。1%掺量试样的崩解率在该阶段开始时先保持缓速上升,随着浸润时间的延长,曲线的斜率逐渐增大,最终保持相对稳定。3%掺量试样的崩解率曲线与素土呈现出相似的变化趋势。在该阶段开始时,3%掺量试样崩解率低于素土。但随着浸润时间延长,二者崩解率与时间的关系逐渐趋于一致,表明在快速崩解阶段 3%掺量试样的崩解规模高于素

土。随着木质素衍生物的掺量增大,试样快速崩解阶段持续的时间呈现先上升后下降的趋势。在浸润时间相同的条件下,1%掺量试样的崩解率均低于素土与其他木质素衍生物掺量试样。当浸润时间为10 min时,相较于素土与0.5%、2%、3%掺量试样降幅分别为67.21%、56.46%、47.48%与61.78%;当浸润时间为35 min时,素土进入快速崩解阶段尾声,试样崩解率为94.34%,表明将木质素衍生物掺入土体可以显著抑制试样崩解进程。

进入缓速崩解阶段前试样均已发生大规模崩解,崩解率经历了一段时间的快速上升。进入缓速崩解阶段后,试样的崩解率曲线斜率随着浸润时间的延长逐渐下降。当试样崩解率高于96%后,曲线斜率趋近于0。素土试样在崩解率达到94.34%后进入缓速崩解阶段,崩解率曲线的斜率仅发生一定的下降,残余土体经过15 min发生完全崩解。改良黏性土试样进入缓速崩解阶段时的崩解率均小于素土试样,崩解率曲线斜率在该阶段中持续下降。1%掺量试样进入缓速崩解阶段的崩解率最低,为82.22%,相较于素土下降了12.85%。该掺量试样残余土体发生完全崩解所需时间为40 min,相较于素土延长25 min。

由图2(b)可知,经过相同时间的浸润后,素土与改良黏性土的崩解率存在一定的差异。在浸润5 min后,素土与0.5%、2%、3%掺量试样均进入快速崩解阶段,而1%掺量试样仍处于吸水饱和阶段。随着浸润时间延长,各掺量试样崩解率均发生快速增长。改良黏性土崩解率因木质素衍生物掺量的不同而表现出一定的差异。改良土体崩解率随木质素衍生物掺量增加,呈现出先下降后上升的趋势。在浸润20 min后,素土与0.5%、1%、2%、3%掺量试样崩解率分别为53.41%、46.93%、36.58%、42.79%与52.18%。浸润40 min后,素土崩解率趋近于100%,仅有少量土体残留,几近完全崩解。当试样浸润时间为60 min时,素土已完全崩解,而掺入木质素衍生物的试样仍有部分土体残余,其中1%掺量试样崩解率为85.48%。当浸润时间达到80 min时,仅有1%与2%掺量试样存在部分未崩解土体,崩解率分别为95.26%与99.61%。当浸润时间为100 min时,试样均已完全崩解。根据各浸润时间条件下试样崩解率可知,1%掺量试样在相同浸润时间条件下,崩解率均为最低值且试样完全崩解所需时间最长,表明1%掺量能够有效提升土体水稳定性与土体抗崩解性能。



(a)崩解率随时间变化曲线 (b)崩解率随木质素衍生物掺量变化曲线

图2 试样崩解率变化曲线

Fig. 2 Variation curves of disintegration ratio of specimens

2.2 改良黏性土崩解速率

根据试样崩解率随时间变化数据对不同木质素衍生物掺量试样崩解率速率进行计算:

$$R = m_0(Y_{i+1} - Y_i)/\Delta t \tag{2}$$

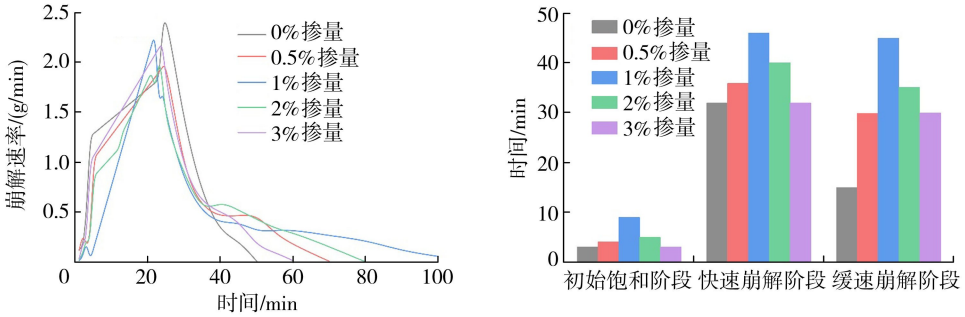
式中:R为试样的崩解速率;Y_{i+1}为试样在i+1时刻的崩解率;Y_i为试样在i时刻的崩解率;Δt为崩解时间间隔。根据计算结果绘制不同木质素衍生物掺量试样崩解速率随时间变化曲线,如图3(a)所示。由图3(a)可知,素土与木质素衍生物改良黏性土的崩解速率存在一定差异,且二者间的差异随浸润时间延长愈发明显。

各试样的崩解速率在浸润开始阶段均处于较低值,对应试样的初始饱和阶段。崩解速率随浸润时间延长缓速上升,且不同木质素衍生物掺量试样的持续时间存在一定差异,1%掺量试样的持续时间最长。在初始饱和阶段中,试样逐步吸收水分填充土体内部微小孔隙,挤占空气存储空间,排出土体内部蕴含的空气,试样未发生显著崩解现象,结构保持相对稳定,因此崩解速率均较低。

试样崩解速率在初始饱和阶段结束后发生快速上升,当崩解速率达到最高值后崩解速率逐步缓速减小,

该阶段为快速崩解阶段。在这个阶段,各试样均已吸水饱和,土体颗粒间的相互作用力因水分进入土体颗粒间孔隙导致水膜增厚而降低,土体稳定性下降,试样发生大规模土体剥落。素土的平均崩解速率约为 1.54 g/min。1%掺量试样的平均崩解速率最低,约为 1.23 g/min,较素土降幅约为 20.13%。素土与 0.5%、2%与 3%掺量试样的曲线呈现出相似的变化趋势,而 1%掺量试样的曲线转折点较为平滑。经过一段时间的快速崩解后,试样的平均崩解速率逐渐减小,且随着浸润时间逐步延长,崩解速率逐渐趋近于 0 g/min。

由图 3(b)可知,初始饱和阶段、快速崩解阶段与缓速崩解阶段的持续时间均随木质素衍生物掺量增大呈现出先上升后下降的趋势。在初始饱和阶段,素土的阶段持续时间为 3 min,而 0.5%、1%、2%与 3%掺量试样持续时间分别为 4、9、5、3 min,增幅分别为 33.33%、200%、66.67%与 0%。试样吸水饱和后进入快速崩解阶段,各试样均发生大规模崩解现象,崩解率快速上升。素土在该阶段中基本完全崩解,持续时间为 32 min,而 1%掺量试样在快速崩解阶段的持续时间为 46 min,相较于素土延长约 14 min,增幅约为 43.75%。2%与 3%掺量试样在该阶段的持续时间分别为 40、32 min,相较于 1%掺量试样持续时间随着木质素衍生物掺量增大而缩短,降幅分别为 13.04%与 30.43%。相较于改良黏性土试样,素土在缓速崩解阶段的持续时间较短,约 15 min。而 0.5%、1%、2%与 3%掺量试样在该阶段持续时间分别为 30、45、35、30 min,分别延长了 15、30、20、15 min。在整个崩解过程中,1%掺量试样持续时间均长于其他试样,实现完全崩解所需时间为 100 min,相较于素土完全崩解所需的 50 min 时间延长了 1 倍。



(a)崩解速率随时间变化曲线　　(b)各崩解阶段持续时间对比

图 3　木质素衍生物掺量对试样崩解速率的影响

Fig. 3　Effect of lignin derivative content on disintegration rate of specimens

2.3　改良黏性土崩解形态

由图 4 可知,1%掺量试样在浸入水中后,试样逐步发生崩解,崩解过程持续约 100 min,可以观察到明显的雾化现象。试样的崩解过程也可以划分为 3 个阶段:吸水饱和阶段、颗粒剥落阶段、缓速剥落阶段。在吸水饱和阶段(浸润时间为 1 min),试样主体未发生显著变化,形态保持相对稳定,未发生显著土体崩落现象。随着浸润时间延长,试样逐渐吸水饱和,部分土体发生崩解,但总质量并未随着崩解过程出现下降,反而由于土体吸收水分出现了一定程度上的增加,该阶段试样表面出现大量小气泡,气泡逐渐向上漂浮直至露出水面发生破裂。这些微小气泡产生的原因主要是由于试样内部存在微小孔隙,其内部存有一定空气。随着土体吸收水分,水分进入土体孔隙内,挤占空气的存储空间,将土体内空气挤出土体,排出的空气在土体表面形成微小气泡。在颗粒剥落阶段(浸润时间 10、45 min),随浸润时间增加,土体持续受到剥蚀,试样体积逐渐减小,试样内部结构遭到破坏。颗粒剥落阶段初期,试样表层气泡逐渐消失,表层出现细小裂纹,部分表层土样发生剥落,试样形态开始发生破坏。随着试样浸润时间的持续延长,试样表层微小裂纹进一步发育,最终贯通整个试样,对试样结构完整性造成严重破坏,试样表层的细小颗粒被逐渐剥蚀,侵蚀现象愈发明显,土体剥落速率逐步上升。伴随剥

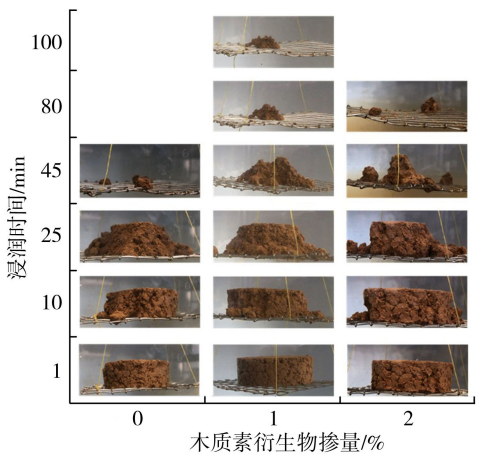


图 4　不同掺量试样崩解过程

Fig. 4　Disintegration process of specimens with different contents

蚀现象的发生,水分进一步渗透到土体内部,将土体内部孔隙残余的空气进一步排出。在形成气泡的同时由于水分的渗透,使得裂隙进一步发育。经长时间浸润后最终导致试样发生断裂与坍塌现象,试样结构发生严重破坏,体积发生显著减小,残存土体质量降低。经过长时间的浸润后,试样进入缓速剥落阶段(浸润时间为100 min),发生大规模坍塌断裂现象。在这个过程中,试样吸水膨胀,试样中细小颗粒掉落至容器底部,部分团聚体仍然聚集在一起。试样质量存在一定程度的减小,但试样状态逐渐趋于稳定,不再发生大规模崩落,土体剥落速率减缓。

由图4可知,素土、1%、2%掺量试样经过相同时间的浸润后结构存在明显的差异,1%掺量试样相较于素土与2%掺量试样结构更为完整。

当浸润时间为1 min时,3类试样呈现出相似的形态特征,试样吸水膨胀且土体表面产生大量微小气泡。与1%掺量试样相比,素土与2%掺量试样表面因水分作用发生一定的剥蚀。随着浸润时间延长,试样崩解率持续上升,土体持续崩落。当浸润时间为10 min时,试样表面出现一定缺口。该缺口主要是由于土体吸水导致土体颗粒间水膜增厚,土体颗粒间相互作用力减弱,在土体应力薄弱处发生一定程度的土体崩解现象。观察3类试样缺口的形态可以发现,1%掺量试样在1 ~10 min区间内崩解量最少,表明1%掺量能有效抵抗土体崩解现象。

当浸润时间为25 min时,试样形态相较于初始阶段发生显著变化。素土与1%掺量试样上部均发生显著崩解现象,土体为上窄下宽的堆积体。2%掺量试样表面形成较多的裂隙。随浸润时间延长,裂隙持续延展发育,最终贯穿试样整体,导致试样呈现为块状崩解,试样形态结构遭受严重破坏。素土在浸润45 min后仅存有少量土体,已无法从残余土体中推测出试样原始形态。相较于素土,掺入木质素衍生物的试样仍有部分土体堆积。

当浸润时间大于45 min时,素土已基本完全崩解,残余土体质量过于微小,可忽略不计。对1%与2%掺量试样进行对比可以发现,两试样均有部分土体受金属网的支撑作用留存于网格上,1%掺量试样残余土体结构较为紧密。在进一步浸润过程中,残余土体未发生显著变化,表明该部分残余土体具备较高的水稳定性与抗崩解性能。2%掺量试样经80 min的浸润后仅有两部分较大块体残余,其余团聚体均因未受到金属网格支撑发生崩解,堆积于容器底部。在进一步浸润过程中,上述残余块体持续崩解为诸多较小团聚体,试样发生完全崩解。

3 微观结构演化分析

将试验结束后对照组的试样进行烘干,并按照扫描电子显微镜分析试验(SEM)以及能谱分析试验(EDS)的要求进行试样的制备与试验的开展,进而获取素土与改良黏性土的微细观结构。试验中,SEM和EDS试验采用SU3500型扫描电子显微镜。扫描电子显微镜分析试验结果如图5所示,图中浅蓝色部分为典型的黏性土颗粒,黄色部分为木质素衍生物形成的典型的薄膜状结构。

由图5可知,木质素衍生物能够在黏性土颗粒表面形成一层薄膜状结构,这些薄膜状结构包裹着黏性土颗粒,改变了黏性土颗粒表面的结构特征,进而影响了改良黏性土的整体性。对于未改良的素土(图5(a)),整体结构较为松散,黏性土颗粒之间存在着较多的孔隙。颗粒边缘较为锐利,颗粒之间无明显联结结构,呈现出无序排列。对于1%掺量的改良黏性土(图5(b)),黏性土颗粒边缘较为圆钝,颗粒之间孔隙的数量和体积较素土均发生明显的下降。黏性土颗粒表面可以观察到明显的薄膜状结构,这些薄膜状结构将相邻的黏性土颗粒进行联结,使得黏性土颗粒形成较大体积的团聚体,土体的整体性得到有效提升。当木质素衍生物的掺量进一步增大(图5(c)),黏性土的微观结构发生进一步的变化。木质素衍生物形成的薄膜状结构出现聚集现象,从而在黏性土内部形成块状的胶结物。这些块状的胶结物能够有效的填充黏性土内部的一部分大孔隙,但其联结作用效果出现明显的降低,黏性土颗粒之间的联结减弱,黏性土颗粒无法形成较为稳定的团聚体,土体的整体性相较于1%掺量的改良土体出现一定的降低。

采用南京大学研制的CIAS图像处理软件对图5中的SEM图像进行二值化处理,处理中保持原有SEM图像的尺寸与放大倍数不变,处理过程中阈值设置为95。在二值化图像中,白色部分表示黏性土颗粒,黑色表示黏性土颗粒之间的孔隙。由图5可知,当木质素衍生物掺量由0%增大到1%时,二值化图像中黑色部分的占比出现明显的下降,黑色部分由素土中“相连成片”的状态转变为1%掺量中“独立分布”的状态。以

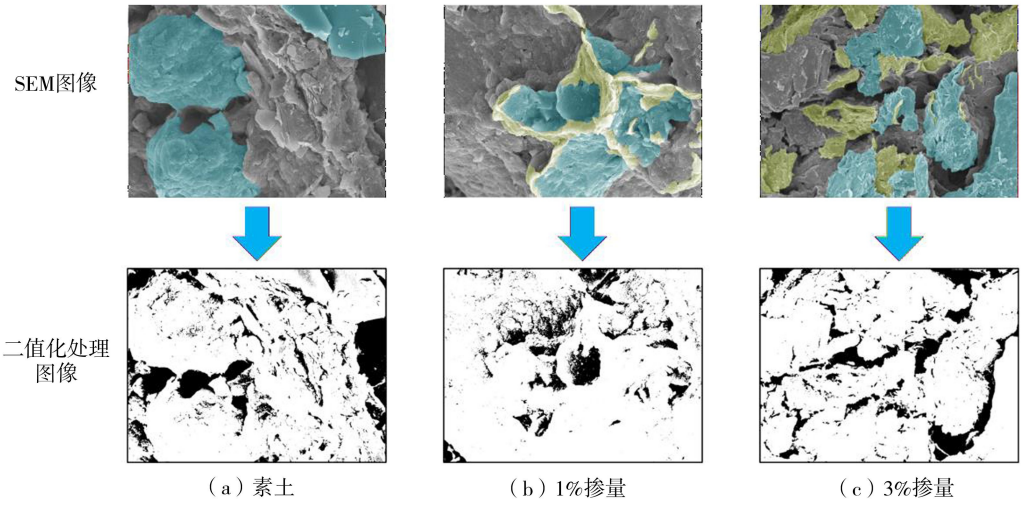


图 5　SEM 图片及其二值化处理图片(放大 5 000 倍)

Fig. 5　SEM images and their binarization processing images (magnified 5 000 times)

上现象表明,随着木质素衍生物掺量的增大,黏性土内部的孔隙体积减小,孔隙之间的连通性降低,由连通的大孔隙逐渐转变为相对独立的小孔隙。当木质素衍生物掺量由 1%增加至 3%时,二值化图像中黑色部分的占比出现一定程度的增加。与 1%掺量的试样相比,“独立分布”的黑色部分的数量发生一定程度的增加。以上现象表明,随着木质素衍生物掺量的进一步增加,木质素衍生物形成的薄膜状结构能够填充一部分黏性土颗粒之间的大孔隙,但其无法有效地联结相邻的黏性土颗粒,颗粒间相对独立的小孔隙的数量出现增减。

对不同木质素衍生物掺量试样开展 EDS 试验。试验中,测试区域的面积约为 3.825×10^{-4} cm^2。根据相关试验结果计算不同试样中元素的质量分数,结果如图 6 所示。由图 6 可知,改良前后土体中的元素类型未发生改变,主要元素均为 C、O、Mg、Al、Si、S、K、Ca、Fe 等,主要的变化为不同掺量木质素衍生物改良土体中各元素的质量分数。素土中,主要的元素为 C、O、Si、Al、Ca、Fe、K 等,其中 C 和 Ca 两种元素均来源于构成黏性土的原生矿物,其质量分数分别为 14.41%和 0.47%。随着木质素衍生物掺量的增大,土体中除 C 和 Ca 之外,Si、Al、Fe 等元素的质量分数均呈现出一定程度减小,主要是由于木质素衍生物的加入对黏性土中其他元素产生了一定的稀释效应。随着木质素衍生物掺量的增大,C 和 Ca 两者的质量分数呈现出不同的增大趋势。C 元素由 0%掺量时的 14.41%增加至 3%掺量时的 15.26%。Ca 元素由 0%掺量时的 0.47%增加至 3%掺量时的 1.19%。Ca 元素的增加,有利于黏性土颗粒间联结作用的发生。但 Ca 元素参与的联结作用存在作用上限。当达到该上限后,进一步增加 Ca 元素,多余的 Ca 元素无法促进黏性土颗粒间联结作用的发生。与 SEM 试验结果进行对比可以发现,当木质素衍生物的掺量过多时,木质素衍生物形成的薄膜状结构出现聚集,无法有效地在黏性土颗粒之间形成联结。

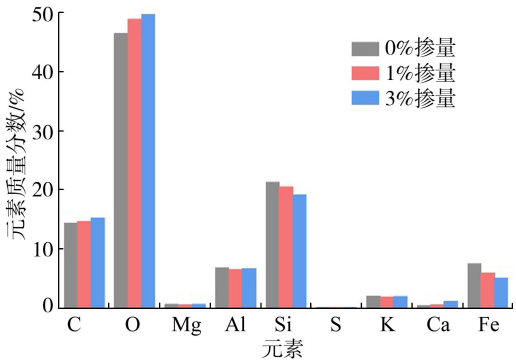


图 6　EDS 试验结果

Fig. 6　EDS test results

土体崩解是大量水的侵入造成的。当土样浸没于水中时,外界水分通过大量孔隙通道渗透,导致孔隙内基质吸力的变化和不均匀的水分分布,从而引发受力的不均衡,并在局部产生应力集中,促进微裂隙的扩展,最终致使土体结构的整体破坏。木质素衍生物形成的薄膜状结构相互连接形成的三维网状结构将黏性土颗粒联结为一个整体的同时,填充孔隙空间,大大减少了水分的优势渗流路径,使得土体的浸水增湿过程受到抑制(图 7)。

木质素衍生物对黏性土抗崩解特性的提升具体表现为:①表层未完全饱和的薄膜状结构吸水膨胀,进一步阻塞了渗流通道,导致孔隙连通性下降,从而使水分更难渗透至土体内部,延长了土体发生崩解破坏的时间;②薄膜状结构通过在土颗粒表面的包裹作用,减少了黏性土颗粒与水分的直接接触,在吸水饱和后形成

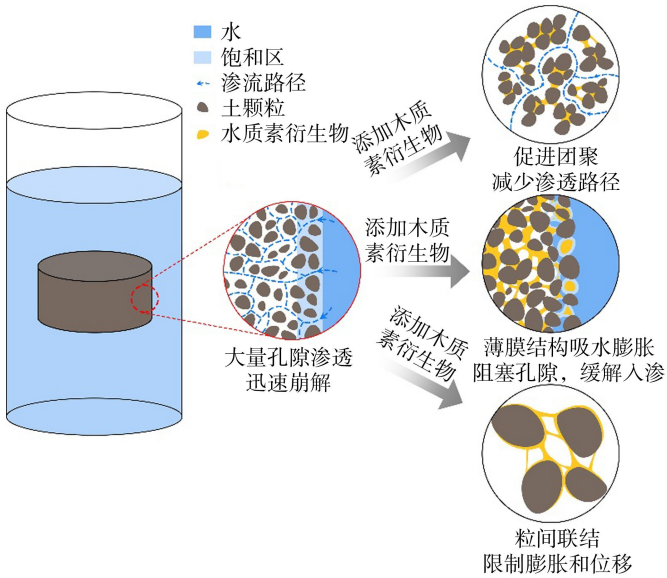


图7 木质素衍生物改良黏性土机理示意图

Fig. 7 Schematic diagram of mechanism of clayey soil improved by lignin derivatives

临时的疏水层,进而延缓了黏性土颗粒的湿化过程;③木质素衍生物改善的颗粒间胶结作用和土体团聚体稳定性限制了黏性土颗粒浸水后的不均匀膨胀变形及其伴随的差异性位移,减少了因水分场和孔隙分布不均所导致的基质吸力差异,有效防止了土体团块的崩落[22]。当木质素衍生物的掺量过高(3%)时,黏性土表面参与土颗粒之间联结作用的点位饱和,薄膜状结构发生聚集,从而形成一些块状的胶结物。这些胶结物能够填充一部分的孔隙,但无法有效地联结黏性土颗粒,使得黏性土的整体结构性发生降低,从而导致水分能够进入土体内部,加速了土体的湿化过程。此外,这些胶结物无法限制土颗粒吸水后的差异性位移。两者综合作用后的结果导致了木质素衍生物掺量过高的条件下,黏性土的抗崩解性出现下降的现象。

4 结 论

a. 木质素衍生物能显著延缓黏性土的崩解进程,其中1%掺量效果最优。1%掺量试样的初始饱和阶段延长至9 min,完全崩解所需时间较素土延长1倍。在相同浸润时间下,1%掺量试样的崩解率始终最低,表明1%掺量可有效提升土体的水稳定性与抗崩解性能。

b. 木质素衍生物对崩解速率及阶段持续时间的影响呈先升后降趋势,以1%掺量为转折点。1%掺量试样的平均崩解速率最低,较素土降低20.13%;其快速崩解阶段与缓速崩解阶段的持续时间分别为46 min和45 min,较素土分别延长14 min和30 min。掺量继续增大至2%或3%时,各阶段持续时间及抗崩解效果均出现下降。

c. 微观机理分析表明,木质素衍生物在黏性土颗粒表面形成薄膜状结构,包裹并联结颗粒,减少孔隙数量与连通性,从而抑制水分入渗和颗粒湿化崩落。但当掺量过高时,薄膜结构发生聚集形成块状胶结物,颗粒间联结减弱,整体结构性下降,导致抗崩解性能降低。

参考文献:

[1] 谢栎,吴建奇. 循环荷载作用下红黏土累积变形研究[J]. 地震工程学报,2019,41(6):1623-1629. (Xie Li, Wu Jianqi. Accumulative deformation of red clay in Southern Jiangxi under cyclic loading[J]. China Earthquake Engineering Journal,2019,41(6):1623-1629. (in Chinese))

[2] 杨南如,徐玲玲. 粘土的结构特点和开发利用[J]. 建筑材料学报,2003(4):337-344. (Yang Nanru, Xu Lingling. Structure characteristics of clay and its application in industries[J]. Journal of Building Materials,2003(4):337-344. (in Chinese))

[3] 卢毅,赵洪岩,蔡田露,等. 生物胶改良黏土抗崩解特性试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(3):64-71. (Lu Yi, Zhao Hongyan, Cai Tianlu, et al. Experimental study on disintegration resistance of clay improved by biological glue[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(3):64-71. (in Chinese))

[4] 惠迎新,张如江,袁东东,等. 粉煤灰改良土在公路工程中的应用研究进展[J]. 长安大学学报(自然科学版),2026,46(1):1-22. (Hui Yingxin,Zhang Rujiang,Yuan Dongdong,et al. Advances in application research of fly ash-stabilized soil for highway engineering[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition),2026,46(1):1-22. (in Chinese))

[5] 张春雷,朱伟,范公俊. 水泥固化高含水率淤泥的收缩性质[J]. 河海大学学报(自然科学版),2010,38(3):295-299. (Zhang Chunlei,Zhu Wei,Fan Gongjun. Shrinkage properties of cement solidified sludge with high water content[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2010,38(3):295-299. (in Chinese))

[6] Ahmed F,Marawan M S. Ground improvement using soil-cement columns:experimental investigation[J]. Alexandria Engineering Journal,2013,52(4):733-740.

[7] 向文俊,牛宏斌,施接锋,等. 宁淮高速公路改良膨胀土压实特性研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2004,32(4):434-436. (Xiang Wenjun,Niu Hongbin,Shi Jiefeng,et al. Study on compaction characteristics of improved expansive soil of Ninghuai Expressway[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2004,32(4):434-436. (in Chinese))

[8] 郭乔明,陈峰,李春志,等. 粉煤灰-矿渣地聚物固化长石粉路基填料水稳性与耐久性研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2026,54(1):119-128. (Guo Qiaoming,Chen Feng,Li Chunzhi,et al. Research on water stability and durability of fly ash and slag geopolymer-solidified feldspar powder roadbed filler [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2026,54(1):119-128. (in Chinese))

[9] Abiola A A,Zalihe N. A Laboratory model study on the performance of lime pile application for marine soils[J]. Marine Georesources & Geotechnology,2017,35(3):397-405.

[10] 张小平,施斌,陆现彩. 石灰改良膨胀土微孔结构试验研究[J]. 岩土工程学报,2003,25(6):761-763. (Zhang Xiaoping,Shi Bin,Lu Xiancai. Experimental study on micro-pore structure of expansive soil improved by lime[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2003,25(6):761-763. (in Chinese))

[11] Feofilova E P,Mysyakina I S. Lignin:chemical structure,biodegradation,and practical application (a review)[J]. Applied Biochemistry and Microbiology,2016,52(6):573-581.

[12] Lyu Zilu,Xu Jikun,Li Chenyu,et al. pH-Responsive lignin hydrogel for lignin fractionation[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering,2021,9(41):13972-13978.

[13] 张建伟,钱思羽,王小锯,等. EICP 与木质素联合改性粉土边坡抗雨蚀试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(1):70-76. (Zhang Jianwei,Qian Siyu,Wang Xiaoju,et al. Experimental study on resistance of EICP and lignin joint-modified silt slope to rain erosion[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(1):70-76. (in Chinese))

[14] 侯鑫,马巍,李国玉,等. 木质素磺酸盐对兰州黄土力学性质的影响[J]. 岩土力学,2017,38(增刊 2):18-26. (Hou Xin,Ma Wei,Li Guoyu,et al. Influence of lignosulfonate on mechanical properties of Lanzhou loess[J]. Rock and Soil Mechanics,2017,38(S2):18-26. (in Chinese))

[15] Breilly D,Fadlallah S,Froidevaux V,et al. Origin and industrial applications of lignosulfonates with a focus on their use as superplasticizers in concrete[J]. Construction and Building Materials,2021,301:124065.

[16] 孟令超,朴淼,张鸿秋,等. 干湿循环条件下木质素改良膨胀土胀缩特性[J]. 工程地质学报,2023,31(2):386-396. (Meng Lingchao,Piao Miao,Zhang Hongqiu,et al. Swelling nd shrinkage behaviour of expansive soil ameliorated by calcium lignosulphonate during wetting-drying cycles [J]. Journal of Engineering Geology,2023,31(2):386-396. (in Chinese))

[17] 王芮芮,项伟,王菁莪,等. 生态复合改性黄土抗水蚀与强度特性试验研究[J]. 安全与环境工程,2019,26(3):44-49. (Wang Ruirui,Xiang Wei,Wang Jing'e,et al. Experimental study on anti-water erosion ability and strength of loess by ecological composite modification[J]. Safety and Environmental Engineering,2019,26(3):44-49. (in Chinese))

[18] Ijaz N,Ye W,Rehman Z,et al. Numerical study on stability of lignosulphonate-based stabilized surficial layer of unsaturated expansive soil slope considering hydro-mechanical effect[J]. Transportation Geotechnics,2022,32:100697.

[19] Zhang Tao,Cai Guojun,Liu Songyu. Assessment of mechanical properties in recycled lignin-stabilized silty soil as base fill material[J]. Journal of Cleaner Production,2018,172:1788-1799.

[20] 贺智强,樊恒辉,王军强,等. 木质素加固黄土的工程性能试验研究[J]. 岩土力学,2017,38(3):731-739. (He Zhiqiang,Fan Henghui,Wang Junqiang,et al. Experimental study of engineering properties of loess reinforced by lignosulfonate[J]. Rock and Soil Mechanics,2017,38(3):731-739. (in Chinese))

[21] Orakoglu M E,Liu J,Lin R B,et al. Performance of clay soil reinforced with fly ash and lignin fiber subjected to freeze-thaw cycles[J]. Journal of Cold Regions Engineering,2017,31(4):4017013.

[22] 姬胜戈. 木质素磺酸钙改性分散性土试验研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2020.

(收稿日期:2026-06-09　编辑:刘晓艳)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.05.016

基于多输出机器学习的碎石桩复合地基本构参数反演方法

钱泽龙[1],岑威钧[1],刘 东[2],钱家豪[1],郑长海[1],韩建华[2]

(1.河海大学水利水电学院;2.中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司)

摘要:针对碎石桩复合地基邓肯 *E-B* 模型本构参数反演中存在计算效率低与多目标优化难的问题,提出了融合径向基函数(RBF)代理模型与多目标霜冰(MORIME)优化算法的智能反演方法。该反演方法采用拉丁超立方采样构建参数样本集,建立 RBF 代理模型替代有限元计算,并引入局部开发策略的 MORIME 优化算法实现快速反演。以某抽水蓄能电站单桩静载试验为例进行了碎石桩和桩周土邓肯 *E-B* 模型参数反演验证,结果表明:该反演方法具有较高的反演精度,将最佳反演参数回代有限元计算得到的不同测点曲线决定系数均在 0.99 以上;双模态局部开发策略可显著优化关键目标、降低迭代收敛次数。SHAP 敏感性分析进一步表明,桩周土参数 K 和 K_b 对桩顶位移与桩周土应力影响较大。

关键词:碎石桩复合地基;参数反演;邓肯 *E-B* 模型;RBF 代理模型;多目标优化;霜冰优化算法

中图分类号:TU472.3 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-1980(2026)05-0138-08

Inversion method for constitutive parameters of gravel pile composite foundation based on multi-output machine learning

Qian Zelong[1], **Cen Weijun**[1], **Liu Dong**[2], **Qian Jiahao**[1], **Zheng Changhai**[1], **Han Jianhua**[2]

(1. *College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University*;
2. *POWERCHINA Zhongnan Engineering Corporation Limited*)

Abstract: To address the problems of low computational efficiency and difficulties in multi-objective optimization during the inversion of constitutive parameters of the Duncan *E-B* model for gravel pile composite foundations, an intelligent inversion method integrating a radial basis function (RBF) surrogate model and a multi-objective rime (MORIME) optimization algorithm was proposed. In this method, Latin hypercube sampling was adopted to construct the parameter sample set; an RBF surrogate model was established to replace finite element computations; the MORIME optimization algorithm with a local exploitation strategy was introduced to achieve rapid inversion. A single-pile static load test at a pumped storage power station was taken as an example to verify the parameter inversion of the Duncan *E-B* model for the gravel pile and the surrounding soil. The results show that the inversion method has high inversion accuracy; the coefficients of determination of curves at different monitoring points obtained by substituting the optimal inverted parameters back into the finite element computations are all above 0.99; the dual-mode local exploitation strategy can significantly optimize key objectives and reduce the number of iterations for convergence. The SHAP sensitivity analysis further shows that the surrounding soil parameters K and K_b have a significant influence on the pile-top displacement and the soil stress near the pile top.

Key words: gravel pile composite foundation; parameter inversion; Duncan *E-B* model; RBF surrogate model; multi-objective optimization; rime optimization algorithm

近年来国家积极布局“双碳”战略与新型电力系统建设,抽水蓄能电站正加速规划和建设[1],不少抽水蓄能电站工程的大坝和库盆拟修建在深厚覆盖层之上,对库坝地基处理提出了很高的要求[2]。碎石桩复合地基因就地取材、施工效率高和变形可控而被广泛采用[3]。工程设计中,常用邓肯 *E-B* 模型作为水库大坝及其复合地基的本构模型进行受力变形分析,然而工程现场的碎石桩复合地基的本构参数获取困难,常规室内试验易受缩尺效应[4]、取样扰动与加载边界约束等影响,难以代表原位工作状态[5],导致参数取值存在偏差。相较之下,基于现场试验[6]与监测数据开展参数反演更能反映工程实际运行状态。为摆脱传统反演方

作者简介:钱泽龙(2001—),男,硕士研究生,主要从事土石坝抗震与地基处理研究。E-mail:hhuqzl@hhu.edu.cn

通信作者:岑威钧(1977—),男,教授,博士,主要从事土石坝抗震与工程渗流安全研究。E-mail:hhucwj@hhu.edu.cn

法带来的高计算成本和多指标权衡困难的弊端,近年来兴起的基于机器学习的参数反演方法,为实现本构参数的快速、稳健识别提供了新途径。陈湘生等[7]系统论述了智能岩土工程技术图谱,明确提出采用深度学习算法进行岩土工程参数预测是关键方法之一。He 等[8]构建了“即插即用”深度代理模型替代有限元计算,为参数反演的前期准备提供了通用工具。高玮等[9]提出了自适应采样融合代理模型的参数反演技术,采用麻雀搜索算法优化的双向支持向量回归(SSA-TSVR)代理模型显著降低了计算成本。Li 等[10]将径向基函数(radial basis function, RBF)代理模型与非支配排序遗传算法(NSGA-Ⅱ)相结合,以动力贯入试验为例进行了土体参数的多目标反演。程秋实等[11]将粒子群算法(PSO)与多输出最小二乘支持向量回归(MLSSVR)耦合,用基坑桩顶位移监测数据反演了土体参数。Wan 等[12]开发了一体化优化反演系统,用自适应遗传算法反演邓肯 *E-B* 模型参数。需要指出的是,尽管深度学习算法(如卷积神经网络(CNN)、长短期记忆(LSTM)、图神经网络(GNN)等)在大样本条件下预测精度高,但其对样本量与数据质量敏感,训练与调参的时间成本较高,若未设置物理约束条件,还可能出现预测结果与力学规律不一致的情况[13]。其他常用代理模型如克里金代理模型、高斯过程代理模型在小样本与不确定性表征方面具有优势,但在多输出、样本量上升或维度增大时超参数选择较为敏感[14];支持向量回归(SVR)、核方法与集成树虽训练高效,但对多输出和平滑可导响应的刻画存在局限性[15];完全依赖有限元计算的全局反演方法具有较强的物理一致性,但在多目标、多参数与大量调用有限元计算的情形下计算成本往往难以接受[16]。

基于上述分析,本文选择 RBF 代理模型与多目标霜冰(multi-objective RIME, MORIME)优化算法组合,构建了 RBF-MORIME 反演方法,以兼顾计算效率与多目标寻优能力,实现碎石桩复合地基本构参数的快速准确识别。

1　算法原理

1.1　RBF 代理模型

RBF 代理模型属于非线性映射模型,其基本思想是:给定一组训练样本点,利用核函数计算待预测点与样本点之间的距离,进而预测未知样本的输出值[17]。RBF 网络一般结构为 3 层,其中输入层输入原始决策变量;隐含层由若干 RBF 构成,每个节点对应一个 RBF,通常使用高斯函数作为基函数;输出层通过隐含层输出的线性组合得到预测值。

1.2　MORIME 优化算法的基本原理与框架

在碎石桩复合地基的参数反演过程中,往往需要同时最小化多个相互竞争的物理量误差,例如桩顶位移误差与桩-土应力误差。这种典型的多目标优化特征使得传统的单目标优化方法难以全面表征真实解空间。为此,引入基于自然启发的霜冰(RIME)优化算法,改进构建其多目标扩展版本——MORIME 优化算法,以高效求解工程反演中的多目标问题。

1.2.1　RIME 优化算法

RIME 优化算法源于冰霜凝结自然现象[18],具有随机性与逐渐收敛的“双重演化”特征。在单目标情形下,RIME 优化算法通过模拟霜冰种软冰针和硬冰针生长过程,来实现探索和优化[19]。其核心机制可分为以下 3 个主要部分:①软霜搜索策略。模拟软霜粒子的运动,自由态粒子会随机移动到软冰附近凝结,增大凝结面积并达到稳定态,通过逐步搜索与开发实现优化。②硬霜穿刺策略。该策略使粒子间实现交换,提高算法跳出局部最优的能力。③正向贪婪机制。仅保留个体适应度值提升的粒子,确保粒子能够持续不断地向更优化的方向更新,提高全局解集的质量,加快收敛速度。

1.2.2　多目标进化机制设计

MORIME 优化算法的核心是在保持 RIME 优化算法原始扰动搜索框架的同时,有效处理多个目标函数之间的冲突性和多样性。为此,本文引入了多目标进化策略,主要包括非支配排序、拥挤度距离计算、多目标精英档案更新和拐点提取 4 个关键机制。多目标进化机制流程如图 1 所示。

a. 非支配排序。将所有候选解按 Pareto 优劣等级分组,设 M 为目标函数数量,对任意两个解 $\boldsymbol{x}$、$\boldsymbol{y}$ 满足:

$$\forall i \in \{1,2,\cdots,M\},\ f_i(\boldsymbol{x}) \leqslant f_i(\boldsymbol{y}) \text{ 且 } \exists j,\ f_j(\boldsymbol{x}) \leqslant f_j(\boldsymbol{y}) \tag{1}$$

则称 $\boldsymbol{x}$ 支配 $\boldsymbol{y}$。通过这一关系,所有解可以被分为若干前沿。

b. 拥挤度距离计算。非支配排序可以识别“优劣等级”,但无法在同一等级中保证多样性。因此引入

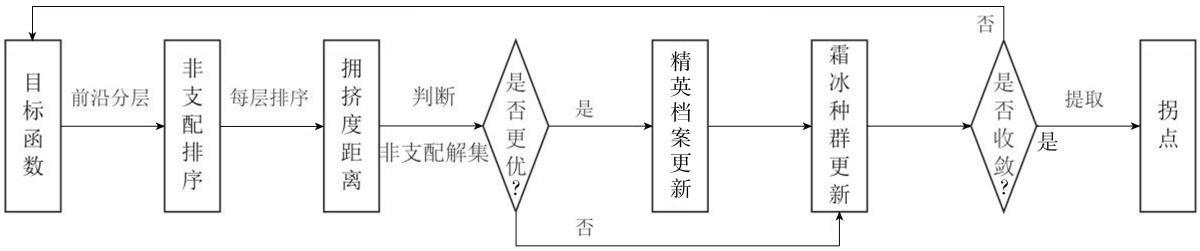


图1 多目标进化机制流程

Fig. 1 Flowchart of multi-objective evolution mechanism

"拥挤度距离"来衡量解在目标空间的分布稀疏程度,拥挤度距离越大,表示该解在目标空间中越"稀疏",优先保留。当同一前沿中存在多个解时,优先选择拥挤度距离大的个体保留。

c. 精英档案更新。在每次迭代过程中,为避免优秀解因种群替换而丢失,MORIME 优化算法设计了一个外部精英档案(archive),专门存储当前已发现的非支配解集。该策略确保了档案中始终保留最优且分布合理的解集,并用于指导下一代的扰动方向。

d. 拐点提取。为从最终 Pareto 解集中选取一个最具工程代表性的"折中解",MORIME 优化算法设计了拐点提取机制:将归一化后的 Pareto 解映射至二维空间并计算每个点到对角线($f_1+f_2=1$)的垂直距离,选取最大距离对应的解作为最终折中参数。

1.3 SHAP 分析

SHAP(shapley additive explanations)是一种基于博弈论的可解释性分析方法,能够为每个输入特征分配一个贡献值,定量评估其对模型预测结果的影响。其核心思想是通过计算每个特征在所有可能特征组合下的平均边际贡献,得到该特征的 SHAP 值。SHAP 值的正负反映该特征对预测结果的影响方向,绝对值大小则衡量影响程度。

2 参数反演流程

在工程实际中,碎石桩复合地基参数反演问题通常需借助有限元仿真手段求解,但由于计算量大、收敛速度慢,在多目标优化迭代过程中面临严重的计算瓶颈。为提高整体效率,本文引入 RBF 代理模型替代高耗时的有限元计算,并与 MORIME 优化算法进行耦合,构建高效的参数反演方法,详细反演流程如图 2 所示。

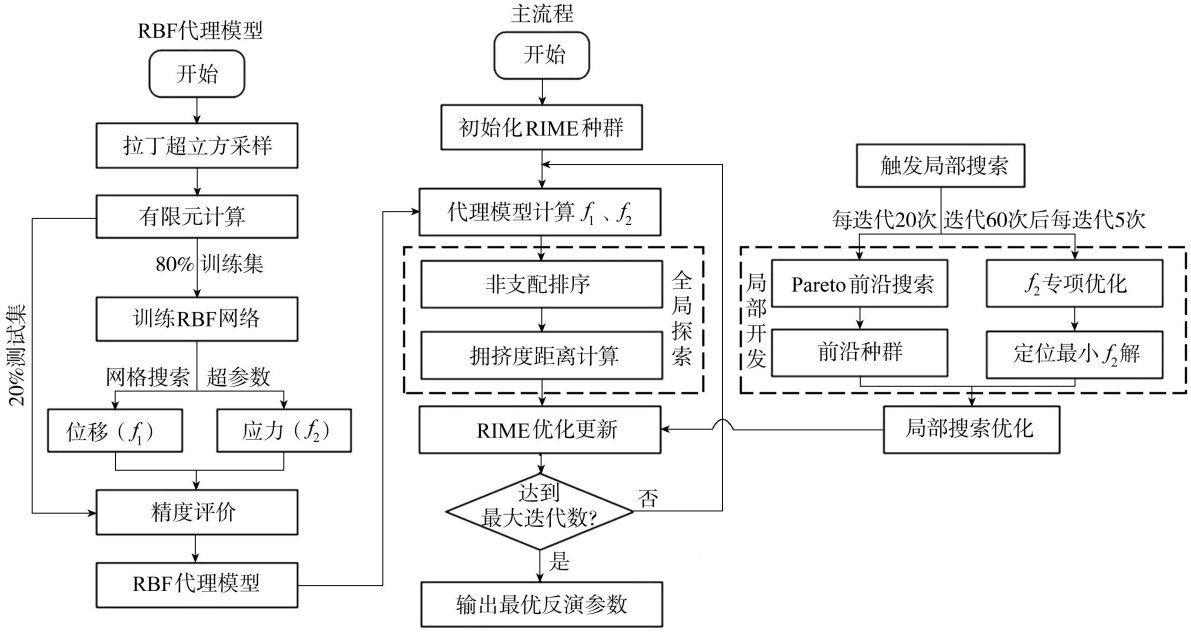


图2 基于 RBF-MORIME 反演方法的碎石桩复合地基参数反演流程

Fig. 2 Parameter inversion process for gravel pile composite foundation based on RBF-MORIME inversion method

RBF 代理模型与 MORIME 优化算法之间的耦合包括以下关键步骤:

a. 输入参数空间定义并采样。定义 8 个关键输入参数,分别为碎石桩和桩周土的邓肯 *E-B* 模型本构参数中的切线模量 K、切线模量指数 n、体积模量 K_b、体积模量指数 m,参数上、下限作为优化算法的搜索边界。采用拉丁超立方采样生成参数样本集,供有限元计算。

b. RBF 代理模型训练。利用有限元数值仿真生成的样本集(样本集包含输入参数及对应的输出沉降和应力),分别训练 3 个单输出 RBF 模型,输出桩顶位移、桩顶竖向应力和桩周土竖向应力。

c. 构造多目标反演函数。构建两个目标函数 f_1 和 f_2,分别为位移预测值与试验值的均方根误差(RMSE)和竖向应力预测值与试验值的 RMSE,接入 RBF 代理模型,进行参数反演。

d. 优化与反馈验证。经过若干代进化,MORIME 优化算法输出的 Pareto 前沿解集是最终选取的最优拐点解(折中解),将反演所得参数回代有限元模型中进行验证。

3　工程实例验证

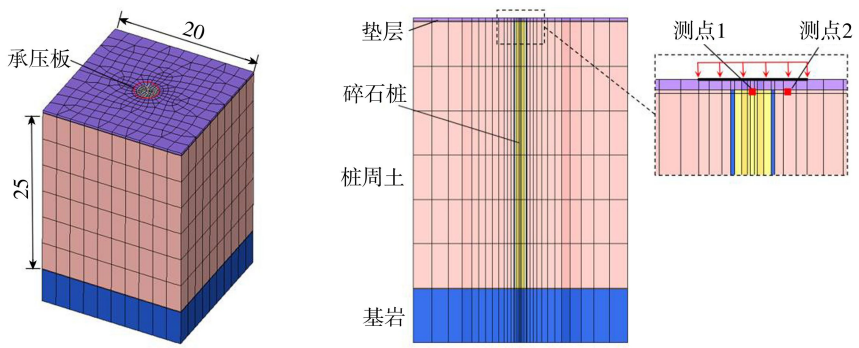
3.1　工程概况

某抽水蓄能电站上水库为一个天然岩溶洼地,存在较为深厚的黏土覆盖层,为满足水库蓄水要求,采取振冲碎石桩加固地基。为评估加固效果,现场进行单桩静载试验,碎石桩直径 1.0 m,桩长 25 m,圆形承压板直径 3.0 m,分 10 级加载,最大载荷 600 kPa。桩顶布置位移计,桩顶和土表埋设土压力盒,试验结果见表 1。结合现场试验建立三维有限元模型,该模型由承压板、板下垫层、碎石桩、桩周土和基岩 5 个部分组成,有限元模型见图 3,图中测点 1 为桩顶位移和竖向应力测点,测点 2 为桩周土竖向应力测点。

表 1　现场单桩静载试验结果

Table 1　Results of field single-pile static load test

荷载/kPa	桩顶位移/mm	竖向应力/kPa	
		桩顶	桩周土
60	−19.3	110.4	46.8
120	−43.2	177.4	95.0
180	−65.5	240.3	143.9
240	−94.1	274.0	176.9
300	−117.3	336.8	214.8
360	−148.3	424.0	238.9
420	−172.5	550.1	298.3
480	−209.3	615.1	330.9
540	−237.1	748.3	375.8
600	−272.9	860.0	400.3



(a) 整体网格(单位:m)　　(b) 剖面网格

图 3　三维有限元模型

Fig. 3　Three-dimensional finite element model

3.2　反演计算条件

以现场单桩静载试验测得的桩顶位移(测点 1)沉降曲线及桩顶(测点 1)和桩周土(测点 2)的竖向应力曲线为目标进行反演。以桩顶位移预测值与试验值的 RMSE 作为第一个目标函数(f_1),以桩顶与桩周土竖向应力的 RMSE 之和作为第二个目标函数(f_2),进行多目标寻优。

王建等[20-21]对邓肯 *E-B* 模型进行了参数敏感性分析,认为其中 K、n、K_b、m 参数对于材料应力变形影响较大,因此本文分别选取碎石桩和桩周土的上述4个本构参数进行反演。各材料已知本构参数取值与待反演参数取值范围根据经验和相关土工试验资料拟定,如表2所示。由于碎石桩为散粒体,因此黏聚力 c 按0考虑。

表2 已知本构参数取值与待反演参数取值范围

Table 2 Known constitutive parameter values and ranges of parameters to be inverted

材料	ρ/(g/cm^3)	φ_0/(°)	$\Delta\varphi$/(°)	c/kPa	K	n	R_f	K_b	m
垫层	2.24	52.1	7.0		1317.9	0.31	0.60	680.8	0.04
碎石桩	2.26	38.0		0	800~1000	0.20~0.30	0.82	350~500	0.17~0.27
桩周土	1.60	26.4		42.1	75~125	0.65~075	0.58	45~75	0.45~0.55

注:ρ 为密度;φ_0、$\Delta\varphi$ 分别为内摩擦角及变化值;R_f 为破坏比。

3.3 样本集构建及网络训练

按表2所示待反演参数的取值范围,采用拉丁超立方采样方法对各参数进行取样,取样数为100。采用取得的100组反演参数进行有限元计算,得到每组反演参数所对应的10级荷载下测点1的位移值、测点1和测点2的竖向应力值,部分结果统计如表3所示。

表3 反演参数与对应有限元计算结果

Table 3 Inversion parameters and corresponding finite element computation results

样本序号	碎石桩				桩周土				桩顶位移/mm	竖向应力/kPa	
	K	n	K_b	m	K	n	K_b	m		桩顶	桩周土
1	830.7	0.30	492.5	0.19	104.0	0.68	66.7	0.49	−18.5,…,−255.3	107.0,…,847.8	47.7,…,393.3
2	867.9	0.27	396.4	0.25	109.0	0.67	70.9	0.52	−18.2,…,−250.8	86.3,…,779.3	47.8,…,399.8
3	906.3	0.21	482.3	0.22	92.3	0.71	57.5	0.54	−23.3,…,−287.4	83.8,…,894.8	46.8,…,381.0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
99	955.3	0.23	420.9	0.18	111.7	0.65	64.9	0.52	−18.1,…,−248.9	108.5,…,833.9	47.9,…,398.0
100	935.7	0.23	467.5	0.23	110.1	0.68	61.7	0.48	−18.2,…,−251.0	109.3,…,856.3	47.8,…,394.1

每组反演参数与对应有限元计算结果为1组样本,共生成100组样本,按8∶2的比例划分训练集与测试集,采用网格搜索对RBF代理模型的扩展系数和最大神经元数量进行寻优,确定最佳超参数组合后,构建RBF代理模型。代理模型桩顶位移测试集的决定系数 R^2 为0.9907,桩顶和桩周土竖向应力测试集的决定系数 R^2 分别为0.9945和0.9992,表明建立的代理模型具有较高的可信度,能够替代有限元计算,可用于后续的模型优化。

3.4 反演结果

采用MORIME优化算法,设置初始种群数为20,精英档案最大容量数为40,迭代次数为200,以测点处预测值和试验值的RMSE为目标函数,对8个邓肯 *E-B* 模型本构参数进行反演,最优反演结果如表4所示。

表4 最优反演结果

Table 4 Optimal inversion results

材料	K	n	K_b	m
碎石桩	851.7	0.27	440.0	0.25
桩周土	93.7	0.66	72.9	0.52

采用反演后的最优参数进行有限元计算,以验证反演结果的合理性,结果如图4所示。桩顶在10级荷载下沉降曲线的决定系数 R^2 为0.9986,桩顶和桩周土在

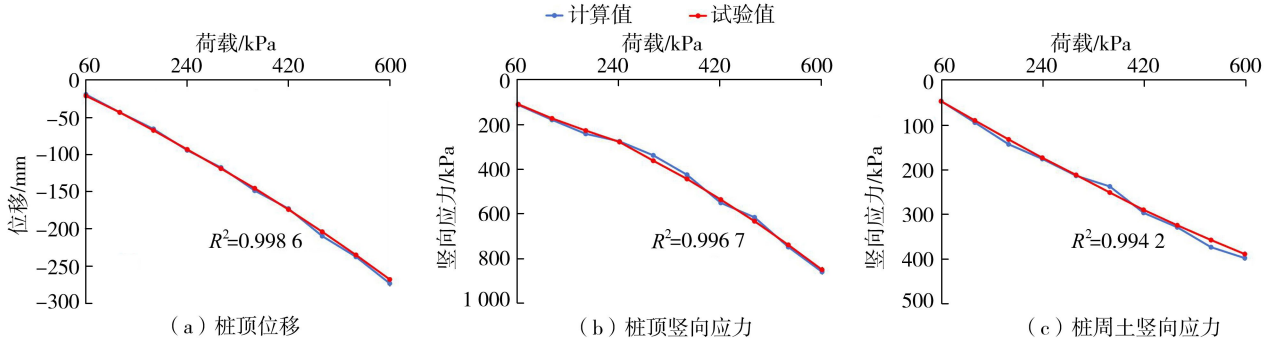


图4 有限元计算值与试验值对比

Fig. 4 Comparison between calculated finite element values and experimental values

10 级荷载下竖向应力曲线的决定系数 R^2 分别为 0.9967 和 0.9942,有限元计算曲线与试验曲线吻合度较高,证明 RBF-MORIME 反演方法是可靠且有效的。个别荷载级在局部区间仍存在微小偏差,原因可能来源于试验测量波动、土体空间非均质性、有限元模型理想化等。尽管如此,整体误差稳定,未见系统性偏差累积。

4　分析与讨论

4.1　局部开发策略

在多目标反演中,种群式搜索具备良好的全局探索能力,但在接近 Pareto 前沿时,目标函数常会陷入局部最优和弱梯度的困境中,导致收敛速度下降,尤其是不同量纲目标(如沉降与应力)之间会出现不均衡推进。为此,本文在 MORIME 优化算法中引入双模态局部开发策略,以加速前沿压缩和难收敛目标(f_2)的收敛,局部开发策略的优化效果如图 5 所示,其中无局部开发、专项局部开发(迭代 60 次后每迭代 5 次触发)、联合局部开发(每迭代 20 次触发)、双模态局部开发 4 种策略 f_2 最小值分别为 21.10、20.04、20.15、19.94 kPa,双模态局部开发收敛迭代次数为 109 次。未引入局部开发策略时,优化算法在 10~128、129~200 次迭代内收敛值变化梯度小,算法陷入局部最优,未能收敛;仅采用专项局部开发策略(f_2)时,当迭代 60 次后每迭代 5 次对当前精英档案下最优 f_2 进行模式化搜索,进一步降低 f_2,当专项局部开发策略在第 65 次迭代触发时,收敛值下降 0.4452,优化效果显著。仅采用联合局部开发策略时,每迭代 20 次,从当前 Pareto 前沿中选择拥挤度距离最大的 3 个解作为初始点进行模式搜索,以联合优化 f_1 和 f_2,当联合局部开发策略首次触发时,收敛值下降 0.3425,优化效果显著。当采用双模态局部开发策略时,在专项局部开发和联合局部开发的共同作用下,优化算法在 109 次迭代时成功收敛,f_2 达到最小值 19.94 kPa。上述结果表明,双模态局部开发策略有效结合了两种局部开发的优势,在 Pareto 前沿的推进和关键目标的优化方面效果显著。

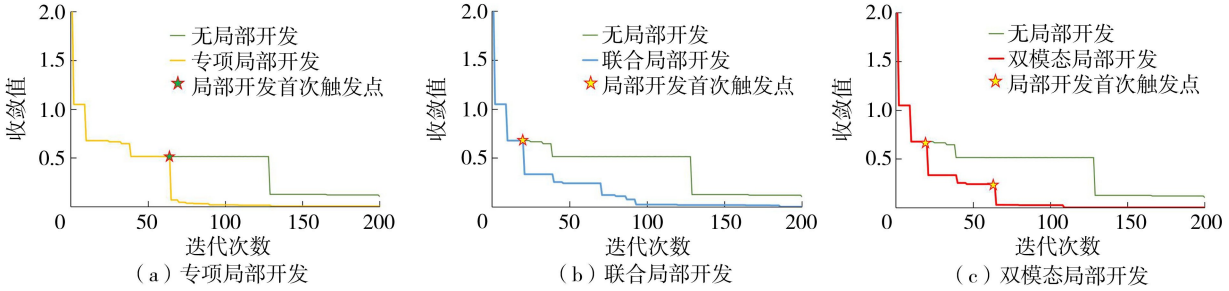


图 5　局部开发策略效果对比

Fig. 5　Comparison of effects of local exploitation strategy

4.2　敏感性分析

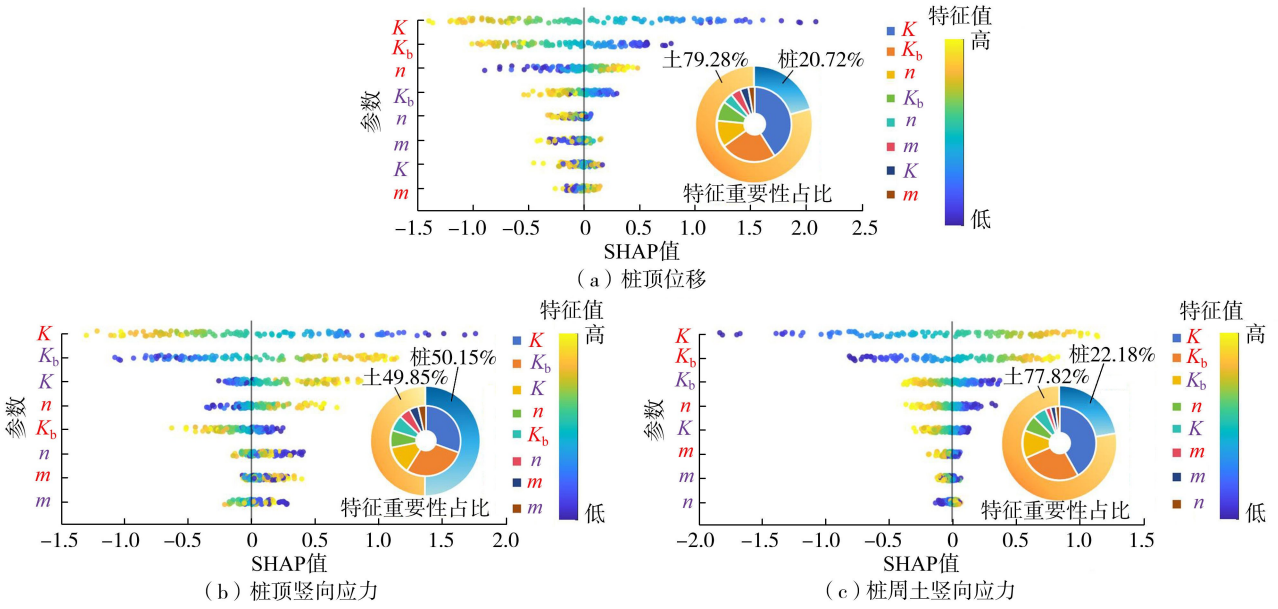
4.2.1　本构参数

为定量判断各反演参数对沉降和竖向应力的影响,采用 SHAP 方法对 100 组样本进行分析,各测点的计算结果如图 6 所示。由图 6 可知,对于桩顶竖向位移,因桩截面仅占荷载面积的 1/9,土体承担绝大部分荷载,所以桩顶位移主要由桩周土参数主导,桩周土总体参数重要性占比为 79.28%,其中参数 K 和 K_b 的影响最为显著,参数 n 和 m 影响较弱。对于桩顶竖向应力,一般认为随着桩土模量比的增大,桩土应力比近于线性增长,因而碎石桩参数与桩周土参数总体上对于桩顶竖向应力影响的重要性占比接近,其中桩周土参数 K 和碎石桩参数 K、K_b 也是对桩土模量影响较为直接的参数。对于桩周土竖向应力,桩周土总体参数重要性占比为 77.82%,其中桩周土参数 K、K_b 和碎石桩参数 K_b 的影响最为显著。

由图 6 可见:①碎石桩与桩周土参数 K、K_b 对沉降为负影响,即参数越大、材料越硬,沉降越小。②碎石桩参数 K、K_b 与桩周土参数 n 对桩顶竖向应力为正影响,即参数越大、桩材料越硬、土材料越软,桩顶竖向应力越大;桩周土参数 K、K_b 对桩顶竖向应力为负影响。③桩周土参数 K、K_b 对桩周土竖向应力为正影响,即参数越大、材料越硬,竖向应力越大;碎石桩参数 K、K_b 与桩周土参数 n、m 对桩周土竖向应力为负影响。

4.2.2　样本规模

为评估样本规模对计算精度与效率的影响,分别统计样本数为 100、150、200 时,3 个测点的平均误差,并记录 RBF-MORIME 反演方法总耗时(包含采集样本耗时),与直接采用有限元反演的结果进行对比分析,



注:参数符号紫色为碎石桩参数、红色为桩周土参数。

图 6 SHAP 值与相对重要性分析

Fig. 6 SHAP values and relative importance analysis

结果如表 5 所示。由表 5 可知,随着样本数增加,总耗时近乎线性增长,最终反演精度提升并不明显。相较于直接采用有限元法接入优化模型,选用 100 组样本进行训练时,RBF-MORIME 反演方法总耗时缩短了 94.19%,精度误差不超过 0.1%,表明在小样本条件下该反演方法以较小计算成本即可获得与有限元法近似一致的反演结果,兼顾精度与效率,具有良好的工程应用价值。

表 5 不同样本数下反演精度与耗时

Table 5 Inversion accuracy and time consumption under different sample numbers

样本数	R^2			时间/s
	桩顶位移	桩顶竖向应力	桩周土竖向应力	
100	0.9986	0.9967	0.9942	6224
150	0.9978	0.9970	0.9946	9358
200	0.9980	0.9971	0.9948	12955
有限元法	0.9992	0.9976	0.9952	107158

5 结 语

本文构建了融合径向基函数(RBF)代理模型-多目标霜冰(MORIME)优化算法的反演方法,旨在解决碎石桩复合地基邓肯 *E-B* 模型本构参数反演中计算成本高、多目标冲突难以权衡的问题。以某抽水蓄能电站现场单桩静载试验为例,验证了反演方法的有效性。验证结果表明,反演参数回代所得的验证曲线与试验曲线吻合度较高,证明反演方法有效且可靠;多目标优化时,采用专项局部开发和联合局部开发的双模态局部开发策略,能将迭代收敛次数降低至 109 次,应力目标函数降低至 19.94 kPa。反演结果表明,桩顶位移和桩周土竖向应力受桩周土参数影响较大,重要性占比分别达 79.28%和 77.82%,桩顶竖向应力受碎石桩和桩周土参数影响接近。碎石桩参数 K、K_b 与桩周土参数 n 对桩顶竖向应力为正影响;桩周土参数 K、K_b 对桩顶竖向应力为负影响,对桩周土竖向应力为正影响;碎石桩参数 K、K_b 与桩周土参数 n、m 对桩周土竖向应力为负影响。

参考文献:

[1] 贡力,董洲全,贾治元,等. 水利行业低碳技术研究热点与前沿趋势[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(4):1-9. (Gong Li, Dong Zhouquan, Jia Zhiyuan, et al. Low carbon technology research hotspots and frontier trends in the water conservancy industry[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2023,51(4):1-9. (in Chinese))

[2] 岑威钧,魏江梁,郑长海,等. 深厚软土覆盖层固结特性对面板堆石坝安全的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),

2025,53(2):39-46. (Cen Weijun, Wei Jiangliang, Zheng Changhai, et al. Influence of consolidation characteristics of deep soft soil overburden on the safety of a CFRD[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2025,53(2):39-46. (in Chinese))

[3] 刘汉龙,赵明华. 地基处理研究进展[J]. 土木工程学报,2016,49(1):96-115. (Liu Hanlong, Zhao Minghua, Review of ground improvement technical and its application in China[J]. China Civil Engineering Journal,2016,49(1):96-115. (in Chinese))

[4] 应宏伟,陈雨,王阳扬,等. 含碎石芯软黏土复合试样大三轴试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2024,51(11):104-114. (Ying Hongwei, Chen Yu, Wang Yangyang, et al. Study on large triaxial test of soft clay composite samples with gravel core[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences),2024,51(11):104-114. (in Chinese))

[5] 陈家琦,岑威钧,李邓军,等. 基于改进 ACMPSO 并行算法的土石坝本构参数反演[J]. 水利水电科技进展,2021,41(3):66-71. (Chen Jiaqi, Cen Weijun, Li Dengjun, et al, Inversion of constitutive parameters of earth-rock dams based on improved ACMPSO parallel algorithm[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2021,41(3):66-71. (in Chinese))

[6] 张福海,王保田,王炳奇,等. 大粒径碎石桩在饱和超软土地基中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2006,34(4):430-434. (Zhang Fuhai, Wang Baotian, Wang Binqi, et al. Application of large grain-size gravel piles to strengthening saturated super-soft ground[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2006,34(4):430-434. (in Chinese))

[7] 陈湘生,洪成雨,苏栋. 智能岩土工程初探[J]. 岩土工程学报,2022,44(12):2151-2159. (Chen Xiangsheng, Hong Chengyu, Su dong. Intelligent geotechnical engineering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2022,44(12):2151-2159. (in Chinese))

[8] He Xuzhen, Xu Haoding, Sheng Daichao. Ready-to-use deep-learning surrogate models for problems with spatially variable inputs and outputs[J]. Acta Geotechnica,2022,18(4):1681-1698.

[9] 高玮,李培远,赵志浩,等. 基于自适应采样和代理模型的滑带土参数反演[J]. 岩土工程学报,2026,48(4):687-696. (Gao Wei, LI Peiyuan, Zhao Zhihao, et al. Parameter inversion of slip zone soil based on adaptive sampling and surrogate models[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2026,48(4):687-696. (in Chinese))

[10] Li Yuqiong, Ying Liping, Lyu Zhiyuan, et al. A rapid interpretation RBF-NSGA-Ⅱ framework for multi-mechanical parameters from impact penetration technique[J]. Computers and Geotechnics,2025,185:107377.

[11] 程秋实,杨志双,秦胜伍,等. 基于 PSO-MLSSVR 的土体参数反演方法在深基坑工程中的应用[J]. 工程地质学报,2022,30(2):520-532. (Cheng Qiushi, Yang Zhishuang, Qin Shengwu, et al. Application of soil parameters inversion based on pso-mlssvr in deep foundation pit engineering[J]. Journal of Engineering Geology,2022,30(2):520-532. (in Chinese))

[12] Wan Chengjie, Xu Nianchun, Meng Jiangchao, et al. Integrated optimization system for geotechnical parameter inversion using ABAQUS, Python, and MATLAB[J]. Buildings,2025,15(7):1108-1108.

[13] Zhang Wenggang, Li Hongrui, Li Yongqin, et , al. Application of deep learning algorithms in geotechnical engineering: a short critical review[J]. Artificial Intelligence Review,2021,54(8):1-41.

[14] Tao Cui, Dan Pagendam, Gilfedder M. Gaussian process machine learning and Kriging for groundwater salinity interpolation[J]. Environmental Modelling & Software,2021(6):105170.

[15] He Chunlin, Zhang Yong, Gong Dunwei, et al. A review of surrogate-assisted evolutionary algorithms for expensive optimization problems[J]. Expert Systems With Applications,2023,217:119495.

[16] Ma Haiping, Zhang Yajing, Sun Shengyi, et al. A comprehensive survey on NSGA-Ⅱ for multi-objective optimization and applications[J]. Artificial Intelligence Review,2023,56(12):15217-15270.

[17] 孙超利,李贞,金耀初. 模型辅助的计算费时进化高维多目标优化[J]. 自动化学报,2022,48(4):1119-1128. (Sun Chaoli, Li Zhen, Jin Yaochu. Surrogate-assisted expensive evolutionary many-objective optimization[J]. Acta Automatica Sinica,2022,48(4): 1119-1128. (in Chinese))

[18] Su Hang, Zhao Dong, Heidari A A, et al. RIME: a physics-based optimization[J]. Neurocomputing,2023,532:183-214.

[19] 朱婷,颜七笙. 基于模态分解和 RIME-CNN-BiLSTM-AM 的风速预测方法[J]. 科学技术与工程,2025,25(20):8514-8525. (Zhu Ting, Yan Qisheng. Wind speed prediction based on modal decomposition and RIME-CNN-BiLSTM-AM[J]. Science Technology and Engineering,2025,25(20):8514-8525. (in Chinese))

[20] 王建,岑威钧,张煜. 邓肯-张模型参数反演的不唯一性[J]. 岩土工程学报,2011,33(7):1054-1057. (Wang Jian, Cen Weijun, Zhang Yu. Non-uniqueness of back-analyzed parameters of Ducan-Chang model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2011,33(7):1054-1057. (in Chinese))

[21] 李炎隆,李守义,丁占峰,等. 基于正交试验法的邓肯-张 *E*-B 模型参数敏感性分析研究[J]. 水利学报,2013,44(7):873-879. (Li Yanlong, Li Shouyi, Ding Zhanfeng, et al. The sensitivity analysis of Duncan-Chang *E-B* model parameters based on the orthogonal test method[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2013,44(7):873-879. (in Chinese))

(收稿日期:2025-08-19　编辑:熊水斌)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.05.017

整体冲刷对刘五店航道桥锚碇基础稳定性的影响

林路宇[1,2],蔡华忠[3],郭梦雨[4],刘宝森[1],贺 瑞[4],占晓明[5]

(1. 厦门路桥工程投资发展有限公司; 2. 长安大学公路学院; 3. 福建省交通建设质量安全中心;
4. 河海大学港口海岸与近海工程学院; 5. 浙江华东测绘与工程安全技术有限公司)

摘要:为研究整体冲刷对厦门刘五店航道桥锚碇承载性能的影响,开展了缩尺模型试验与有限元数值模拟分析。采用均质石英砂模拟锚碇周围土体,在不同冲刷深度工况下,分别进行了单向加载、单向单级加卸载和单向分级递增循环加卸载模型试验,得到了锚碇的荷载-位移曲线;利用模型试验结果对有限元建模方法进行了验证,构建了考虑真实土壤分层与换填加固的原型锚碇三维数值模型。缩尺模型试验结果表明,每增加 0.33H(H 为锚碇埋深)的冲刷深度,锚碇极限承载力降低约 14.3%;不同加载方式对极限承载力影响较小。数值模拟结果表明:在原型场地中,当冲刷深度以 0.2H 为阶梯增大时,锚碇极限承载力以约 10.3%的速率递减,与缩尺模型试验结果虽数值上略有差异但整体规律一致;随着冲刷加剧,锚碇破坏模式由倾覆为主逐渐演化为以整体滑移为主;在锚碇周围土体本构参数中,内摩擦角对极限承载力的影响最为显著,其次为黏聚力,弹性模量的影响相对较小。

关键词:锚碇;分体式沉井基础;整体冲刷;物理模型试验;有限元数值模拟;刘五店航道桥

中图分类号:U443.24;TV148 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-1980(2026)05-0146-09

Effects of general scour on the stability of the anchorage foundation of the Liuwudian Navigation Channel Bridge

Lin Luyu[1,2], **Cai Huazhong**[3], **Guo Mengyu**[4], **Liu Baosen**[1], **He Rui**[4], **Zhan Xiaoming**[5]

(1. *Xiamen Road and Bridge Engineering Investment Development Co., Ltd.*;
2. *School of Highway Engineering, Chang'an University*;
3. *Fujian Provincial Transportation Construction Quality and Safety Center*;
4. *College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University*;
5. *Zhejiang Huadong Surveying and Mapping & Engineering Safety Technology Co., Ltd.*)

Abstract: To investigate the influence of general scour on the bearing performance of the anchorage of Xiamen Liuwudian Navigation Channel Bridge, scaled model tests and finite element numerical simulations were conducted. Homogeneous quartz sand was adopted to simulate the soil surrounding the anchorage. Under working conditions with different scour depths, scaled model tests including unidirectional loading, unidirectional single-stage loading-unloading and unidirectional step-increasing cyclic loading-unloading were performed to obtain the load-displacement curves of the anchorage. The finite element modeling method was validated against the test data, and a three-dimensional numerical model of the prototype anchorage, considering actual soil stratification and replacement reinforcement, was established. The scaled model test results reveal that the ultimate bearing capacity of the anchorage decreases by approximately 14.3% with each additional scour depth of 0.33H (H denotes the embedded depth of the anchorage), and different loading modes exert slight effects on the ultimate bearing capacity. Numerical simulation results indicate that at the prototype site, the ultimate bearing capacity declines at a rate of about 10.3% when the scour depth increases stepwise by 0.2H. Although slight numerical differences exist between simulation and test results, their overall variation trends are consistent. As scour intensifies, the failure mode of the anchorage gradually transitions from overturning-dominated to global sliding. Among the constitutive parameters of surrounding soil, the internal friction angle exerts the most significant influence on the ultimate bearing capacity, followed by cohesion, whereas the elastic modulus has a relatively minor effect.

Key words: anchorage; split-type caisson foundation; general scour; physical model tests; finite element numerical simulation; Liuwudian Navigation Channel Bridge

---

基金项目:2024 年度福建省交通运输科技计划项目(YB202418)

作者简介:林路宇(1983—),男,高级工程师,硕士,主要从事悬索桥锚碇基础稳定性研究。E-mail:228830117@qq.com

通信作者:贺瑞(1987—),男,教授,博士,主要从事海底基础动力特性研究。E-mail:herui@hhu.edu.cn

悬索桥凭借其强大的跨越能力,已成为跨越宽阔水域、深邃峡谷等复杂自然条件的关键桥型。悬索桥主缆系统承受的复杂荷载通过锚固系统传递至地基,因此锚碇的承载性能对桥梁整体安全具有决定性影响[1-3]。在国家海洋强国战略的推动下,悬索桥正在我国东南沿海广泛布局,并向“大跨径、深水、智能化、耐久性”方向发展。

工程实践中,悬索桥常采用重力锚和隧道锚,并在此基础上发展出沉井-桩复合式、齿坎式、根式等多种复合锚碇,以适应复杂的地质条件与多变的荷载环境。现有研究主要聚焦于锚碇基础稳定性评价、桥型比选、承载机理、失稳模式等方面。在研究方法上,通常结合数值模拟与物理模型试验,数值模拟具有分析效率高、可直接基于原型建模、能考虑多种复杂工况等优势,但需引入一定的本构假定与几何简化,其结果可靠性通常依赖试验验证[4-5];物理模型试验包括室内 1g 模型试验与离心模型试验等,可较为真实地反映结构-地基体系的复杂非线性响应,是揭示新型结构受力机理与验证数值模型的重要手段[6-7]。二者结合可显著提升锚碇稳定性研究的可靠性。

因大跨径悬索桥建设需求,各类新型锚碇不断涌现,汪明元等[8]提出了沉井-钻孔灌注桩的复合锚碇结构,并与沉井锚碇对比证实了其优越性;何亚东[9]基于有限元模型,对齿坎式重力锚的失效模式和最大承载力进行了分析;Wu 等[10]通过双轴剪切蠕变试验研究了软岩上带凹槽重力锚的长期稳定性,发现凹槽的抗滑作用有时间依赖性;Cui 等[11]系统研究了根式桩锚碇基础的静力性能,并推导了锚碇水平位移引起的主塔位移、主梁挠度和内力变化的解析公式。锚碇结构的失稳破坏大致包含滑移破坏、倾覆破坏、地基剪切破坏和复合破坏等形式,取决于荷载水平、岩土性质以及结构设计[12-13],鲁志强等[14]发现齿坎和回填均能提升锚碇承载性能,相比于平底锚碇的滑移破坏,齿坎将使锚碇的破坏形式变为齿坎附近岩体的剪切破坏和锚碇的倾覆破坏。

目前,重力式锚碇的研究多集中于规则矩形或椭圆形基础,而对采用分体式矩形沉井基础的重力式锚碇研究相对有限,且现有研究多针对常规尺寸或中小型锚碇,对于深埋、大尺寸的锚碇,其受力复杂程度远超常规工程,相关研究尚不充分。此外,针对冲刷作用下锚碇承载性能及其影响因素的研究仍相对缺乏,不足为承载力的估算提供理论支撑。

针对分体式沉井深大锚碇受力状态复杂且在海域中易受到冲刷导致其服役性能退化的问题,本文采用物理模型试验和数值模拟相结合的方法,对极端冲刷下的刘五店航道桥分体式沉井深大锚碇基础的承载力进行分析,并对影响锚碇承载力的关键参数进行了敏感性分析。

1　工程概况

厦门第三东通道是推动厦门岛内外一体化发展、构建东南沿海综合交通枢纽的重大交通基础设施,刘五店航道桥为其控制性工程,是福建省内跨径最大的桥梁,也是国内少数离岸式海中悬索桥之一。主桥采用三跨吊五跨连续悬索桥方案,桥跨布置为 130 m+380 m+928 m+380 m+130 m,其结构示意见图 1。

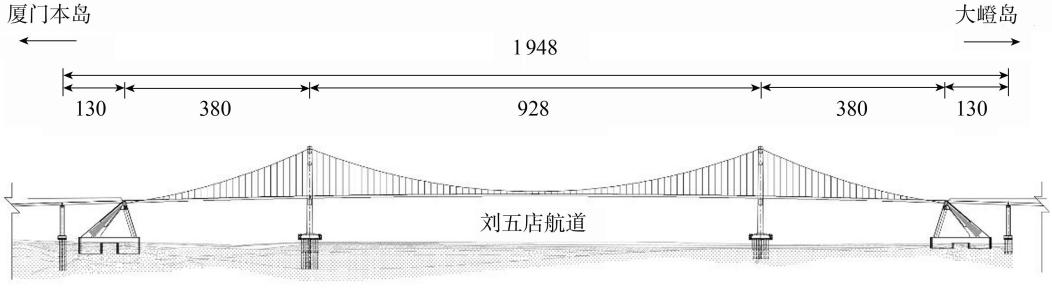


图 1　刘五店航道桥结构示意图(单位:m)

Fig. 1　Schematic diagram of Liuwudian Navigation Channel Bridge(unit:m)

选取地质条件相对不利、风险较高的西锚碇作为研究对象。西锚碇采用分体式矩形沉井基础,前、后沉井平面尺寸均为 66 m×48 m(横桥向×顺桥向),高度均为 33.9 m,角隅采用半径为 3.8 m 的圆角过渡;前后沉井之间通过宽 29.5 m、高 11.75 m 的钢壳混凝土系梁连接。锚碇整体宽度为 125.5 m,高度为 74.1 m,全桥设两根主缆,锚碇散索鞍处主缆加载中心距为 45.5 m,锚索与水平面夹角为 10.08°。

开挖范围内地层以软土与风化岩为主,基础持力层主要为砂土状强风化花岗岩,局部为全风化花岗岩,通过换填加固进行局部加强,锚碇埋深 H 约 23.4 m。

2 缩尺模型试验

2.1 模型参数

2.1.1 相似理论及相似比的推导

通过几何相似比 C_l、重力加速度相似比 C_g 和容重相似比 C_γ 3 个基础比尺,可进行其他变量相似关系的推导。本文试验中,综合考虑原型尺寸(125.5 m)与实验室土槽尺寸,确定 $C_l=400$;试验在 1g 重力场中进行,$C_g=1$;模型砂容重(15.18 kN/m^3)与原型土层(17.17~18.74 kN/m^3)相近,取 $C_\gamma\approx 1$。

2.1.2 模型土的选择

鉴于分层土难以准确模拟各土层的相对刚度比,易对破裂面的自然发展产生干扰,影响试验结果的可靠性,故采用均质土替代原型多土层。同时,本文试验主要研究锚碇的极限承载状态,重点关注土体强度参数,弹性模量影响较小,其取值无需严格遵循相似准则中难以实现的弹模比。此外,在 1g 模型试验中,黏聚力需按原型土的 1/400 进行缩放,而内摩擦角按 1∶1 保持不变,导致合适的黏性土难以选取。为此,选用黏聚力近似为零、内摩擦角与原型相近的均质石英砂,有效解决了强度参数缩放不协调的问题,确保了试验结果与原型工程的可比性。通过多方案比选,选用密实度约 88%、粒径 0.2~0.6 mm、中值粒径约 0.42 mm 的石英砂作为模型土。原型土与模型土内摩擦角分别为 21.5°~30°、25°。

内摩擦角是控制极限承载力的关键强度参数,本文专注于锚碇极限状态的研究,因此采用均质石英砂模拟原型地基具有一定的合理性。

2.1.3 模型锚碇的设置

模型锚碇尺寸如图 2 所示,模型体积为 4.15 L,质量为 10.4 kg,重力 G 为 101.92 N,在锚碇底部无砂土埋置(裸露)工况下进行加载试验,此时承载力主要由底面与砂土间摩擦阻力提供,试验获得的极限承载力约为 0.33G,计算可得锚底的等效摩擦系数约为 0.33,与工程中基底换填后的摩擦系数不小于 0.31 的要求相符。

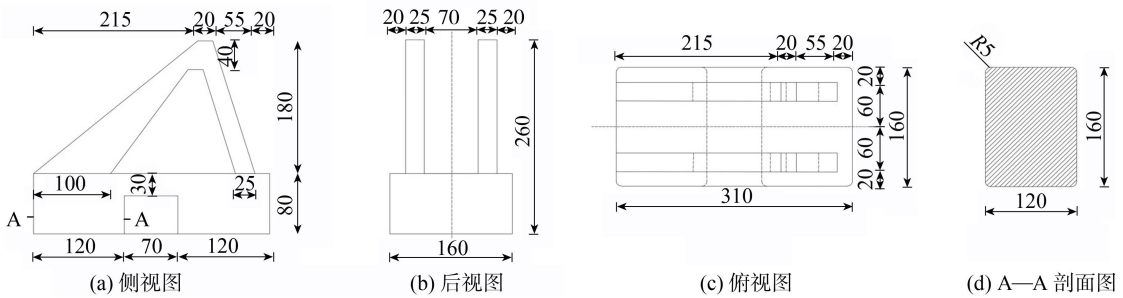


图 2 模型锚碇尺寸参数(单位:mm)

Fig. 2 Dimensional parameters of model anchorage (unit: mm)

2.1.4 1g 模型试验中尺度效应的影响

尺度效应指缩尺模型中,材料力学性质与物理现象无法严格按比例推演至原型。在 1g 模型试验中,模型土体自重应力远低于原型,导致土体剪胀增强、峰值内摩擦角偏高,从而使抗剪强度高于原型高应力状态下的真实值。因此,1g 模型试验不宜直接定量外推原型极限承载力,其价值在于定性揭示冲刷深度对锚碇承载力的影响规律,并为原型数值模拟提供建模依据。

2.2 试验装置

试验在河海大学港航结构实验室的近海岩土工程实验室内 1.0 m×1.0 m×1.0 m 的土槽中进行,为减小边界效应的影响,土体在水平方向宽度应大于 3~5 倍的锚碇特征宽度,底部边界距锚碇基底应大于 2~4 倍的锚碇埋深,模型锚碇特征宽度 310 mm、最大埋深 60 mm。锚碇基底距土槽底部 940 mm,远超要求,底部边界效应可忽略。侧边界方面,土体水平方向宽度约为锚碇特征宽度的 3 倍,锚碇居中,前缘距侧壁 345 mm。根据 Wang 等[15]提出的临界宽度概念,结合模型土内摩擦角为 25°,算得锚碇前侧土体被动破坏楔体的最大

水平延伸长度约 94 mm,远小于前缘至侧壁距离,滑动破裂面可完全发展,侧边界效应可忽略。

试验中,在锚碇散索鞍位置焊接一刚性横梁,缆索固定于横梁中部,经定滑轮变向后,通过砝码系统模拟主缆荷载的施加,试验采用 10 N 和 4 N 两级砝码,缆索加载方向与水平方向夹角为 10°。设置位移传感器捕获锚碇在加载时的位移和转角,并通过 DH3820N 动态采集仪采集数据,位移传感器量程为 20 cm,灵敏度为 0.2 mV/mm,以半桥电路接入动态采集仪;信号采集器量程为±0.05,最小分辨率为 0.5×10^{-6}[16]。试验装置如图 3 所示。

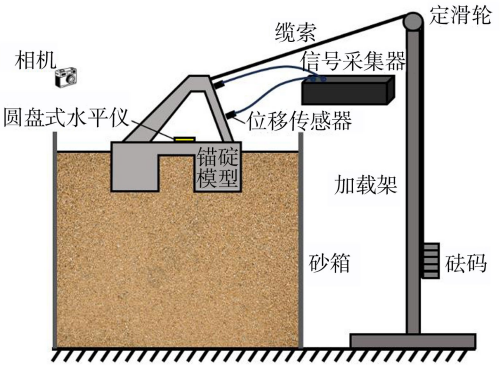


图 3　试验装置示意图

Fig. 3　Schematic diagram of the experimental setup

2.3　试验方案

物理模型试验的研究内容包括两部分:一是改变锚碇埋深,研究冲刷深度对锚碇极限承载力的影响;二是校准数值模型,得到可靠的建模方法后,建立原型锚碇模型进行模拟分析。

为最大化考虑冲刷深度的影响,假设锚碇周围发生整体冲刷,分别设置了无冲刷、冲刷深度 0.33H 和 0.66H 共 3 种工况,各工况下依次施加不同的荷载:①T1 组单向加载,用于确定不同冲刷深度下锚碇极限承载力;②P1 组单向单级加卸载,用于研究滞回特性与残余变形;③P2 组单向分级递增循环加卸载,用于考察循环荷载下土体刚度退化及累积位移。共得到 9 组物理试验方案,依次记为 T1-1、T1-2、T1-3、P1-1、P1-2、P1-3、P2-1、P2-2、P2-3(编号中"-"后的数字 1、2、3 分别表示无冲刷、冲刷深度 0.33H 和 0.66H 工况)

2.4　试验结果

试验中先逐级增加砝码至锚碇失稳,随后进行单向单级加卸载和单向分级递增循环加卸载试验。每次试验前均重新装填砂土。图 4 为各工况下锚碇模型的荷载-位移曲线(图中 F 为施加的主缆拉力,G 为锚碇重力,U 为锚碇散索鞍处的位移,B 为锚碇宽度,以 F/G、U/B 分别将主缆拉力和锚碇位移进行无量纲化)。由图 4 可知,各冲刷深度对应的极限承载力分别为 0.57G、0.51G、0.41G;不同加载方式下,锚碇的极限承载力基本保持不变。冲刷深度 0.66H 工况下,荷载-水平位移曲线在卸载过程中会出现明显的折角,原因是随着荷载减小,锚碇重心位置逐渐恢复,残余变形由荷载控制向自重控制转化。在冲刷深度较浅工况下,单向分级递增循环加卸载在摩擦力承载达到极限后出现明显的刚度退化,可见循环加卸载会引起砂土刚度的衰减。

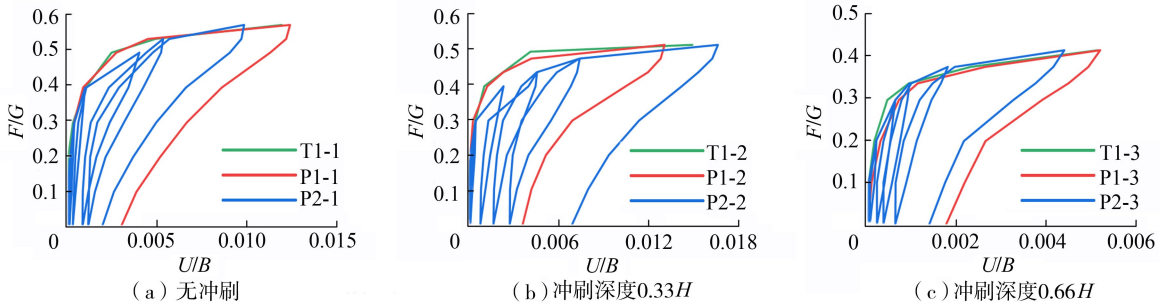


图 4　不同工况下 3 种加载方式锚碇散索鞍处的荷载-位移曲线

Fig. 4　Load-displacement curves at the splay saddle of the anchorage under three loading patterns and different working conditions

由图 5 可以看出,锚碇最大的水平位移和残余位移均出现在冲刷深度 0.33H 的工况中;锚碇在小变形阶段的初始刚度随冲刷深度变化不显著,主要受锚碇自重控制;随冲刷加剧,荷载-位移曲线更早进入屈服阶段,极限承载力逐步降低,若按线性近似,每增加 0.33H 的冲刷深度会导致锚碇极限承载力降低约 14.3%。

3　有限元数值模拟

3.1　建模方法可靠性验证

根据物理模型试验构建三维数值模型,对 3 种冲刷深度工况进行计算,提取锚碇散索鞍处的荷载-位移

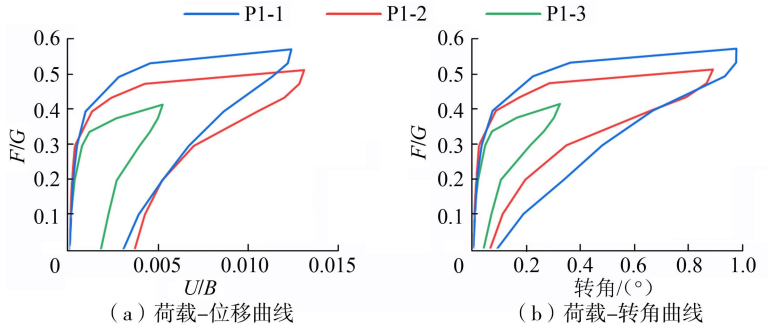


图5 不同工况下锚碇散索鞍处的荷载-位移与荷载-转角曲线

Fig. 5 Load-displacement and load-rotation curves at the splay saddle of anchorage under different working conditions

曲线与物理模型试验结果对比,结果如图6所示,可见数值模拟与物理模型试验得到的荷载-位移曲线在弹性阶段、屈服阶段和破坏前后的总趋势均吻合较好,极限承载力和对应位移亦较为接近。说明本文采用的本构模型、建模流程、边界条件及接触模拟方法能够合理反映锚碇-地基体系的受力特征,为后续研究提供了可靠的建模依据。

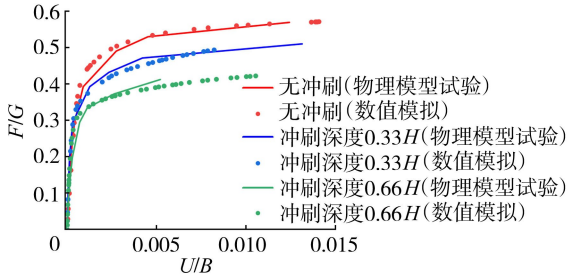


图6 不同工况下锚碇散索鞍处荷载-位移曲线对比

Fig. 6 Comparison of load-displacement curves at anchorage splay saddle under different working conditions

3.2 原型锚碇数值模型的构建

基于原型建立三维数值模型,如图7所示(图中γ为容重,E为弹性模量,φ为内摩擦角)。数值模型由锚碇、换填加固混凝土板和锚碇周围土体(共7层)组成。土体采用Mohr-Coulomb(MC)本构准则模型,MC本构准则虽在描述土体屈服前非线性刚度衰减上有局限,但本文主要研究极限状态,极限承载力主要由土体抗剪强度参数控制,该本构准则可精准刻画土体宏观剪切破坏包络线,且其数值收敛性更好,完全适用于本文研究。

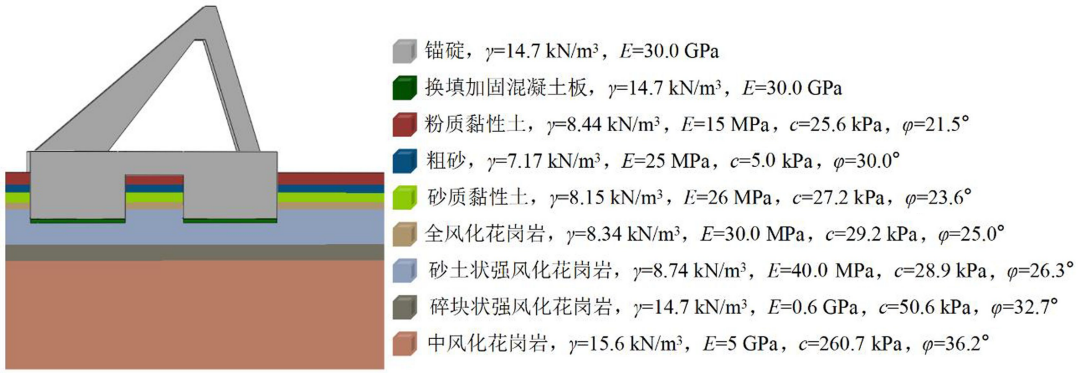


图7 原型锚碇数值模型

Fig. 7 Numerical model of the prototype anchorage

西锚基底换填加固后,底部摩擦系数不小于0.31,在模型中考虑为锚碇底部相互分离的两块混凝土板,锚碇和混凝土板均采用线弹性本构模型。土体尺寸为628 m×330 m×130 m,采用MC本构准则模型。

模型采用八节点六面体线性减缩积分单元(C3D8R),整体共计有161 804个节点、150 450个网格。由于土体模型尺寸较大,因此采用渐变过渡型网格,经网格密度可靠性验证,当前网格密度满足试验要求。

主缆荷载与水平方向夹角为 10.08°,锚碇顶部两根主缆之间的水平距离为 45.5 m,主缆拉力以面荷载的形式施加于前锚室底板上。模型中切向接触采用库仑摩擦模型(罚函数形式),法向接触采用“硬接触”。

整个分析过程分为 3 步:①地应力初始平衡。在未激活锚碇与换填加固混凝土板的情况下建立初始地应力场。②坑内开挖与结构激活。模拟基坑内土体开挖并激活锚碇与换填加固混凝土板单元。③主缆荷载加载分析。施加主缆水平拉力,直至体系进入极限状态。在原型三维锚碇模型基础上,设置冲刷深度、基底摩擦系数及土体材料参数变化的多个工况,用于开展参数敏感性分析。

3.3　模拟结果与分析

3.3.1　无冲刷工况

JTG/T D65-05—2015《公路悬索桥设计规范》规定运营阶段锚碇的水平位移不宜大于主跨跨径的 0.01%,竖向位移宜不大于主跨跨径的 0.02%。本桥主跨跨径为 928 m,对应水平与竖向位移限值分别为 92.8 mm 和 185.6 mm。数值分析结果如图 8 所示,锚碇在主缆拉力作用下以水平位移为主,竖向变形较小,因此可采用散索鞍水平位移达到 92.8 mm 时对应的主缆拉力作为锚碇在运营工况下的允许承载力,其值约为 0.047G。锚碇失稳破坏时,对应的极限主缆拉力约为 0.5G。

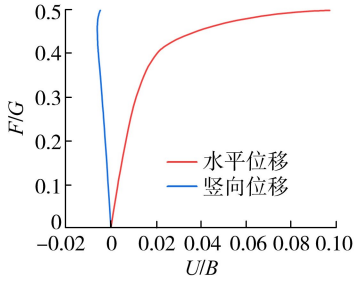
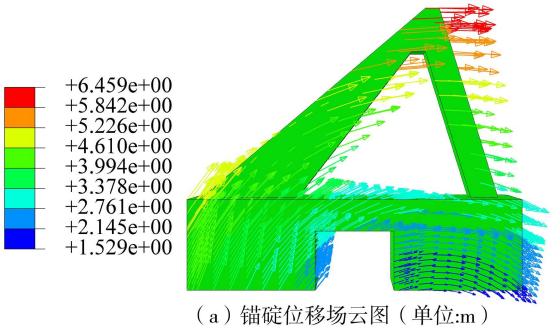


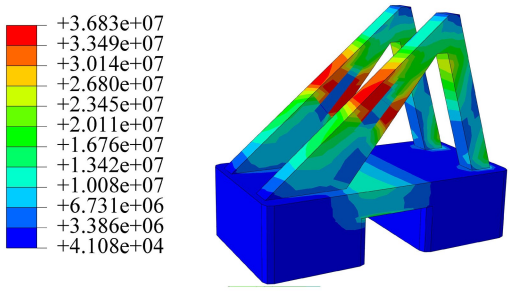
图 8　无冲刷工况下锚碇散索鞍处荷载-位移曲线

Fig. 8　Load-displacement curve at the splay saddle of anchorage under no scour condition

极限主缆拉力下锚碇状态如图 9 所示,可见极限主缆拉力导致锚碇前端下沉、后端上拔,整体绕基底前侧向前倾覆,最大位移出现在锚顶前缘;锚碇前锚室、散索鞍支墩、前后沉井系梁处应力水平较高,沉井基础箱体应力相对较小,在结构设计中应适当提高上述关键部位的刚度。



(a) 锚碇位移场云图(单位:m)



(b) 锚碇应力云图(单位:Pa)

图 9　极限主缆拉力下锚碇状态

Fig. 9　Anchorage behavior under ultimate main cable tension

锚碇周围土体的位移、应力与等效塑性应变见图 10,极限主缆拉力作用下,锚碇前侧上部土体隆起,基底前缘形成凹陷,锚碇后侧土体有明显下沉;土体最大应力集中在锚碇前趾处的基底接触区;随着荷载增加,塑性区逐渐扩展并最终贯通,导致地基剪切破坏。

3.3.2　参数敏感性分析

在原型数值模拟基础上,进行锚碇极限承载力参数分析,分析过程中只单独改变某一参数,分别研究冲刷深度、锚碇底部摩擦系数、锚碇四周土体材料参数(内摩擦角、弹性模量、黏聚力)对锚碇承载性能的影响,分析方案见表 1。

表 1　数值模型分析方案

Table 1　Numerical analysis schemes

冲刷深度		摩擦系数		内摩擦角		弹性模量		黏聚力	
分析组次	参数取值	分析组次	参数取值	分析组次	参数取值	分析组次	参数取值	分析组次	参数取值
R-1	0.2H	S-1	0.1	T-1	φ_0	U-1	E_0	V-1	c_0
R-2	0.4H	S-2	0.2	T-2	$1.2\varphi_0$	U-2	$1.2E_0$	V-2	$1.2c_0$
R-3	0.6H	S-3	0.3	T-3	$1.2^2\varphi_0$	U-3	1.2^2E_0	V-3	1.2^2c_0
R-4	0.8H	S-4	0.4	T-4	$1.2^3\varphi_0$	U-4	1.2^3E_0	V-4	1.2^3c_0
R-5	1.0H	S-5	0.5	T-5	$1.2^4\varphi_0$	U-5	1.2^4E_0	V-5	1.2^4c_0

注:φ_0、E_0、c_0 分别为基准内摩擦角、基准弹性模量和基准黏聚力。

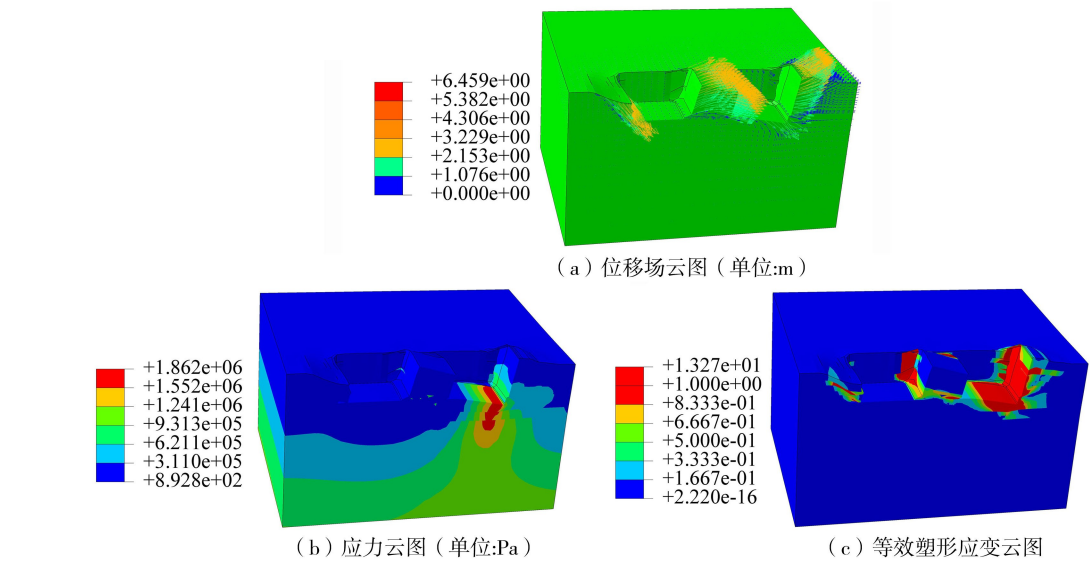


图10 极限主缆拉力下锚碇周围土体状态

Fig. 10 Behavior of surrounding soil around the anchorage under ultimate main cable tension

图11为不同工况下锚碇散索鞍处的荷载-位移曲线,随着冲刷深度的增加,荷载-位移曲线初始刚度变化不大,但更早进入屈服阶段,极限承载力单调降低(冲刷深度为0.2H、0.4H、0.6H、0.8H、1.0H时极限承载力依次为0.450G、0.413G、0.370G、0.329G、0.291G),冲刷深度每增加0.2H,极限承载力以约10.3%的速率减小。物理模型试验中,冲刷深度每增加0.33H,锚碇的极限承载力以大约14.3%的速率减小,若将物理模型试验结果线性折算,每0.2H冲刷深度导致极限承载力减小约9.0%,略低于原型数值模拟中约10.3%的衰减速率。这种差异可以从锚碇极限抗力的组成角度分析:物理模型试验采用了均质松散的石英砂,其前侧提供的土压力有限,极限抗力主要由基底摩擦主导,故对冲刷深度的敏感度相对较小;而原型锚碇前侧土体的强度较高,提供了较大的侧向抗力,因此,当发生同等比例的冲刷时,前侧被动土压力的减小更为明显,从而表现出更高的衰减速率。物理模型试验与数值模拟中,冲刷深度对极限承载力的影响存在数值差异,但整体规律是一致的。

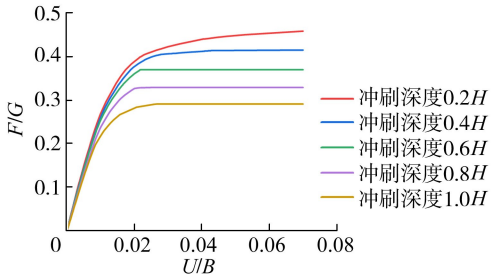


图11 不同工况下锚碇散索鞍处的荷载-位移曲线

Fig. 11 Load-displacement curves at the splay saddle of the anchorage under different working conditions

为了印证冲刷对锚碇破坏模式的影响,本文提取了不同工况下极限破坏时锚碇的位移矢量场进行分析。浅冲刷工况下(图12(a)(b)),锚碇侧向土抗力对锚碇承载力贡献较大,这时锚碇顶部有较大的位移,但土

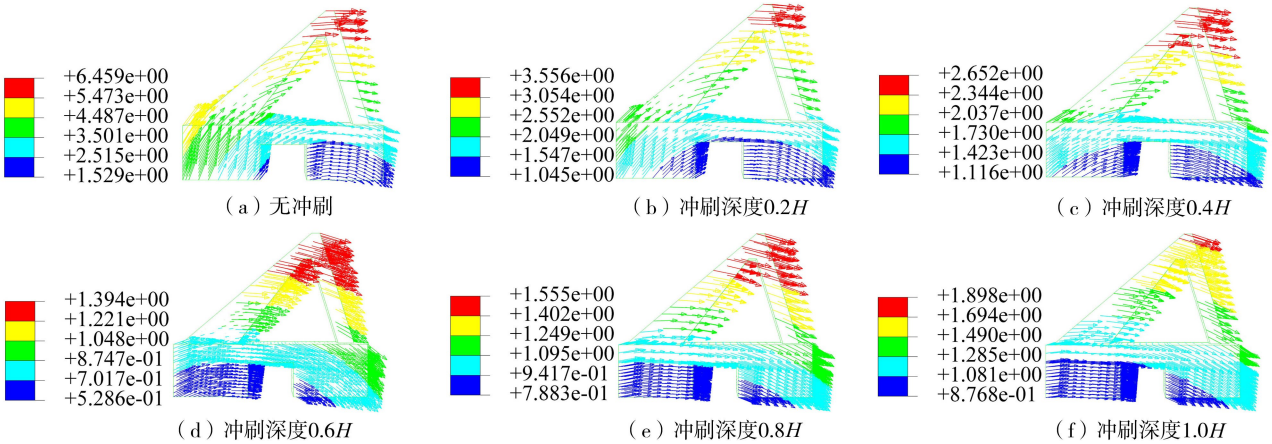


图12 不同工况下极限破坏时锚碇位移矢量场(单位:m)

Fig. 12 Displacement vector field of the anchorage at ultimate failure under different working conditions (unit: m)

体对锚碇下部的水平位移限制较强,使得锚碇上下位移差值较大,锚碇后侧的竖向位移明显大于水平位移,旋转中心位于前侧基底,锚碇向前倾覆。中等冲刷工况下(图 12(c)(d)),侧向土抗力约束减弱,锚碇上下位移差值逐渐缩小,锚碇后侧位移趋于水平,可见锚碇的滑移趋势越来越强。深冲刷工况下(图 12(e)(f)),侧向土抗力约束极弱,锚碇上下位移幅值趋于一致,锚碇后侧位移近乎水平,旋转中心持续后移,系统的水平抗力几乎完全由底部摩擦力承担,破坏模式由倾覆变为整体滑移。

由数值模拟结果(图 13)可知,基底摩擦系数 $\mu=0.1,0.2,0.3,0.4,0.5$ 时,锚碇极限承载力依次为 $0.381G$、$0.446G$、$0.497G$、$0.508G$、$0.514G$,可见当摩擦系数以 0.1 为阶梯增加且 $\mu<0.3$ 时,锚碇极限承载力以约 14.0%的速率增大;当 $\mu>0.3$ 时,极限承载力增幅显著减小,平均增幅仅 1.7%。这表明基底摩擦系数在一定范围内对提高锚碇承载能力十分有效,但当摩擦系数达到约 0.3 后,继续提高则增益有限。工程设计中,可将 $\mu\approx0.3$ 视为基底摩擦力利用的"经济上限"。

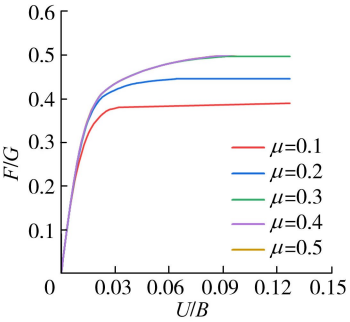
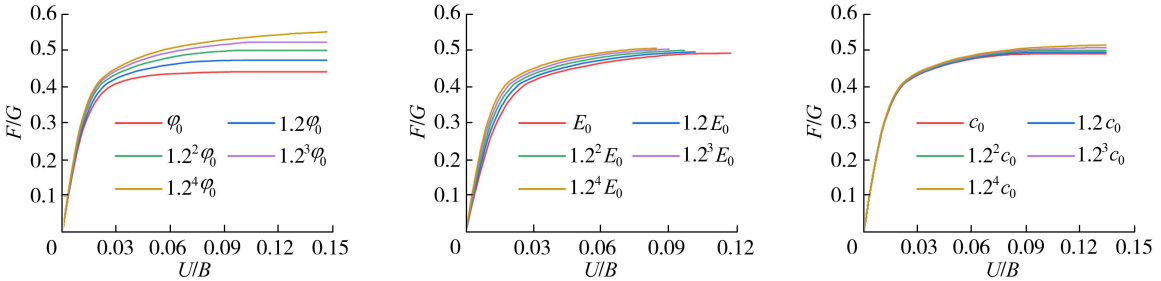


图 13　不同摩擦系数下锚碇荷载-位移曲线

Fig. 13　Load-displacement curves of the anchorage under different friction coefficients

在原型无冲刷工况下,分别对周围土体的内摩擦角、弹性模量和黏聚力进行单参数敏感性分析,结果见图 14。由图 14 可知:①当土体内摩擦角以 20%的幅度逐步增大时,对应极限承载力依次为 $0.442G$、$0.473G$、$0.500G$、$0.523G$、$0.551G$。平均来看,内摩擦角每提高 20%,极限承载力约提高 5.71%,说明内摩擦角作为控制土体抗剪强度的主要指标,对锚碇极限承载力具有最显著的影响。②土体弹性模量同样以 20%幅度递增时,对应极限承载力依次为 $0.493G$、$0.496G$、$0.500G$、$0.504G$、$0.506G$,土体弹性模量的增大对极限承载力的提升幅度仅为 0.67%,弹性模量主要影响体系的变形刚度而对极限状态贡献有限。③当黏聚力以 20%的幅度递增时,极限承载力依次为 $0.491G$、$0.495G$、$0.500G$、$0.507G$、$0.515G$,平均提升幅度仅为 1.2%,介于内摩擦角与弹性模量之间。



(a) 不同内摩擦角　(b) 不同弹性模量　(c) 不同黏聚力

图 14　不同土体材料参数下锚碇荷载-位移曲线

Fig. 14　Effect of soil-rock material parameters on load-displacement curves of anchorage

4　结　论

a. 随着冲刷深度增加,荷载-位移曲线屈服点提前出现,极限承载力显著降低。每当冲刷深度增加 $0.33H$,极限承载力降低约 14.3%。3 种加载方式(单向加载、单向单级加卸载、单向分级递增循环加卸载)对极限承载力影响较小,但循环加卸载会导致砂土刚度衰减。

b. 极限工况下锚碇整体向前倾覆,前锚室、散索鞍支墩、系梁处应力较高,沉井箱体应力较小。锚碇前侧土体隆起、后侧土体下陷,塑性区逐渐发展并最终贯通导致地基剪切破坏。

c. 冲刷深度以 $0.2H$ 为阶梯增大时,锚碇极限承载力以约 10.3%的速率降低,冲刷对锚碇稳定性具有显著不利影响。随着冲刷加剧,锚碇破坏模式逐渐由浅冲刷工况下的倾覆破坏向深冲刷工况下的整体滑移破坏转变,冲刷削弱了锚碇的被动土抗力与抗倾覆能力。

d. 提高锚碇底部摩擦系数可显著提升其极限承载力,但当摩擦系数达到某一阈值后,其对承载力的提升效果趋于平缓。在土体参数中,内摩擦角是影响锚碇极限承载力的首要参数,黏聚力次之,弹性模量主要影响工作状态下的变形,对极限承载力影响较小。

e. 本文基于整体冲刷假定,未考虑实际局部冲刷坑的非对称形态、坡面几何及局部深槽特征,因此所得定量结论外推至局部冲刷工况时需结合冲刷坑形状进行修正。

参考文献:

[1] 叶文海,魏奇芬,叶恒梅. 大跨径悬索桥锚碇基础设计与计算发展综述[C]//第二十届全国桥梁学术会议论文集. 武汉:中国土木工程学会桥梁与结构工程分会,2012:172-178.

[2] 张志恒,梁铎. 深水锚碇基础概念设计[J]. 内蒙古科技与经济,2013(11):101. (Zhang Zhiheng, Liang Duo. Conceptual design of deepwater anchorage foundation[J]. Inner Mongolia Science Technology & Economy,2013(11):101. (in Chinese))

[3] 林荣安. 悬索桥重力式锚碇系统受力分析及其优化[D]. 西安:长安大学,2008.

[4] 苏静波,楼淑君,霍瑞丽. 锚碇沉井基础稳定性的规范算法与有限元方法的对比[J]. 盐城工学院学报(自然科学版),2008,21(4):4-7. (Su Jingbo, Lou Shujun, Huo Ruili. Comparison between normative method and finite element method for stability of open caisson anchorage foundation[J]. Journal of Yancheng Institute of Technology(Natural Science Edition),2008,21(4):4-7. (in Chinese))

[5] 朱晓文,赵启林,朱凯,等. 润扬大桥北锚碇基础三维数值仿真分析[J]. 东南大学学报(自然科学版),2005,35(2):293-297. (Zhu Xiaowen,Zhao Qilin,Zhu Kai,et al. 3-D simulation of Runyang suspended bridge's north anchorage[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition),2005,35(2):293-297. (in Chinese))

[6] 李永盛. 江阴长江公路大桥北锚碇模型试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),1995,23(2):134-140. (Li Yongsheng. Model test study on north anchorage of Jiangyin Yangtze River Bridge[J]. Journal of Tongji University (Natural Science),1995,23(2):134-140. (in Chinese))

[7] 李家平,张子新,黄宏伟,等. 宁波庆丰大桥锚碇室内相似模型试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2005,33(8):1011-1016. (Li Jiaping, Zhang Zixin, Huang Hongwei, et al. Research on similarity model test of anchorage of Qingfeng suspension bridge in Ningbo[J]. Journal of Tongji University (Natural Science),2005,33(8):1011-1016. (in Chinese))

[8] 汪明元,赵小晴,龚晓南,等. 沉井-钻孔灌注桩复合锚碇受力变形特性试验研究[J]. 建筑结构,2025,55(13):142-147. (Wang Mingyuan, Zhao Xiaoqing, Gong Xiaonan, et al. Experimental study on deformation and mechanical characteristics of caisson-bored pile composite anchorage[J]. Building Structure,2025,55(13):142-147. (in Chinese))

[9] 何亚东. 大跨度悬索桥齿坎式重力锚碇承载机理和稳定性研究[D]. 成都:西南交通大学,2021.

[10] Wu C J,Lai Y J,Cao X J,et al. Long-term stability of gravity anchorage with notched sill for suspension bridge on soft rock ground[J]. IOP Conference Series:Earth and Environmental Science,2020,570(2):022038.

[11] Cui Mingzhu, Ren Weixin, Yin Yonggao. Numerical analysis and field load testing of a suspension bridge with a root pile anchorage[J]. Structures,2021,34(7):1373-1382.

[12] 崖岗,韩冬冬,石海洋,等. 虎门二桥坭洲水道桥重力式锚碇基础稳定性研究[J]. 公路,2017,62(4):129-135. (Ya Gang, Han Dongdong,Shi Haiyang,et al. Stability study on gravity anchorage foundation of Nizhou Waterway Bridge of Humen Second Bridge[J]. Highway,2017,62(4):129-135. (in Chinese))

[13] 李家平. 软土地区悬索桥重力式锚碇稳定性和变位研究[D]. 上海:同济大学,2006.

[14] 鲁志强,陈贺,张永华,等. 基于数值仿真的重力式锚碇承载机制研究[J]. 公路交通科技,2021,38(8):67-74. (Lu Zhiqiang,Chen He, Zhang Yonghua,et al. Study on load-bearing mechanism of gravity anchorage based on numerical simulation [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2021,38(8):67-74. (in Chinese))

[15] Wang Xu,Dang Faning,Cao Xiaoshan,et al. Solution for active and passive earth pressure on rigid retaining walls with narrow backfill[J]. Applidciences,2025,15(4):1750-1750.

[16] 袁煜晖,贺瑞,朱元张. 水平循环荷载下嵌岩单桩基础受力特性试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(6):97-106. (Yuan Yuhui, He Rui, Zhu Yuanzhang. Experimental study on characteristics of rock-socketed monopile under lateral cyclic loads[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(6):97-106. (in Chinese))

(收稿日期:2026-01-23 编辑:熊水斌)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.05.018

动水位作用下海底隧道非线性渗流场解析研究

刘 翔[1],黎奎辰[1],王东池[1],张 雨[2],姜谙男[1],房 倩[3]

(1.大连海事大学道路与桥梁研究所;2.北京城建集团有限责任公司;3.北京交通大学土木建筑工程学院)

摘要:针对流体在海底隧道衬砌与注浆圈等低渗透介质中的渗流行为会偏离达西渗流的问题,采用 Hansbo 非线性渗流模型描述衬砌与注浆圈内的渗流规律,分别利用复变函数法与镜像法推导了动水位作用下海底隧道非线性渗流场的解析解,构建了可考虑衬砌、注浆圈或无支护等不同支护方式解析模型;通过与数值模拟结果及其他理论解析解、室内模型试验结果对比验证了该解析解的准确性,并分析了非线性指数、动水位、注浆圈厚度与衬砌厚度的比值等因素对渗流场的影响。结果表明:当非线性指数增大时,隧道涌水量随之减少,注浆圈承担更大的孔隙水压力,从而降低衬砌所承担的孔隙水压力;在周期性动水位的作用下,隧道涌水量与孔隙水压力均会产生周期性变化;注浆圈能够削弱动水位对衬砌的影响,随着注浆圈厚度与衬砌厚度比值的增大,隧道涌水量进一步减小,注浆圈承担的孔隙水压力增大,从而减小衬砌所承担的孔隙水压力。

关键词:动水位;非线性渗流;衬砌;注浆圈;渗流场解析解;海底隧道;复变函数法;镜像法

中图分类号:U459.5;O357.3 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-1980(2026)05-0155-09

Analytical study on nonlinear seepage field of subsea tunnels under dynamic water levels

Liu Xiang[1], **Li Kuichen**[1], **Wang Dongchi**[1], **Zhang Yu**[2], **Jiang Annan**[1], **Fang Qian**[3]

(1. *Institute of Road and Bridge Engineering*, *Dalian Maritime University*;
2. *Beijing Urban Construction Group Co.*, *Ltd.*; 3. *School of Civil Engineering*, *Beijing Jiaotong University*)

Abstract: In view of the problem of the seepage behavior of fluids in low-permeability media, such as the lining and grouting zone of subsea tunnels, may deviate from Darcy seepage, the Hansbo nonlinear seepage model was employed to describe the seepage behavior within the lining and grouting zone. Analytical solutions for the nonlinear seepage field of a subsea tunnel under dynamic water levels were derived using the complex variable method and the method of images, respectively. Furthermore, an analytical model applicable to different support conditions, such as lining, grouting zone, or no support, was established. The accuracy of the analytical solutions was verified through comparisons with numerical simulation results, other theoretical analytical solutions, and laboratory model test results, and the effects of factors such as the nonlinear parameter, dynamic water levels, and the ratio of grouting zone thickness to lining thickness on the seepage field were analyzed. The results show that as the nonlinear parameter increases, the tunnel water inflow decreases, and the grouting zone sustains greater pore water pressure, thereby reducing the pore water pressure sustained by the lining; under the action of periodic dynamic water levels, both the tunnel water inflow and pore water pressure vary periodically; the grouting zone can attenuate the influence of dynamic water levels on the lining, and as the ratio of grouting zone thickness to lining thickness increases, the tunnel water inflow further decreases and the pore water pressure sustained by the grouting zone increases, thereby reducing the pore water pressure sustained by the lining.

Key words: dynamic water level; nonlinear seepage; lining; grouting zone; analytical solution for seepage field; subsea tunnel; complex variable method; method of images

伴随着我国交通强国战略实施的深入,我国沿海地区迎来了海底隧道规划和建设的热潮[1-2]。隧道渗水和由孔隙水压过大引起的隧道结构变形、破坏等问题,是建设期与运营期需要重点关注的问题,高估或低估海底隧道渗流场可能导致设计过于保守或引发严重事故[3-6]。因此,准确计算海底隧道渗流场对提高隧道工程的安全性与经济性具有重要意义。

国内外许多学者对渗流场问题进行了研究,如 El Tani[7] 克服了无压隧洞渗流方程中傅里叶级数系数求解烦琐等问题,求解出隧道渗流场解析解,但该研究并未考虑衬砌与注浆圈;Kolymbas 等[8] 通过共形映射,

基金项目:国家自然科学基金项目(52108363);中国博士后基金面上项目(2023T160074)

作者简介:刘翔(1992—),男,副教授,博士,主要从事海底隧道多物理场耦合研究。E-mail:xliu@dlmu.edu.cn

考虑衬砌影响得到适用于地表变水头情况下的渗流场解析解;Harr[9]通过镜像法,并假定土层为多孔弹性介质,得到适用于高水头、深埋圆形洞室的围岩孔隙水压解析解;应宏伟等[10]同样通过镜像法求解出高水头深埋注浆隧道渗流场解析解,并且可以退化为 Harr 解[9];张治国等[11]基于镜像法和渗流理论得到了富水区山岭深埋圆形隧道衬砌、注浆圈和围岩等关键位置的隧道排水量和水头变化规律;郭玉峰等[12]基于质量守恒定律和达西定律,采用保角变换法和 Schwarz 迭代法求解了水下双线平行隧道稳态渗流场;李鹏飞等[13]基于镜像法和叠加原理,推导了平行四孔隧道渗流场解析解。

以上研究均是基于达西定律推导的,但实际流体在低渗透介质中会发生非线性渗流[14]。常见的非线性渗流模型有 Hansbo、Swartzendruber 和 Slepicka 非线性渗流模型。Zhang 等[15]假设注浆圈符合 Hansbo 非线性渗流模型,土体符合达西线性渗流,利用复变函数法得到隧道涌水量及孔隙水压力解析解,并用 FLAC3D 验证了其正确性。张丙强等[16]假设土体服从 Slepicka 指数渗流模式,衬砌服从达西渗流,基于镜像法及复变函数法,求解出隧道涌水量的解析解。傅鹤林等[6]将隧道开挖扰动区考虑为非线性渗流,通过镜像法求解出考虑衬砌与注浆圈的渗流场解析解。

目前,关于非线性渗流场的研究仍较为有限,尚缺少考虑衬砌与注浆圈共同作用下海底隧道非线性渗流场的研究,尤其是考虑动水位的情况。因此,本文引入 Hansbo 非线性渗流模型,分别利用两种不同解析方法求解动水位作用下含衬砌与注浆圈的海底隧道非线性渗流场解析解,并与数值模拟结果和其他理论解析解进行对比分析,同时通过参数分析讨论了非线性参数和其他工程参数对非线性渗流场的影响结果。

1 计算模型

1.1 动水位

隧道渗流场简化计算模型如图 1 所示。以海床面为位势零面,研究对象为饱和、均质、连续且各向同性的半无限岩体。岩体内部开挖一座外半径为 r_1 的隧道,隧道中心至海床面的垂直距离(即隧道埋深)记为 s,围岩渗透系数为 k_s,衬砌内半径为 r_0,注浆圈半径为 r_g,分析时段内,相对于海床面的最高水位和最低水位分别记为 H_{max} 和 H_{min}。海域水位会受到潮汐、风暴增水及海啸等因素的影响而随时间变化。于茜等[17]的研究表明,动水位变化可由余弦函数表示,在此基础上,本文采用周期函数来描述动水位:

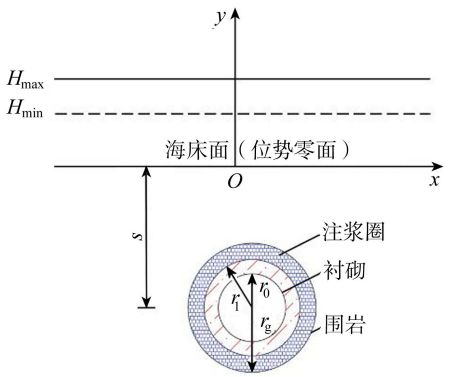


图 1 隧道渗流场简化计算模型

Fig. 1 Simplified calculation model of tunnel seepage field

$$H_t = \bar{H} + \Delta H\cos(\omega t - \varphi) \tag{1}$$

式中:H_t 为海床处动水位对应的总水头;$\bar{H}$ 为分析时段内的平均水位;ΔH 为水位变化幅值;ω 为动水位变化的角频率;t 为时间;φ 为初始相位角。

1.2 基本假定

在求解动水位作用下海底隧道渗流场时,作如下基本假设:围岩、注浆圈和衬砌均为饱和、均质、连续且各向同性介质,衬砌内侧的孔隙水压为零。岩体和水体均不可压缩,且地下水补给充足;渗流主要沿隧道径向发生,注浆圈和衬砌内的渗流可简化为轴对称渗流问题。对于任一给定时刻,将动水位作为该时刻的边界水头,忽略介质储水效应和渗流响应的时间滞后,将渗流场近似视为准稳态渗流场。

围岩中的渗流遵循达西定律,衬砌与注浆圈内的渗流规律采用 Hansbo 非线性渗流模型描述。Hansbo 非线性渗流模型可表示为:

$$v = \begin{cases} k_{nj} i^{m_j} & i \leqslant i_{lj} \\ k_{lj}(i - i_0) & i > i_{lj} \end{cases} \tag{2}$$

式中:v 为渗流速度;i 为水力梯度;i_{lj} 为第 j 种介质由非线性渗流向线性渗流转变的临界水力梯度;i_0 为线性渗流段的起始水力梯度;k_{nj}、k_{lj} 分别为非线性段和线性段的渗透系数;m_j 为非线性指数;下标 j 为介质类型,

j=l 表示衬砌,j=g 表示注浆圈。

2　海底隧道渗流场解析解

2.1　复变函数法求解

围岩渗流场的求解属于半无限平面问题,采用保角变换将复杂边界映射为同心环形边界。围岩总水头满足:

$$\frac{\partial^2 H_s}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 H_s}{\partial y^2}=0 \tag{3}$$

式中:H_s 为总水头。

经过保角变换后的控制方程为:

$$\frac{\partial^2 H_s}{\partial \xi^2}+\frac{\partial^2 H_s}{\partial \eta^2}=0 \tag{4}$$

式中:ξ、η 分别为保角变换后映射平面内的横、纵坐标。映射后的环形区域内渗流场呈径向对称,因此:

$$\frac{\partial^2 H_s}{\partial \rho^2}+\frac{1}{\rho}\frac{\partial H_s}{\partial \rho}=0 \tag{5}$$

其中

$$\rho=\sqrt{\xi^2+\eta^2}=\sqrt{\frac{x^2+(y+A)^2}{x^2+(y-A)^2}}$$

式中:ρ 为保角变换后映射平面内的无量纲径向坐标;A 为保角变换的几何参数,$A=\sqrt{s^2-r_g^2}$。

环形区域的边界条件为:

$$\begin{cases}H_s\mid_{\rho=1}=H_t\\ H_s\mid_{\rho=\alpha}=H_g\end{cases} \tag{6}$$

式中:H_g 为注浆圈外边界总水头;α 为保角变换后注浆圈外边界对应的无量纲径向坐标,$\alpha=\sqrt{\frac{s-A}{s+A}}$。

求解式(5)可得:

$$H_s=H_t+(H_g-H_t)\ln\rho/\ln\alpha \tag{7}$$

隧道涌水量 Q_s 为:

$$Q_s=2\pi k_s(H_g-H_t)/\ln\alpha \tag{8}$$

式中:k_s 为围岩渗透系数。

2.2　镜像法求解

采用镜像法将半无限渗流场等效为无限平面内源与汇的叠加。任意点 M 到实际隧道和镜像隧道中心的距离分别为:

$$\begin{cases}d_1=\sqrt{x^2+(y+s)^2}\\ d_2=\sqrt{x^2+(y-s)^2}\end{cases} \tag{9}$$

式中:d_1、d_2 分别为点 M 到汇和源的距离。

根据达西定律和势的叠加原理,围岩总水头为:

$$H_s=\frac{Q_s}{2\pi k_s}\ln\frac{d_1}{d_2}+H_t \tag{10}$$

在注浆圈外边界处,取 $d_1=r_g$。当 $r_g<<s$ 时,可近似认为 $d_2=2s$。令 $\beta=r_g/2s$,则:

$$H_g=\frac{Q_s}{2\pi k_s\ln\beta}+H_t \tag{11}$$

2.3　衬砌与注浆圈渗流场解析解

衬砌与注浆圈均为低渗透介质,其内部渗流可简化为轴对称径向渗流,并采用 Hansbo 非线性渗流模型描述。则介质 j 内的总水头 H_j 满足:

$$\begin{cases} m_j \dfrac{\mathrm{d}^2 H_j}{\mathrm{d}r^2} + \dfrac{1}{r}\dfrac{\mathrm{d}H_j}{\mathrm{d}r} = 0 & (m_j > 1, i \leqslant i_{tj}) \\ \dfrac{\mathrm{d}^2 H_j}{\mathrm{d}r^2} + \dfrac{1}{r}\left(\dfrac{\mathrm{d}H_j}{\mathrm{d}r} - i_{0j}\right) = 0 & (m_j > 1, i > i_{tj}) \end{cases} \tag{12}$$

其中 $$i_{0j} = \frac{m_j - 1}{m_j} i_{tj}$$

设介质内、外边界半径分别为 r_{in} 和 r_{out},相应总水头分别为 H_{in} 和 H_{out}。求解式(12)可得:

$$H_j = \begin{cases} \dfrac{H_{in} r_{out}^{a_j} - H_{out} r_{in}^{a_j} + (H_{out} - H_{in}) r^{a_j}}{r_{out}^{a_j} - r_{in}^{a_j}} & m_j > 1, i \leqslant i_{tj} \\ H_{in} + \dfrac{H_{out} - H_{in}}{\ln(r_{out}/r_{in})} \ln(r/r_{in}) + i_{0j}\left[r - r_{in} - \dfrac{(r_{out} - r_{in})\ln(r/r_{in})}{\ln(r_{out}/r_{in})} \right] & m_j > 1, i > i_{tj} \\ H_{in} + \dfrac{H_{out} - H_{in}}{\ln(r_{out}/r_{in})} \ln(r/r_{in}) & m_j = 1 \end{cases} \tag{13}$$

其中 $$a_j = \frac{m_j - 1}{m_j}$$

式中:a_j 为用于简化表达的指数参数。对于衬砌,$r_{in} = r_0$,$r_{out} = r_1$,$H_{in} = H_0$,$H_{out} = H_1$;对于注浆圈,$r_{in} = r_1$,$r_{out} = r_g$,$H_{in} = H_1$,$H_{out} = H_g$,其中 H_1 为衬砌与注浆圈交界面总水头,H_0 为衬砌内边界总水头,H_0 计算公式为:

$$H_0 = \frac{p_0}{\gamma_w} + r_0 \sin\theta - s \tag{14}$$

式中:p_0 为衬砌内边界孔隙水压力;γ_w 为水容重;θ 为衬砌内边界计算点的极角。

介质 j 内的涌水量 Q_j 为:

$$Q_j = \begin{cases} 2\pi k_{nj} \left[\dfrac{a_j (H_{out} - H_{in})}{r_{out}^{a_j} - r_{in}^{a_j}} \right]^{m_j} & m_j > 1, i \leqslant i_{tj} \\ 2\pi k_{lj} \dfrac{H_{out} - H_{in} - i_{0j}(r_{out} - r_{in})}{\ln(r_{out}/r_{in})} & m_j > 1, i > i_{tj} \\ 2\pi k_{lj} \dfrac{H_{out} - H_{in}}{\ln(r_{out}/r_{in})} & m_j = 1 \end{cases} \tag{15}$$

根据渗流连续条件:

$$Q_s = Q_l = Q_g \tag{16}$$

式中:Q_l、Q_g 分别衬砌与注浆圈的涌水量。

由于径向水力梯度在介质内边界处最大,可根据内边界水力梯度是否达到 i_{tj} 判断渗流状态。介质 j 由非线性段进入线性段时的临界渗流量 Q_{tj} 为:

$$Q_{tj} = 2\pi r_{in} k_{lj} (i_{tj} - i_{0j}) \tag{17}$$

文考虑以下两种渗流状态:

$$Q_s = \begin{cases} Q_{gn} = Q_{ln} & Q_s \leqslant Q_{tg} \\ Q_{gl} = Q_{ln} & Q_{tg} < Q_s \leqslant Q_{tl} \end{cases} \tag{18}$$

式中:Q_{gn}、Q_{gl} 分别为注浆圈处于非线性段和线性段时的涌水量;Q_{ln} 为衬砌处于非线性段时的涌水量;Q_{tl}、Q_{tg} 分别为衬砌与注浆圈的临界涌水量。

联立式(16)~(18),可求得注浆圈外边界总水头 H_g 和注浆圈与衬砌交界面总水头 H_1。

3 解析解验证

3.1 退化验证

选取 Zhang 等[15]研究中的计算参数:隧道半径 7.4 m,埋深 52.4 m,水头 20 m,衬砌厚度 0.6 m,注浆圈厚

度 5.4 m,土体渗透系数 5.0×10^{-6} m/s,衬砌渗透系数 5.0×10^{-8} m/s,注浆圈渗透系数 5.0×10^{-7} m/s,衬砌内孔隙水压力 0 kPa。

当 $m=1$ 时,本文方法可退化为遵循达西线性渗流的传统方法。取注浆圈半径为 13.4 m,开挖半径为 7.4 m,衬砌厚度分别为 0.5 m 和 0.6 m 两种情况,绘制隧道涌水量与水头变化规律,并与潘以恒等[18]线性渗流结果进行对比分析,结果如图 2 所示。可见,两种方法计算结果基本一致,说明本文方法不仅可考虑非线性渗流,也可考虑线性渗流,具有普适性。

3.2　数值分析验证

将海底隧道简化为无衬砌情况,不同相对渗透率(k_r)时 Zhang 等[15]解析模型计算所得的海底隧道涌水量(Q_s)与本文数值解和解析解结果对比如图 3 所示。由图 3 可见,在退化为无衬砌情况下,参数 $m_g=1.5$、$i_{tg}=10$ 和 $m_g=2.5$、$i_{tg}=15$ 两种情况本文计算结果与 Zhang 等[15]的计算结果基本吻合,误差不超过 1%。随着相对渗透率的增大,隧道涌水量逐渐减小。相对渗透率对隧道涌水量影响的解析解与数值模拟结果吻合较好,本文解析方法可以较好地计算海底隧道涌水量。值得注意的是,当前版本 FLAC3D 只考虑了线性渗流,本文根据李毅等[19]给出的基于 FLAC3D 的单元变渗透系数法来模拟非线性渗流,将非线性渗流考虑为一系列线性渗流的组合来实现对非线性渗流的模拟。

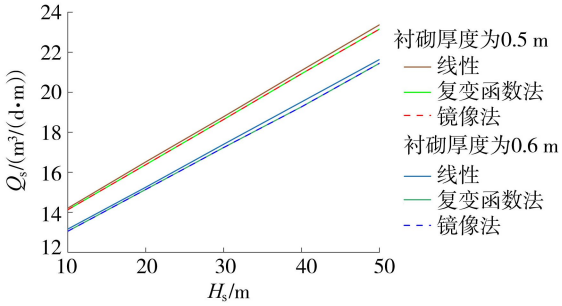


图 2　线性渗流对比分析

Fig. 2　Comparative analysis of linear seepage

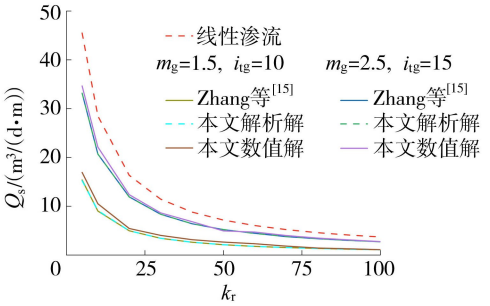


图 3　不同相对渗透率时隧道涌水量解析解与数值解对比

Fig. 3　Comparison between analytical and numerical solutions for tunnel water inflow under different relative permeabilities

3.3　工程案例分析

厦门翔安海底隧道工程海水深约 25 m,覆土厚度为 40 m,为全强风化岩层,外半径为 7.25 m,围岩渗透系数取 2.05×10^{-6} m/s[20]。根据设计要求,注浆圈厚度为 5 m,渗透系数须达到 10^{-7} m/s 量级;初期支护 50 cm,综合考虑其排水效应,渗透系数取为 1×10^{-8} m/s;二次衬砌为 C45 强度等级高性能耐腐蚀钢筋混凝土,厚度为 70 cm,其渗透系数取为 1×10^{-8} m/s,$m_g=1.5$,$i_{tg}=10$。室内模型试验得到的隧道涌水量为 2.52 m^3/(d·m)[20],采用竖井法[21]、保角变换法[22]、本文复变函数法和镜像法计算得到的隧道涌水量分别为 2.71、2.70、2.48、2.49 m^3/(d·m)。与室内模型试验结果相比,本文复变函数法和镜像法的相对误差分别为 1.6%和 1.2%,吻合较好;竖井法和保角变换法的相对误差分别为 7.0%和 7.1%。其原因可能在于上述两种方法均将衬砌与注浆圈内的渗流视为线性达西渗流,而本文方法考虑了两者的非线性渗流特性。可见本文提出的两种解析方法能够较准确地计算实际工程中的隧道涌水量,具有一定的工程应用价值。

4　参数分析

本节讨论 Hansbo 非线性渗流模型参数、动水位及支护结构尺寸对隧道渗流场的影响,主要包括注浆圈非线性指数 m_g、临界水力梯度 i_{tg}、动水位幅值 ΔH 以及注浆圈厚度与衬砌厚度的比值(厚度比)λ。

由于基于复变函数法与镜像法所计算的渗流场结果相同,因此采用镜像法开展参数分析。假定隧道半径为 7.4 m,埋深为 52.4 m,水头为 20 m,衬砌厚度为 0.6 m,注浆圈厚度为 5.4 m,土体渗透系数为 5.0×10^{-6} m/s,衬砌渗透系数为 5.0×10^{-8} m/s,注浆圈渗透系数为 5.0×10^{-7} m/s,衬砌内孔隙水压力为 0 kPa。

4.1　非线性指数与临界水力梯度对渗流场的影响

非线性指数 m_g 和临界水力梯度 i_{tg} 是反映注浆圈非线性渗流特性的 Hansbo 非线性渗流模型参数。图 4 给出了 m_g 对隧道涌水量 Q_s 的影响。当 i_{tg} 保持不变时,Q_s 随 m_g 增大而减小,且下降幅度逐渐减缓。图 5 给

出了 i_{tg} 对 Q_s 的影响,其变化规律与 m_g 基本一致。结果表明,增大 m_g 和 i_{tg} 均可增强注浆圈的阻水作用,降低 Q_s;但当参数增大至一定程度后,Q_s 的变化趋于平缓,继续增大参数对堵水效果的改善有限。

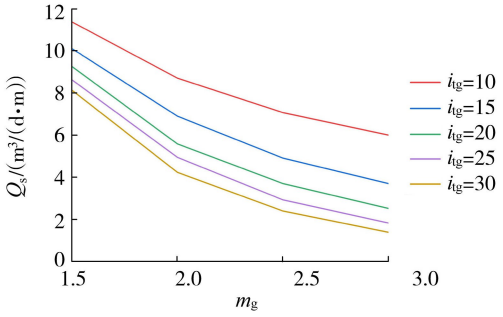


图4 非线性指数对隧道涌水量的影响

Fig. 4 Effect of nonlinear exponent on tunnel water inflow

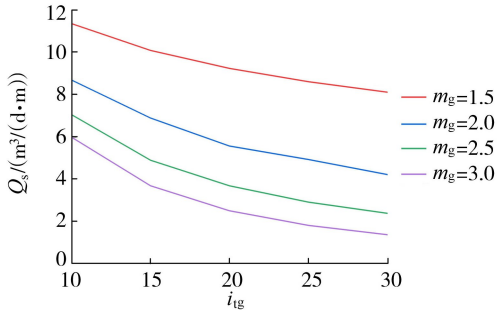


图5 临界水力梯度对隧道涌水量的影响

Fig. 5 Effect of critical hydraulic gradient on tunnel water inflow

m_g 对衬砌拱底孔隙水压力 p_l 与注浆圈拱底孔隙水压力 p_g 的影响如图6所示。当 i_{tg} 保持不变时,随着 m_g 增大,注浆圈的非线性阻水作用增强,其内部水头损失增大,p_l 相应减小,从而增强对衬砌的保护作用。i_{tg} 越大,p_l 随 m_g 的变化幅度越大,表明较大的 i_{tg} 能够强化 m_g 增大对衬砌的减压作用。随着 m_g 继续增大,p_l 和 p_g 的变化幅度均逐渐减小并趋于稳定。

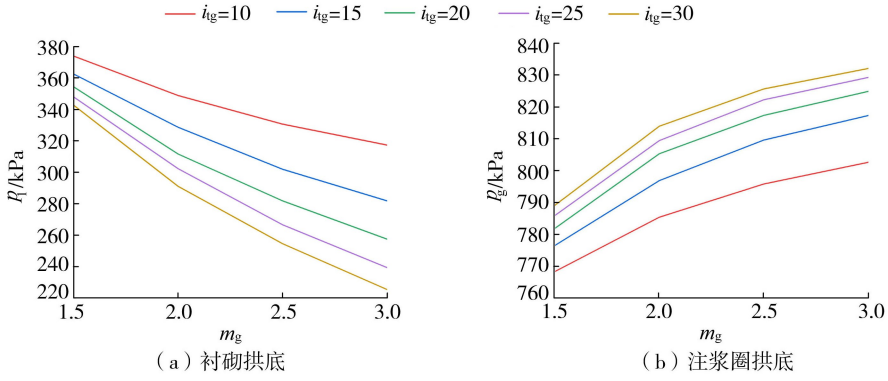


图6 非线性指数对衬砌与注浆圈拱底孔隙水压力的影响

Fig. 6 Effect of nonlinear exponent on pore water pressure at inverts of lining and grouting zone

4.2 动水位对渗流场的影响

为分析周期性动水位作用下隧道涌水量的变化规律,取平均水头 $\bar{H}=20$ m,水位变化幅值 $\Delta H=10$,15 m,周期 $T=4,8$ s,初始相位角 $\varphi=0,\pi/2$。图7比较了相同周期性动水位作用下,不同非线性指数 m_g 对隧道涌水量 Q_s 的影响;图8进一步分析了动水位幅值 ΔH、动水位变化的角频率 ω 和初始相位角 φ 的影响。结果表明,周期性动水位作用下,Q_s 随水位呈周期性变化。与 Hansbo 非线性渗流相比,线性达西渗流条件

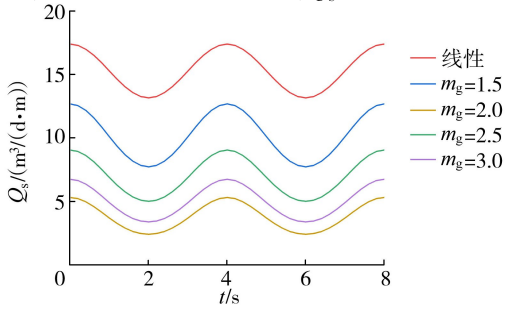


图7 周期性动水位作用下非线性指数对隧道涌水量的影响

Fig. 7 Effect of nonlinear exponent on tunnel water inflow under periodic dynamic water levels

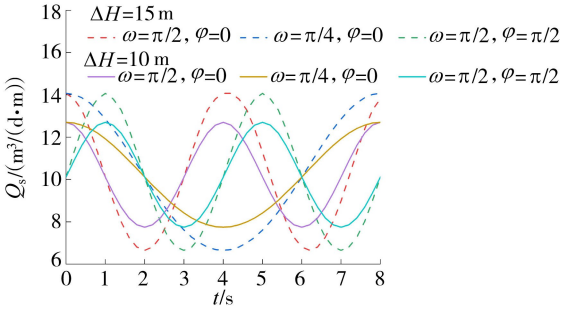
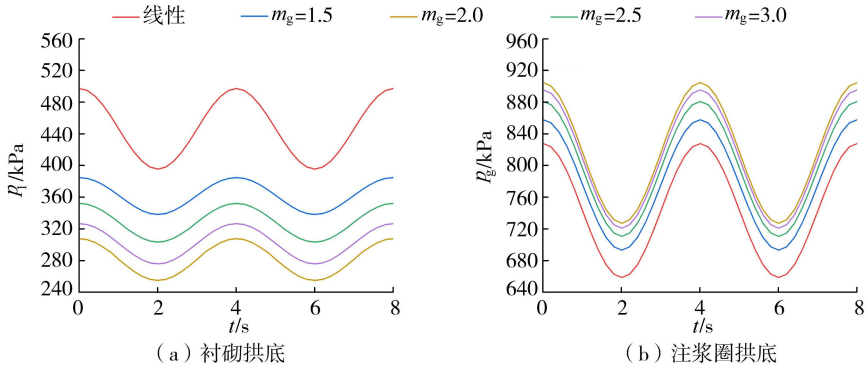


图8 不同幅值、周期和初始相位的动水位对隧道涌水量的影响

Fig. 8 Effects of amplitude, period, and initial phase of dynamic water levels on tunnel water inflow

下的 Q_s 及其波动幅度均较大。随着 m_g 增大,Q_s 及其波动幅度逐渐减小,表明注浆圈的非线性阻水作用增强。

周期性动水位作用下,不同非线性指数 m_g 对衬砌拱底孔隙水压力 p_l 和注浆圈拱底孔隙水压力 p_g 的影响如图 9 所示(图中各工况采用相同的周期性动水位输入,仅改变 m_g),可以看出,p_l 和 p_g 均随动水位呈周期性变化。与线性渗流相比,考虑非线性渗流后,p_g 增大,而 p_l 减小;随着 m_g 增大,这一差异更加明显,表明注浆圈的非线性渗流特性能够削弱外部动水位向衬砌的传递,从而降低 p_l。



(a) 衬砌拱底　　(b) 注浆圈拱底

图 9　周期性动水位作用下不同非线性指数对衬砌和注浆圈拱底孔隙水压力的影响

Fig. 9　Effects of different nonlinear exponents on pore water pressures at inverts of lining and grouting zone under periodic dynamic water levels

4.3　厚度比对渗流场的影响

根据海底隧道的实际情况,注浆圈厚度较大,因此有必要探究厚度比 λ 变化对隧道渗流场的影响。λ 对隧道涌水量 Q_s 的影响计算结果如图 10 所示,随着 λ 的增大,Q_s 会随之降低,并且考虑非线性渗流时的降低幅度会比线性渗流时的大。图 11 为 λ 对隧道衬砌拱底孔隙水压力 p_l 和注浆圈拱底孔隙水压力 p_g 的影响,随着 λ 的增大,p_g 也随之增大,p_l 则会降低。因此,随着 λ 的增大,注浆圈会为衬砌分担更多的孔隙水压力,对衬砌起到保护作用。

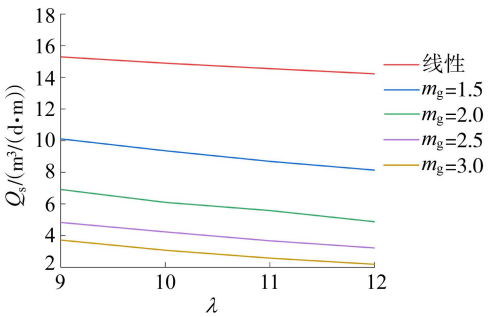
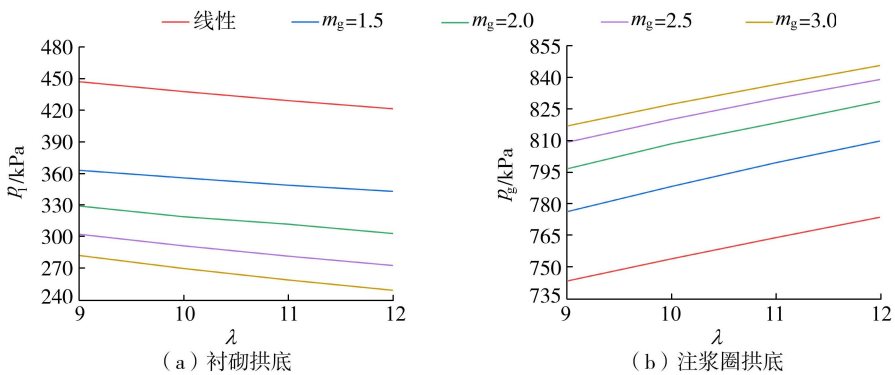


图 10　厚度比对隧道涌水量的影响

Fig. 10　Effect of thickness ratio on tunnel water inflow



(a) 衬砌拱底　　(b) 注浆圈拱底

图 11　厚度比对衬砌与注浆圈拱底孔隙水压力的影响

Fig. 11　Effect of thickness ratio on pore water pressure at inverts of lining and grouting zone

5 结 论

a. 采用 Hansbo 非线性渗流模型描述注浆圈和衬砌内的渗流规律,分别基于保角变换的复变函数法和镜像法,推导了动水位作用下海底隧道非线性渗流场解析解。通过与已有解析解、数值模拟结果及室内模型试验结果对比,验证了所推导的解析解的准确性。

b. 达西线性渗流与 Hansbo 非线性渗流条件下得到的海底隧道渗流场存在明显差异。与线性达西渗流相比,考虑非线性渗流时,隧道涌水量减小,注浆圈承担的孔隙水压力增大,而传递至衬砌的孔隙水压力减小,表明注浆圈能够承担更多水头损失,并对衬砌起到保护作用。

c. 随着 Hansbo 非线性渗流模型参数与厚度比的增大,注浆圈的阻水作用增强,隧道涌水量减小;同时,注浆圈承担的孔隙水压力增大,衬砌承担的孔隙水压力减小。当上述参数增大至一定程度后,其对涌水量和孔隙水压力的影响逐渐减弱。在周期性动水位作用下,隧道涌水量以及衬砌与注浆圈孔隙水压力均呈周期性变化,注浆圈能够削弱动水位波动对衬砌的影响。

参考文献:

[1] 王义盛,赵小鹏,袁锐,等. 风化岩层岩渣配制的盾构同步注浆浆液性能及微观形貌分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(4):65-71. (Wang Yisheng, Zhao Xiaopeng, Yuan Rui, et al. Analysis on performance and micromorphology of shield synchronous grouting slurry made of weathered rock slag[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(4):65-71. (in Chinese))

[2] 朱伟,钱勇进,王璐,等. 长距离盾构隧道掘进的主要问题及发展趋势[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(1):138-149. (Zhu Wei, Qian Yongjin, Wang Lu, et al. Main problems and development trends of long-distance shield tunneling[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(1):138-149. (in Chinese))

[3] 甘磊,吴健,戴寿晔,等. 含施工裂缝隧道穿越段堤防渗流和稳定分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(1):85-90. (Gan Lei, Wu Jian, Dai Shouye, et al. Seepage and stability analysis of an embankment with construction cracks in a tunnel-crossing section[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(1):85-90. (in Chinese))

[4] 王媛,周峰,陈龙,等. 盾构隧道管片接缝密封垫防水耐久性试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(1):129-137. (Wang Yuan, Zhou Feng, Chen Long, et al. Experimental study on waterproof durability of sealing gaskets for segment joints of shield tunnels[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(1):129-137. (in Chinese))

[5] Di Qiguang, Li Pengfei, Zhang Mingju, et al. Experimental study on the effect of seepage flow on tunnel face stability in saturated ground[J]. Ocean Engineering, 2024, 299:117074.

[6] 傅鹤林,安鹏涛,伍毅敏,等. 开挖扰动及非达西渗流对隧道涌水的影响分析[J]. 铁道工程学报,2022,39(7):80-85. (Fu Helin, An Pengtao, Wu Yimin, et al. Analysis of the influence of excavation disturbance and non-Darcy seepage on tunnel water inflow[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2022, 39(7):80-85. (in Chinese))

[7] El Tani M. Circular tunnel in a semi-infinite aquifer[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2003, 18(1):49-55.

[8] Kolymbas D, Wagner P. Groundwater ingress to tunnels: the exact analytical solution[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2007, 22(1):23-27.

[9] Harr M E. Groundwater and seepage[M]. New York: McGraw-Hill, 1962.

[10] 应宏伟,章丽莎,谢康和,等. 坑外地下水位波动引起的基坑水土压力响应[J]. 浙江大学学报(工学版),2014,48(3):492-497. (Ying Hongwei, Zhang Lisha, Xie Kanghe, et al. Pore-water and earth pressure responses to groundwater fluctuations outside a foundation pit[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2014, 48(3):492-497. (in Chinese))

[11] 张治国,汪嘉程,赵其华,等. 富水山岭地区邻近补水断层隧道结构上的水头分布解析求解[J]. 岩石力学与工程学报,2020,39(增刊2):3378-3394. (Zhang Zhiguo, Wang Jicheng, Zhao Qihua, et al. Analytical solution for head distribution on a tunnel structure adjacent to a water-filled fault in a water-rich mountainous region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(S2):3378-3394. (in Chinese))

[12] 郭玉峰,王华宁,蒋明镜. 水下浅埋双孔平行隧道渗流场的解析研究[J]. 岩土工程学报,2021,43(6):1088-1096. (Guo Yufeng, Wang Huaning, Jiang Mingjing. Analytical solutions for the seepage field of underwater shallow-buried parallel twin tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(6):1088-1096. (in Chinese))

[13] 李鹏飞,刘江,张素磊. 平行4孔山岭隧道渗流场解析解及影响参数分析[J]. 隧道建设(中英文),2022,42(12):1996-2005. (Li Pengfei, Liu Jiang, Zhang Sulei. Analytical solution for the seepage field of parallel four-tube mountain tunnels and

analysis of influencing parameters[J]. Tunnel Construction,2022,42(12):1996-2005. (in Chinese))
[14] Wu Jie,Li Pengfei,Yao Aijun,et al. Three-dimensional analytical solutions for non-Darcy seepage ahead of a grouted subsea tunnel face[J]. Computers and Geotechnics,2023,159:105509.
[15] Zhang Yu,Zhang Dingli,Fang Qian,et al. Analytical solutions for non-Darcy seepage in grouted subsea tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2020,96:103182.
[16] 张丙强,王启云,卢晓颖. 软土地层浅埋圆形隧道非达西渗流场解析研究[J]. 岩土力学,2018,39(12):4377-4384. (Zhang Bingqiang,Wang Qiyun,Lu Xiaoying. Analytical solution for the non-Darcian seepage field of a shallow circular tunnel in soft soil [J]. Rock and Soil Mechanics,2018,39(12):4377-4384. (in Chinese))
[17] 于茜,潘海东,吕咸青. 南海主要分潮振幅变化趋势再探[J]. 海洋学报,2022,44(5):62-70. (Yu Qian,Pan Haidong,Lyu Xianqing. Trends in the amplitudes of major tidal constituents in the South China Sea:a revisit[J]. Haiyang Xuebao,2022,44 (5):62-70. (in Chinese))
[18] 潘以恒,罗其奇,周斌,等. 半无限平面含注浆圈深埋隧道渗流场解析研究[J]. 浙江大学学报(工学版),2018,52(6):1114-1122. (Pan Yiheng,Luo Qiqi,Zhou Bin,et al. Analytical study on the seepage field of a deep-buried tunnel with a grouting circle in a half-plane[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science),2018,52(6):1114-1122. (in Chinese))
[19] 李毅,伍嘉,李坤. 基于 FLAC3D 的饱和-非饱和渗流分析[J]. 岩土力学,2012,33(2):617-622. (Li Yi,Wu Jia,Li Kun. Saturated-unsaturated seepage analysis based on FLAC3D[J]. Rock and Soil Mechanics,2012,33(2):617-622. (in Chinese))
[20] 杜朝伟. 海底隧道衬砌水压力及结构受力特征研究[D]. 北京:北京交通大学,2011.
[21] 王建宇. 再谈隧道衬砌水压力[J]. 现代隧道技术,2003,40(3):5-10. (Wang Jianyu. Once more on hydraulic pressure acting on tunnel linings[J]. Modern Tunnelling Technology,2003,40(3):5-10. (in Chinese))
[22] 朱成伟,应宏伟,龚晓南. 任意埋深水下隧道渗流场解析解[J]. 岩土工程学报,2017,39(11):1984-1991. (Zhu Chengwei,Ying Hongwei,Gong Xiaonan. Analytical solutions for seepage fields of underwater tunnels with arbitrary burial depths[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2017,39(11):1984-1991. (in Chinese))

(收稿日期:2025-06-17　编辑:熊水斌)

(上接第 113 页)

[12] 汤青峰,彭立云,蒋永红,等. 基于 SWMM 的城市河网情景调控与分析研究[J]. 水利水电技术(中英文),2023,54(5):15-26. (Tang Qingfeng,Peng Liyun,Jiang Yonghong,et al. SWMM-based scenario regulation and analysis of urban river networks [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2023,54(5):15-26. (in Chinese))
[13] 闫毓,袁赛瑜,唐洪武,等. 上海蕴南水利控制片河网水动力再造[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(4):329-334. (Yan Yu,Yuan Saiyu,Tang Hongwu,et al. Hydrodynamic reconstruction of Wennan river network in Shanghai City[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(4):329-334. (in Chinese))
[14] 何健,冯胜男,韩幸烨. 闸泵调度对扬州市主城区河网水动力水质改善效果的模拟分析[J]. 江苏水利,2022(6):6-11.
[15] 徐存东,訾亚辉,黄嵩,等. 基于 MIKE 21 的圩区河网水动力调控方法研究[J]. 水利水电技术(中英文),2023,54(7):161-170. (Xu Cundong,Zeng Yahui,Huang Song,et al. Research on the hydrodynamic regulation method of river network in polder area based on MIKE 21[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2023,54(7):161-170. (in Chinese))
[16] 孙文宇,姚成,刘志雨,等. 秦淮河水文水动力模型及实时校正[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(4):26-33. (Sun Wenyu,Yao Cheng,Liu Zhiyu,et al. Hydrological and hydrodynamic model of Qinhuai River and real-time correction[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(4):26-33. (in Chinese))
[17] 李健,金中武,蔺秋生. 香溪河水质的平面二维数值模拟[J]. 水动力学研究与进展:A 辑,2012,27(6):720-726. (Li Jian,Jin Zhongwu,Lin Qiusheng. Application of two-dimensional water quality model in Xiangxi River[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics,2012,27(6):720-726. (in Chinese))

(收稿日期:2025-07-31　编辑:熊水斌)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.05.019

干散货港区 $PM_{2.5}$浓度多变量混合预测模型

陶凯旋[1],封学军[1],季皆名[1],涂傲辉[1],林志端[2]

(1.河海大学港航物流与绿色发展研究所; 2.中交水运规划设计院有限公司)

摘要:为实现干散货港区 $PM_{2.5}$ 浓度的精准预测与有效管控,提出了一种融合 XGBoost 特征筛选与粒子群算法(PSO)智能优化的支持向量回归(SVR)多变量混合预测模型(XGBoost-PSO-SVR 模型)。该模型充分考虑了港口 $PM_{2.5}$ 形成机制与气象条件下扩散过程的差异,通过 XGBoost 量化关键影响因子,并利用 PSO 优化后的 SVR 进行精准预测。长江南京段典型港区的实例验证结果表明,XGBoost-PSO-SVR 模型在高浓度区间具有较强的鲁棒性,与单变量 STL-ARIMA-SVR 模型相比,其平均绝对误差、平均绝对百分比误差和均方根误差分别降低 15.6%、14.3%和 24.9%;与传统多变量 SVR 模型相比,分别降低 52.5%、57.1%和 37.7%;XGBoost-PSO-SVR 模型具有较好的预测性能,可为干散货港区智慧化抑尘提供决策支撑。

关键词:干散货港区;$PM_{2.5}$;智慧抑尘;多变量预测;混合模型;XGBoost

中图分类号:X736.1 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-1980(2026)05-0164-09

Multivariate hybrid prediction model for $PM_{2.5}$ concentration in dry bulk ports

Tao Kaixuan[1], **Feng Xuejun**[1], **Ji Jieming**[1], **Tu Aohui**[1], **Lin Zhiduan**[2]

(1. *Institute of Maritime Logistics and Green Development*, *Hohai University*; 2. *CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd.*)

Abstract: To achieve accurate prediction and effective control of $PM_{2.5}$ concentration in dry bulk port areas, a multivariate hybrid prediction model based on support vector regression (SVR) integrating XGBoost feature selection and particle swarm optimization (PSO) intelligent optimization was proposed, namely XGBoost-PSO-SVR model. The differences in $PM_{2.5}$ formation mechanisms and diffusion processes under meteorological conditions in ports were fully considered by the model. XGBoost was employed to quantify the key influencing factors, and the SVR optimized by PSO was utilized for accurate prediction. The case verification results of typical port areas in the Nanjing section of the Yangtze River show that the XGBoost-PSO-SVR model has strong robustness in the high-concentration range; compared with the univariate STL-ARIMA-SVR model, its MAE, MAPE, and RMSE decrease by 15.6%, 14.3%, and 24.9%, respectively; compared with the conventional multivariate SVR model, they decrease by 52.5%, 57.1%, and 37.7%, respectively. The XGBoost-PSO-SVR model has good prediction performance and can provide decision support for intelligent dust suppression in dry bulk port areas.

Key words: dry bulk port; $PM_{2.5}$; intelligent dust suppression; multivariate prediction; hybrid model; XGBoost

随着国际贸易的发展和陆海运输通道的完善,铁矿石、煤炭、谷物等大宗商品的流通日益频繁,干散货成为全球贸易和港口服务持续发展的关键动力。根据克拉克森统计,2024 年全球贸易量增长 6.5%,总量达到 126.6 亿 t,其中干散货占比高达 42.3%。然而,干散货装卸、运输和存储作业会产生大量粉尘污染,常规风力条件下其影响半径可达 3~4 km,强风条件下可扩展 10 km 以上,在不同尺度上影响着港区周边空气质量、设备安全,并对作业人员和周边居民的健康构成威胁[1-2]。厘清干散货港区颗粒物浓度变化的影响因素并实现精准预测,为管理者提前制定针对性的防尘措施提供科学依据,正成为港口绿色智慧化发展的迫切要求。

大量研究指出,颗粒物浓度受多种因素影响,包括风速、风向等气象条件及货种、物料含水率、粒径和作业强度等。Dong 等[3]利用露天煤尘源估算模型发现,含水率相同时起尘量与风速正相关;Manoli 等[4]指出 Volos 港内 PM_{10} 浓度峰值多出现在风速低于 0.5 m/s 的无风天气;李绍武等[5]通过风洞试验验证了铁矿粉起尘量在自然含水率条件下随风速增大呈幂函数增长;Gupta 等[6]通过对港区颗粒物及气象监测数据进行

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB2600203)

作者简介:陶凯旋(2002—),男,硕士研究生,主要从事港航运筹与优化算法研究。E-mail:tkx@hhu.edu.cn

通信作者:封学军(1975—),男,教授,博士,主要从事绿色智慧港航工程研究。E-mail:fxj@hhu.edu.cn

统计分析,发现 TSP 浓度与风速具有较强相关性;Žibert 等[7]采用聚类方法,证实了风速与降雨是影响颗粒物时空变化的重要因素。在颗粒物时空分布方面,研究表明码头前沿和堆场区域是高浓度的主要分布区[8]。别淑君[9]指出青岛港 $PM_{2.5}$ 的主要来源为港口活动与船舶排放;王康等[10]采用希尔伯特-黄变换(HHT)方法揭示了港口颗粒物浓度的多尺度波动规律。Shen 等[11]和刁昶皓等[12]分别从垂直与水平空间维度细化颗粒物分布特征,指出不同作业源和抑尘措施对颗粒物浓度有显著影响。尽管如此,如何在现有基础上构建兼顾多因子影响的高精度颗粒物浓度预测模型,仍是当前研究的热点与难点。

大气污染物浓度预测模型主要可分为数值模式和统计机器学习两类,数值模式基于大气动力学原理,借助 CMAQ[13]、WRF-Chem[14]等模型模拟污染物扩散过程,需建立复杂的扩散模型,且预测结果易受初始场数据影响,预报过程较为复杂,结果往往具有不确定性。相比之下,统计机器学习方法通过历史数据构建回归模型,采用多元线性回归、人工神经网络(ANN)、支持向量机(SVM)及支持向量回归(SVR)等模型进行预测,在特定时空条件下可实现较高的预测精度。目前已有多项研究选取 $PM_{2.5}$ 浓度、温度、湿度、气压、风速、水汽压等影响因子进行研究[15-20],但仍未有效融合 $PM_{2.5}$ 的形成机制与气象条件下的扩散过程,存在一定的局限性。

针对时间序列数据的非线性与波动性特征,自回归积分滑动平均(ARIMA)模型与 SVM 模型被广泛应用并展现出良好的适应性。ARIMA 模型形式相对简单,依赖内生变量即可实现中长期趋势预测,而 SVM 模型则在处理小样本、非线性、高维空间问题中表现出较高精度[21]。彭斯俊等[22]研究表明,ARIMA 模型在分时段 $PM_{2.5}$ 预测中优于灰色模型和全时段 ARIMA 模型;宋国君等[23]发现,ARIMA-SVM 组合模型在峰谷值识别方面优于未进行气象类型划分的传统机器学习模型;戴李杰等[24]通过引入粒子群优化(PSO)算法提升了 SVM 在 $PM_{2.5}$ 小时级预报中的准确性;Shahriar 等[25]对 ARIMA-ANN、ARIMA-SVM、决策树和 CatBoost 等多种模型在孟加拉国 $PM_{2.5}$ 浓度预测中的表现进行了系统评估,结果表明组合模型在预测精度方面具有明显优势。此外,ADMS、AERMOD 等大气扩散模型也被用于污染物空间分布模拟[26-28]。然而,当前研究多集中于单一港区及其周边区域,较少关注颗粒物浓度的多尺度(年、季、日、小时)动态特征及混沌特性,如非平稳性与长期持续性,而基于海量实时监测数据及多变量因素耦合影响探讨港区颗粒物浓度变化的研究亦相对不足。

为了应对多元时序数据和复杂气象及多变量因素的耦合影响,本文系统整合 $PM_{2.5}$ 浓度变化的关键影响因素,提出一种融合特征选择与智能优化的多变量混合预测模型(XGBoost-PSO-SVR 模型),以期为干散货港区 $PM_{2.5}$ 精准防控提供新的技术方案和决策参考。

1　模型构建

$PM_{2.5}$ 浓度变化受气象因子(如温度、湿度、风速等)显著影响,且与 PM_{10} 具有较强相关性[29];总悬浮颗粒物(TSP)作为港区颗粒物的重要指标,其变化能够反映作业扬尘特征[11],仅依赖 $PM_{2.5}$ 浓度单一历史序列进行建模(如 ARIMA 模型)往往受限于其对历史气象条件的“记忆”,难以反映当前或未来气象背景下污染物扩散机制的变化,从而限制了预测的适应性和准确性。为探究复杂多因素交互作用下干散货港区 $PM_{2.5}$ 浓度的预测方法,本文构建了融合特征选择与智能优化的 XGBoost-PSO-SVR 模型,其结构如图 1 所示。

本文建模时,在模型输入层引入气象与颗粒物等多因子数据,通过 XGBoost 算法识别相关变量并剔除冗余特征;为提高 SVR 模型的泛化能力与参数适配性,采用 PSO 算法对其核心参数(惩罚因子 C、核函数核系数 σ)进行全局寻优;最后将筛选后的特征变量输入参数优化后的 SVR 模型,实现 $PM_{2.5}$ 浓度回归预测。该“特征筛选—参数优化—回归预测”三阶段建模策略,通过特征筛选与参数优化的协同作用,可提升模型对复杂多元时序预测问题的适应能力。此外,为验证模型有效性,选取单变量和多变量模型作比较,以突出模型在 $PM_{2.5}$ 形成机制与气象条件下扩散过程耦合预测方面的机制优势。

1.1　XGBoost 重要性指标排序方法

XGBoost 是基于梯度提升的高效机器学习算法,支持多种学习器形式,包括线性分类器和树模型。本文采用树模型进行特征选择,通过量化各特征变量在模型中的重要性,实现以下两个目标:①识别与 $PM_{2.5}$ 高度相关的特征变量;②在保证预测精度的前提下,筛选数量较少的关键特征变量。在模型构建过程中,

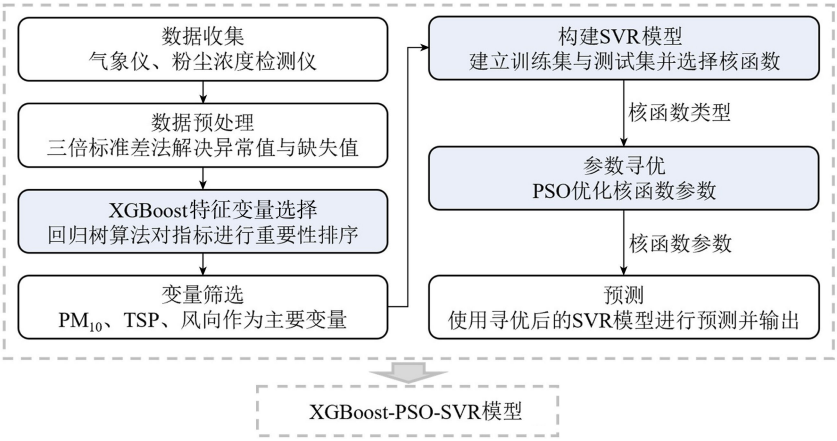


图1 XGBoost-PSO-SVR模型结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of XGBoost-PSO-SVR model structure

XGBoost通过最小化分裂代价、最大化增益来优化树结构,特征变量分裂次数越多、平均增益越大,说明该特征变量的重要性越高。重要性度量指标主要包括特征变量分裂次数、平均增益和平均覆盖率,计算流程为:遍历各节点的所有特征变量→按照样本值对特征变量进行排序→确定增益最大的分裂点并选择相应特征变量进行分裂→更新样本与树节点的映射关系→按照最大深度迭代构建树模型→集成各树完成模型构建→计算特征变量重要性度量指标。

1.2 PSO-SVR自动寻优模型

SVR算法作为一种基于统计学习理论的机器学习方法,通过引入核函数将非线性问题映射到高维空间实现线性回归,具有较强的鲁棒性,能够解决非线性、高维、小样本等实际问题,因此常用于非线性回归预测。SVR模型性能受惩罚因子、不敏感系数与核函数影响显著[30-31]。惩罚因子 C 控制模型对训练误差的容忍度,C 值过大会导致过拟合,反之则模型泛化不足;不敏感系数 ε 则影响支持向量的数量;核函数核系数 σ 决定数据映射的复杂度,本文选择径向基核函数(RBF)。高斯核函数是最常用的RBF[31-32],该函数具有局部性质,其参数可决定函数作用范围,同时RBF对降低样本数据内的噪声干扰有较好的抑制效果,其中核系数 σ 对模型的拟合情况起关键作用,当 σ 过大时,会出现拟合不足的情况,过小时则会出现过拟合现象。

传统参数选择方法依赖经验试错,易陷入局部最优。为此,本文采用PSO算法对SVR参数进行全局寻优,构建PSO-SVR自动寻优模型,以提升预测精度与泛化能力。PSO是一种基于群体协同搜索的智能优化算法,通过粒子在参数空间中的迭代搜索确定较优参数组合。本文将每个粒子的位置表示为一组SVR参数组合,并以验证集的均方根误差(RMSE)作为适应度指标,RMSE越小,表明该参数组合对应的模型预测性能越好。

PSO-SVR自动寻优模型的具体构建流程如图2所示,具体步骤如下:

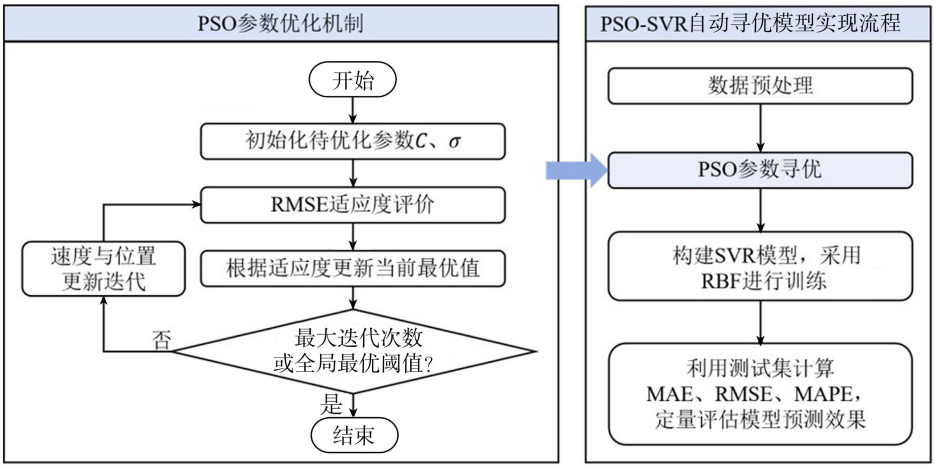


图2 PSO-SVR自动寻优模型构建流程

Fig. 2 Construction flowchart of PSO-SVR automatic optimization model

a. 数据预处理。对输入数据归一化处理,消除量纲影响,并按比例划分为训练集、验证集与测试集。

b. 参数寻优。设定 PSO 参数(种群规模、迭代次数、搜索范围),执行算法获取最优参数 C^*、σ^*。

c. 模型训练与验证。基于最优参数构建 SVR 模型,采用 RBF 进行训练。

d. 性能评估。利用测试集计算平均绝对误差(MAE)、平均绝对百分比误差(MAPE)和 RMSE,定量评估模型预测效果。

2　实例验证

以长江南京段南京西坝码头有限公司(以下简称“西坝码头”)、南京大厂港务有限公司(以下简称“大厂港务”)、南京大胜关港港口有限公司(以下简称“大胜关港口”)、南京明州码头有限公司(以下简称“明州码头”)和南京霞瑞实业有限公司(以下简称“霞瑞码头”)5 个主要干散货港区为案例分析对象,其主要营运货种、年通过能力、港区内抑尘措施与设备等如表 1 所示。

表 1　长江南京段港区简况

Table 1　Overview of port areas in the Nanjing section of the Yangtze River

名称	运营货种	抑尘措施与设备	年通过能力/万 t
西坝码头	煤炭、砂石、石油焦及铜精矿等	防风抑尘网,封闭式皮带运输机,除尘喷淋设备	1 911
大厂港务	砂石、钢铁、石化、煤炭	封闭式皮带运输机	3 436
大胜关港口	砂石料、液体化工品	防风抑尘网,堆场覆盖,封闭式皮带运输机	350
霞瑞码头	煤、石油焦、砂石	封闭式皮带运输机,封闭式堆场	150
明州码头	煤炭、矿石、建材	U 形斗、防风抑尘网	649

颗粒物数据来源于江苏省港口粉尘在线监测监管平台,该平台涵盖了全省主要干散货港区 $PM_{2.5}$、PM_{10}、TSP 和大气压力、风力、风向、温度、湿度分钟级实时监测数据,每个港区至少配置 1 台 β 射线颗粒物监测仪(港界处)和覆盖码头前沿、堆场及卡口的多台光散射法颗粒物监测仪,总数超过 5 000 台套。粉尘在线监测系统 24 h 连续工作,记录每分钟各检测对象浓度,数据结构如图 3 所示。



图 3　港口粉尘在线监测监管平台数据结构示例

Fig. 3　Example of data structure of port dust online detection and supervision platform

本文以 $PM_{2.5}$ 日均浓度作为预测目标,预测时间尺度为天。数据集同时涵盖颗粒物与气象因子两个维度,构成典型的复杂多元时序结构,具有显著的多变量特性。这一特征要求在模型构建中充分考虑污染物形成与气象因子的耦合影响,从而提升模型的预测精度与泛化能力。

2.1　数据预处理

粉尘在线监测监管平台数据由于天气、设备等原因会导致数据丢失,造成某时间段颗粒物检测数据的某个特征值为“0”,或者出现风向范围不在 0°~360°之间、颗粒物质量浓度达到仪器极值(300 μg/m^3)等明显不符合实际的数据,预处理时将该时间段数据删除。针对其他异常数据,采用三倍标准差法进行异常值识别与处理[33]。

2.2　特征变量选择与智能优化

为简化模型结构并提升预测性能,本文从多个影响因子中筛选出与 $PM_{2.5}$ 浓度关联度最高的核心特征变量作为原始输入,涵盖颗粒物因子($PM_{2.5}$、PM_{10}、TSP)和气象因子(大气压力、风速、风向、温度、湿度)。采用 XGBoost 中的回归树算法,对所有特征变量的影响程度进行排序,计算各特征变量的重要性得分。剔除影响较小的特征变量,以简化计算并提高预测精度。$PM_{2.5}$ 浓度的预测中,颗粒物因子的重要性高于气象因子,重要性排序为 PM_{10}、TSP、风向、温度、湿度和风速。在颗粒物因子中,由于 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 和 TSP 存在较强的线性关系,且为向下包含关系,因此 PM_{10} 和 TSP 的重要性得分较高。尽管 PM_{10}、TSP 均包含 $PM_{2.5}$,但基于 XGBoost 的重要性量化指标结果,可以认为 PM_{10} 和 TSP 并非冗余特征,而是预测 $PM_{2.5}$ 浓度最关键的

核心特征变量。因此,本文选择保留 PM_{10} 和 TSP 两个特征变量作为模型的输入。

气象因子中,风向重要性较高,温度次之,风速和湿度的重要性相对较低,这与康俊锋等[34]研究结果相近。因此,本文选取 PM_{10}、TSP 和风向作为影响预测 $PM_{2.5}$ 浓度的特征变量。PSO 算法优化后,确定惩罚因子 $C=20$、核函数核系数 $\sigma=0.046$。PSO 算法参数设置如下:粒子数量为 100,粒子维度为 2,最大迭代次数为 500,局部和全局学习因子均为 2,惯性因子为 0.8,参数最大值为 25、最小值为 0.001。

2.3 模型预测结果对比与分析

港区颗粒物浓度在不同时间尺度(小时、日、月、季和年)下的平均水平存在差异,但整体变化趋势基本一致。大厂港务作为典型的多货种、高通量港区,具备较强代表性,故以其作为案例分析对象。本文采用大厂港务 2020 年 1 月 1 日至 12 月 27 日的 362 个 $PM_{2.5}$ 日均质量浓度数据,基于前 352 天(1 月 1 日至 12 月 17 日)数据进行拟合,后 10 天(12 月 18 日至 12 月 27 日)的数据进行预测,结果见图 4 和表 2。由图 4 可见,日均 $PM_{2.5}$ 质量浓度的拟合值与实测值变化趋势基本一致,拟合效果较好。结合表 2 预测效果可见,模型对数据的解释能力强($R^2=0.89$),已经较为接近理想水平,说明该模型能够有效捕捉 $PM_{2.5}$ 浓度的变化规律;MAE 为 6.46 μg/m³,RMSE 为 8.91 μg/m³,误差均较小;而 MAPE 为 6%,表明相对误差非常小,进一步证明了该模型在实际预测中的高准确性。因此,XGBoost-PSO-SVR 模型在 $PM_{2.5}$ 浓度预测中展现出了良好性能,其预测精度和泛化能力可满足港区污染防控需求,可为类似研究和实际应用提供有力支持。

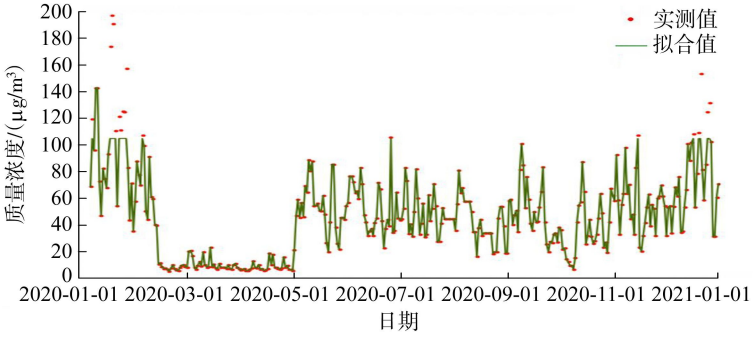


图 4 XGBoost-PSO-SVR 模型拟合效果

Fig. 4 Fitting effect of XGBoost-PSO-SVR model

2.4 与其他模型预测精度对比

为验证多特征变量选择对 $PM_{2.5}$ 日均质量浓度预测结果的影响,选取 ARIMA 模型[22]、STL-ARIMA-SVR 模型[32,35]、使用全部特征变量作为输入的传统 SVR 模型,与本文 XGBoost-PSO-SVR 模型进行对比分析,以综合评估模型性能。

表 2 XGBoost-PSO-SVR 模型预测效果

Table 2 Prediction performance of XGBoost-PSO-SVR model

日期	实测值/(μg/m³)	预测值/(μg/m³)	相对误差/%
2020-12-18	110.25	109.15	1
2020-12-19	82.59	87.49	6
2020-12-20	58.83	60.73	3
2020-12-21	90.23	87.13	3
2020-12-22	91.43	90.33	1
2020-12-23	124.28	118.03	5
2020-12-24	145.25	125.81	13
2020-12-25	99.72	92.62	7
2020-12-26	69.14	66.04	4
2020-12-27	132.52	115.88	13

2.4.1 ARIMA 模型

ARIMA 模型是一种经典的时间序列预测模型,通过自回归、差分和移动平均等过程刻画时间序列中的趋势性和随机波动特征,广泛应用于具有明显时间相关性的预测问题。本文采用 ARIMA 模型作为单变量预测模型的对比模型,用于分析 $PM_{2.5}$ 历史浓度序列的变化规律。

本文在 python3.8 平台中通过编写程序调用 statsmodels.api 数据包构建 ARIMA 模型,经由遍历可得,当自回归阶数 $p=2$、差分阶数 $d=0$、移动平均阶数 $q=1$ 时,AIC、BIC 以及 HQIC 值均为最小,故选取 ARIMA(2,0,1)作为最优模型进行预测。

2.4.2 STL-ARIMA-SVR 模型

STL-ARIMA-SVR 模型是一种单变量混合预测模型,该模型将 STL(seasonal-trend decomposition procedure based on loess)分解方法与 ARIMA、SVR 模型相结合,擅长处理具有季节性和趋势性的时间序列数据。尽管该方法最早由 Cleveland 等在 1990 年提出[36],但其基于分解的核心思想依然具有很强的时效性[35-36],近年

来仍有学者将 STL 分解方法应用于 $PM_{2.5}$ 浓度预测并取得了较好的效果[32]。本文选用 STL-ARIMA-SVR 单变量预测模型作为对比基准,旨在突出 XGBoost-PSO-SVR 多变量预测模型在考虑多因素耦合影响方面的优势。STL-ARIMA-SVR 模型预测步骤如下:

a. 分解。采用 STL 分解方法将原始 $PM_{2.5}$ 浓度数据分解为长期趋势项、季节变动项和余项。

b. 预测。采用 ARIMA 模型对长期趋势项进行预测,采用 SVR 模型对季节变动项和余项进行预测,得到长期趋势项、季节变动项和余项对应的预测结果。

c. 重构。将长期趋势项、季节变动项和余项的预测结果进行叠加重构,获得最终的 $PM_{2.5}$ 浓度预测值。

d. 评估。采用 MAE、MAPE 和 RMSE 作为评价指标,对模型预测性能进行评价。

2.4.3　结果对比与分析

特征选择和智能优化能显著提高 SVR 模型的拟合和预测精度,与本文 XGBoost-PSO-SVR 模型(图 4 和表 2)相比,未经 XGBoost 特征筛选和 PSO 参数优化的 SVR 模型拟合效果及预测性能均较差(图 5 和表 3),$PM_{2.5}$ 日均质量浓度最大绝对误差为 21.26 μg/m³,MAE、MAPE、RMSE 和 R^2 分别为 13.60 μg/m³、14%、14.30 μg/m³ 和 0.70。虽然 SVR 模型在低质量浓度区内拟合效果较好(尤其在第 50~100 天),但在需要重点关注的高质量浓度区,特别是尖峰值的预测上存在较大偏差。本文 XGBoost-PSO-SVR 模型在 3—11 月的拟合效果明显优于 SVR 模型,同时预测结果的 R^2 值由 0.70 提升至 0.89。因此,采用 XGBoost 筛选后的特征变量作为输入,能够显著提升预测精度,验证了本文 XGBoost-PSO-SVR 模型的优势。

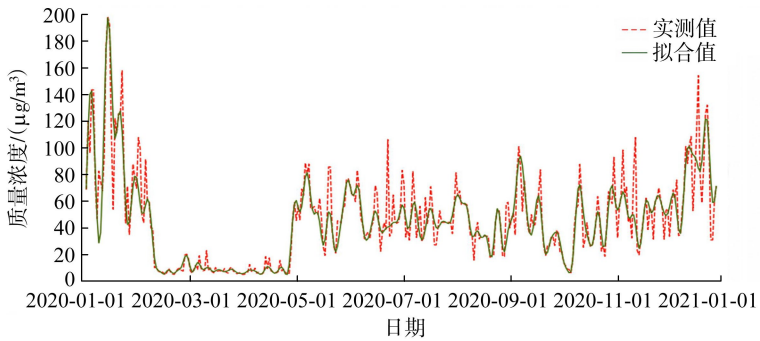


图 5　SVR 模型拟合效果

Fig. 5　Fitting effect of SVR model

3 种对比模型与本文模型的预测结果对比见图 6 和表 4。相较于 ARIMA、STL-ARIMA-SVR 和传统 SVR 模型,本文 XGBoost-PSO-SVR 模型在各项指标上均表现出更优的预测精度。在单变量预测模型中,经 STL 分解后的 STL-ARIMA-SVR 模型精度明显优于 ARIMA 模型,MAE、MAPE 和 RMSE 分别降低了 66.8%、68.2%和 57.0%。在多变量预测模型中,经特征选择后的 XGBoost-PSO-SVR 模型精度明显优于 SVR 模型,MAE、MAPE 和 RMSE 分别降低了 52.5%、57.1%和 37.7%。与单变量 STL-ARIMA-SVR 模型相比,多变量 XGBoost-PSO-SVR 模型预测结果总体更加准确,MAE、MAPE 和 RMSE 分别降低了 15.6%、14.3%和 24.9%。

表 3　SVR 模型预测效果

Table 3　Prediction performance of SVR model

日期	实测值/(μg/m³)	预测值/(μg/m³)	相对误差/%
2020-12-18	110.25	101.15	8
2020-12-19	82.59	96.69	17
2020-12-20	58.83	43.93	25
2020-12-21	90.23	108.33	20
2020-12-22	91.43	84.53	8
2020-12-23	124.28	135.18	9
2020-12-24	145.25	123.99	15
2020-12-25	99.72	113.62	14
2020-12-26	69.14	60.24	13
2020-12-27	132.52	114.54	14

在表现较好的两个混合模型中,XGBoost-PSO-SVR 模型在前 3 天的预测表现更加突出,且全周期内保持较低的误差波动,整体稳定性更强。STL-ARIMA-SVR 模型通过 STL 分解能有效提取趋势、季节和残差项,改善了 ARIMA 对非平稳数据的适应能力,尤其在第 4 天和第 5 天 $PM_{2.5}$ 质量浓度波动时,STL-ARIMA-SVR 模型能够在局部时间窗口内提供较高精度的预测。然而,从整体预测性能看,XGBoost-PSO-SVR 模型的最大绝对误差为 19.44 μg/m³,小于 STL-ARIMA-SVR 模型的 25.89 μg/m³。XGBoost-PSO-SVR 模型在多变量输入基

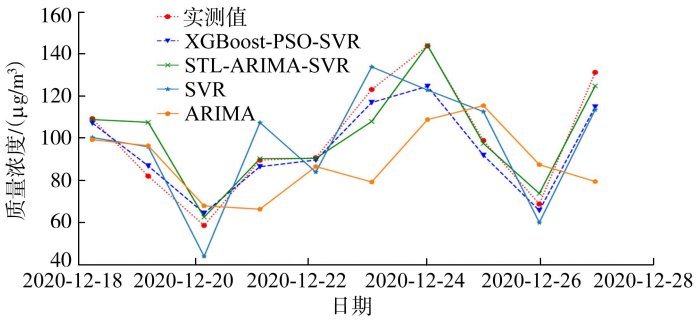


图6 不同模型未来10天 $PM_{2.5}$ 质量浓度预测结果对比

Fig. 6 Comparison of $PM_{2.5}$ mass concentration prediction results of different models for next 10 days

表4 $PM_{2.5}$ 日均质量浓度预测精度比较

Table 4 Comparison of prediction accuracy of $PM_{2.5}$ daily average mass concentration

变量类型	模型	MAE/(μg/m³)	MAPE/%	RMSE/(μg/m³)	R^2
单变量	ARIMA	23.01	22	27.60	0.34
	STL-ARIMA-SVR	7.65	7	11.86	0.80
多变量	SVR	13.60	14	14.30	0.70
	XGBoost-PSO-SVR	6.46	6	8.91	0.89

础上融合了特征选择与PSO参数优化机制,减少了冗余变量干扰,增强了SVR模型的泛化能力,性能表现更佳。此外,当 $PM_{2.5}$ 质量浓度处于55~95 μg/m³时,所有模型的预测精度均较高;当质量浓度超过95 μg/m³时,预测精度有所下降,但XGBoost-PSO-SVR模型波动幅度相对较小,表现出更强的鲁棒性与适应性。

3 结 语

本文针对干散货港区 $PM_{2.5}$ 浓度受多因素影响、时序变化复杂的问题,提出了融合XGBoost特征筛选与PSO参数优化的SVR多变量混合预测模型。该模型利用XGBoost筛选 PM_{10}、TSP和风向等关键影响因子,并采用PSO对SVR模型参数进行优化。长江南京段典型干散货港区监测数据验证结果表明,XGBoost-PSO-SVR模型的MAE、MAPE、RMSE和 R^2 分别为6.46 μg/m³、6%、8.91 μg/m³和0.89,整体预测性能优于ARIMA、STL-ARIMA-SVR和传统SVR模型,且在 $PM_{2.5}$ 高质量浓度区间具有较好的稳定性和适应性。研究结果表明,特征筛选与参数优化能够有效提升SVR模型对港区 $PM_{2.5}$ 浓度变化的预测能力,可为干散货港区污染预测及智慧抑尘决策提供参考。后续可进一步考虑极端天气条件下气象变量突变对预测性能的影响,以提高模型在复杂环境条件下的鲁棒性。

参考文献:

[1] Shen Jinxing, Liu Qinxin, Feng Xuejun. Prediction of PM_{10} concentration in dry bulk ports using a combined deep learning model considering feature meteorological factors[J]. Environmental Science, 2024, 45(9): 5179-5187.

[2] Shen Jinxing, Liu Qinxin, Feng Xuejun. Hourly $PM_{2.5}$ concentration prediction for dry bulk port clusters considering spatiotemporal correlation: a novel deep learning blending ensemble model[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 370: 122703.

[3] Dong Shipei, Liu Bin. Analysis of coal dust source strength in open storage yard of coal port area of Huanghua Port[J]. E3S Web of Conferences, 2020, 206: 01009.

[4] Manoli E, Chelioti-Chatzidimitriou A, Karageorgou K, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons and trace elements bounded to airborne PM_{10} in the harbor of Volos, Greece: implications for the impact of harbor activities[J]. Atmospheric Environment, 2017, 167: 61-72.

[5] 李绍武,李文善,雷鹏,等. 港口散货堆场铁矿粉起尘风洞试验研究[J]. 水道港口, 2016, 37(5): 558-562. (Li Shaowu, Li Wenshan, Lei Peng, et al. Research on dust emission of iron ore for bulk-cargo yard of ore terminal by using wind tunnel test[J]. Port & Waterway Engineering, 2016, 37(5): 558-562. (in Chinese))

[6] Gupta A K, Patil R S, Gupta S K. A Statistical analysis of particulate data sets for jawaharlal nehru port and surrounding harbour

region in India[J]. Environmental Monitoring and Assessment,2004,95(1/2/3):295-309.

[7] Žibert J,Pražnikar J. Cluster analysis of particulate matter (PM_{10}) and black carbon (BC) concentrations[J]. Atmospheric Environment,2012,57:1-12.

[8] 彭宜蔷,封学军,顾建,等. 基于发动机活动的集装箱港作机械排放清单研究[J]. 安全与环境学报,2017,17(3):1136-1141. (Peng Yiqiang,Feng Xuejun,Gu Jian,et al. On the air pollutant emission inventory of the cargo handling equipment based on the activities of the container delivery ports[J]. Journal of Safety and Environment,2017,17(3):1136-1141. (in Chinese))

[9] 别淑君. 港口地区大气 $PM_{2.5}$ 及其化学成分的组成特征及来源解析[D]. 济南:山东大学, 2020.

[10] 王康,张艳,王启明,等. 基于 HHT 的干散货港区大气 TSP 浓度时频特征分析[J]. 环境科学与技术,2020,43(9):125-134. (Wang Kang, Zhang Yan, Wang Qiming, et al. Time-frequency analysis of TSP in dry bulk port based on HHT[J]. Environmental Science & Technology,2020,43(9):125-134. (in Chinese))

[11] Shen Jinxing, Feng Xuejun,Zhuang Kai,et al. Vertical distribution of particulates within the near-surface layer of dry bulk port and influence mechanism:a case study in China[J]. Sustainability,2019,11(24):7135.

[12] 刁昶皓,封学军,张艳,等. 基于无人机平台的干散货港区 $PM_{2.5}$ 分布规律研究[J]. 环境污染与防治,2020,42(12):1502-1506. (Diao Changhao,Feng Xuejun,Zhang Yan,et al. Study on $PM_{2.5}$ distribution in dry bulk port based on unmanned aerial vehicle platform [J]. Environmental Pollution & Control,2020,42(12):1502-1506. (in Chinese))

[13] Chen Jianjun, Lu Jin, Avise J C, et al. Seasonal modeling of $PM_{2.5}$ in California's San Joaquin Valley[J]. Atmospheric Environment,2014,92:182-190.

[14] Grell G A, Peckham S E, Schmitz R, et al. Fully coupled "online" chemistry within the WRF model[J]. Atmospheric Environment,2005,39(37):6957-6975.

[15] Mohan M,Gupta M. Sensitivity of PBL parameterizations on PM_{10} and ozone simulation using chemical transport model WRF-Chem over a sub-tropical urban airshed in India[J]. Atmospheric Environment,2018,185:53-63.

[16] Lu Weizhen,Wang Wenjian,Wang Xiekang,et al. Potential assessment of a neural network model with PCA/RBF approach for forecasting pollutant trends in Mong Kok urban air,Hong Kong[J]. Environmental Research,2004,96(1):79-87.

[17] Zhou Qingping,Jiang Haiyan,Wang Jianzhou,et al. A hybrid model for $PM_{2.5}$ forecasting based on ensemble empirical mode decomposition and a general regression neural network[J]. Science of the Total Environment,2014,496:264-274.

[18] Narut S,Tassanee P,Kraichat T. Relationship between PM_{10} and $PM_{2.5}$ levels in high-traffic area determined using path analysis and linear regression[J]. Journal of Environmental Sciences,2018,69:105-114.

[19] 陈亚玲,赵智杰. 基于小波变换与传统时间序列模型的臭氧浓度多步预测[J]. 环境科学学报,2013,33(2):339-345. (Chen Yaling,Zhao Zhijie. A multi-step-ahead prediction of ozone concentration using wavelet transform and traditional time series model[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2013, 33(2):339-345. (in Chinese))

[20] 陈军,高岩,张烨培,等. $PM_{2.5}$ 扩散模型及预测研究[J]. 数学的实践与认识,2014,44(15):16-27. (Chen Jun,Gao Yan,Zhang Yepei,et al. Study on the diffusion model and forecast of $PM_{2.5}$ pollution[J]. Mathematics in Practice and Theory,2014,44(15):16-27. (in Chinese))

[21] 武骁,宗蓓华. 基于支持向量机回归的港口吞吐量非线性组合预测[J]. 河海大学学报(自然科学版),2005,33(4):482-484. (Wu Xiao,Zong Beihua. Nonlinear combined prediction of port throughput based on support vector machine regression[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2005,33(4):482-484. (in Chinese)).

[22] 彭斯俊,沈加超,朱雪. 基于 ARIMA 模型的 $PM_{2.5}$ 预测[J]. 安全与环境工程,2014,21(6):125-128. (Peng Sijun,Shen Jiachao,Zhu Xue. $PM_{2.5}$ prediction based on ARIMA model[J]. Safety and Environmental Engineering,2014,21(6):125-128. (in Chinese))

[23] 宋国君,国潇丹,杨啸,等. 沈阳市 $PM_{2.5}$ 浓度 ARIMA-SVM 组合预测研究[J]. 中国环境科学,2018,38(11):4031-4039. (Song Guojun,Guo Xiaodan,Yang Xiao,et al. Forecasting of $PM_{2.5}$ concentration in Shenyang City with ARIMA-SVM combined model[J]. China Environmental Science,2018,38(11):4031-4039. (in Chinese))

[24] 戴李杰,张长江,马雷鸣. 基于机器学习的 $PM_{2.5}$ 短期浓度动态预报模型[J]. 计算机应用,2017,37(11):3057-3063. (Dai Lijie,Zhang Changjiang,Ma Leiming. Dynamic forecasting model of short-term PM2. 5 concentration based on machine learning [J]. Journal of Computer Applications,2017,37(11):3057-3063. (in Chinese))

[25] Shahriar S A, Kayes I, Hasan K, et al. Potential of ARIMA-ANN, ARIMA-SVM, DT and CatBoost for atmospheric $PM_{2.5}$ forecasting in Bangladesh[J]. Atmosphere,2021,12(1):100.

[26] 石柳,刘陈鸿,马继华,等. ADMS 模型在港口规划大气环境影响评价中的应用[J]. 西部交通科技,2019(6):175-205. (Shi Liu,Liu Chenhong,Ma Jihua,et al. Application of ADMS model in atmospheric environmental impact assessment of port

planning[J]. Western China Communications Science & Technology,2019(6):175-205. (in Chinese))

[27] 何泽慧,彭士涛. AERMOD-EIA 模型参数在港口粉尘污染预测中的敏感性分析[J]. 水道港口,2012,33(4):342-347. (He Zehui,Peng Shitao. AERMOD-EIA model parameters sensitivity analysis of port dust pollution prediction[J]. Port & Waterway Engineering,2012,33(4):342-347. (in Chinese))

[28] 刘建昌,李兴华,徐洪磊,等. 内河多点分散码头大气污染叠加影响特征[J]. 环境科学,2013,34(5):2044-2050. (Liu Jianchang,Li Xinghua, Xu Honglei, et al. Superposition impact character of air pollution from decentralization docks in a freshwater port[J]. Environmental Science,2013,34(5):2044-2050. (in Chinese))

[29] 张玮,郭胜利,申付振,等. 南京地区 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度分布特征及与相关气象条件的关系[J]. 科学技术与工程,2016,16(4):124-129. (Zhang Wei,Guo Shengli,Shen Fuzhen,et al. The relationship between the distribution characteristics of PM_{10} and $PM_{2.5}$ in Nanjing area and meteorological conditions[J]. Science Technology and Engineering,2016,16(4):124-129. (in Chinese))

[30] 谷艳昌,吴云星,黄海兵,等. 基于遗传算法优化支持向量机的大坝安全性态预测模型[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(5):419-425. (Gu Yanchang, Wu Yunxing, Huang Haibing, et al. Prediction model of dam safety behavior based on genetic algorithm optimized support vector machine[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(5):419-425. (in Chinese))

[31] 王红瑞,魏豪杉,胡立堂,等. 基于遗传算法的 SVM-AR 改进模型与应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(6):488-497. (Wang Hongrui,Wei Haoshan,Hu Litang,et al. Improved model and application of SVM-AR based on genetic algorithm [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(6):488-497. (in Chinese))

[32] 柳建菲. 基于时间序列分解的 $PM_{2.5}$ 浓度预测[D]. 兰州:兰州大学,2020.

[33] Bolmanis E,Uhlendorff S,Pein-Hackelbusch M,et al. Anomaly detection and removal strategies for in-line permittivity sensor signal used in bioprocesses[J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology,2025,13:1609369.

[34] 康俊锋,谭建林,方雷,等. XGBoost-LSTM 变权组合模型支持下短期 $PM_{2.5}$ 浓度预测:以上海为例[J]. 中国环境科学,2021,41(9):4016-4025. (Kang Junfeng, Tan Jianlin, Fang Lei, et al. Short-term $PM_{2.5}$ concentration prediction based on XGBoost and LSTM variable weight combination model: a case study of Shanghai[J]. China Environmental Science,2021,41(9):4016-4025. (in Chinese)).

[35] 吕蓬,岳莉莉,赵晓丽. 小波分解和 ARIMA 模型相结合的短期风速预测[J]. 科技信息,2011(14):401-402. (Lyu Peng, Yue Lili,Zhao Xiaoli. Short-term wind speed prediction combined with wavelet decomposition and ARIMA model[J]. Science and Technology Information,2011(14):401-402. (in Chinese))

[36] Cleveland R B,Cleveland W S,McRae J E,et al. STL:a seasonal-trend decomposition procedure based on LOESS[J]. Journal of Official Statistics, 1990, 6(1): 3-73.

(收稿日期:2025-07-08 编辑:熊水斌)

(上接第38页)

[30] 陈爱军,陶子淳. 多样性地形条件下 IMERG 精度综合评估[J]. 科学技术与工程,2025,25(16):6608-6618. (Chen Aijun, Tao Zichun. Comprehensive assessment of IMERG accuracy under diverse topographic conditions[J]. Science Technology and Engineering,2025,25(16):6608-6618. (in Chinese))

[31] 雍斌,周振杨,陶新,等. 黄河源区多源融合降水产品综合评价及其水文效应评估[J]. 水资源保护,2025,41(2):47-57. (Yong Bin,Zhou Zhenyang,Tao Xin,et al. Comprehensive evaluation and hydrological effect evaluation of multi-source fusion precipitation product in the Yellow River source area[J]. Water Resources Protection,2025,41(2):47-57. (in Chinese))

[32] 李致家,龚俊超,孙明坤. 中国半湿润流域 WRF-Hydro 模型参数敏感性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):1-8. (Li Zhijia, Gong Junchao, Sun Mingkun. Parametric sensitivity analysis of WRF-Hydro model in a semi-humid watershed of China[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(5):1-8. (in Chinese))

[33] 齐晟慰,谷黄河,王玉明,等. 不同融合降水数据驱动的 WRF-Hydro 模型对中小流域山洪模拟的适用性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2026,54(2):45-52. (Qi Shengwei,Gu Huanghe,Wang Yuming,et al. Applicability of WRF-Hydro model driven by different precipitation fusion data in mountain torrent simulation of medium-and small-sized watersheds[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2026,54(2):45-52. (in Chinese))

(收稿日期:2025-08-26 编辑:刘晓艳)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.05.020

基于 OpenFOAM 的网袋状牡蛎礁消浪特性数值模拟

邵士好[1,2],陶爱峰[1,2],王佑齐[3],田 鹏[4],邢金洋[5],刘剑浩[1,2],徐 伟[6],
范 骏[1,2],陈新平[6],韩 宇[7]

(1. 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室; 2. 河海大学港口海岸与近海工程学院;
3. 河海大学水文水资源学院; 4. 中交上海航道勘察设计研究院有限公司; 5. 上海勘测设计研究院有限公司;
6. 自然资源部海洋减灾中心; 7. 浙江省水利河口研究院(浙江省海洋规划设计研究院))

摘要: 为了定量评估网袋状牡蛎礁的消浪效能并深入研究礁体粗糙度参数对波能耗散的影响,基于 OpenFOAM 构建了网袋状牡蛎礁的数值模型,通过改变相对礁体高度、相对礁顶宽度、入射波陡和粗糙度等参数,分析了规则波作用下牡蛎礁的消浪特性。研究结果表明:透射系数随各参数的增大而减小,其中相对礁体高度影响最为显著;相对礁体高度为 1.0 时,粗糙度对波浪衰减的影响主要体现在低值范围,粗糙度从 0 增大到 2.5 时透射系数降低 23.6%,但继续增大粗糙度透射系数则几乎不再发生变化。基于分析结果,采用回归分析法拟合了透射系数的预测公式,可为网袋状牡蛎礁消浪能力评估提供依据。

关键词:网袋状牡蛎礁;粗糙度;波浪衰减;透射系数;OpenFOAM
中图分类号:TV139.2;P753 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-1980(2026)05-0173-08

Numerical simulation of wave attenuation characteristics of oyster shell bags based on OpenFOAM

Shao Shihao[1,2], **Tao Aifeng**[1,2], **Wang Youqi**[3], **Tian Peng**[4], **Xing Jinyang**[5], **Liu Jianhao**[1,2], **Xu Wei**[6], **Fan Jun**[1,2], **Chen Xinping**[6], **Han Yu**[7]

(1. *Key Laboratory of Coastal Disaster and Protection (Hohai University), Ministry of Education*;
2. *College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University*;
3. *College of Hydrology and Water Resources, Hohai University*;
4. *CCCC Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd.*;
5. *Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co., Ltd.*; 6. *National Marine Hazard Mitigation Service*;
7. *Zhejiang Institute of Hydraulics & Estuary (Zhejiang Institute of Marine Planning and Design)*)

Abstract: To quantitatively evaluate the wave attenuation performance of oyster shell bags and further investigate the influence of reef roughness parameters on wave energy dissipation, a numerical model of oyster shell bags was established based on OpenFOAM. By changing parameters including relative reef height, relative reef crest width, incident wave steepness, and roughness, the wave attenuation characteristics of oyster reefs under regular waves were analyzed. The results show that the transmission coefficient decreases with the increase in each parameter, among which the relative reef height has the most significant influence. When the relative reef height is 1.0, the influence of roughness on wave attenuation is mainly reflected in the low-value range; when the roughness increases from 0 to 2.5, the transmission coefficient decreases by 23.6%, but as the roughness continues to increase, the transmission coefficient remains almost unchanged. Based on the analytical results, a prediction formula for the transmission coefficient was fitted using regression analysis, which provides a basis for evaluating the wave attenuation capacity of oyster shell bags.

Key words: oyster shell bag; roughness; wave attenuation; transmission coefficient; OpenFOAM

近一个世纪以来,全球气候变暖导致海平面持续上升,风暴潮等海洋自然灾害的规模与频率均显著增加[1-2]。传统硬质海堤在保障沿海居民生命财产安全方面发挥了关键作用,但同时也对海岸生态环境造成了一定的负面影响[3-4]。近年来,随着 Building with Nature[5-6]、基于自然的解决方案[7-9]以及减灾与生态协同增效[10]等理念的兴起与发展,基于生态系统的海岸防护逐渐成为一种融合防护功能、经济效益与生态效益的

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3007900);浙江省水利厅科技计划项目(RC2401)
作者简介:邵士好(2002—),男,硕士研究生,主要从事海岸防灾减灾研究。E-mail:shihao.shao@hhu.edu.cn
通信作者:陶爱峰(1978—),男,教授,博士,主要从事海洋防灾减灾研究。E-mail:aftao@hhu.edu.cn

可持续范式[11]。

牡蛎礁作为海洋生态系统的重要组成部分,由牡蛎不断附着于硬质基底并经多年生长堆积而成,具有结构透空、形态复杂及表面大糙率等典型特征。它们不仅可以净化水质、促进渔业资源增殖、增加生物多样性和生态系统稳定性,还具有消浪弱流、减缓岸线侵蚀等重要功能[12-16],是实现海岸带防灾减灾与生态修复协同增效的有效途径。与传统硬质防护结构相比,牡蛎礁能够通过牡蛎的持续生长与沉积,动态适应海平面上升,从而增强海岸带防护系统的气候韧性与长期适应性[17]。

近年来,国内外学者采用多种数值模拟方法对牡蛎礁的消浪效果进行了研究。例如:Hong 等[18]基于 SWAN 模型构建了中空结构礁体模拟山东滨州沿海牡蛎礁消波过程,分析了不同水位和波向条件下牡蛎礁的消浪性能;Yang 等[19]利用 OpenFOAM 建立了波浪与多孔牡蛎礁结构相互作用的数值模型,探讨了礁体高度、宽度、孔隙率及布置形式对牡蛎礁消浪效果的影响;岑林等[20]采用 SWASH 模型,以不透水矩形块体概化牡蛎礁形态,研究了牡蛎礁与红树林的协同消浪特性;Salatin 等[21]基于 FUNWAVE-TVD 建立了波浪与混凝土块堆叠式的牡蛎礁相互作用模型,并利用美国特拉华湾现场观测数据对其进行了验证;Carter 等[22]结合路易斯安那州沿海的 Living Shorelines 项目,通过 FLOW-3D 构建了人工牡蛎礁模型,并分析了其波浪衰减能力。上述研究大多通过简化几何形态(如不透水矩形块体、混凝土块堆叠体)初步揭示了牡蛎礁的消浪潜力,然而目前仍缺乏对其消浪效果的定量化评价;与传统潜堤工程主要通过堤顶波浪破碎、反射和越浪过程耗能不同,牡蛎礁潜堤还存在牡蛎附着导致的表面粗糙度所引起的底部摩擦能量耗散。粗糙度作为影响近床流速分布与湍流动能的关键参数(如牡蛎聚集形态与壳体尖锐度可显著改变波能耗散效率),其具体作用机制尚不明确。因此,定量评估牡蛎礁的消浪效能并深入研究礁体粗糙度参数对波能耗散的影响,对提升牡蛎礁潜堤的消浪特性具有重要科学意义与工程应用价值。

针对当前牡蛎礁消浪研究中定量评估不足以及数值模型普遍忽略粗糙度影响的问题,本文基于 OpenFOAM 构建了网袋状牡蛎礁消浪的数值模型,通过系统分析其消浪特性随不同控制因素的变化规律,定量评估了网袋状牡蛎礁地形对消浪效果的影响,揭示了粗糙度对透射系数的影响机制,并采用回归分析法建立了透射系数的预测公式,可为牡蛎礁生态护岸工程设计提供参考。

1 数值模型

1.1 模型构建

OpenFOAM 具有灵活度高、适用性强及能够兼顾计算效率与准确度等优点[23],已广泛应用于波浪-结构物相互作用的研究中[24]。模型选用基于 OpenFOAM 的 OlaFlow 求解器,以良好模拟波浪和礁体之间的相互作用。模型通过求解雷诺平均纳维-斯托克斯方程(RANS)来模拟波浪与结构物相互作用下的流场。牡蛎礁消浪工况包括水和空气两相,因此使用 VOF 方法来描述液面运动。

数值模型中水流经过牡蛎礁时,流态会发生强烈变化,故考虑采用湍流模型。k-ω SST 模型综合了 k-ε 模型在远场区域收敛性好的特点与 k-ε 模型在近壁区分辨率高的优势,能够准确捕捉礁体表面附近的剪切湍流与能量耗散过程。因此本文采用 k-ω SST 模型作为湍流模型来进行数值模拟。k-ω SST 模型表达式如下:

$$\frac{\partial k}{\partial t}+\frac{\partial u_j k}{\partial x_j}-\frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\upsilon+\sigma_k\upsilon_t)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]=P_k-\beta^*\omega k \tag{1}$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t}+\frac{\partial u_j \omega}{\partial x_j}-\frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\upsilon+\sigma_\omega\upsilon_t)\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right]=\frac{\gamma}{\upsilon_t}G-\beta\omega^2+2(1-F_1)\frac{\sigma_{\omega 2}}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial \omega}{\partial x_j} \tag{2}$$

其中 $$P_k=\min(G,10\beta^*k\omega)\qquad G=\upsilon_t\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\qquad \upsilon_t=\frac{\alpha_1 k}{\max(\alpha_1\omega,SF_2)}$$

式中:k 为湍动能;ω 为比耗散率;u_j 为雷诺平均时均速度分量;P_k 为 k 的产生项;G 为湍动能生成项;υ 为运动黏度;υ_t 为湍流的运动黏度;S 为雷诺平均流的平均应变速率;σ_k 为 k 方程的湍流普朗特数;σ_ω、$\sigma_{\omega 2}$ 为 ω 方程的湍流普朗特数,取自远场 k-ε 模型的参数集;γ 为 ω 方程产生项系数;β^* 为 SST 常数,取 0.09;β 为 ω 方程湍流衰减系数;α_1 为涡黏限制系数,取 0.31;F_1、F_2 为混合函数,F_1 在靠近边壁时为 1,远离边壁时为 0;F_1、F_2 表达式如下:

$$F_1 = \tanh\left\{\min\left[\max\left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500y}{y^2\omega}\right), \frac{4\sigma_{\omega 2}k}{D_{k\omega}y^2}\right]\right\}^4 \tag{3}$$

$$F_2 = \tanh\left[\max\left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\upsilon}{y^2\omega}\right)\right]^2 \tag{4}$$

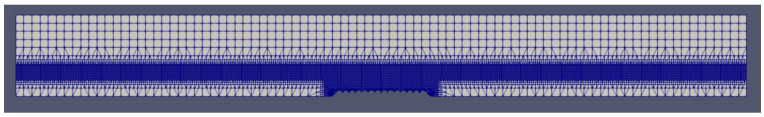
式中:$D_{k\omega}$ 为交叉扩散项,$D_{k\omega} = \max\left(2\rho\sigma_{\omega 2}\frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_i}\frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10}\right)$;$\rho$ 为流体密度。

1.2　网格划分

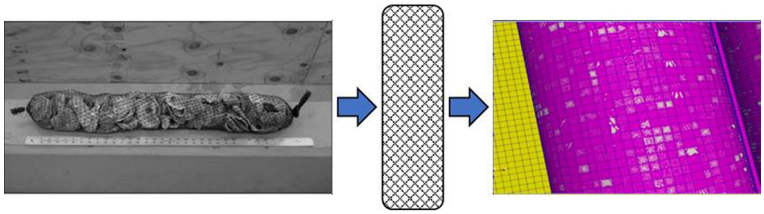
在计算域的入口处,采用速度入口边界,通过指定波面和流体速度进行造波。在计算域的入口处和出口处都设置了主动消波边界,以方便消波。水槽底部定义为壁面边界,两侧壁面定义为对称边界。顶部边界施加大气压力条件。计算域采用 blockMesh 生成均匀底网,网格尺寸 0.10 m。利用 snappyHexMesh 对礁体表面和自由液面区域局部加密,礁体表面及自由液面附近网格尺寸细化到 12.5 mm,尖角及高曲率处细化至 6.2 mm,自由表面带设置水平切片加密区以提高波面捕捉精度。共生成 209 万网格,完整网格如图 1(a)所示。礁体附近网格为远端网格尺寸的 1/2,兼顾计算效率与局部精度。

1.3　礁体粗糙度参数化

本文将网袋状牡蛎礁等效为不透水、无孔隙的简化几何体(如图 1(b)所示)。通过设置粗糙度常数 C_s 为 0.8 来表示网袋状牡蛎礁表面网眼结构。采用 nut 文件中的 nutkRoughWallFunction 设置无量纲参数等效砂粒粗糙度(K_s,以下简称"粗糙度")来量化礁体大糙率表面对流动阻力的影响,本质是将复杂真实粗糙面等效为一层均匀砂粒床,从而把多尺度几何粗糙度简化为单一水力学长度尺度参数,并在壁函数中以"粗糙函数"形式修正对数律截距(体现为近壁速度亏损与摩擦阻力增加)。对于均匀砂粒附着的表面,K_s 可简单定义为表面砂粒突出高度;对不均匀砂粒附着的表面,可用表面砂粒的平均直径表示。当 $K_s = 0$ 时,礁体表面是光滑的,K_s 越大代表礁体表面越粗糙,拥有更大的摩擦阻力与更厚的动量耗散层。



(a) OpenFOAM数值水槽



(b) 网袋状牡蛎礁概化图

图 1　数值模型

Fig. 1　Numerical model

2　模型验证与分析

2.1　计算模型

数值模型布置如图 2 所示,数值水槽长 40 m、宽 0.4 m、高 1 m。牡蛎礁紧密排列布置,单排牡蛎礁宽度为 0.4 m,放置于距造波边界 20 m 处。礁体前后各布置 3 个波高测点,礁后 3 处波高测点间距 1 m,分别监测礁后 1、2、3 m 处波面变化情况,礁前 3 处波高测点则用于波浪入反射分离计算,波高测点位置随组次变化,按照 Mansard 和 Funke 的波浪入反射分离三点法[25]要求进行布置。波面信息采集使用可变步长形式,初始采集步长为 0.001 s,采集结束后平均步长为 0.003 s,采集时长为 120 s。

2.2　工况设置

虽然牡蛎礁的几何空间结构不规则,且随着牡蛎生长会发生动态变化,但礁体的几何形状与传统的潜堤类似,波浪经过牡蛎礁引起的波浪衰减符合经典的潜堤波浪传播理论。因此,关于牡蛎礁消浪的已有研究大都参考了 Seabrook 等[26]对潜堤消浪效果的研究,使用波浪透射系数 K_t(透射波高 H_t 与入射波高 H_i 的比值)

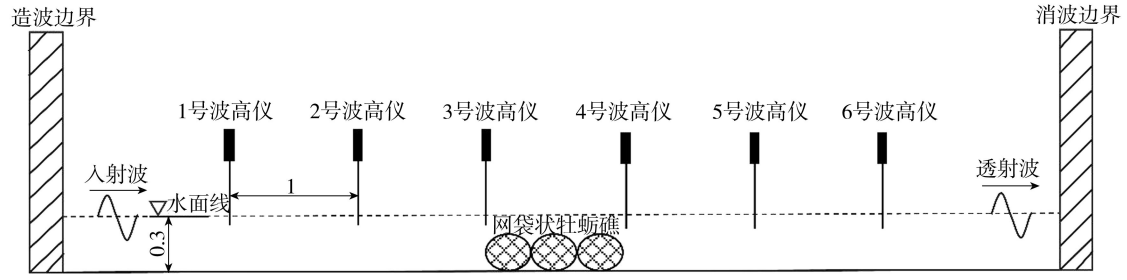


图2 模型布置(单位:m)

Fig. 2 Layout of numerical model (unit: m)

来表示消浪效果。如图3所示(图中h_s为礁体高度,d为水深,B为礁顶宽度,T_i、T_t分别为入射波周期和透射波周期),本文主要考虑相对礁体高度h_s/d、相对礁顶宽度B/H_i、入射波陡H_i/L(L为入射波长)以及粗糙度K_s对牡蛎礁透射系数的影响,通过变化礁体宽度、试验水深以及波要素以达到改变h_s/d、B/H_i、H_i/L等无量纲参数的目的。

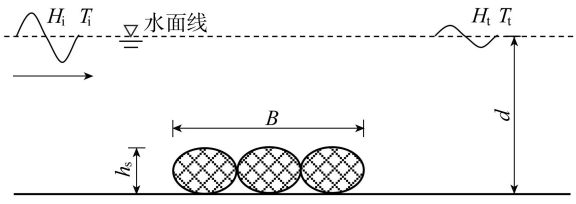


图3 研究参数示意图

Fig. 3 Schematic diagram of research parameters

计算参数设置如下:$H_i=0.1$ m,$h_s=0.3$ m,$d=0.24$、0.3、0.4、0.6 m,相应$h_s/d=1.25$、1、0.75、0.5;单排牡蛎礁宽度为0.4 m,通过改变礁体排数将礁顶宽度B设置为0.8、1.6、2.4、3.2、4.0 m,相应$B/H_i=8$、16、24、32、40;通过调整波周期T来控制入射波陡$H_i/L=0.02$、0.03、0.04、0.05;研究粗糙度K_s影响时,K_s分别取0、2.5、5、7.5、10。具体计算工况如表1所示。

表1 计算工况

Table 1 Calculation cases

B/m	K_s	T/s
0.8	5	2.24
1.6	5	2.24
2.4	5	2.24
3.2	5	2.24
4.0	5	2.24
2.4	5	2.63、1.83、1.45、1.23
1.6	0、2.5、5、7.5、10	2.24

2.3 模型验证

通过评估4种不同的计算网格尺寸(表2)的计算精度进行网格收敛性研究。采用更精细的网格划分网袋状牡蛎礁附近和自由液面区域能够以较高的精度捕捉到波浪传播和水动力过程;使用更粗的网格来划分远场,旨在优化计算效率。模拟的初始条件为$B=2.4$ m、$d=0.4$ m、$K_s=5$、$H_i=0.1$ m、$T=5$ s。以1号波高仪记录的平均波高作为比较各种模拟结果的基准,4种网格模拟得到的平均波高分别为0.952、0.977、0.996、0.999 m。网格4对网格划分做了进一步的细化,得到了与网格3几乎相同的结果。为了在计算时长和精度之间达到一个平衡,选取网格3是合理的。每个数值模拟包括90 s的物理持续时间。

表2 计算网格参数

Table 2 Computational grid parameters

网格	网格尺寸/mm		网格数量/10^6
	远场	牡蛎礁附近和自由液面区域	
1	170	21.3	0.34
2	125	15.6	0.92
3	10	12.5	1.76
4	80	10.0	3.68

通过复现Allen等[27]于2011年开展的网袋状牡蛎礁消浪特性物理模型试验(物理模型试验使用长9 m、宽0.8 m的水槽,单个网袋状牡蛎礁长度为0.76 m,牡蛎壳平均直径为76 mm),并对比透射系数K_t随礁顶宽度B与礁体高度h_s变化曲线,以验证本文构建的数值模型在模拟网袋状牡蛎礁消浪效果方面的可行性。试验采用波高0.1 m、波周期1.34 s的规则波,水深$d=0.3$ m(通过有效波理论计算,数值模拟中使用二阶斯托克斯波理论进行造波),通过改变礁体高度与礁顶宽度构建了36种不同工况。本文根据不同礁体高度、礁顶宽度等因素,挑选1个工况用于参数率定,14个工况用于模型验证,粗糙度K_s率定为5,模型验证结果如表3所示。

表3中个别工况(如工况7、11)中数值模拟与试验结果的偏差主要来自物理模型试验的不确定性和边界条件差异,整体趋势与变化规律仍保持一致,说明模型在物理机制上是合理的。图4为本文模型模拟透射系数与物理模型试验中透射系数随礁顶宽度与礁体高度变化曲线对比。由图4可知,随着礁顶宽度增大,透射系数呈现减小趋势;随着礁体高度的增大,礁顶在逐渐接近直至与水面持平的过程中,透射系数呈现先慢后快的减小趋势。同时可以看出本文模型模拟结果与物理试验结果吻合较好,表明该模型可对网袋状牡蛎

礁消浪过程进行模拟。

表 3　模型验证结果

Table 3　Model validation results

序号	B/m	h_s/m	透射系数		
			数值模拟	物理模型试验	相对误差/%
1	0.38	0.08	0.9789	0.97	0.92
2	0.84	0.09	0.9366	0.92	1.80
3	1.30	0.08	0.9195	0.89	3.31
4	1.62	0.09	0.8471	0.84	0.85
5	1.89	0.09	0.7978	0.78	2.28
6	0.83	0.16	0.8551	0.85	0.60
7	1.30	0.16	0.6952	0.78	10.87
8	0.41	0.24	0.7797	0.78	0.04
9	0.61	0.23	0.5872	0.63	6.79
10	0.84	0.24	0.5332	0.59	9.63
11	1.30	0.23	0.4145	0.60	30.91
12	1.93	0.23	0.3350	0.34	1.47
13	0.89	0.31	0.1157	0.11	5.18
14	1.30	0.30	0.0493	0.05	1.40

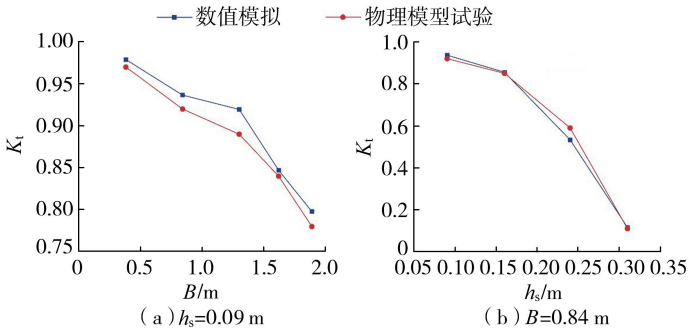


图 4　数值模拟结果与物理模型试验结果对比

Fig. 4　Comparison between numerical and experimental results

3　网袋状牡蛎礁消浪影响因子分析

3.1　相对礁体高度

图 5 为牡蛎礁附近的波浪场,当相对礁体高度 $h_s/d=1.25$ 时,波浪在礁体附近完全破碎,越浪量很少,接近不透水情况,破碎和越浪过程导致大部分能量耗散;当 $h_s/d=1$ 时,礁体高度与水面持平,波浪在礁体上方的紊动最强烈,消浪效果良好;当 $h_s/d=0.75$ 时,摩擦耗散在消浪过程中占主导,且摩擦耗散能量随着相对礁体高度减小逐渐减小;当 $h_s/d=0.5$ 时,波浪经过牡蛎礁时波形基本无变化,礁体对波浪传播没有影响。

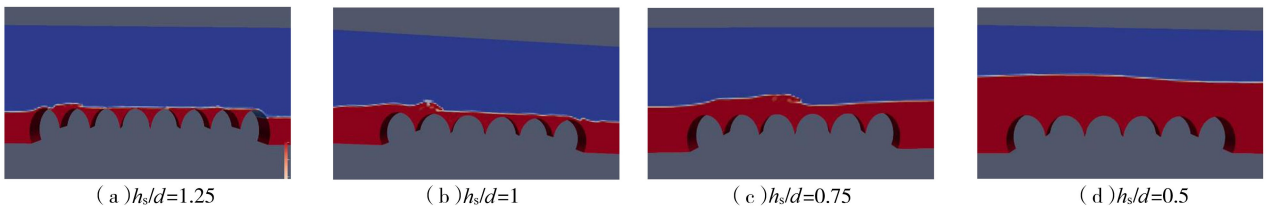


图 5　不同相对礁体高度下牡蛎礁附近波浪场

Fig. 5　Wave field near oyster reefs at different relative reef heights

透射系数 K_t 随礁体相对高度 h_s/d 变化趋势如图 6 所示。总体上,K_t 随 h_s/d 的增大非线性减小,且减小趋势逐渐变缓。在 $h_s/d<1$ 的情况下,礁体处于淹没状态,K_t 随 h_s/d 变化的速率较快,当 $h_s/d=0.5$ 时,礁体接近全透水状态,消浪效果较差。以 $B/H_i=16,24$ 两种工况为例,当 $h_s/d=0.5$ 时,两种宽度的 K_t 接近 1.0,此时波浪几乎不发生衰减;当 $h_s/d=1$ 时,K_t 分别为 0.329、0.229,此时波浪的衰减效果相对较好。

3.2 相对礁顶宽度

图7为透射系数 K_t 随相对礁顶宽度 B/H_i 的变化趋势。总体而言,B/H_i 与 K_t 存在明显的负相关关系。这主要是因为随着 B/H_i 增大,波浪越过礁顶的距离变长,导致波浪破碎更剧烈,从而增强了消浪效果。值得注意的是,B/H_i 对于 K_t 的影响在一定程度上依赖相对礁体高度 h_s/d,当 $h_s/d=0.5$ 时,K_t 均处于1.0左右,B/H_i 的变化对 K_t 近乎没有影响。当 $h_s/d=1.25$ 时,B/H_i 的变化对 K_t 的影响同样不明显。这是因为:当 $h_s/d=0.5$ 时,礁体完全被淹没,礁体上方波浪几乎不发生衰减,B/H_i 的增大并不会显著增加波能耗散;当 $h_s/d=1.25$ 时,礁体顶部露出水面,波浪以反射、破碎为主,此时宽度变化对消浪贡献有限。以 $h_s/d=0.75$,1.25为例,当 $B/H_i=8$ 时,$K_t=0.781$,0.154;当 $B/H_i=40$ 时,$K_t=0.348$,0.007,降幅分别为55.4%、95.5%。

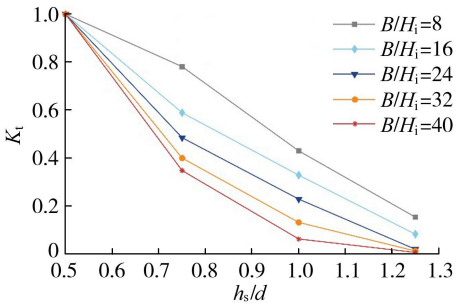


图6 相对礁体高度对透射系数的影响

Fig. 6 Effect of relative reef height on transmission coefficient

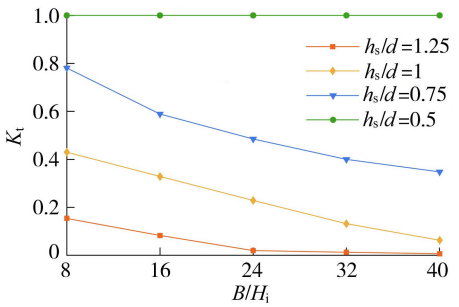


图7 相对礁顶宽度对透射系数的影响

Fig. 7 Effect of relative reef crest width on transmission coefficient

3.3 入射波陡

入射波陡是影响波浪破碎形态的重要因素。由图8可知,透射系数 K_t 随入射波陡 H_i/L 的增大而逐渐减小,这是因为在相同条件下,H_i/L 越大,波浪更易发生反射,透射系数会因此降低。在4种不同相对礁体高度条件下,当 $H_i/L=0.02$ 时,$K_t=1.000$,0.726,0.638,0.191;当 $H_i/L=0.05$ 时,$K_t=0.674$,0.299,0.104,0.005,分别降低了32.6%、58.8%、83.7%、97.4%。

3.4 粗糙度

图9为透射系数 K_t 随粗糙度 K_s 的变化情况。总体而言,K_t 随 K_s 增大而减小,减小趋势逐渐减弱。在牡蛎礁表面由光滑到粗糙转变的初期阶段,K_t 下降较为明显;随着 K_s 进一步增大,K_t 下降速率逐渐减缓,最终趋于稳定。此外,K_s 对于 K_t 的影响在一定程度上取决于相对礁体高度 h_s/d,当 $h_s/d=1$ 时,K_s 的增强显著增加底部摩擦与湍流耗散,当 $h_s/d=0.5$ 时,底部摩擦效应较弱,K_s 变化对 K_t 影响有限;而 $h_s/d=1.25$ 时,礁体顶端出水,波浪主要通过反射耗散,K_s 的作用同样不明显。当 $h_s/d=0.5$,1.25时,K_s 对 K_t 的影响并不显著,因此这两种情况下不纳入后续定量分析。

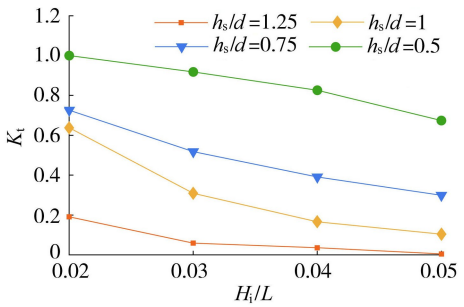


图8 入射波陡对透射系数的影响

Fig. 8 Effect of incident wave steepness on transmission coefficient

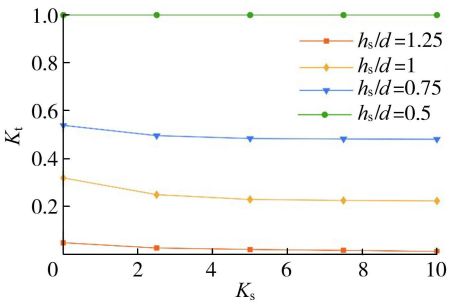


图9 粗糙度对透射系数的影响

Fig. 9 Effect of roughness on transmission coefficient

当 $B/H_i=16$、$h_s/d=0.75$,1时,$K_s=0$ 时 $K_t=0.559$,0.339,$K_s=2.5$ 时 $K_t=0.506$,0.259,分别降低了9.5%和23.6%。由此可见,当 h_s/d 一定(如0.75~1)时,粗糙表面的牡蛎礁潜堤相比光滑潜堤可显著增强波能耗散,消浪效果约提高9%~24%。随着 K_s 的进一步增大,当 $K_s=10$ 时,$K_t=0.481$,0.223,仅分别降低了0.025、0.036,继续增加礁体 K_s 对于 K_t 的影响已经非常小。

3.5　网袋状牡蛎礁消浪拟合公式

参考 Allen 等[27]的研究,网袋状牡蛎礁消浪公式拟合形式为:

$$K_t = a_1 \frac{h_s}{d} + b_1 \exp\left(0.1 \frac{B}{H_i}\right) + c_1 \sqrt{\frac{H_i}{L}} + d_1 \exp(d_2 K_s) + e_1 \tag{5}$$

式中:a_1、b_1、c_1、d_1、d_2、e_1 为待定参数。由数据分析可知,当 $h_s/d>1$ 时,透射系数受 4 类无量纲参数的影响较小,不参与表达式拟合。拟合过程中,各参数选取范围分别为:相对礁体高度取 0.50~1.00,相对礁顶宽度取 8~40,入射波陡取 0.02~0.05,礁体粗糙度取 0~10。

回归分析拟合参数参考值及 95%置信区间如表 4 所示。拟合结果与数值模拟结果的拟合优度 R^2 = 0.909,显著性小于 0.05,表明本文分析的 4 个变量显著影响透射系数,且在 90%以上程度决定透射系数大小。

将表 4 中参数参考值代入式(5)可得网袋状牡蛎礁透射系数拟合公式如下:

$$K_t = -0.931 \frac{h_s}{d} - 0.005 \exp\left(0.1 \frac{B}{H_i}\right) - 4.567 \sqrt{\frac{H_i}{L}} + 0.094 \exp(-0.160 K_s) + 2.055 \tag{6}$$

图 10 为拟合公式预测值和数值模拟试验以及 Allen 等[27]开展的物理模型试验结果的对比,可以看出拟合公式预测值和试验值吻合较好。

表 4　拟合参数参考值及 95%置信区间

Table 4　Reference values and 95% confidence intervals of fitting parameters

拟合参数	参考值	置信区间下限	置信区间上限
a_1	−0.931	−0.980	−0.882
b_1	−0.005	−0.006	−0.004
c_1	−4.567	−5.013	−4.022
d_1	0.094	0.005	0.183
d_2	−0.160	−0.056	−0.264
e_1	2.055	1.877	3.352

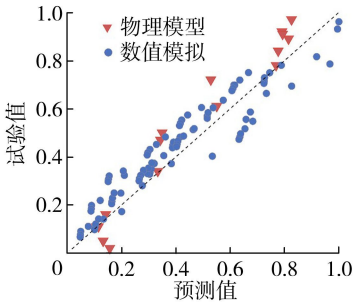


图 10　试验值与拟合公式预测值比较

Fig. 10　Comparison between experimental values and predicted values of fitting formula

4　结　论

a. 透射系数随相对礁体高度的增大而逐渐减小。当相对礁体高度为 0.5 时,礁体接近全透水状态;在淹没状态下,随着水深减小,波浪由基本不破碎逐渐转为破碎状态,且受相对礁体高度的影响增强;当礁体处于不完全淹没状态时,波浪在其附近完全破碎,能量主要通过反射、破碎以及越浪过程耗散。

b. 透射系数随相对礁顶宽度的增大而逐渐减小,但其影响随水深增加而逐渐减弱;当相对礁体高度为 0.5 时,透射系数几乎不随相对礁顶宽度发生变化。透射系数随入射波陡的增大亦呈下降趋势,原因在于入射波陡增大增强了波浪反射。

c. 牡蛎礁粗糙度对透射系数的影响显著依赖于相对礁体高度,在相对礁体高度为 1 时最为明显。透射系数随牡蛎礁粗糙度的增大而逐渐减小,当相对礁体高度为 1 时,粗糙度由 0 增大至 2.5 时透射系数降低 23.6%,但若粗糙度进一步增大,透射系数几乎不发生改变。

d. 综合考虑相对礁体高度、相对礁顶宽度、入射波陡、粗糙度等因素,通过多元非线性回归分析,建立了网袋状牡蛎礁透射系数的拟合公式。公式预测值与数值模拟结果及物理模型试验结果相关性良好,该公式可为网袋状牡蛎礁消浪能力评估提供依据。

参考文献:

[1] Shi Jian, Feng Xiangbo, Toumi R, et al. Global increase in tropical cyclone ocean surface waves[J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 174.

[2] 左军成,左常圣,李娟,等. 近十年我国海平面变化研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版),2015,43(5):442-449. (Zuo Juncheng, Zuo Changsheng, Li juan, et al. Advances in research on sea level variations in China from 2006 to 2015[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciencss), 2015, 43(5): 442-449. (in Chinese))

[3] Bilkovic D M, Roggero M M. Effects of coastal development on nearshore estuarine nekton communities[J]. Marine Ecology Progress Series, 2008, 358(1): 27-39.

[4] 刘晓建,侯堋,陈文龙,等.生态海堤多级平台消浪特性及越浪量计算[J].河海大学学报(自然科学版),2024,52(4):70-77.(Liu Xiaojian,Hou Peng,Chen Wenlong,et al. Wave dissipation characteristics and wave overtopping calculation of multi-stage platforms of ecological seawall[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciencss),2024,52(4):70-77. (in Chinese))
[5] Mitsch W J. What is ecological engineering? [J]. Ecological Engineering,2012,45(1):5-12.
[6] van Slobbe E,de Vriend H J,Aarninkhof S,et al. Building with nature:in search of resilient storm surge protection strategies[J]. Natural Hazards,2013,65(1) :947-966.
[7] Temmerman S,Meire P,Bouma T J,et al. Ecosystem-based coastal defence in the face of global change[J]. Nature,2013,504(7478):79-83.
[8] Faivre N,Fritz M,Freitas T,et al. Nature-based solutions in the EU:innovating with nature to address social,economic and environmental challenges[J]. Environ Research,2017,159(1):509-518.
[9] Fastenrath S,Bush J,Coenen L. Scaling-up nature-based solutions:lessons from the living Melbourne strategy[J]. Geoforum,2020,116(1) :63-72.
[10] Zheng Jinhai ,Xu Wei,Tao Aifeng ,et al. Synergy between coastal ecology and disaster mitigation in China:policies,practices,and prospects[J]. Ocean and Coastal Management,2023,245(1):106866.
[11] Xu Wei,Tao Aifeng,Wang Risheng,et al. Review of wave attenuation by artificial oyster reefs based on experimental analysis [J]. Ocean Engineering,2024,298(1):117309.
[12] Xu Wei,Tao Aifeng,Zheng Jinhai. Protect oyster reefs in China's coastal zone[J]. Science,2023,380(6641):142.
[13] Tolley S G,Volety A K. The role of oysters in habitat use of oyster reefs by resident fishes and decapod crustaceans[J]. Journal of Shellfish Research,2005,24(4):1007-1012.
[14] Coen L D,Brumbaugh R D,Bushek D,et al. Ecosystem services related to oyster restoration[J]. Marine Ecology Progress Series,2007,341(1):303-307.
[15] Grabowski J H,Peterson C H. Restoring oyster reefs to recover ecosystem services[J]. Ecosystem Engineers:Plants to Protists,2007,4(1):281-298.
[16] Mann R,Harding J M,Southworth M J. Reconstructing pre-colonial oyster demographics in the Chesapeake Bay,USA[J]. Estuarine,Coastal and Shelf Science,2009,85(2):217-222.
[17] Rodriguez A B,Fodrie F J,Ridge J T,et al. Oyster reefs can outpace sea-level rise[J]. Nature Climate Change,2014,4(6):493-497.
[18] Hong Xin,Ji Yinglu,Yan Jie,et al. Study on the wave-dissipation effect of oyster reefs based on the SWAN numerical model[J]. Water,2023,15(16):2884.
[19] Yang Yunhan,Sui Titi,Wang Guangsheng,et al. Investigations on the shallow water wave attenuation over continuous porous oyster reef-like structure[J]. Ocean Engineering,2023,287:115307.
[20] 岑林,倪兴也,冯曦,等.淤泥质海岸多要素协同减灾数值模拟研究[J].河海大学学报(自然科学版),2026,54(3):149-160.(Cen Lin, Ni Xingye,Feng Xi,et al. Numerical simulation study on multi-factor synergistic disaster reduction on muddy coasts[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2026,54(3):149-160.(in Chinese))
[21] Salatin R,Wang Hongqing,Chen Qin,et al. Assessing wave attenuation with rising sea levels for sustainable oyster reef-based living shorelines[J]. Frontiers in Built Environment,2022,8:884849.
[22] Carter J,Fenical S,Harter C,et al. CFD modeling for the analysis of living shoreline structure performance[C]//Coastal Structures and Solutions to Coastal Disasters Joint Conference 2015. Reston,VA:American Society of Civil Engineers,2015:442-450.
[23] 曾诚,尹雨然,周婕,等.基于二阶规则波模拟的数值波浪水槽优化[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(4):33-40.(Zeng Cheng,Yin Yuran,Zhou Jie,et al. Optimization of a numerical wave tank based on simulations of 2nd order regular waves[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciencss),2023,51(4):33-40. (in Chinese))
[24] 毛鸿飞,韩龙,赫岩莉,等.潜堤坡度对波浪传播变形的影响[J].河海大学学报(自然科学版),2024,52(5):76-84.(Mao Hongfei,Han Long,He Yanli,et al. Influence of slope of submerged breakwater on wave propagation and deformation[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciencss),2024,52(5):76-84. (in Chinese))
[25] Mansard E P D, Funke E R. The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method[C]//Proceedings of the 17th International Conference on Coastal Engineering. New York:ASCE,1980:154-172.
[26] Seabrook S R,Hall K R. Wave transmission at submerged rubble mound breakwaters[C]//Proceedings of the International Conference on Coastal Engineering,Reston, VA:ASCE,1999:2000-2013.
[27] Allen R J,Webb B M. Determination of wave transmission coefficients for oyster shell bag breakwaters[J]. Coastal Engineering Practice (2011), 2011:684-697.(https://doi.org/10.1061/41190(422)57)

(收稿日期:2025-09-15 编辑:熊水斌)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.05.021

海上风电吸力筒基础灌浆材料特性及可回收性试验

翟汉波[1],李婷婷[1],代加林[1],杨金康[2],王伟臣[2],付登锋[2],黄 维[3]

(1. 中国长江三峡集团有限公司科学技术研究院; 2. 中国海洋大学环境科学与工程学院; 3. 中山大学土木工程学院)

摘要:为优化海上风电吸力筒基础的水泥灌浆材料组成,并验证吸力筒在不同水泥灌浆材料施工后的可回收性,通过 18 组流动性试验、21 组无侧限抗压强度试验和 6 组吸力筒回收试验,研究了不同水固比(0.75、1、1.1、2.5)与膨润土掺量(0%、20%、40%、60%、80%、100%)对水泥灌浆材料流动性、抗压强度及不同水泥灌浆材料对吸力筒在黏土中可回收性的影响机制。结果表明:水固比一定时,随着膨润土掺量的增加,水泥灌浆材料流动度、抗压强度显著降低,膨润土掺量大于或等于 60%时基本丧失流动性,膨润土掺量固定时,流动度随水固比增大而提高(20%膨润土掺量下流动度为 210~290 mm),但抗压强度随之下降;60%、100%膨润土掺量的水泥灌浆材料可通过吸力筒内正压注水成功回收,而 0%、20%膨润土掺量的水泥灌浆材料在充分凝固后会完全堵塞注水口导致回收失败。建议水泥灌浆材料初始流动度控制在 250~300 mm、30 min 后流动度不低于 200 mm,水泥灌浆材料优选 60%膨润土掺量并提高水固比,直至满足流动度范围,以平衡施工可操作性、结构强度及可回收性需求。

关键词:吸力筒基础;灌浆材料;膨润土掺量;水固比;流动性;无侧限抗压强度;可回收性

中图分类号:P751 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-1980(2026)05-0181-09

Experimental study on material properties and recyclability of grout for offshore wind suction bucket foundation

Zhai Hanbo[1], **Li Tingting**[1], **Dai Jialin**[1], **Yang Jinkang**[2], **Wang Weichen**[2], **Fu Dengfeng**[2], **Huang Wei**[3]

(1. *China Three Gorges Corporation Science and Technology Research Institute*;
2. *College of Environmental Science and Engineering*, *Ocean University of China*;
3. *School of Civil Engineering*, *Sun Yat-Sen University*)

Abstract: To optimize the composition of grout materials for offshore wind suction bucket foundations and verify the recyclability of suction buckets after construction with different grouts, 18 fluidity tests, 21 unconfined compressive strength tests and 6 suction bucket recovery tests were carried out to investigate the influence mechanisms of water-solid ratio (0.75, 1, 1.1, 2.5) and bentonite content (0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%) on the fluidity and compressive strength of grout materials, as well as the recyclability of suction buckets in clay with different grouts. The results show that at a fixed water-solid ratio, the fluidity and compressive strength of grout materials decrease significantly with the increase of bentonite content, and the grout basically loses fluidity when the bentonite content is no less than 60%. At a fixed bentonite content, fluidity increases with rising water-solid ratio (210-290 mm for 20% bentonite content), while compressive strength decreases accordingly. Suction buckets with grouts containing 60% and 100% bentonite can be successfully recovered by positive-pressure water injection inside the bucket. In contrast, grouts with 0% and 20% bentonite content fully solidify and completely block the water injection port, leading to recovery failure. It is recommended that the initial fluidity of grout be controlled within 250-300 mm and the fluidity after 30 min be no less than 200 mm. A bentonite content of 60% is preferred, and the water-solid ratio shall be increased until the required fluidity range is satisfied to balance the requirements of constructability, structural strength and recyclability.

Key words: suction bucket foundation; grout material; bentonite content; water-solid ratio; fluidity; unconfined compressive strength; recyclability

随着全球能源转型加速推进,海上风电凭借其风功率密度高、主导风向稳定及邻近电力负荷中心等优势发展迅猛[1],截至 2024 年,其累计装机容量已达 83.9 GW[2]。在海上风电场建设工程中,风机基础成本占比

基金项目:中国长江三峡集团有限公司科研项目(NBZZ202300461)

作者简介:翟汉波(1989—),男,博士,主要从事海洋工程地质勘察、海上风电基础与土相互作用研究。E-mail:zhai_hanbo@ctg.com.cn

通信作者:李婷婷(1992—),女,博士,主要从事海洋工程地质勘察、海上风电基础与土相互作用研究。E-mail:hfutltt@163.com

高达30.7%[3],而单桩、导管架等传统基础形式造价高昂,严重制约了海上风电的规模化开发[4]。吸力筒基础作为一种创新解决方案,可广泛应用于固定式和漂浮式风机基础工程[5-8],通过负压贯入方式完成安装,具有安装噪音低、抗倾覆承载性能优及可回收再利用等优势[9]。其安装过程主要分为3个阶段:①依靠结构自重贯入海床至一定深度;②通过负压泵排出筒内水体形成压差完成最终沉贯;③筒内灌浆,实现吸力筒顶盖与海床充分接触,完成安装[10-12]。吸力筒回收时,则通过向筒内注水形成筒内外正压差,配合吊机完成吸力筒回收与重复利用[13]。

吸力筒安装完成后,常因负压不足或海床局部存在坡度,在筒盖与海床之间产生不均匀水膜空隙,致使设计承载力难以充分发挥[14],因此,吸力筒负压沉贯完成后,通常采用筒内灌浆技术填充该空隙,使吸力筒基础能够将上部荷载充分传递至海床土体,大幅提高基础整体刚度与承载性能[15-16]。目前相关学者围绕吸力筒的负压贯入开展研究,分析了在黏土、砂土及分层土中所需负压的大小与评估方法[17],但针对灌浆对吸力筒承载性能及对其可回收性影响的相关研究仍较为匮乏。水下灌浆材料以水泥基体系为主导[18-20],而海洋环境对其要求较为严苛:需兼具大流动性(如初始流动度大于或等于290 mm)、抗海水分散性、高早期强度(静置1 d抗压强度大于或等于40 MPa)及体积稳定性(24 h膨胀率为0.02%~0.50%)[21-22],国内外多项工程均体现了该核心指标的重要性[23]。

吸力筒基础水泥灌浆材料的流动性、抗压强度特性及可回收性的影响机理尚不明确,是制约该工程技术优化的关键瓶颈[24]。流动性方面,传统观点认为,高流动性(坍落度大于或等于240 mm)有利于浆体充填密实,但高掺量膨润土水泥灌浆材料黏度偏高,会使注浆压力显著增大,易造成海床土体局部扰动,甚至顶起吸力筒,造成吸力筒有效埋深降低,承载力无法达到设计要求[25]。可见,流动性并非单向有益参数,需综合考虑土体强度、注浆压力及其对吸力筒可回收性的影响。

本文通过18组流动性试验、21组无侧限抗压强度试验,研究不同水固比(0.75、1、1.1、2.5)与膨润土掺量(0%、20%、40%、60%、80%、100%)对水泥灌浆材料流动性和抗压强度特性的影响;针对黏土地层,通过6组吸力筒回收试验,探究不同水泥灌浆材料对吸力筒可回收性的影响机制,以期为优化吸力筒基础水泥灌浆材料的研究提供科学依据。

1 试验方法

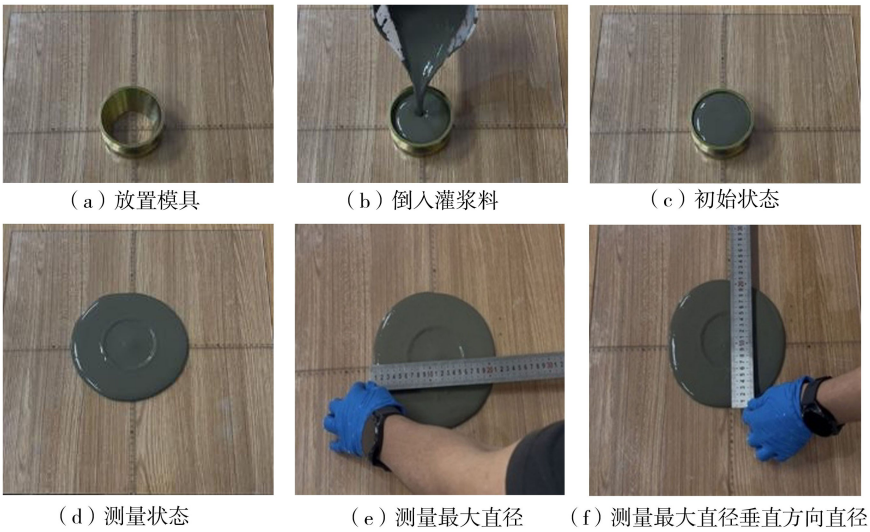
1.1 流动性试验

灌浆材料的截锥流动度是衡量水泥灌浆材料流动性能的核心指标,直接反映材料在施工过程中的可泵送性和填充密实性。流动性不足(流动半径小)将导致灌浆不密实,形成空洞或蜂窝状缺陷;流动性过高(流动半径过大)则可能引发离析,降低材料的均质性。根据GB/T 2419—2005《水泥胶砂流动度测定方法》及规范建议,水泥灌浆材料流动性需分别测量初始流动度和30 min流动度。

a. 试验装置:KWQ2680电动搅拌机、玻璃板(500 mm×500 mm)、截锥圆模(下口内径100 mm、上口内径70 mm、高60 mm)、量壶、直尺和不同膨润土掺量的水泥灌浆材料。灌浆材料由多种成分组成,包括硅酸盐水泥、粉煤灰、减水剂、流变剂、缓凝剂、水下抗分散剂、钠基膨润土及水,各成分配比为粉煤灰214.93 g、减水剂1.91 g、流变剂0.38 g、缓凝剂0.76 g、水下抗分散剂17.84 g。

b. 试验过程:①准确称取1 000 g充分预混的水泥灌浆材料样品,根据设定的膨润土掺量及对应的水固比(本文指水泥灌浆材料中所加水的质量与其固体质量的比值),称量所需的拌合用水量;②预先润湿搅拌锅与搅拌叶片,将称量完毕的水泥灌浆材料倒入搅拌锅中,开启搅拌机并设定转速为900 r/min,搅拌机运行的同时,于10 s内匀速加入全部拌合用水;③保持900 r/min搅拌速度,持续搅拌240 s;④将搅拌完成的浆体迅速装满坍落度筒,刮平筒口浆体,清理筒外及底板的多余浆体,随后,垂直、平稳提起坍落度筒,提离过程控制在5~10 s,使浆体在无干扰状态下自由流动至静止状态,浆体装筒到坍落度筒完全提起整个过程应在60 s内完成;⑤浆体停止流动后,立即测量其坍落度,记录为初始坍落度值,同时测量浆体扩展后两个相互垂直方向的直径,计算平均值作为初始坍落扩展度值,步骤②~⑤的总时间需控制在5 min以内;⑥将底板上的残余浆体回收至搅拌锅,自加水拌合开始计时,达30 min时,以相同转速重启搅拌机,对锅内浆体再搅拌180 s。随后,重复执行③~⑤的搅拌与测量操作步骤,所得坍落度与坍落扩展度,即为浆体30 min保留值。该试验在室内进行,室内温度为24~26℃,室内湿度为22%~36%。水泥灌浆材料流动性试验过程如图1所示,不

同配比水泥灌浆材料的流动性试验方案如下:①12 组试验用于探究同一水固比(均为 1,水固比工况代号 1)下不同膨润土掺量试样的初始和静置 30 min 后的流动度,其中膨润土掺量分别为 0%、20%、40%、60%、80%、100%,以 P 表示膨润土掺量,S 表示水固比,M 表示静置时间(取 0、30 min),试样编号为 P*x*S*y*M*z*(其中 *x*、*y*、*z* 为相应代号),如 P20S1M30 表示膨润土掺量为 20%、水固比为 1、静置时间为 30 min 的试样;②8 组试验用于探究不同水固比下不同膨润土掺量试样的初始和静置 30 min 后的流动度,其中水固比为 0.75、1.1、2(水固比工况代号分别为 2、3、4,下同),6 组试验编号分别为 P20S2M0、P20S2M30、P60S3M0、P60S3M30、P100S4M0、P100S4M30。



(a)放置模具　(b)倒入灌浆料　(c)初始状态

(d)测量状态　(e)测量最大直径　(f)测量最大直径垂直方向直径

图 1　流动性试验过程

Fig. 1　Fluidity test process

1.2　无侧限抗压强度试验

a. 试验装置:天平(量程为 0~1 000 g,分度值为 0.1 g)、模具(直径 5 cm、高 10 cm)、KWQ2680 电动搅拌机、WCY-1 型应力应变无侧限压力仪、CSF-A 拉压力传感器(量程 1 t,用于测试高膨润土掺量水泥灌浆材料的强度)、CSF-B 柱式传感器(量程 5 t,用于测试低膨润土掺量水泥灌浆材料的强度),以及水泥灌浆材料,其成分配比同流动性试验。

b. 试验过程:①制备直径为 5 cm、高度 10 cm 的试验试样;②依据水泥灌浆材料配比方案及试验工况称取固体物料与水,将物料倒入搅拌桶,采用电动搅拌机搅拌 5 min 后,倒入模具中进行制样;③试样固结成型后,在其两端表面均匀涂抹一薄层凡士林,以阻隔水分蒸发,随后,按照规定的预定时间对试样进行固结;④将固结完成的试样放置于压力仪的下加压板上,缓慢升高下加压板,直至试样上表面与上加压板发生轻微接触,无预压荷载,此时将轴向位移传感器与轴向力传感器读数归零;⑤控制下加压板以恒定速率上升,使试样产生每分钟 1%的轴向应变速率,加载过程中,轴向应变每增加 0.1%,同步测量并记录对应的轴向荷载和轴向位移;⑥试验持续进行,当轴向荷载达到峰值或进入稳定变化阶段,继续加载使轴向应变再增加 3%~5%后停止试验,或轴向荷载全程未出现稳定阶段,则加载至轴向应变达到 20%时终止试验;⑦试验结束后,下降下加压板,取出试样,观察并记录试样最终破坏的形态与特征。

不同配比水泥灌浆材料的无侧限抗压强度试验方案如下:①18 组试验用于探究同一水固比(均为 1,水固比工况代号 1)下不同膨润土掺量分别经过不同固结时间后的无侧限抗压强度,其中 D 表示固结时间(取 3、7、28 d),其他同流动性试验,试样编号为 P*x*S*y*D*u*(其中 *x*、*y*、*u* 为相应代号),如 P20S1D3 表示膨润土掺量为 20%、水固比为 1、固结时间为 3 d 的试样;②3 组试验用于探究不同水固比下不同膨润土掺量的试样固结 28 d 的流动度),3 组试验编号分别为 P20S2D28、P60S3D28、P100S4D28。

无侧限抗压强度试验的破坏标准和破坏模式基于应力-应变关系和试样形态变化综合判定,依照 ASTM D2166/D2166M—2016《黏土无侧限抗压强度的标准试验方法》规定,以峰值应力或 20%轴向应变作为破坏标准,当试样表面出现明显倾斜裂缝、剪切带或整体崩解时,即使未达到理论峰值,也同样判定为破坏。

1.3 回收试验

吸力筒回收试验整体装置如图2所示,主要包含模型箱、吸力筒模型、吸力沉放及回收系统、竖向加载系统、灌浆系统、土强度测试系统、水下监测系统、传感器布设及控制与采集系统等。

试验采用尺寸为1 500 mm×1 500 mm×1 500 mm的立方体PVC模型箱,侧面距底部150 mm处设1 150 mm×1 230 mm的圆角矩形观察窗,观察窗采用双层钢化玻璃结构并配套刻度标尺,以方便观察试验过程。模型箱外侧覆有方钢支架,防止土体加载过程中箱体受力形变对试验精度造成影响。

吸力筒模型结构主要由筒壁与筒盖两部分构成。筒盖上部设有抽水口、注浆口及孔压传感器,其中抽水口配置硅胶薄膜与滤网,硅胶薄膜可增大吸力筒与固定环之间的摩擦力;筒壁贴有刻度尺,用于精准观察吸力筒贯入土体深度及筒内水膜厚度。吸力筒筒体由有机玻璃制成,外径为300 mm,壁厚10 mm,筒盖厚40 mm,筒壁长度300 mm,长径比1.0。

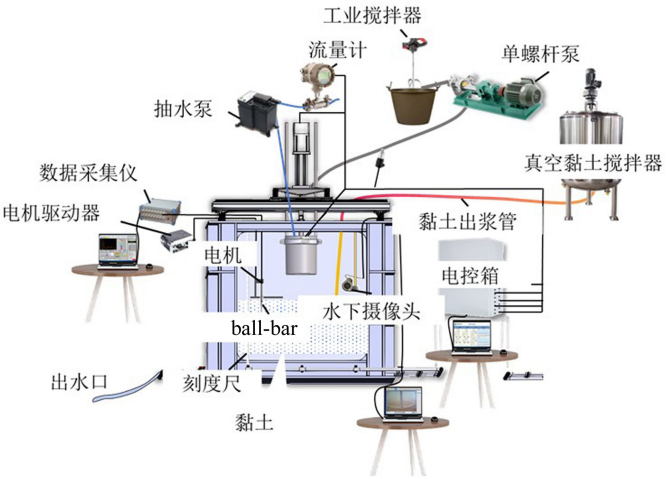


图2 吸力筒回收试验装置

Fig. 2 Suction bucket retrieval test apparatus

吸力沉放与回收系统包括抽水泵与流量计。其中抽水泵可调频率范围为833~3 333 Hz,对应电机转速为833~3 333 r/min,开口流量范围为1.5~6 L/min;流量计可实时可视化监测抽水泵的抽水速率。灌浆系统主要由单螺杆泵与连接管路组成,单螺杆泵流量为0.1~0.5 m^3/h,电机功率为0.55 kW,转速960 r/min。竖向加载系统由伺服电机、限位器、加载杆、反力架、反力架滑轨、拉压力传感器及吸力筒固定环组成,拉压力传感器量程为1 t。

土强度测试系统包括电机、电机驱动器、ball-bar(球形探头)、数据采集仪及数据采集软件。水下监测系统包括水下摄像头、摄像头支架和实时监控软件,结合透明亚克力吸力筒,可清晰观测、记录试验时吸力筒内水膜高度和灌浆过程。控制与采集系统由电控系统与控制软件组成,主要功能是调试、控制整个试验装置并记录、存储和传输试验数据。

在每组回收试验开始前,均采用球形仪在吸力筒预设贯入位置中心点进行土体抗压强度测试,获得土强度参数 q_{ball} 随深度的变化规律,通过式(1)[26]计算得到不排水抗剪强度 s_u:

$$s_u = q_{ball}/N_{kt} \tag{1}$$

式中:N_{kt} 为锥尖阻力系数,本文所用球形仪取10.5[27-28]。

回收试验过程如下:①保持吸力筒注浆口与抽水口处于开启状态,采用静压方式以0.2 mm/s左右的速度将吸力筒下放至土体表面,并贯入至泥面以下一定深度处。根据工况设计要求,控制筒盖与泥面之间水膜厚度为0 cm(无水膜)或2 cm,完成吸力筒安装就位工作。②灌浆泵抽水润管,完成后排出管路内残留积水。将灌浆泵注浆管连接至吸力筒注浆口,同时在出浆口连接导流软管,用于排出水泥灌浆材料置换出的水膜。根据工况设计制备不同掺量的试样(膨润土掺量分别为20%、60%、100%),缓慢向筒内注浆,避免注浆压力过大顶起吸力筒或冲击扰动筒内泥面。当出浆口有浆料溢出时视为注浆完成,立即停止注浆,关闭注浆口与出浆口阀门,断开注浆管与吸力筒的连接,清洗灌浆泵和注浆管。③静置24 h,确保吸力筒内试样固结完成。④连接抽水泵与吸力筒抽水口,向筒内注水,使筒内产生正压。在实际工程中,吸力筒正压回收通常借助吊机协同完成,因此试验施加500 N的固定荷载协同筒内正压上拔,以模拟吊机在实际工程中提供的作用力。⑤当吸力筒内孔压不再上升时,将竖向加载系统设为位移控制模式,将吸力筒以0.2 mm/s左右的速度继续上拔,以完成后续回收。吸力筒回收试验方案如表1所示。

2 试验结果与分析

2.1 流动性试验

不同水固比对试样截锥流动度的影响如图3所示。可以看出,膨润土掺量固定时,试样的流动度随水固

表 1　吸力筒回收试验方案

Table 1　Scheme for suction bucket retrieval test

试样编号	水膜高度/cm	膨润土掺量/%	试验目的
G0	0		探究完全贯入不灌浆时的可回收性
G2	2		探究保留 2 cm 水膜不灌浆时的可回收性
P0G2	2	0	探究不同膨润土掺量试样灌浆后的可回收性
P20G2	2	20	
P60G2	2	60	
P100G2	2	100	

注:试样编号中 G 表示水膜高度。

比增大而提高。本文通过调节加水量,同时固体质量保持为 1 000 g 以获取不同的水固比,探究水固比对试样性能的影响。对于膨润土掺量为 20%的试样,水固比为 1 时流动度为 290 mm,水固比降至 0.75 时流动度为 210 mm;膨润土掺量为 60%的试样,水固比 1.1 时流动度为 141.5 mm,水固比降至 1 时流动度仅为 70 mm。当膨润土掺量为 20%、水固比小于 0.75,或膨润土掺量为 60%、水固比小于 1 时,试样完全丧失流动性,测得的流动度数值等同于截锥模具底面内径。从理论层面分析,若水固比持续无限增大,试样趋近于纯水或水泥净浆,其平面扩展直径因受模具体积约束而存在上限。因此,在膨润土掺量一定的条件下,试样流动度随水固比的变化存在上、下边界。相同水固比下不同膨润土掺量试样的流动度变化规律为:膨润土掺量由 0 增大至 100%,试样流动度持续下降,且下降速率逐步趋缓;当膨润土掺量达 60%时,试样已基本不具备流动性,继续提高膨润土掺量,试样几乎完全失去流动能力。

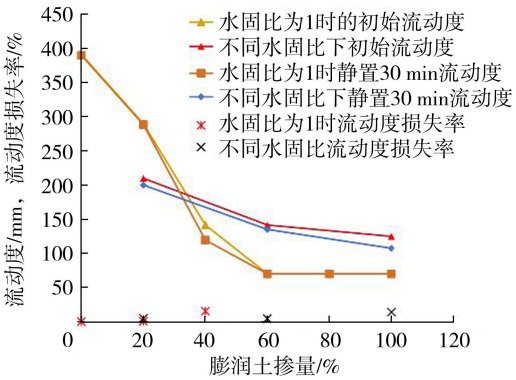


图 3　流动性试验结果

Fig. 3　Fluidity test results

不同膨润土掺量的试样在不同的静置时间下,其流动性试验结果如图 3 所示。静置 30 min 后,试样的流动度有不同程度的损失;低膨润土掺量条件下流动度损失相对较小,最小损失率仅为 0.26%;随着膨润土掺量的提高,流动度损失率随之增大,最大损失率可达 15.55%。

2.2　无侧限抗压强度试验

水固比为 1 的条件下,不同膨润土掺量试样剪切破坏特征如图 4 所示。试样固结 3 d 时(图 4(a)),未掺膨润土的试样,在单轴压缩加载至峰值强度后,产生大量贯通上下表面的斜向裂缝,加载后期发生大块剥落物。膨润土掺量为 20%的试样,单轴压缩加载至峰值强度后,表面出现大量斜裂缝,少部分斜裂缝延伸至试样中部,造成试样中部土层膨胀或张裂,表现为脆性破坏特征。40%、60%膨润土掺量试样在单轴压缩至峰值强度后,呈现向外鼓胀破坏,有明显的剪切破坏面。

由图 4(b)可知,固结 7 d 后,膨润土掺量为 0%、20%的试样经单轴压缩达到峰值强度后产生贯通上下表面的轴向裂缝,加载后期试样发生大块剥落,呈现脆性破坏特征;膨润土掺量为 40%、60%的试样经单轴压缩达到峰值强度后产生向外鼓胀变形,并出现显著剪切破坏面。试样固结 28 d 后(图 4(c))的破坏模式与固结 3、7 d 试样基本一致。水固比为 1 的试验条件下,膨润土掺量为 80%、100%的试样强度过低无法制样,因此未开展强度测试。



图 4　无侧限抗压强度试验结果

Fig. 4　Results of unconfined compressive strength test

水固比为 1 的条件下,不同膨润土掺量试样的无侧限抗压应力-应变关系曲线如图 5 所示。可以看出,在膨润土掺量较低时,试样应力曲线存在明显峰值,达到峰值后发生脆性破坏,随后应力降低;而当膨润土掺量较高时,

应力达到峰值后变化趋势较小,与正常固结黏土相似。

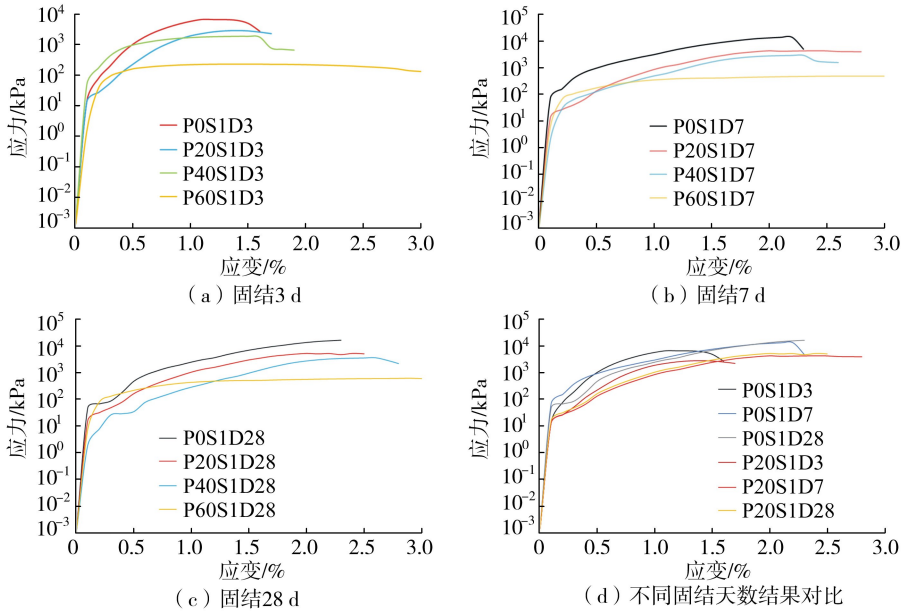


图5 不同固结时间试样应力-应变关系

Fig. 5 Stress-strain relationships of specimens with different consolidation durations

不同膨润土掺量(0%、20%、60%、100%)试样的无侧限抗压强度试验结果显示,固结28 d后,P0S1D28试样的峰值强度最高,可达17 334.5 kPa;随着膨润土掺量的增加,峰值强度呈逐渐降低趋势。固结7 d后各膨润土掺量试样的抗压强度均低于28 d的试样,其中最大为13 367.6 kPa(P0S1D7)。固结3 d时,试样抗压强度进一步降低,P0S1D3为6 876.2 kPa,其余试样抗压强度同样随膨润土掺量增加而降低。

进一步分析可以发现,膨润土掺量40%、60%试样的7 d抗压强度与28 d抗压强度比值,略高于膨润土掺量为0%、20%的试样,而3 d抗压强度与28 d抗压强度的比值则在膨润土掺量为40%时达到最高。总体而言,膨润土掺量的提升导致各固结天数下的峰值强度呈下降趋势,同时不同膨润土掺量会对试样早期抗压强度(3、7 d)相对于28 d占比产生差异化影响。

不同水固比条件下,20%、60%、100%膨润土掺量试样固结28 d后的无侧限抗压应力-应变关系曲线如图6所示。水固比为0.75的试样固结7 d的峰值强度为11 148.8 kPa,远高于水固比为1的20%膨润土掺量试样的峰值强度。针对60%的膨润土掺量,水固比为1.1的试样固结7 d的峰值强度和水固比为1的60%膨润土掺量试样固结7 d的峰值强度相比无明显变化。100%膨润土掺量,在水固比为1时无流动性,无法进行制样,故其强度不作参考,当水固比提高至2.5时,峰值强度为1.5 kPa。

2.3 回收试验

各黏土试样的s_u随深度变化情况如图7所示。在每组试验开始前,均利用满流式球形仪在吸力筒贯入

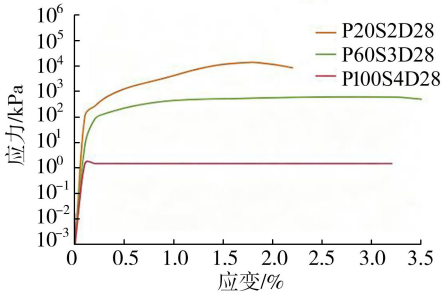


图6 不同水固比下试样固结28 d无侧限抗压应力-应变关系曲线

Fig. 6 Strength of different specimens cured for 28 d under various water-solid ratios

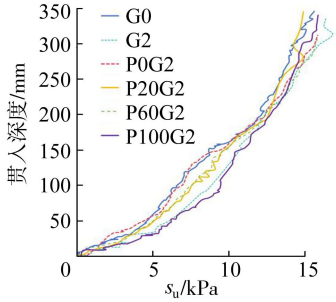
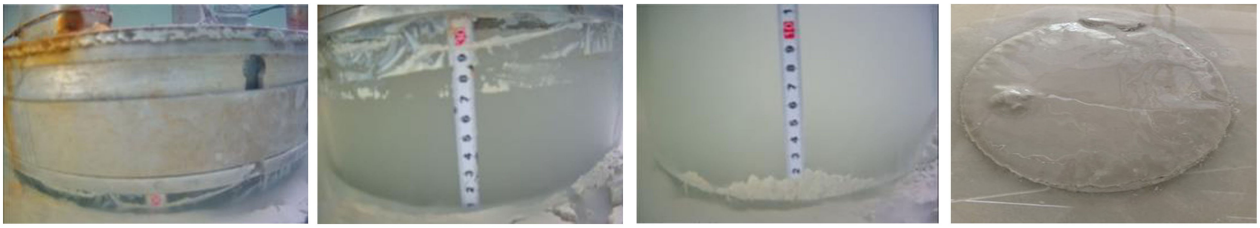


图7 回收试验各试验组黏土不排水抗剪强度随深度变化

Fig. 7 Variation of undrained shear strength of clay with depth for each experimental group in retrieval test

位置中心点进行土体抗压强度测试,获得 q_{ball} 随深度变化情况。本文所用黏土均利用真空预压固结法制备,在 60 kPa 的负压下固结 7 d,s_u 随深度增加呈现增大趋势,6 组回收试验中土体强度相似,在 300 mm 处强度约为 15 kPa。

回收试验过程如图 8 所示。其中,G0、G2、P60G2、P100G2 组均可完成回收,基础贯入和回收上拔过程中竖向力值以及回收过程中超静孔压变化如图 9 所示。筒内正压逐渐增大,吸力筒逐渐向上拔出,在回收至 80~110 mm 时,筒裙对土体扰动较大,筒内无法再形成密闭空间,筒内孔压降为 0,随后通过位移控制完成回收。



(a) 开始回收　(b) 回收中　(c) 离开泥面(回收完成)　(d) 回收后的试样

图 8　回收试验过程

Fig. 8　Retrieval test process

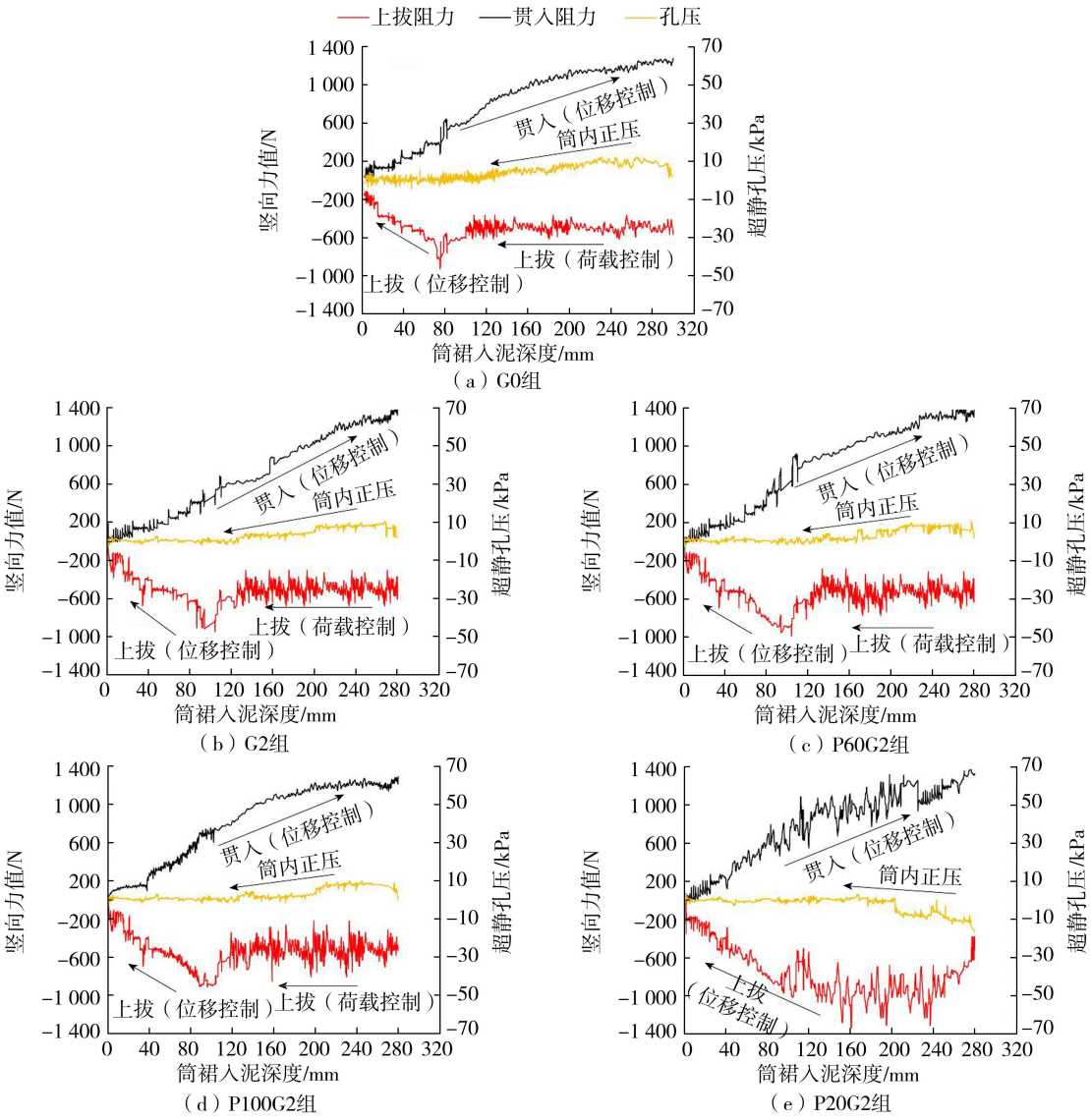


图 9　回收试验结果

Fig. 9　Retrieval test results

P20G2 组试样固结完成后将注水口堵住,无法进行正压回收,试验过程中竖向力值与筒内超静孔压变化如图 9(e)所示。由于灌浆液水泥含量较高,固结后与筒内孔压传感器相互黏结,考虑孔压传感器无法正确测量筒内孔压,因此通过位移控制将吸力筒拔出初期时筒内负孔压不作为参考。考虑到膨润土掺量更低的 P0G2 组(纯水泥)同样无法进行正压回收,因此未进行 P0G2 组试验。对比 P20G2、P60G2 与 P100G2 试验,回收阻力随吸力筒内膨润土掺量增大而降低,传统高强混凝土灌浆材料灌浆后(注水口堵塞)上拔吸力筒将导致基础内部产生被动吸力,如图 9(e)所示,回收竖向力显著增大导致回收失败。

3 结 论

a. 水固比一定时,随着膨润土掺量的增加,水泥灌浆材料的流动度与抗压强度均降低;膨润土掺量一定时,随着水固比增大,水泥灌浆材料流动度提升、抗压强度下降;在控制水固比使不同膨润土掺量的水泥灌浆材料保持相同流动性的条件下,水泥灌浆材料强度仍随膨润土掺量增加而降低。

b. 流动度过低易造成浆料泵送管道堵塞,流动度过高则易引发浆料离析。因此建议将水泥灌浆材料初始流动度控制在 250~300 mm,静置 30 min 后流动度不低于 200 mm,以保障灌浆过程中的流动性稳定,避免因施工延时导致浆料失效。

c. 膨润土掺量为 60%、100%的吸力筒可进行注水顶升回收,其余掺量条件下吸力筒无法完成注水顶升回收。综合考虑灌浆材料力学性能与吸力筒的可回收性,建议采用 60%膨润土掺量的水泥灌浆材料开展筒内灌浆,并适度提高水固比,使材料兼具良好流动性与较高强度,同时保障吸力筒的可回收性。

参考文献:

[1] International Energy Agency. Global energy review 2021[R]. Paris:IEA,2021.

[2] Global Wind Energy Council. Global offshore wind report 2024[R]. Brussels:GWEC,2024.

[3] Oh K Y,Nam W,Ryu M S,et al. A review of foundations of offshore wind energy convertors:current status and future perspectives[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2018,88:278-293.

[4] 杜剑强,李木盛,付小军,等. 海上风电建设成本趋势分析及石化行业投资建议[J]. 工程造价管理,2022(6):85-91. (Du Jianqiang,Li Musheng,Fu Xiaojun,et al. Trend analysis of offshore wind power construction costs and investment suggestions for petrochemical industry[J]. Engineering Cost Management,2022(6):85-91. (in Chinese))

[5] Zhong Fan,Lian Yushun,Zheng Jinhai,et al. Effects of shared lines with different materials on mooring response of the floating offshore wind turbine farm[J]. Chinese Journal of Ship Research,2024,19(4):59-70.

[6] 康思伟,张雨蓉,栾辰宇,等. 系泊锚在海上浮式风机中的应用[J]. 中国海洋平台,2023,38(3):16-21. (Kang Siwei,Zhang Yurong,Luan Chenyu,et al. Application of mooring anchors in offshore floating wind turbines[J]. China Offshore Platform,2023,38(3):16-21. (in Chinese))

[7] 代军,李佳佳,杨毅. 国内外漂浮式风电系泊系统技术发展研究[J]. 船舶工程,2024,46(11):175-180. (Dai Jun,Li Jiajia,Yang Yi. Research on technological development of mooring systems for floating offshore wind turbines worldwide[J]. Ship Engineering,2024,46(11):175-180. (in Chinese))

[8] 张继生,王军磊,李浩然,等. 海上浮式风机纵摇及其抑制研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(1):103-110. (Zhang Jisheng,Wang Junlei,Li Haoran,et al. Research progress on pitching and its suppression of floating offshore wind turbines[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025,53(1):103-110. (in Chinese))

[9] Kirkwood B P. Cyclic lateral loading of monopile foundations in sand[D]. Cambridge:University of Cambridge,2016.

[10] Faizi K,Faramarzi A,Dirar S,et al. Investigating the monotonic behaviour of hybrid tripod suction bucket foundations for offshore wind towers in sand[J]. Applied Ocean Research,2019,89:176-187.

[11] Haigh S K. Foundations for offshore wind turbines[C]//Proceedings of the 8th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics. Perth:CRC Press,2014:45-50.

[12] 刘辉. 国内首例三桩吸力筒式导管架基础灌浆工艺[J]. 企业科技与发展,2021(12):28-31. (Liu Hui. Grouting technology for China's first three-pile suction bucket jacket foundation[J]. Enterprise Science and Technology & Development,2021(12):28-31. (in Chinese))

[13] Bhattacharya S. Design of foundations for offshore wind turbines[M]. Hoboken:John Wiley & Sons,2019.

[14] 仲伟秋,滕丽荣. 剪力键形状对海上风电场灌浆连接段影响[J]. 低温建筑技术,2014,36(3):72-74. (Zhong Weiqiu,Teng

Lirong. Influence of shear key shape on grouted connections for offshore wind farms[J]. Low Temperature Architecture Technology,2014,36(3):72-74. (in Chinese))

[15] 康海贵,孙道明,莫仁杰,等. 海上风机桩基础与上部结构灌浆连接段优化分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2013,29(1):77-85. (Kang Haigui,Sun Daoming,Mo Renjie,et al. Optimization analysis of grouted connections between offshore wind turbine pile foundations and superstructures[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science),2013,29(1):77-85. (in Chinese))

[16] 郑金海,丁星宇,管大为,等. 循环荷载作用下海上风机单桩基础周围砂土沉降与对流特性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(6):552-561. (Zheng Jinhai,Ding Xingyu,Guan Dawei,et al. Characteristics of soil subsidence and convective motion around offshore windfarm monopile foundations subjected to long-term cyclic loading[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(6):552-561. (in Chinese))

[17] Dallyn P,El-Hamalawi A,Palmeri A,et al. Prediction of wear in grouted connections for offshore wind turbine generators[C]//Proceedings of the 26th International Ocean and Polar Engineering Conference. Rhodes:ISOPE,2016:680-687.

[18] Dallyn P,El-Hamalawi A,Palmeri A,et al. Experimental investigation on the development of wear in grouted connections for offshore wind turbine generators[J]. Engineering Structures,2016,113:89-102.

[19] 袁煜晖,贺瑞,朱元张. 水平循环荷载下嵌岩单桩基础受力特性试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(6):97-106. (Yuan Yuhui,He Rui,Zhu Yuanzhang. Experimental study on characteristics of rock-socketed monopile under lateral cyclic loads[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(6):97-106. (in Chinese))

[20] 贺瑞,金煜,吉吉,等. 海上风机大直径嵌岩单桩非线性动力特性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(1):121-130. (He Rui,Jin Yu,Ji Ji,et al. Nonlinear dynamic characteristics of large diameter rock-socketed monopile for offshore wind turbine[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025,53(1): 121-130. (in Chinese))

[21] 陶国荣,王梦赛,王宝民. 水下不分散混凝土研究与开发进展[J]. 低温建筑技术,2019,41(6):6-10. (Tao Guorong,Wang Mengsai,Wang Baomin. Research and development progress of non-dispersible underwater concrete[J]. Low Temperature Architecture Technology,2019,41(6):6-10. (in Chinese))

[22] 邓韶辉,王晓玲,石祖智,等. 基于 FIG 和 GWO-SVM 的灌浆功率时序预测[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(5):426-432. (Deng Shaohui,Wang Xiaoling,Shi Zuzhi,et al. Prediction of grouting power time series based on FIG and GWO-SVM[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(5):426-432. (in Chinese))

[23] 丁成. 超高性能海上风电灌浆料试验研究[D]. 广州:华南理工大学,2021.

[24] Tebbett I E. Recent developments in the design of grouted connections[J]. SPE Production Engineering,1987,2(3): 223-232.

[25] Cerfontaine B,Collin F,Charlier R. Numerical modelling of transient cyclic vertical loading of suction caissons in sand[J]. Géotechnique,2016,66(2):121-136.

[26] 李忠信,孙枭雄,刘东华,等. 海上风电勘察中确定土体抗剪强度的实用方法[J]. 南方能源建设,2021,8(4): 37-42. (Li Zhongxin,Sun Xiaoxiong,Liu Donghua,et al. Practical methods for determining soil shear strength in offshore wind power surveys[J]. Southern Energy Construction,2021,8(4):37-42. (in Chinese))

[27] Karlsrud K,Lunne T,Kort D A,et al. CPTU correlations for clays[C]//Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Osaka:ICSMGE,2005:396-402.

[28] Wang B,Brooks G R,Hunter J A M. Geotechnical investigations of a large landslide site at Quyon[C]//Proceedings of the 68th Canadian Geotechnical Conference. Québec:CGS,2015:355-362.

(收稿日期:2025-07-03　编辑:胡新宇)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.05.022

极端环境下单锚与三锚系泊深水浮标动力响应特性对比分析

陈航伟[1],孙安琪[2],吴 聪[1],王咸智[2],覃文鸿[1],乔东生[2]

(1. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司广州局海口分局; 2. 大连理工大学海岸与海洋工程全国重点实验室)

摘要: 为提升海缆路由浮标在极端环境下的在位稳定性,优化其运动响应与系泊张力,以直径为 2.4 m 的全钢制深水浮标为研究对象,分别开展了配置单锚系泊和三锚系泊浮标的运动响应与系泊张力对比分析;在保证锚链总质量与初始预张力一致的前提下设计单点式和三点式系泊系统,建立了浮标和系泊系统的时域耦合动力响应计算模型,对比分析了规则波条件下不同波高、周期,以及"威马逊"台风工况作用下的浮标运动响应和系泊张力。结果表明:浮标运动响应幅度与系泊张力主要受波高影响,周期对其影响较弱;相比于单点式,三点式系泊系统可以有效减小浮标运动响应幅度与系泊张力,为现行常用单锚系泊浮标设计改进提供参考。

关键词:深水浮标;动力响应;系泊系统;系泊张力;时域分析;台风工况

中图分类号:P715 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-1980(2026)05-0190-09

Comparative analysis of dynamic response characteristics of deep-water buoys with single-point and three-point mooring systems in extreme environments

Chen Hangwei[1], **Sun Anqi**[2], **Wu Cong**[1], **Wang Xianzhi**[2], **Qin Wenhong**[1], **Qiao Dongsheng**[2]

(1. *Haikou Sub-Bureau of Guangzhou Bureau, EHV Transmission Company of China Southern Power Grid Co., Ltd.*;
2. *State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology*)

Abstract: To improve the on-site stability of navigational buoys for submarine cable routes under extreme environments and optimize their motion response and mooring tension, this study takes a 2.4 m-diameter all-steel deep-water buoy as the research object, and conducts a comparative analysis of the motion responses of the buoy and mooring tension under single-point mooring (SPM) and three-point mooring (TPM) systems. Under the premise of ensuring consistent total weight and initial pretension of the mooring chains, SPM and TPM systems were designed. A time-domain coupled dynamic response calculation model for the buoy and mooring systems was established, and the buoy's motion responses and mooring tensions were compared and analyzed under the action of different regular wave heights/periods and the extreme typhoon condition of "Rammasun". The results show that: the motion responses amplitudes of the buoy and mooring tension are mainly affected by wave height, while influence of wave period is weak; compared with SPM system, TPM system can effectively reduce the amplitude of the buoy's motion response and the mooring tension. TPM system layout method proposed in this study can provide a reference for the design improvement of the currently commonly used SPM buoys.

Key words: deep-water buoy; dynamic response; mooring system; mooring tension; time-domain analysis; typhoon condition

海上浮标既是海洋观测体系的关键设施,也是深度服务于航海导航、海洋资源开发、灾害预警、海底设施保护等领域的重要工具,在观测数据采集与各类海洋事务落地推进过程中均发挥着核心作用[1]。其中导航浮标通过视觉或电子信号,向航海者提供精准定位、指引方向,是保障夜间及恶劣天气下航行安全的"海上灯塔",助力海上交通管理高效运行,在海上交通领域意义重大[2]。

浮式结构无固定式基础支撑,在极端环境风、浪、流联合作用下会产生复杂的六自由度运动响应[3]。系泊系统的设计选型对浮式结构物的运动响应具有显著影响,直接决定浮体系统的稳定性和可靠性,同时影响现场布设施工效率及后期运营维护的可行性[4]。王旭等[5]对三锚式浮标数值模型进行了频域分析,研究了不同锚泊半径下浮标的运动响应以及系泊张力,结果表明,锚泊半径对锚链预张力及系泊张力影响显著,但

基金项目:中国南方电网有限责任公司科技项目(CGYKJXM20230136))

作者简介:陈航伟(1986—),男,高级工程师,主要从事海缆运行维护研究。E-mail:qianchenchw@163.com

通信作者:乔东生(1983—),男,教授,博士,主要从事海洋浮式结构物研究。E-mail:qiaods@dlut.edu.cn

对浮标纵荡、横荡及垂荡运动响应影响较小;缪泉明等[6]基于三维势流理论,分析了 10 m 圆盘浮体的频域水动力特性,基于 Cummins 方程分析了极限海况下三锚浮标运动及锚链受力;Zhu 等[7]构建了系泊球形浮标数值模型,以集中质量法离散系泊缆,针对单根与多根锚绳束缚的球形浮标开展了水动力特性研究,发现浮标的运动与系泊线的拉力和运动紧密相关;郑锡巧等[8]基于 OrcaFlex 软件构建深海单点系泊浮标模型,分析了海洋动力环境参数对浮标动力响应的影响,结果表明,水深增大可降低系泊张力的最大值,波高增加会加剧张力与浮标横荡,波浪周期增加将适当增大系泊张力与浮标的横荡;高洋洋等[9]针对三锚系泊大型浮标开展水动力响应研究,揭示了波流环境荷载作用下六自由度运动响应及系泊张力的变化规律;黎祖狄等[10]基于 ANSYS AQWA 建立了三锚系泊浮标的运动响应计算模型,分析了不同环境荷载入射方向对系统动力响应的影响,发现各环境荷载同向作用时浮标纵荡、横荡最大,艏摇相应最小,系泊张力达到峰值。

南海海域作为“21 世纪海上丝绸之路”的重要航道,船舶活动密集,过往商船、作业渔船及工程船舶在此开展各类水下作业。为保障南海水域航海安全,海南联网系统琼州海峡海缆工程建设过程中,在海缆路由的东西两侧配备了 23 座基于 JT/T 760—2009《浮标通用技术条件》设计的直径为 2.4 m 的单锚系泊全钢制深水浮标(以下简称“HF2.4 深水浮标”),用作路由警示浮标,标示航线位置,引导过往船舶航行,提升海上运输效率。然而,南海海域台风频发、海流条件复杂[11],浮标在风、浪、流联合作用下易拖动沉块产生移位。据统计,浮标移位事件已多次发生,对海上航行安全构成严重威胁。

为提升海上浮标的安全性与稳定性,针对初始的单点式系泊系统布置形式,本文在保证锚链总质量与初始预张力一致的前提下,提出三点悬链线式系泊系统布置改进方案,以期解决现役浮标运动响应及系泊张力过大的问题。

1　浮标-系泊时域耦合运动方程

基于三维势流理论[12],假设流体为无旋、无黏、不可压缩的理想流体[13],通过频域水动力计算得到浮标在波浪中所受的辐射力、波浪激振力与恢复力等。基于 Cummins 方程[14],浮标-系泊系统时域耦合运动方程为:

$$\sum_{j=1}^{6}\left[(m_{kj}+A_{kj})\ddot{\xi}_j+\int_{-\infty}^{t}K_{kj}(t-\tau)\dot{\xi}_j(\tau)\mathrm{d}\tau+B_{kj}\dot{\xi}_j+C_{kj}\xi_j\right]=F_{\mathrm{w},k}+F_{\mathrm{exc},k}+F_{\mathrm{c},k}+F_{\mathrm{m},k} \tag{1}$$

式中:下标 j 为运动自由度方向;k 为作用方向;k、j 表示第 j 自由度运动在第 k 自由度产生的广义作用,取值均为 1、2、3、4、5、6,依次代表横荡、纵荡、垂荡、横摇、纵摇、艏摇;m_{kj} 为浮标质量;A_{kj} 为浮标等效附加质量系数;$K_{kj}(t-\tau)$ 为系统迟滞函数;t、τ 分别为当前时刻和历史积分时刻;B_{kj} 为附加黏性阻尼;C_{kj} 为静水恢复刚度;ξ、$\dot{\xi}$、$\ddot{\xi}$ 为浮标 6 个自由度运动的位移、速度和加速度;$F_{\mathrm{w},k}$ 为风荷载;$F_{\mathrm{exc},k}$ 为波浪荷载;$F_{\mathrm{c},k}$ 为流荷载;$F_{\mathrm{m},k}$ 为系泊张力。

1.1　迟滞函数

通过频域水动力计算得到的辐射阻尼 b_{kj} 变换得到时域内的迟滞函数:

$$K_{kj}(t-\tau)=\frac{2}{\pi}\int_0^{\infty}b_{kj}(\omega)\cos\omega t\mathrm{d}\omega \tag{2}$$

式中:ω 为波浪频率。

1.2　附加质量

当依赖于频率的附加质量系数 $a_{kj}(\omega)$ 在某一频率的值 ω' 已知时,等效附加质量系数 A_{kj} 可通过频域水动力计算得到的附加质量系数 $a_{kj}(\omega')$ 表示:

$$A_{kj}=a_{kj}(\omega')+\frac{1}{\omega'}\int_0^{\infty}K_{kj}(t)\sin\omega' t\mathrm{d}t \tag{3}$$

1.3　附加黏性阻尼

浮标垂荡、横摇和纵摇自由度方向上的附加黏性阻尼可通过临界阻尼与阻尼比进行计算。附加黏性阻尼表达式为:

$$B_{kj}=\mu B_{\mathrm{c},kj} \tag{4}$$

式中:$B_{c,kj}$ 为临界阻尼,对于垂荡 $B_{c,jj}=2\sqrt{(m_{jj}+\Delta m_{jj})k_{jj}}$,j 取3,对于横摇和纵摇 $B_{c,jj}=2\sqrt{(I_{jj}+\Delta I_{jj})k_{jj}}$,j 取4或5;Δm_{jj} 为固有频率、周期下的附加质量;I_{jj} 为质量惯性矩;ΔI_{jj} 为固有频率、周期下的附加质量惯性矩;k_{jj} 为刚度;μ 为阻尼比,取5%~10%。

1.4 风、浪、流荷载

考虑到风压沿高度的变化、地面粗糙度、周边环境及构筑物的形状,风荷载 F_w 计算公式可简化为:

$$F_w=\frac{1}{2}\rho C_s C_h A_w v_0^2 \tag{5}$$

式中:ρ 为空气密度;C_s、C_h 分别为形状系数、高度系数,按GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》分别取0.5、1;v_0 为设计的基本风速;A_w 为浮标结构的迎风面面积。

脉冲响应函数 $h_k(t)$ 可通过对频域水动力计算结果中单位波幅下的波浪激振力,即线性传递函数 $H_k(\omega)$ 变换得到:

$$h_k(t)=\frac{1}{\pi}\int_0^{\infty}H_k(\omega)\,\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega t}\,\mathrm{d}\omega \tag{6}$$

因此,波浪荷载可通过卷积计算得到[15]:

$$F_{\mathrm{exc},k}=\int_{-\infty}^{t}h_k(t-\tau)\eta(\tau)\,\mathrm{d}\tau \tag{7}$$

式中:η 为波面高度。

作用于浮标水面以下部分的流荷载 F_c 计算公式为:

$$F_c=\frac{1}{2}C_d\rho_w A_c v_c^2 \tag{8}$$

式中:C_d 为流力系数,按JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》取0.73;v_c 为海流速度;ρ_w 为海水密度;A_c 为浮标结构迎流面面积。

1.5 系泊张力

采用集中质量法建立锚链简化模型[16],将锚链简化为多个质量点和无质量的弹簧,并分为 n 段,每段近似用弹簧代替,质量依次记作 m_0、m_1、…、m_n。其中,第1段弹簧的下端与锚连接,第 n 段弹簧的上端与浮体连接。对于第 i 个节点,其运动控制方程可表达为:

$$m_i\ddot{x}_i+\frac{1}{2}e_i\ddot{x}_{iN|i}+\frac{1}{2}e_{i-1}\ddot{x}_{iN|i-1}=F_i \tag{9}$$

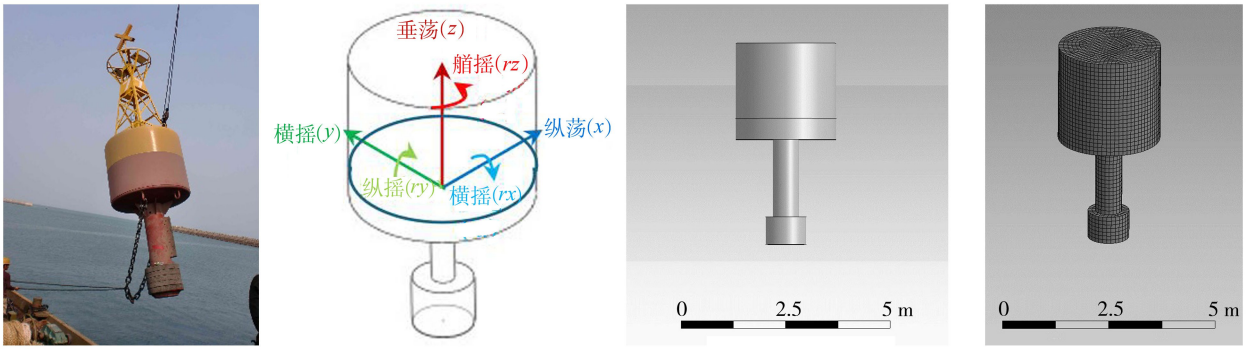
式中:$\ddot{x}_i$ 为第 i 个节点的加速度;e_{i-1}、e_i 分别为第 $i-1$、i 个节点与第 i、$i+1$ 个节点之间的线缆附加质量;$\ddot{x}_{iN|i}$、$\ddot{x}_{iN|i-1}$ 分别为加速度 a_i 在前后节点模型上的法向分量;F_i 为第 i 个节点的受力,主要由节点的重力、浮力、锚链拉力等组成。

建立一系列锚链质量点的运动控制方程,再设置边界条件及初始条件等方程,运用差分方法,求解上述运动控制方程。

2 浮标水动力性能分析

2.1 浮标和单点式、三点式系泊系统参数

HF2.4深水浮标可简化为由3段圆柱结构组合而成,其中上部圆柱直径2.4 m、高2.3 m,中部圆柱直径0.62 m、高1.845 m,下部圆柱直径0.97 m、高0.655 m。浮标吃水3 m,总质量4 100 kg,重心高度1.91 m,浮标绕 x、y、z 轴的质量惯性矩 I_{xx}、I_{yy}、I_{zz} 分别为13 020、13 020、2 343 kg·m^2,其作业水深为30 m,结构示意如图1(a)所示。建立描述浮标运动姿态的全局和局部两个坐标系,全局坐标系以浮标中心线与水面交点为原点,局部坐标系原点在浮标水线面中心点,静止时局部坐标系轴方向与全局坐标系轴方向一致。浮标的运动包括纵荡、横荡、垂荡、横摇、纵摇和艏摇[17],其中浮体沿 x、y、z 轴方向的水平运动分别称为纵荡、横荡、垂荡;浮体绕 x、y、z 轴方向的转动分别称为横摇、纵摇、艏摇。模型坐标系及六自由度运动方向示意如图1(b)所示,浮标水动力计算模型与网格示意分别如图1(c)和(d)所示。

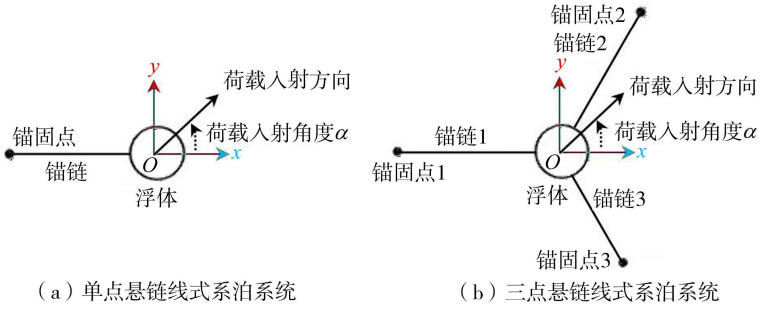


（a）结构　（b）坐标系　（c）水动力计算模型　（d）网格

图 1　浮标示意图

Fig. 1　Schematic diagram of buoy

系泊系统坐标示意如图 2 所示,保证单点式与三点式系泊系统总质量一致、初始预张力一致。根据浮标锚链设计规范,单点悬链线式系泊系统采用 1 条总长度为 82.5 m、直径为 34 mm、总质量为 1 897.5 kg 的无档悬链线式锚链。鉴于锚链总重量一致条件,当三点式系泊系统也采用 3 条长度均为 82.5 m 的无档悬链线式锚链时,可推导出单链直径 D_1 与三链直径 D_2 满足 $D_1=\sqrt{3}D_2$,从而确定三链锚链直径为 19.6 mm。3 条锚链之间呈 120°分布在浮标周围,系泊系统的主要性能参数如表 1 所示。通过调整锚点坐标,保证单点式与三点式系泊系统的总初始预张力相同,单点式系泊系统中海底锚固点距离浮标中心 56.2 m,三点式系泊系统海底锚固点距离浮标中心 66 m。两种系泊系统在纵荡方向上的静刚度曲线如图 3 所示。



（a）单点悬链线式系泊系统　（b）三点悬链线式系泊系统

图 2　系泊系统坐标示意图

Fig. 2　Schematic diagram of mooring system coordinates

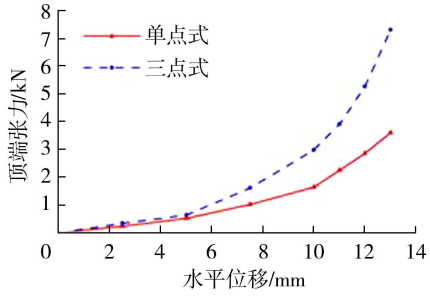


图 3　系泊系统静刚度曲线

Fig. 3　Static stiffness curve of mooring system

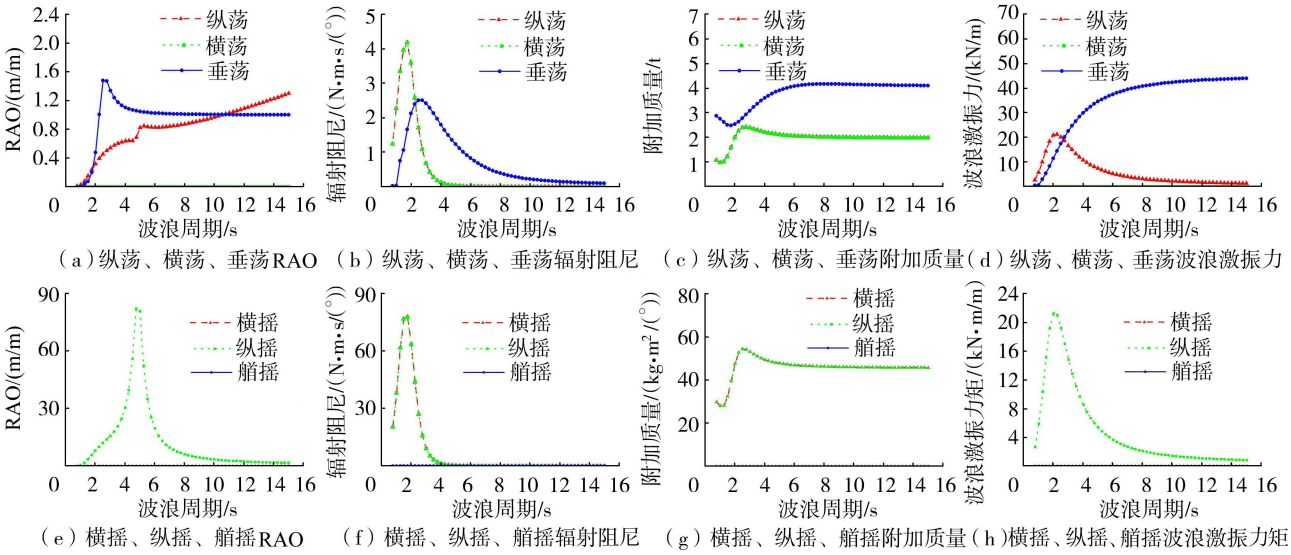
表 1　系泊性能参数

Table 1　Mooring system performance parameters

系泊系统	单链直径/m	单链长度/m	单位长度湿质量/(kg/m)	单链系泊刚度/MN	单链破断强度/MN
单点式	0.034 0	82.5	23.000	98.770	0.600
三点式	0.019 6	82.5	7.645	32.810	0.187

2.2　水动力性能分析

采用频域分析方法[6]计算浮标的水动力特性,并结合频域计算结果研究浮标水动力性能的变化规律。0°浪向条件下浮标频域水动力计算结果如图 4 所示。可以看出,由于结构对称,浮标在 0°浪向作用下横摇、横荡和艏摇的响应幅值算子（response amplitude operator,RAO）与单位波幅下的波浪激振力近似为零,浮标的横荡与纵荡、横摇与纵摇的辐射阻尼和附加质量曲线重合,艏摇的辐射阻尼与附加质量几乎为零。纵荡 RAO 随周期的增加而逐渐增大,垂荡 RAO 在周期为 2.5 s 时出现峰值后衰减,纵摇 RAO 则在周期为 4.75 s 时达到峰值后逐渐减小并趋于稳定。可以推断,本文浮标模型的垂荡固有周期约为 2.5 s,纵摇、横摇固有周期约为 4.75 s。横荡、纵荡、横摇和纵摇辐射阻尼在周期为 1.75 s 时达到峰值后衰减,垂荡辐射阻尼则在周期为 2.5 s 时达到峰值后逐渐减小并趋于稳定。纵荡、横荡附加质量在周期为 2.75 s 时达到峰值后衰减,垂荡附加质量呈先减小后增大并趋于稳定的趋势,横摇、纵摇附加质量在周期为 2.5 s 时达到峰值后衰减。纵荡和纵摇波浪力均在周期为 2.347 s 达到峰值后衰减;垂荡波浪力则随周期持续增长并趋于稳定。



(a)纵荡、横荡、垂荡RAO (b)纵荡、横荡、垂荡辐射阻尼 (c)纵荡、横荡、垂荡附加质量 (d)纵荡、横荡、垂荡波浪激振力

(e)横摇、纵摇、艏摇RAO (f)横摇、纵摇、艏摇辐射阻尼 (g)横摇、纵摇、艏摇附加质量 (h)横摇、纵摇、艏摇波浪激振力矩

图4 浮标频域水动力计算结果

Fig. 4 Frequency-domain hydrodynamic calculation results of buoy

3 不同波浪要素下浮标运动响应与系泊张力特性

3.1 浮标运动响应特性

浮式结构物的多自由度运动响应往往受到入射波浪幅值或周期的控制[18],因此探究不同波浪要素下浮标运动响应特性十分必要。风、浪、流均沿 $\alpha=0°$ 入射,风速分布保持不变,流速按水深呈现一次函数分布,布放海域的具体海洋环境参数[19]如表2所示,波高 H 范围为8~12 m,周期 T 范围为10~14 s。由于结构对称,在环境载荷沿 $\alpha=0°$ 入射时仅分析纵摇、垂荡和纵荡3个自由度方向的运动响应。由图5可知,当波高从8 m增大到12 m时,浮标运动响应的最大值均逐渐增大,且三锚系泊浮标纵荡、垂荡、纵摇响应的最大值始终小于单锚系泊浮标。当波高为12 m时,单锚系泊和三锚系泊浮标纵荡方向上运动响应的最大值分别达24.08、15.99 m,垂荡方向上运动响应的最大值分别达5.25、5.24 m,纵摇方向上运动响应的最大值分别达50.42°、42.78°。

表2 海洋环境参数

Table 2 Ocean environmental parameters

海况编号	波高/m	周期/s	10 m高处风速/(m/s)	表层流速/(m/s)	底层流速/(m/s)
1	8	10	55	3.5	2.5
2	9	10	55	3.5	2.5
3	10	10	55	3.5	2.5
4	11	10	55	3.5	2.5
5	12	10	55	3.5	2.5
6	12	11	55	3.5	2.5
7	12	12	55	3.5	2.5
8	12	13	55	3.5	2.5
9	12	14	55	3.5	2.5

不同周期波浪作用下浮标运动响应的最大值变化结果如图6所示。当周期从10 s增大到14 s时,三锚系泊浮标纵荡、垂荡、纵摇响应的最大值始终小于单锚系泊浮标,单锚系泊浮标纵荡响应的最大值基本保持在24.10 m,三锚系泊浮标纵荡响应的最大值基本保持在15.91 m。单锚系泊浮标垂荡响应的最大值基本保持在5.25 m,三锚系泊浮标垂荡响应的最大值略有减少,从10 s时的5.24 m减小到14 s时的5.12 m。单锚系泊浮标和三锚系泊浮标纵摇响应的最大值均逐渐减小,单锚系泊浮标纵摇响应从10 s时的50.42°减小到14 s时的46.78°,三锚系泊浮标纵摇响应从10 s时的42.78°,减小到14 s时的41.22°。结合浮标水动力性能分析结果可知,由于研究波浪周期范围与垂荡固有周期($T=2.5$ s)相差较大,未出现显著共振现象,因此垂荡响应对周期变化不敏感;而在纵摇方向,当波浪周期偏离固有周期($T=4.75$ s)并逐渐增大时,纵摇RAO和

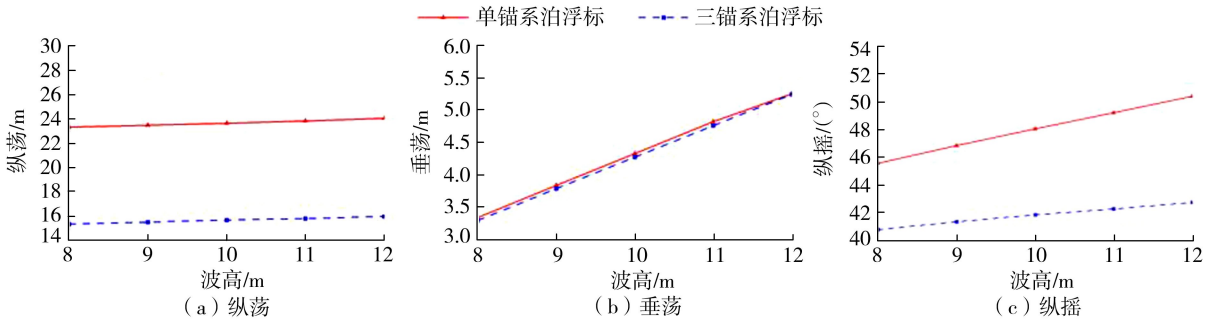


图 5　浮标运动响应最大值随波高变化曲线

Fig. 5　Variations of maximum values of buoy motion responses with wave heights

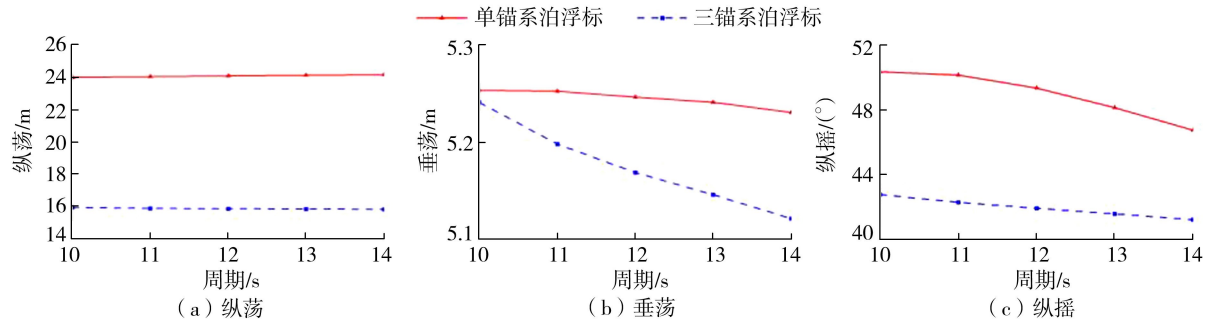


图 6　浮标运动响应最大值随波浪周期的变化曲线

Fig. 6　Variations of maximum values of buoy motion responses with wave periods

波浪激振力均呈下降趋势,从而导致纵摇响应幅值减小。

3.2　系泊张力特性

图 7(a)为波浪周期为 10 s 时,锚点处系泊张力最大值随波高的变化曲线。可见,随着波高的增大,系泊张力的最大值逐渐增大,并且三点式系泊系统系泊张力最大值始终小于单点式系泊系统。当波高为 12 m 时,单点式系泊系统的系泊张力达 78.71 kN,三点式系泊系统的系泊张力达 75.00 kN。图 7(b)为波高为 12 m 时,系泊张力最大值随波浪周期的变化曲线。可见,系泊张力最大值随波浪周期的增大而增大,并且三点式系泊系统系泊张力最大值始终小于单点式系泊系统。当波浪周期为 14 s 时,单点式系泊系统系泊张力的最大值达 80.88 kN,三点式系泊系统为 78.68 kN。

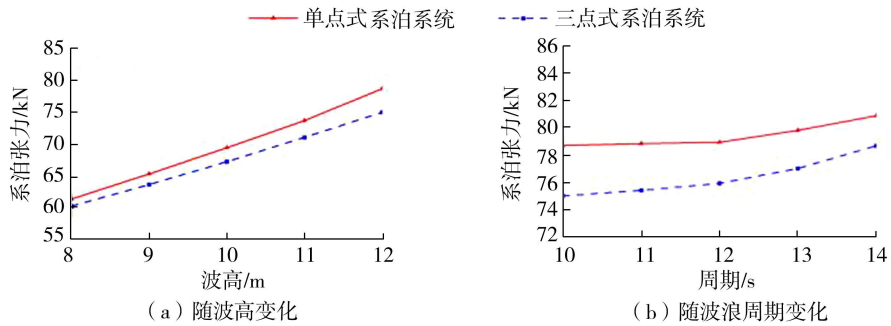


图 7　系泊张力最大值随波高与周期的变化曲线

Fig. 7　Variation of maximum mooring tension with different wave heights and periods

4　台风工况下浮标运动响应与系泊张力

4.1　单点式与三点式系泊系统对浮标运动响应的影响

极端海况下,系泊系统正常服役是浮式结构安全定位和生存的重要保障[20]。因此,针对台风极端工况,对比分析单点式与三点式系泊系统对浮标运动响应的影响。作业水深为 30 m,工况采用“威马逊”台风期间最不利波浪和海流实测数据,作业水深取 30 m,有效波高 H_s 为 7.5 m,谱峰周期 T_p 为 10 s,表层流速为

3.5 m/s,底层流速为2.5 m/s,风速为55 m/s。其中波浪谱选用JONSWAP谱[21],谱峰因子γ取3.3,挪威船级社(DNV)相关经验与研究表明,当$3.6<T_p/\sqrt{H_s}<5$时,该谱型能够较好地反映实际海况特征[22]。环境荷载方向取最危险的同向工况,入射角度$\alpha=0°$。

图8为浮标在极端工况下单锚系泊浮标和三锚系泊浮标运动响应时程曲线,表3为单锚和三锚系泊浮标运动响应统计值,三锚系泊浮标纵荡、纵摇最大值分别为16.62 m、60.85°,小于单锚系泊浮标的23.93 m、65.57°,垂荡最大值约为6.16 m,与单锚系泊浮标基本一致。将初始单点式系泊系统改进为三点式系泊系统后,浮标纵荡和纵摇运动最大值分别减小30.55%、7.20%。图9为环境荷载沿同一方向不同角度入射时,单锚系泊浮标与三锚系泊浮标沿环境荷载作用方向的位移包络图,可以发现三点式系泊系统对浮标的约束效果更强。

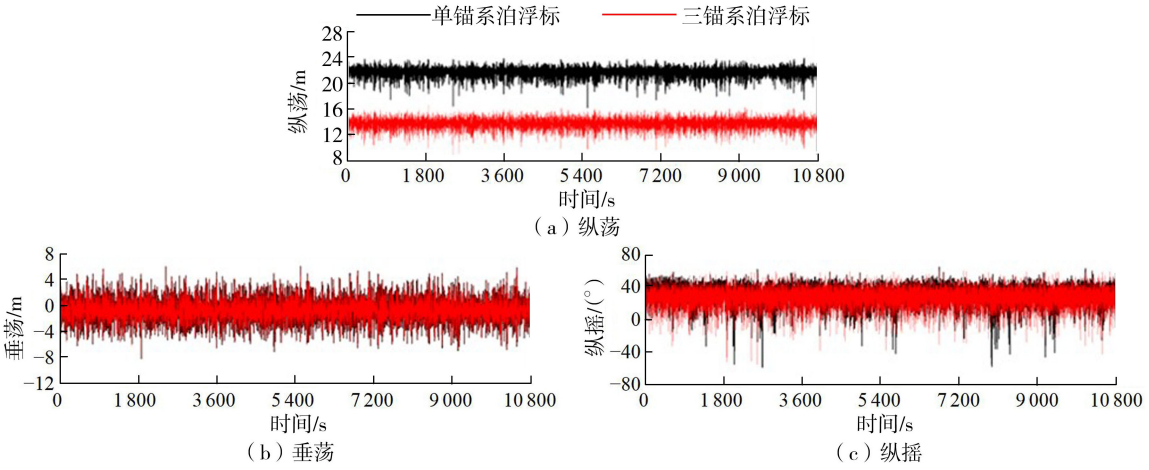


图8 单锚与三锚系泊浮标运动响应时程曲线

Fig. 8 Time history curves of motion response of single-point and three-point mooring buoy

表3 单锚与三锚系泊浮标运动响应统计

Table 3 Statistical values of motion responses of single-point and three-point mooring buoy

自由度方向	浮标类型	运动响应/m			
		最大值	最小值	平均值	标准差
纵荡	单锚系泊浮标	23.929	16.231	21.601	0.799
	三锚系泊浮标	16.623	8.812	13.691	0.880
垂荡	单锚系泊浮标	6.157	−8.214	−0.748	1.904
	三锚系泊浮标	6.156	−8.219	−0.721	1.917
纵摇	单锚系泊浮标	65.572	−59.438	28.613	12.948
	三锚系泊浮标	60.853	−55.813	25.644	12.187

4.2 单点式与三点式系泊系统对系泊张力的影响

表4为单点式与三点式系泊系统系泊张力统计值。当外荷载以$\alpha=0°$作用在浮标上时,锚链1与荷载处于同一平面,所以三点式系泊系统中锚链1上的系泊张力最大,定义为最不利锚链,锚链2、3上的系泊张力相对较小,故将单点式系泊系统系泊张力与三点式系泊系统中锚链1系泊张力进行比较,对比结果如图10所示。可见三点式系泊系统中锚链1的系泊张力平均值小于单点式系泊系统,系泊张力最大值减小约90 kN。图11为环境荷载沿同一方向不同角度入射时,单点式与三点式系泊系统中最不利锚链的系泊张力包络图,可以发现,相比于单点式系泊系统,三点式系泊系统的系泊张力明显较低。

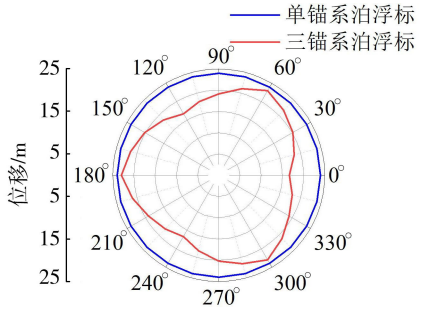


图9 单锚与三锚系泊浮标位移包络图

Fig. 9 Displacement rose diagrams of single-point and three-point mooring buoy

表 4　单点式与三点式系泊系统系泊张力统计

Table 4　Statistical values of mooring tension of single-point and three-point mooring systems

系泊类型	锚链编号	系泊张力/N			
		最大值	最小值	平均值	标准差
单点式	锚链	215 192.00	602.90	35 750.54	13 330.74
三点式	锚链 1	125 024.00	634.17	35 064.39	13 401.51
	锚链 2	7 208.58	83.56	2 632.43	633.96
	锚链 3	6 855.23	83.56	2 632.39	633.79

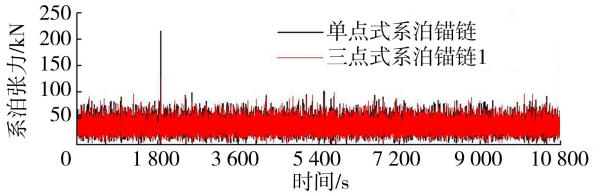


图 10　单点式与三点式系泊系统系泊张力时程曲线对比

Fig. 10　Comparison of mooring tension time-history curves between single-point and three-point mooring systems

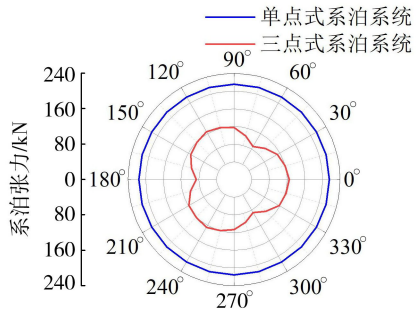


图 11　单点式与三点式系泊系统中最不利锚链的系泊张力包络图

Fig. 11　Mooring tension rose diagrams of the most unfavorable mooring-lines in single-point and three-point mooring systems

5　结　论

a. 浮标运动响应对波高变化的敏感性显著高于波浪周期。随着波高的增大,浮标的运动响应及系泊张力最大值均显著增加;随着波浪周期增大,浮标纵摇最大值呈微弱减小,系泊张力最大值呈微弱增加,纵荡、垂荡最大值基本不变。

b. 三锚系泊浮标运动响应均小于单锚系泊浮标,系泊张力最大值也小于单点式系泊系统,三点式系泊系统对浮标的约束效果更强,同时也能降低系泊系统张力。

参考文献:

[1] 王淇元,范健宇,陈江龙,等. 中心管式波能发电浮标的气动性能仿真分析[J]. 能源技术与管理,2024,49(3):8-13. (Wang Qiyuan,Fan Jianyu,Chen Jianglong,et al. Simulation analysis of aerodynamic performance of wave energy generation buoy with central pipe[J]. Energy Technology and Management,2024,49(3):8-13. (in Chinese))

[2] 赵春廷,张燕红. 一种自发电安全导航智能化夜视浮标设计方案[J]. 设备管理与维修,2024(22):55-57. (Zhao Chunting,Zhang Yanhong. Design scheme of a self-powered intelligent night-vision buoy for safe navigation[J]. Plant Maintenance Engineering,2024(22):55-57. (in Chinese))

[3] 张继生,王军磊,李浩然,等. 海上浮式风机纵摇及其抑制研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(1):103-110. (Zhang Jisheng,Wang Junlei,Li Haoran,et al. Research progress on pitching and its suppression of floating offshore wind turbines[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025,53(1):103-110. (in Chinese))

[4] 郭晨伟,高洋洋,国振,等. 新型激光雷达浮标运动响应特性数值研究[J]. 海洋工程,2021,39(4):46-61. (Guo Chenwei,Gao Yangyang,Guo Zhen,et al. Numerical investigation on the dynamic response of a novel FLiDAR buoy[J]. The Ocean

Engineering,2021,39(4):46-61. (in Chinese))
[5] 王旭,贾思洋,刘长华,等. 三锚式浮标综合观测平台不同系泊参数的响应分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2024,48(2):285-291. (Wang Xu,Ja Siyang,Liu Changhua,et al. Response analysis of different mooring parameters for a three-anchor buoy integrated observing platform[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering),2024,48(2):285-291. (in Chinese))
[6] 缪泉明,顾民,杨占明,等. 极限海况下浮标运动及锚链受力估算[J]. 船舶力学,2003,7(5):21-27. (Liao Quanming,Gu Min,Yang Zhanming,et al. Estimation of buoy motions and chain forces in extreme sea state[J]. Journal of Ship Mechanics,2003,7(5):21-27. (in Chinese))
[7] Zhu Xiangqian,Yoo W S. Dynamic analysis of a floating spherical buoy fastened by mooring cables[J]. Ocean Engineering,2016,121:462-471.
[8] 郑锡巧,朱克强,张大朋,等. 深水单点系泊海洋气象浮标的水动力分析[J]. 水道港口,2018,39(1):96-100. (Zheng Xiqiao,Zhu Keqiang,Zhang Dapeng,et al. Hydrodynamic analysis of the single point mooring metocean buoy in deep water[J]. Journal of Waterway and Harbor,2018,39(1):96-100. (in Chinese))
[9] 高洋洋,胡阳宁,王立忠,等. 三锚系大型浮标运动响应特性数值研究[J]. 海洋工程,2023,41(6):124-138. (Gao Yangyang,Hu Yangning,Wang Lizhong,et al. Numerical investigation on the dynamic responses of three-anchor large-scale buoy[J]. The Ocean Engineering,2023,41(6):124-138. (in Chinese))
[10] 黎祖狄,米智楠,李伟雄. 风浪流夹角变化对三锚浮标系统运动响应的影响[J]. 机电工程技术,2025,54(9):1-6. (Li Zudi,Mi Zhinan,Li Weixiong. Effects of wind-wave-current intersection angle change on motion response of three-anchor buoy system[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology,2025,54(9):1-6. (in Chinese))
[11] Zhang Baofeng,Li Xu,Wang Lizhong,et al. Numerical simulation of typhoon waves in an offshore wind farm area of the South China Sea[J]. Journal of Marine Science and Engineering,2025,13(3):451.
[12] Liang Shuang,Lin Lin,Liang Fayun,et al. Numerical analysis of nonlinear hydrodynamic performance in an innovative composite monopile foundation for offshore wind turbines using a fully nonlinear potential flow model[J]. Sustainability,2025,17(11):4769.
[13] 梁冠辉,薛宇欢,孙宝楠,等. 海洋物性监测小型浮标稳性设计[J]. 海洋科学进展,2020,38(3):541-548. (Liang Guanhui,Xue Yuhuan,Sun Baonan,et al. Stability design of small buoy for marine physical property monitoring[J]. Advances in Marine Science,2020,38(3):541-548. (in Chinese))
[14] Cummins W E. The impulse response function and ship motions[R]. West Bethesda:David Taylor Model Basin, 1962.
[15] Tao Wei,Sun Jinwei,Wang Shuqing,et al. Coupled dynamic analysis of moored floating structures by a hybrid laplace-time domain method[J]. Ocean Engineering,2025,317:120022.
[16] Xiong Lingzhi,Yang Jianmin,Zhao Wenhua. Dynamics of a taut mooring line accounting for the embedded anchor chains[J]. Ocean Engineering,2016,121:403-413.
[17] Cao Yu,Wang Kewen,Xi Chen,et al. Hydrodynamic performance characteristics of small-scale in-situ buoys with critical motion requirements[J]. Ocean Engineering,2024,313:119420.
[18] 李彬彬,欧进萍. Truss Spar 平台垂荡响应频域分析[J]. 海洋工程,2009,27(1):8-16. (Li Binbin,Ou Jinping. Heave response analysis of Truss Spar in frequency domain[J]. The Ocean Engineering,2009,27(1):8-16. (in Chinese))
[19] 黄必桂,胡琴,谢波涛,等. 1409 号"威马逊"台风对海上水文气象设计参数的影响研究[J]. 中国造船,2016,57(A01):532-538. (Huang Bigui,Hu Qin,Xie Botao,et al. Research on influence of No. 1409 typhoon Rammasun on meteorological and hydrological design parameters in open sea[J]. Ship Building of China,2016,57(A01):532-538. (in Chinese))
[20] 连宇顺,潘正虎,郑金海,等. 离岸系泊式海藻牧场的动力响应分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(6):107-116. (Lian Yushun,Pan Zhenghu,Zheng Jinhai,et al. Dynamic response analysis of offshore moored kelp farms[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(6):107-116. (in Chinese))
[21] Liu P C,Hawley N. Wave grouping characteristics in nearshore great lakes Ⅱ[J]. Ocean Engineering,2002,29(11):1415-1425.
[22] DNV. Environmental conditions and environmental loads:DNV-RP-C205[S]. Oslo:Det Norske Veritas, 2017.

(收稿日期:2025-08-31 编辑:胡新宇)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.05.023

源荷不确定性扰动下电压波动区间解析分析与越限抑制

黄 桦[1],朱立轩[2],余一平[3]

(1.南京工程学院电力工程学院;2.国网福建省电力有限公司电力科学研究院;3.河海大学电气与动力工程学院)

摘要:针对新能源发电与新型负荷高渗透率引发的节点电压频繁不确定性波动乃至越限问题,提出一种功率不确定性扰动下的电压波动区间解析计算方法。该方法采用区间模型与非参数化方式表征不确定性,仅需节点注入功率的扰动区间,即可通过解析运算快速获得各节点电压的波动区间。在此基础上,构建以调节代价最小为目标的优化模型,以确定抑制电压波动的功率调节措施,进而提出一种电压越限时利用可调负荷的电压波动抑制策略,使电压恢复至允许范围。IEEE-39节点系统的仿真结果表明,本文提出的解析计算方法所得电压波动区间上下限的误差在1%左右,提出的越限抑制策略效果显著。

关键词:电力系统;新能源发电;不确定性扰动;电压波动;区间分析;越限抑制

中图分类号:TM711 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-1980(2026)05-0199-10

Analytic analysis and over-limit mitigation of voltage fluctuation interval under source-load uncertainty

Huang Hua[1], **Zhu Lixuan**[2], **Yu Yiping**[3]

(1. *School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology*;
2. *Electric Power Research Institute, State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd.*;
3. *School of Electrical and Power Engineering, Hohai University*)

Abstract: In view of the frequent uncertain voltage fluctuations and even limit violations at buses caused by the high penetration rate of renewable energy generation and emerging loads, an analytical calculation method for voltage fluctuation intervals under uncertain power disturbances was proposed. This method employed an interval model and a non-parametric approach to characterize uncertainties and could rapidly obtain the voltage fluctuation intervals of each bus through analytical calculations using only the disturbance intervals of bus injected power. On this basis, an optimization model aimed at minimizing the adjustment cost was established to determine the power adjustment measures for mitigating voltage fluctuations, and a voltage fluctuation mitigation strategy utilizing adjustable loads during voltage limit violations was subsequently proposed to restore voltages to the allowable range. Simulation results on the IEEE 39-bus system show that the errors of the upper and lower bounds of the voltage fluctuation intervals obtained by the proposed analytical calculation method are around 1%. Furthermore, the proposed over-limit mitigation strategy is highly effective.

Key words: power system; renewable energy generation; uncertainty disturbance; voltage fluctuation; interval analysis; over-limit mitigation

随着新能源发电与新型负荷占比的持续攀升,源荷功率扰动日趋显著[1-2],进而引发节点电压的频繁波动[3-6]。电压波动作为衡量电压安全性与电能质量的关键指标,受源荷功率扰动不确定性的影响,其变化幅度亦呈现显著的随机特征。因此,开展不确定性电压波动的分析与抑制研究,具有重要的现实意义。

现有关于电压波动的研究主要分为稳态、动态两个部分。稳态分析主要关注不确定性潮流的计算方法和优化[7-8],动态分析则主要考虑不确定性对暂态电压的影响[9]。准稳态分析针对慢变扰动(比如新能源功率正常波动),忽略系统中的快变过程,并采用代数方程近似描述系统状态变化,重点关注系统状态与后续

基金项目:国家自然科学基金项目(52077058)

作者简介:黄桦(1990—),女,讲师,博士,主要从事新能源电力系统不确定性分析与控制研究。E-mail:hua.h@njit.edu.cn

通信作者:余一平(1977—),男,教授,博士,主要从事新能源电力系统不确定性分析与控制研究。E-mail:yyiping@hhu.edu.cn

状态之间的关系和转换。这种分析方法是潮流计算和全时域动态仿真的一种折中,有效协调了计算速度与精确度两方面的矛盾[10],可用于慢变扰动下的电压波动分析[11]。

电力系统中不确定性波动的分析方法,主要有随机分析方法、模糊分析方法和区间分析方法等。其中,随机分析方法使用最多,理论与应用成果均较为丰富。随机分析方法采用准确的概率分布描述实际问题中的不确定性,通过概率分配法、域方法论等对系统运行状态进行评估,计算待求物理量或系统响应的具体概率特征[12]。然而,新型电力系统中的各种不确定性因素更加复杂,许多情况下无法采用标准概率分布进行表征[13]。模糊分析方法将模糊数学理论运用于电力系统分析,采用隶属度函数等描述变量的不确定性,适用于多量纲的多目标优化问题求解以及鲁棒控制器设计等[14]。然而,模糊类数学方法不仅会导致分析模型阶数升高、求解复杂性增加,同时其模糊参数的确定高度依赖专家经验,因而难以有效适应新型电力系统不确定性分析的要求[15]。数据驱动方法为当前热门的非参数随机分析方法,其借助大量历史数据描述电力系统中的多种不确定性。随着数据测量与人工智能技术的成熟,该方法已能量化评估不确定性因素对高阶电力系统的影响[16-18]。然而,现有研究多基于低维系统模型且依赖较多理想化假设[19];此外,数据驱动方法存在物理机理不清晰、计算复杂度高及维数灾难等问题[20],难以直接应用于实际电力工程。区间分析方法[21]则综合了上述方法的优势,采用波动区间刻画不确定性,无需额外参数假设,机理清晰、形式简洁。同时,区间分析的表述形式与电压波动问题更为契合,更适用于源荷功率扰动不确定性下电压波动的解析分析。

当前不确定性电压分析研究多集中于稳态或动态场景,易使分析过程过于简化或过度复杂,亟须从准稳态层面深入探究不确定性影响下系统电压波动的演变特性。同时,针对区间扰动下电压越限的抑制策略研究尚不充分,缺乏通用的调控手段。为此,本文针对新型电力系统中新能源有功/无功功率不确定性扰动引发的电压波动问题,提出一种计及功率扰动不确定性的电压波动区间快速分析方法。该方法基于不确定性电流注入模型,通过解析计算为电压安全性评估提供量化依据。在解析电压波动区间的基础上,构建以调节代价最小为目标、含约束条件的优化模型,进而提出电压越限时利用可调负荷调整进行抑制的策略,确保电压在允许区间内运行。借助功率扰动与电压波动的解析关系,可便捷地反推获得越限抑制措施,有效克服传统区间优化控制在求解效率与保守性方面的不足。

1 不确定性扰动下波动区间解析求解方法

区间潮流计算的本质在于求解含区间变量的线性代数方程组[22]。现有研究多采用区间高斯迭代法、区间 Krawczyk 迭代法及仿射迭代法等数值方法[23]。然而,这类数值迭代方法普遍存在计算量大、区间扩张明显等问题,尤其在高维系统下,计算复杂度急剧上升,求解效率显著降低。因此,在特定条件下,可探索含区间变量线性代数方程组的解析求解途径。

对于一般的含区间变量的代数方程组,其表达式如下:

$$\boldsymbol{A}\boldsymbol{x} = \boldsymbol{b} \tag{1}$$

式(1)右侧向量为已知的区间向量即 $\boldsymbol{b}=[\boldsymbol{b}]=[\underline{\boldsymbol{b}},\overline{\boldsymbol{b}}]$,其不确定性可来源于新能源和负荷的功率波动等各方面[24];左侧向量为待求解的区间向量,即 $\boldsymbol{x}=[\boldsymbol{x}]=[\underline{\boldsymbol{x}},\overline{\boldsymbol{x}}]$,表示节点电压等。系统矩阵 $\boldsymbol{A}$ 是网络矩阵,为确定性实数矩阵。对式(1)进行解析求解,若 $\boldsymbol{A}$ 并非满秩,可求取其 Moore-Penrose 广义逆矩阵 $\boldsymbol{A}_{\mathrm{MP}}^{-1}$[25],将式(1)转化为:

$$\boldsymbol{x} = \boldsymbol{A}_{\mathrm{MP}}^{-1}\boldsymbol{b} \tag{2}$$

对于上述采用广义逆进行求解的方法,需作以下两点说明。

a. 矩阵出现非满秩或奇异的典型电网运行场景包括 3 种情况:①无平衡节点或多平衡节点场景,此时系统导纳矩阵存在零特征值;②极端静态电压稳定极限场景(即鞍结分岔点),系统运行于静态电压稳定临界点,其雅可比矩阵发生奇异;③电网解列场景,严重故障导致电网分裂为多个独立子网,全局系统矩阵呈现对角化不满秩。

b. 采用广义逆所得解在数学上等价于最小二乘解,其物理含义包含两方面:①误差最小化,当系统因源荷预测误差等原因不存在严格解析解时,广义逆可使方程残差平方和最小。物理上表现为不平衡功率并非集中于单一节点,而是依据网架的电气距离或权重,在全网范围内分配,使得各节点功率方程不平衡量总和最小,体现全网机组共同承担不平衡量的响应特性。②全网电压/相角波动最小化,在所有可能解中,广义逆

能保证相对偏移的平方和最小。

若采用确定性方法,直接将区间向量[$\boldsymbol{b}$]的上下界代入计算,所得结果无法构成包含变量 $\boldsymbol{x}$ 的所有可能解的区间,导致其结果保守且实际应用价值有限。为保证求解的合理性,根据矩阵运算的分配律(叠加原理),将已知的区间向量[$\boldsymbol{b}$]分解为区间中点和关于原点对称的区间加和形式:

$$[\boldsymbol{b}] = \boldsymbol{b}_{\mathrm{m}} + [-\boldsymbol{b}_{\mathrm{r}}, \boldsymbol{b}_{\mathrm{r}}] \tag{3}$$

式中:$\boldsymbol{b}_{\mathrm{m}}$ 为由各量区间中点组成的区间中点向量;$\boldsymbol{b}_{\mathrm{r}}$ 为对应的区间半径向量。将式(3)的代入式(2),首先求 $\boldsymbol{x}$ 的区间中点向量:

$$\boldsymbol{x}_{\mathrm{m}} = \boldsymbol{A}_{\mathrm{MP}}^{-1}\boldsymbol{b}_{\mathrm{m}} \tag{4}$$

式中:$\boldsymbol{x}_{\mathrm{m}}$ 为待求区间向量 $\boldsymbol{x}$ 的中点向量。其次求 $\boldsymbol{x}$ 的区间半径向量,由于 $\boldsymbol{b}_{\mathrm{r}}$ 的元素有正有负,为了保证求 $\boldsymbol{x}_{\mathrm{r}}$ 时能包含所有可能性,将 $\boldsymbol{A}_{\mathrm{MP}}^{-1}$ 矩阵中所有元素取绝对值后表达为 $\overline{\boldsymbol{A}}_{\mathrm{MP}}^{-1}$:

$$\boldsymbol{x}_{\mathrm{r}} = \overline{\boldsymbol{A}}_{\mathrm{MP}}^{-1}\boldsymbol{b}_{\mathrm{r}} \tag{5}$$

由此可得待求区间向量的上下界:

$$\begin{cases} \underline{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{A}_{\mathrm{MP}}^{-1}\boldsymbol{b}_{\mathrm{m}} - \overline{\boldsymbol{A}}_{\mathrm{MP}}^{-1}\boldsymbol{b}_{\mathrm{r}} \\ \overline{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{A}_{\mathrm{MP}}^{-1}\boldsymbol{b}_{\mathrm{m}} + \overline{\boldsymbol{A}}_{\mathrm{MP}}^{-1}\boldsymbol{b}_{\mathrm{r}} \end{cases} \tag{6}$$

由式(6)可知,所提区间解析计算方法只需要简单的矩阵计算便可以获得待求向量的区间边界。本方法不需要迭代,对于高维系统的求解非常简便。对上述逆矩阵的所有元素取绝对值,需要说明的是,这一处理相当于假定各节点功率扰动(不确定性量)在数学上彼此独立且完全解耦。其原因如下:①从区间数学理论视角看,首要目标是求取波动变量的严格上下界。在不引入仿射算术、联合概率分布等复杂参量的前提下,直接对矩阵元素取绝对值并叠加,能够保证所得区间半径包络所有可能的不确定性组合。②从电网安全预防调度视角看,不确定性分析的核心目的在于量化风险并提供安全裕度。假定各节点扰动相互独立并取绝对值叠加,本质上是最恶劣场景分析,可保障不确定性分析结果的鲁棒性。③从工程应用视角看,考虑相关性会引入高维非线性运算或复杂的协方差矩阵计算,显著增加求解耗时,甚至导致求解失败。式(5)的线性化处理具有较高的计算效率,并能获得确保不越限的安全边界,对于大规模电力系统在线不确定性分析等场景具有较好的实用性。

2　不确定性扰动下电压波动区间分析

2.1　电压波动区间分析模型

随着现代社会经济的发展,高质量电能供应要求电压波动保持在允许范围内。在实时调度框架下,希望能基于当前时刻电压实测值与下一时刻(如 5 min 后)的功率预测值,预测下一时刻电压的波动范围,并对潜在电压越限风险进行预警和抑制。现有研究通常采用功率灵敏度分析方法计算功率扰动引起的电压波动[26]。然而,节点功率与电压之间呈非线性关系,导致功率灵敏度方法在线性化过程中误差较大;而节点电压与注入电流之间为线性关系,可直接将两者的线性化关系代入系统。因此,本文基于注入电流灵敏度,解析分析区间不确定性影响下的电压波动[27]。由基尔霍夫定律,任意节点 i 处的注入电流为[28]:

$$\dot{I}_i = Y_{si}\dot{U}_i + \sum_{j\in N_i} Y_{ij}(\dot{U}_i - \dot{U}_j) \tag{7}$$

式中:$\dot{I}_i$ 为节点 i 的注入电流;$\dot{U}_i$、$\dot{U}_j$ 分别为节点 i 和节点 j 的电压;Y_{si} 为对地支路导纳;Y_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的互导纳;N_i 为与节点 i 相邻的节点集合。

将式(7)取共轭后左乘节点 i 的电压 $\dot{U}_i$,可以得到节点功率方程。再将所得方程的有功及无功部分分别除以当前时刻的标量电压 U_i,便可得到节点对应的注入有功电流 $I_{\mathrm{P}i}$ 和无功电流 $I_{\mathrm{Q}i}$:

$$I_{\mathrm{P}i} = \dot{U}_i\sum_{j\in N_i} G_{ij} - \sum_{j\in N_i} U_j(G_{ij}\cos\theta_{ij} + B_{ij}\sin\theta_{ij}) \tag{8}$$

$$I_{\mathrm{Q}i} = -U_iB_{si} - U_i\sum_{j\in N_i} B_{ij} + \sum_{j\in N_i} U_j(B_{ij}\cos\theta_{ij} + G_{ij}\sin\theta_{ij}) \tag{9}$$

式中:G_{ij}、B_{ij} 分别为节点 i 和节点 j 间的联络线电导和电纳;B_{si} 为节点 i 对地电纳;θ_{ij} 为节点 i 和节点 j 间相角。在电流方程中,节点电压与注入电流间为线性关系,故将电流方程线性化的误差比功率方程更小。将

式(8)(9)在平衡点处线性化并假设网络中存在 m 个 PQ 节点和 n 个 PV 节点,则各节点无功及有功电流的变化量可表达如下:

$$\Delta \boldsymbol{I}_{\mathrm{Q(PQ\text{-}node)}} = \boldsymbol{B}_{\mathrm{B}} \Delta \boldsymbol{U}_{\mathrm{(PQ\text{-}node)}} + \boldsymbol{B}_{\mathrm{A}} \Delta \boldsymbol{\theta}_{\mathrm{(PQ\text{-}node)}} \tag{10}$$

$$\Delta \boldsymbol{I}_{\mathrm{P(PQ,PV\text{-}node)}} = \boldsymbol{B}_{\mathrm{C}} \Delta \boldsymbol{U}_{\mathrm{(PQ,PV\text{-}node)}} + \boldsymbol{B}_{\mathrm{D}} \Delta \boldsymbol{\theta}_{\mathrm{(PQ,PV\text{-}node)}} \tag{11}$$

式中:$\Delta \boldsymbol{I}_{\mathrm{Q(PQ\text{-}node)}}$ 为 PQ 节点无功电流的变化量;$\Delta \boldsymbol{I}_{\mathrm{P(PQ,PV\text{-}node)}}$ 为 PQ 及 PV 节点有功电流的变化量;$\boldsymbol{B}_{\mathrm{A}}$、$\boldsymbol{B}_{\mathrm{B}}$、$\boldsymbol{B}_{\mathrm{C}}$、$\boldsymbol{B}_{\mathrm{D}}$ 为系数矩阵;$\Delta \boldsymbol{U}_{\mathrm{(PQ\text{-}node)}}$、$\Delta \boldsymbol{U}_{\mathrm{(PQ,PV\text{-}node)}}$ 分别为 PQ 节点、PQ 及 PV 节点的电压幅值变化量;$\Delta \boldsymbol{\theta}_{\mathrm{(PQ\text{-}node)}}$、$\Delta \boldsymbol{\theta}_{\mathrm{(PQ,PV\text{-}node)}}$ 分别为 PQ 节点、PQ 及 PV 节点电压相位变化量。各系数矩阵元素的计算表达式如下:

$$B_{\mathrm{B}ij} = \begin{cases} -\sum\limits_{j \in N_i} B_{ij} - B_{\mathrm{s}i} & i = j \\ B_{ij}\cos\theta_{ij} + G_{ij}\sin\theta_{ij} & i \neq j \end{cases} \tag{12}$$

$$B_{\mathrm{A}ij} = \begin{cases} \sum\limits_{j \in N_i} U_j (G_{ij}\cos\theta_{ij} - B_{ij}\sin\theta_{ij}) & i = j \\ U_j (B_{ij}\sin\theta_{ij} - G_{ij}\cos\theta_{ij}) & i \neq j \end{cases} \tag{13}$$

$$B_{\mathrm{C}ij} = \begin{cases} \sum\limits_{j \in N_i} G_{ij} & i = j \\ -G_{ij}\cos\theta_{ij} - B_{ij}\sin\theta_{ij} & i \neq j \end{cases} \tag{14}$$

$$B_{\mathrm{D}ij} = \begin{cases} -\sum\limits_{j \in N_i} U_j (B_{ij}\cos\theta_{ij} - G_{ij}\sin\theta_{ij}) & i = j \\ -U_j (G_{ij}\sin\theta_{ij} - B_{ij}\cos\theta_{ij}) & i \neq j \end{cases} \tag{15}$$

设下一时刻有功功率波动预测范围为 $[\Delta \boldsymbol{P}] = [\Delta \underline{\boldsymbol{P}}, \Delta \overline{\boldsymbol{P}}]$,对应的有功电流波动预测范围为 $[\Delta \boldsymbol{I}_{\mathrm{P}}]$;无功功率波动预测范围为 $[\Delta \boldsymbol{Q}] = [\Delta \underline{\boldsymbol{Q}}, \Delta \overline{\boldsymbol{Q}}]$,对应的无功电流波动预测范围为 $[\Delta \boldsymbol{I}_{\mathrm{Q}}]$;引起的电压波动预测范围也将表现为区间形式,分别表示为 $[\Delta \boldsymbol{U}] = [\Delta \underline{\boldsymbol{U}}, \Delta \overline{\boldsymbol{U}}]$ 和 $[\Delta \boldsymbol{\theta}] = [\Delta \underline{\boldsymbol{\theta}}, \Delta \overline{\boldsymbol{\theta}}]$。将式(10)和(11)改写为矩阵形式,可以得到不确定性功率扰动与电压波动的方程,表征为一线性区间方程组:

$$\begin{bmatrix} [\Delta \boldsymbol{I}_{\mathrm{Q}}] \\ [\Delta \boldsymbol{I}_{\mathrm{P}}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{B}_{\mathrm{B}} & \boldsymbol{B}_{\mathrm{A}} \\ \boldsymbol{B}_{\mathrm{C}} & \boldsymbol{B}_{\mathrm{D}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta \boldsymbol{U}] \\ [\Delta \boldsymbol{\theta}] \end{bmatrix} \tag{16}$$

其中,节点 i 处注入电流与功率和电压的关系如下:

$$\begin{cases} [\Delta I_{\mathrm{P}i}] = [\Delta P_i] / U_i \\ [\Delta I_{\mathrm{Q}i}] = [\Delta Q_i] / U_i \end{cases} \tag{17}$$

式中:$[\Delta P_i]$、$[\Delta Q_i]$ 为有功、无功功率波动在下一时刻的区间预测值;$[\Delta I_{\mathrm{P}i}]$、$[\Delta I_{\mathrm{Q}i}]$ 为有功、无功电流波动在下一时刻的区间预测值。需要指出的是,严格来说应该采用潮流方程,但由于功率与电压之间的非线性关系将导致无法解析求解。这里将下一时刻功率预测值除当前时刻电压实际值获得电流预测值相当于近似的滚动预测,由于前后两个点电压相差不大,所以引入的误差也不大。

2.2 电压波动区间滚动解析方法

将下一时刻源荷功率的区间预测值作为已知输入量,通过代入方程计算获得输出变量即电压的波动区间,以此定量分析下一时刻的电压波动情况。如此逐步往前推进,便可实现电压波动区间的滚动分析。由于式(16)中的系统雅可比矩阵 $\boldsymbol{B}$ 为常系数矩阵且一般并非满秩,可求取其广义逆矩阵,将式(16)转化为如下形式:

$$\begin{bmatrix} [\Delta \boldsymbol{U}] \\ [\Delta \boldsymbol{\theta}] \end{bmatrix} = \boldsymbol{B}_{\mathrm{MP}}^{-1} \begin{bmatrix} [\Delta \boldsymbol{I}_{\mathrm{Q}}] \\ [\Delta \boldsymbol{I}_{\mathrm{P}}] \end{bmatrix} \tag{18}$$

式中:$\boldsymbol{B}_{\mathrm{MP}}^{-1}$ 为矩阵 $\boldsymbol{B}$ 的 Moore-Penrose 广义逆矩阵。

进一步按式(3)将区间扰动量分解为区间中点和半径区间的加和形式:

$$\begin{cases} [\Delta \boldsymbol{I}_{\mathrm{Q}}] = \Delta \boldsymbol{I}_{\mathrm{Qm}} + [-\Delta \boldsymbol{I}_{\mathrm{Qr}}, \Delta \boldsymbol{I}_{\mathrm{Qr}}] \\ [\Delta \boldsymbol{I}_{\mathrm{P}}] = \Delta \boldsymbol{I}_{\mathrm{Pm}} + [-\Delta \boldsymbol{I}_{\mathrm{Pr}}, \Delta \boldsymbol{I}_{\mathrm{Pr}}] \end{cases} \tag{19}$$

式中:$\Delta \boldsymbol{I}_{\mathrm{Qm}}$、$\Delta \boldsymbol{I}_{\mathrm{Pm}}$ 分别为区间向量 $[\Delta \boldsymbol{I}_{\mathrm{Q}}]$ 和 $[\Delta \boldsymbol{I}_{\mathrm{P}}]$ 的区间中点;$\Delta \boldsymbol{I}_{\mathrm{Qr}}$、$\Delta \boldsymbol{I}_{\mathrm{Pr}}$ 为对应的区间半径。

按式(4)和(5)分别求解电压和相角的区间中点及半径:

$$\begin{bmatrix}\Delta \boldsymbol{U}_{\mathrm{m}}\\ \Delta \boldsymbol{\theta}_{\mathrm{m}}\end{bmatrix}=\boldsymbol{B}_{MP}^{-1}\begin{bmatrix}\Delta \boldsymbol{I}_{\mathrm{Qm}}\\ \Delta \boldsymbol{I}_{\mathrm{Pm}}\end{bmatrix}\qquad \begin{bmatrix}\Delta \boldsymbol{U}_{\mathrm{r}}\\ \Delta \boldsymbol{\theta}_{\mathrm{r}}\end{bmatrix}=\overline{\boldsymbol{B}}_{\mathrm{MP}}^{-1}\begin{bmatrix}\Delta \boldsymbol{I}_{\mathrm{Qr}}\\ \Delta \boldsymbol{I}_{\mathrm{Pr}}\end{bmatrix} \tag{20}$$

将式(20)中得到的区间结果叠加,即可得到电压波动区间上下界的解析解:

$$\begin{bmatrix}\Delta \underline{U}\\ \Delta \underline{\boldsymbol{\theta}}\end{bmatrix}=\boldsymbol{B}_{\mathrm{MP}}^{-1}\begin{bmatrix}\Delta \boldsymbol{I}_{\mathrm{Qm}}\\ \Delta \boldsymbol{I}_{\mathrm{Pm}}\end{bmatrix}-\overline{\boldsymbol{B}}_{\mathrm{MP}}^{-1}\begin{bmatrix}\Delta \boldsymbol{I}_{\mathrm{Qr}}\\ \Delta \boldsymbol{I}_{\mathrm{Pr}}\end{bmatrix} \tag{21}$$

$$\begin{bmatrix}\Delta \overline{U}\\ \Delta \overline{\boldsymbol{\theta}}\end{bmatrix}=\boldsymbol{B}_{\mathrm{MP}}^{-1}\begin{bmatrix}\Delta \boldsymbol{I}_{\mathrm{Qm}}\\ \Delta \boldsymbol{I}_{\mathrm{Pm}}\end{bmatrix}+\overline{\boldsymbol{B}}_{\mathrm{MP}}^{-1}\begin{bmatrix}\Delta \boldsymbol{I}_{\mathrm{Qr}}\\ \Delta \boldsymbol{I}_{\mathrm{Pr}}\end{bmatrix} \tag{22}$$

综上,电压波动区间滚动解析分析的具体步骤如下:①基于给定的系统参数,进行稳态潮流计算,确定当前时刻电压实际值;②以该稳态运行点为基准点,构建如式(10)(11)所示的系统线性化模型,并求解式(16)中的雅可比矩阵 $\boldsymbol{B}$;③根据下一时刻功率扰动区间预测值$[\Delta P_i]$、$[\Delta Q_i]$,并除以当前时刻电压实际值 U_i,获得电流扰动区间预测值$[\Delta I_{\mathrm{P}i}]$、$[\Delta I_{\mathrm{Q}i}]$;④基于式(21)与(22),求解电压的波动区间$[\Delta \boldsymbol{U}]$。

3　不确定性扰动下电压波动越限抑制

基于解析分析方法可以获得电压区间,如果越限则发出预警,并提前做好控制预案进行抑制,从而将电压维持在允许范围内。由于各节点相互耦合,若某些节点电压越限,也可能是受到了其他节点的影响。因此,需要识别关键节点并评估其功率调控对抑制电压越限的效果。在分析该问题时,应当根据实际需求设定指标,找到最合适的区间解向量,使其在满足区间线性方程组的同时达到指标最优。具体而言,应当将有功和无功功率波动量优化为新的区间变量,以在满足所提最优条件的同时实现电压的波动抑制,将系统所有节点的电压调节至允许范围内。基于该思路,将区间不确定性电压的波动抑制问题转化为一个区间优化问题:

$$\begin{cases}\min\ J(\boldsymbol{x},\boldsymbol{u},[\xi])\\ \text{s. t.}\begin{cases}g(\boldsymbol{x},\boldsymbol{u},[\xi])=0\\ h(\boldsymbol{x},\boldsymbol{u},[\xi])\leqslant \boldsymbol{h}_{\max}\end{cases}\end{cases} \tag{23}$$

式中:$\boldsymbol{x}$ 为前述电压波动向量;$\boldsymbol{u}$ 为系统调节向量,比如储能、需求响应等;$[\xi]$为不确定性扰动量;$J(\cdot)$为待优化的目标函数,常取经济指标、耗能总和等;g 为该模型需要满足的等式约束,包括系统的稳态潮流、功率平衡关系等;h 为不等式约束,常包含输入输出功率的边界约束等;$\boldsymbol{h}_{\max}$ 为不等式约束对应的允许上限向量。

对于计及区间不确定性波动的电力系统优化问题,将功率区间向量$[\Delta \boldsymbol{P}]$和$[\Delta \boldsymbol{Q}]$作为调节向量,目标函数 J 为总的功率控制代价,即

$$J=\sum_{i\in C_1}\beta_{\mathrm{Q}i}\left(\left|\Delta \underline{Q}_{i\mathrm{a}}-\Delta \underline{Q}_{i\mathrm{b}}\right|+\left|\Delta \overline{Q}_{i\mathrm{a}}-\Delta \overline{Q}_{i\mathrm{b}}\right|\right)+\sum_{i\in C_2}\beta_{\mathrm{P}i}\left(\left|\Delta \underline{P}_{i\mathrm{a}}-\Delta \underline{P}_{i\mathrm{b}}\right|+\left|\Delta \overline{P}_{i\mathrm{a}}-\Delta \overline{P}_{i\mathrm{b}}\right|\right) \tag{24}$$

式中:$\Delta \overline{P}_{i\mathrm{b}}$、$\Delta \underline{P}_{i\mathrm{b}}$ 和 $\Delta \overline{P}_{i\mathrm{a}}$、$\Delta \underline{P}_{i\mathrm{a}}$ 分别为波动抑制前、后节点 i 的负荷有功调节量上、下界;$\Delta \overline{Q}_{i\mathrm{b}}$、$\Delta \underline{Q}_{i\mathrm{b}}$ 和 $\Delta \overline{Q}_{i\mathrm{a}}$、$\Delta \underline{Q}_{i\mathrm{a}}$ 分别为波动抑制前、后节点 i 的负荷无功调节量上、下界;$\beta_{\mathrm{Q}i}$、$\beta_{\mathrm{P}i}$ 为调节单价;C_1 为 PQ 节点集合;C_2 为 PQ 及 PV 节点组成的集合。需要说明的是,实际中不同类型调节措施、不同负荷节点的调节代价、不同机组的启停成本等存在明显差异。这里作为起步性研究而且是为了说明求解方法有效性,所做的近似假设包括:调节类型只考虑可调负荷节点、各负荷节点的调节成本相同(即 $\beta_{\mathrm{Q}i}$、$\beta_{\mathrm{P}i}$ 均取 1)。上述近似假设尚显粗糙,后续研究将对此进一步细化,考虑不同类型调节措施、不同负荷节点等因素在调节代价上的差异。

优化问题式(23)中等式约束 g 为考虑当前状态系统的稳态潮流以及前文所述基于稳态平衡点、计及区间不确定性的电流注入关系;而不等式约束 h 为电压波动允许区间,根据 GB/T 12325—2008《电能质量　供电电压偏差》规定,35 kV 及以上供电电压正、负偏差绝对值之和不超过标称电压的 10%,本文设定各节点电压允许的波动区间为[0.95p. u. ,1.05p. u.]。结合式(21)(22)的区间算法,可将准稳态电压幅值的不等式约束表达如下:

$$0.95\leqslant U_i+[\Delta U_i]\leqslant 1.05\qquad (i\in C_1) \tag{25}$$

除设定的电压波动区间限制外,为保证抑制前后节点输出或输入功率在实际调度中合理可行、负荷调度量充足,还应根据实际情况,使各节点优化前后负荷有功、无功功率保持在允许范围内。该约束可表达如下:

$$\begin{cases} \underline{Q}_i \leqslant Q_i + [\Delta Q_{ib}] \leqslant \overline{Q}_i \\ \underline{Q}_i \leqslant Q_i + [\Delta Q_{ia}] \leqslant \overline{Q}_i \end{cases} \quad (i \in C_1) \tag{26}$$

$$\begin{cases} \underline{P}_i \leqslant P_i + [\Delta P_{ib}] \leqslant \overline{P}_i \\ \underline{P}_i \leqslant P_i + [\Delta P_{ia}] \leqslant \overline{P}_i \end{cases} \quad (i \in C_2) \tag{27}$$

式中:$\underline{P}_i$、$\overline{P}_i$ 分别为各节点负荷有功功率的允许下限和上限;$\underline{Q}_i$、$\overline{Q}_i$ 分别为各节点负荷无功功率的允许下限和上限。

综合上述目标函数和节点电压、功率区间等约束,即可对系统准稳态电压进行波动抑制。为求解该区间控制优化问题并评估节点功率对电压的影响,还应考虑各种不同的功率调节方式,适当选择决策变量,分别对各个节点的负荷功率变化情况进行分析。

4 算例验证

4.1 电压波动区间分析验证

算例系统采用 IEEE-39 节点标准测试系统,系统的拓扑结构如图 1 所示,具体数据见文献[29]。扰动设置为:电源和负荷节点的有功与无功功率发生扰动,其区间范围假设为稳态值的正负 20%,均为标幺值。

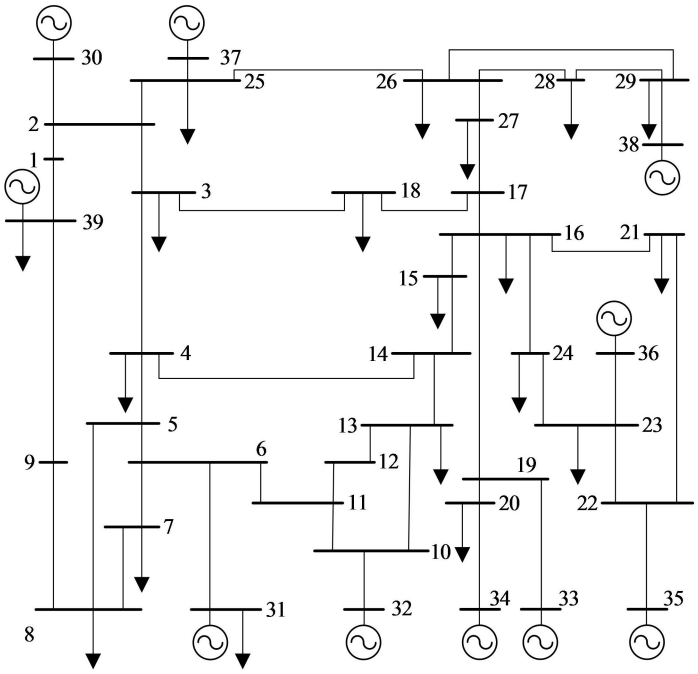


图 1 IEEE-39 节点系统

Fig. 1 IEEE 39-bus system

鉴于蒙特卡罗方法在不确定性分析中具有通用性和基础性,本文首先采用蒙特卡罗方法进行仿真,设置仿真次数为 50 000 次,并将所得结果作为检验本文方法的参考基准。考虑到区间分析方法不涉及功率扰动的具体分布函数及其参数,为简便起见,假设功率扰动在其区间内服从均匀分布。随后,采用本文第 2 节所述解析方法计算电压波动范围,两种方法的对比结果如表 1 所示。本文区间算法求得的电压区间完全涵盖了蒙特卡罗法的仿真结果,且区间冗余度较小,验证了该方法的有效性。本文区间算法所得电压波动区间比蒙特卡罗法稍大,但整体结果非常接近,电压波动上下限的误差在 1%左右,最大不超过 2%。在设置相同情况下,本文区间算法仿真结果与文献[24]区间分析方法相比,电压波动误差更小。值得指出的是,蒙特卡罗方法需进行大量次数的随机采样,计算负担沉重。相比之下,本文区间算法仅涉及基本的矩阵运算,计算效率极高,更适用于在线分析与快速评估。对于更大规模的电网,本文区间算法在计算效率上的优势将更为突出。

表 1　本文区间算法与蒙特卡罗法计算结果对比

Table 1　Comparison of calculation results between proposed interval algorithm and Monte Carlo method

节点编号	U_i	U_i 上限			U_i 下限		
		蒙特卡罗方法	本文区间算法	误差/%	蒙特卡罗方法	本文区间算法	误差/%
1	1.0394	1.0444	1.0479	0.3351	1.0345	1.0309	0.3480
2	1.0485	1.0558	1.0633	0.7104	1.0414	1.0337	0.7394
3	1.0307	1.0420	1.0533	1.0845	1.0195	1.0081	1.1182
4	1.0045	1.0241	1.0390	1.4549	0.9859	0.9700	1.6127
5	1.0060	1.0281	1.0437	1.5174	0.9842	0.9683	1.6155
6	1.0082	1.0303	1.0460	1.5238	0.9863	0.9704	1.6121
7	0.9984	1.0221	1.0376	1.5165	0.9748	0.9592	1.6003
8	0.9979	1.0212	1.0363	1.4787	0.9743	0.9595	1.5190
9	1.0383	1.0499	1.0566	0.6382	1.0268	1.0200	0.6623
10	1.0178	1.0360	1.0500	1.3514	0.9996	0.9856	1.4006
11	1.0134	1.0333	1.0483	1.4517	0.9935	0.9785	1.5098
12	1.0008	1.0217	1.0405	1.8401	0.9777	0.9611	1.6979
13	1.0149	1.0334	1.0484	1.4515	0.9964	0.9814	1.5054
14	1.0123	1.0301	1.0453	1.4756	0.9952	0.9793	1.5977
15	1.0162	1.0323	1.0461	1.3368	0.9992	0.9863	1.2910
16	1.0325	1.0475	1.0604	1.2315	1.0177	1.0046	1.2872
17	1.0342	1.0483	1.0586	0.9825	1.0216	1.0098	1.1551
18	1.0316	1.0447	1.0551	0.9955	1.0195	1.0081	1.1182
19	1.0501	1.0582	1.0651	0.6521	1.0421	1.0351	0.6717
20	0.9910	0.9975	1.0023	0.4812	0.9843	0.9797	0.4673
21	1.0323	1.0475	1.0598	1.1742	1.0170	1.0048	1.1996
22	1.0501	1.0601	1.0691	0.8490	1.0397	1.0311	0.8272
23	1.0451	1.0564	1.0660	0.9087	1.0335	1.0242	0.8999
24	1.0380	1.0540	1.0669	1.2239	1.0221	1.0091	1.2719
25	1.0577	1.0825	1.0988	1.5058	1.0326	1.0166	1.5495
26	1.0526	1.0716	1.0881	1.5398	1.0333	1.0171	1.5678
27	1.0383	1.0542	1.0684	1.3470	1.0219	1.0082	1.3406
28	1.0504	1.0679	1.0803	1.1612	1.0332	1.0205	1.2292
29	1.0501	1.0638	1.0729	0.8554	1.0365	1.0273	0.8876

4.2　电压波动越限抑制验证

基于 IEEE-39 节点系统对不同目标函数及波动抑制约束下的系统区间优化算例进行分析。相关优化问题选用 Matlab 中的 yalmip 函数库及 Cplex 求解器进行求解。需要说明的是,由于 matpower 中 39 节点系统的潮流结果中已经有部分节点(节点 2、9 等)的电压幅值大于 1.05 p. u. ,故本节波动抑制相关仿真均考虑系统节点电压波动越上限的情况。仿真分析得到的波动抑制规律和特性在节点电压越下限或越上、下限均存在的情况下也适用。后续仿真分析都分为抑制前后节点的电压波动对比和节点有功、无功功率波动变化 2 个部分。本节通过 PQ 调节无限制、PQ 调节有限制两个场景进行分析。

4.2.1　PQ 调节无限制

选取目标函数式(24)、约束式(25),各节点负荷有功和无功功率均参与调节而且无限制。波动抑制前后区间不确定性扰动下电力系统各节点准稳态电压幅值的对比如图 2 所示,可见控制前节点 2、3、9、16~19、21~29 的电压已经越限,在引入本文所提波动抑制策略后,系统中各节点的电压不再越限,均被限制在允许的波动范围[0.95p. u. ,1.05p. u.]内。

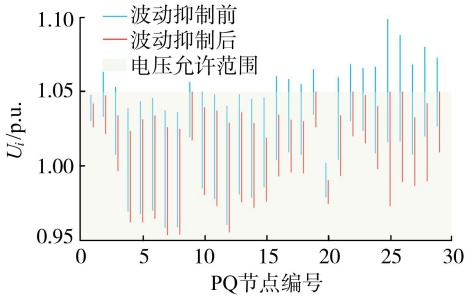


图 2　PQ 调节无限制场景下波动抑制前后各 PQ 节点电压波动区间对比

Fig. 2　Comparison of voltage fluctuation intervals of PQ buses before and after fluctuation mitigation without PQ adjustment limits

由图 3 可知,当有功与无功功率共同参与平抑不确定性功率波动引起的系统电压越限时,倾向于优先调节负荷无功功率,其中节点 23、25 和 28 等的调节幅度较大。这是因为输电系统中线路电阻 R 远小于电抗 X,越限节点电压与其邻近节点的无功功率密切相关,通过增加负荷无功功率可降低电压,从而有效抑制

电压越上限波动。而调节有功功率会影响负荷节点的用户用电,但当无功调节能力不足或无功资源受限时,则需引入有功功率参与协同调节。需要指出的是,在实际工程中,多数节点的功率并不能无限制地增加或减少,因此还需适当考虑波动抑制前后各节点负荷功率的大小及比例关系,以确保抑制策略切实可行。

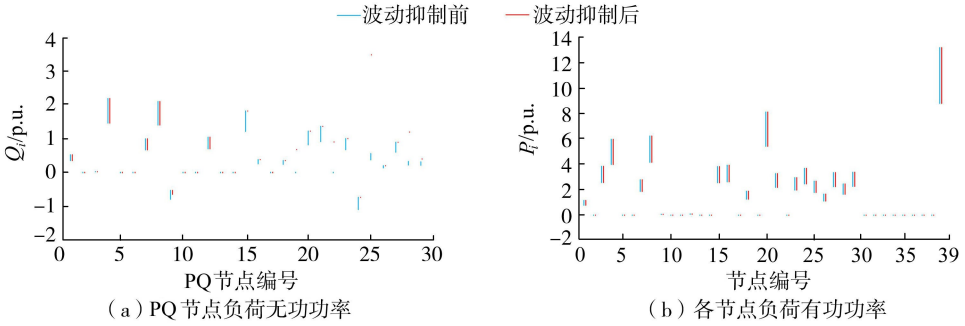


图3 PQ调节无限制场景下波动抑制前后节点功率区间对比

Fig. 3 Comparison of power intervals of buses before and after fluctuation mitigation without PQ adjustment limits

4.2.2 PQ调节有限制

选取目标函数式(24)、约束式(25)~(27),各节点负荷有功和无功功率均参与调节,但限制在[0.7P_i, 1.3P_i]和[0.7Q_i, 1.3Q_i]范围内。由图4可知,原先受功率不确定性波动影响而越限的节点电压得到了有效抑制,均被限制在了允许范围内。由图5可知,与PQ调节无限制场景不同,在限定各节点功率区间范围后,优化结果中不再出现负荷功率激增或骤减的节点。然而,受无功储备限制或不足的影响,在PQ调节受限场景下,各节点有功功率开始参与波动抑制。由于39节点算例中各节点的有功储备量明显大于无功储备,有功功率的调节幅度逐渐增大。在负荷有功参与准稳态电压波动抑制的过程中,最优抑制策略并不会直接选择有功可调范围最大的发电机节点39,而是将有功调节电压的任务分配给各节点共同承担,发电机节点与普通节点在功能上并无明显区别。总体而言,无论是负荷有功还是无功功率,在抑制准稳态电压波动时,其原先的波动区间值均被调节为点值,且基本较抑制前略有增加,以应对系统电压越限。值得一提的是,虽然上述各仿真给出的抑制策略均涉及负荷功率区间,但其数值可正可负,不仅包含负荷侧变化,也可表征新能源发电出力等源侧不确定性波动特性。

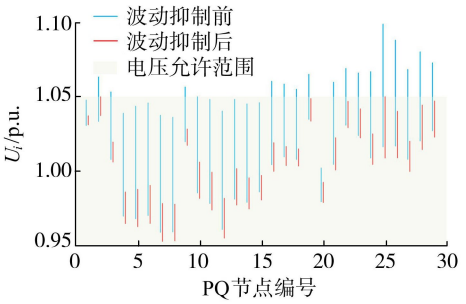


图4 PQ调节有限制场景下波动抑制前后PQ节点电压波动区间对比

Fig. 4 Comparison of voltage fluctuation intervals of PQ buses before and after fluctuation mitigation with PQ adjustment limits

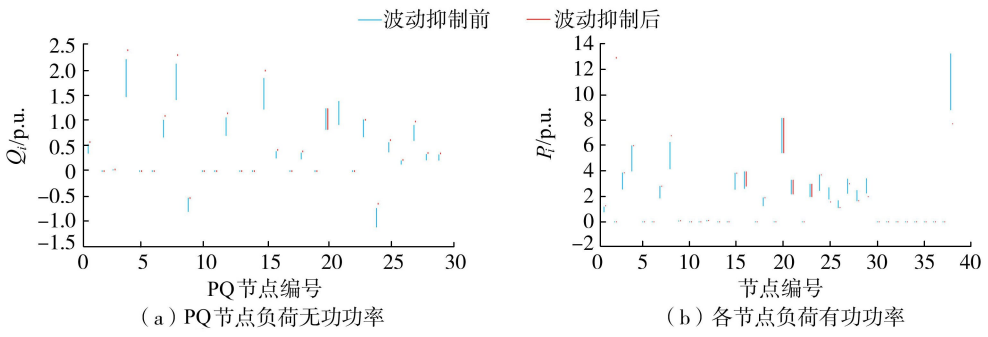


图5 PQ调节有限制场景下波动抑制前后各节点功率区间对比

Fig. 5 Comparison of power intervals of buses before and after fluctuation mitigation with PQ adjustment limits

5 结 语

针对新能源发电和新型负荷等功率不确定性扰动引发的节点电压波动问题,通过滚动方式将功率扰动

近似转化为电流注入,提出了节点电压波动区间的解析量化方法,并进一步提出了电压波动越限时的抑制策略。基于 IEEE-39 节点系统算例,验证了所提电压波动区间解析方法和越限抑制策略的有效性。结果表明,由于输电系统中越限节点电压与邻近节点无功功率之间的灵敏度较高,调节负荷无功功率抑制电压波动的效果显著;但当无功调节能力不足或难以满足需求时,各节点的有功功率也需协同参与调压。本文研究基于部分理想化假设,鉴于实际电网功率波动特性、各类设备及网络结构的复杂性,未来研究需采用实际功率扰动数据,并在更大规模的实际电网系统中进一步验证所提方法的工程适用性与有效性。

参考文献:

[1] 黄显峰,谢洋,冉超越,等. 考虑多重不确定性的水光互补中长期优化调度研究[J/OL]. 河海大学学报(自然科学版),2026-05-25. https://link.cnki.net/urlid/32.1117.tv.20260525.1247.006. (Huang Xianfeng, XieYang, RanChaoyue, et al. Research on medium-and long-term optimal scheduling of hydro-PV complementary systems considering multiple uncertainties[J/OL]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2026-05-25. https://link.cnki.net/urlid/32.1117.tv.20260525.1247.006. (in Chinese))

[2] 孙铱萌,秦川,唐颖 等. 基于特性指标聚类的海洋能发电场景简约与容量优化配置[J]. 河海大学学报(自然科学版),2026,54(4):21-29. (Sun Yimeng, Qin Chuan, Tang Ying, et al. Simplification of ocean energy power generation scenarios and optimal capacity allocation based on characteristic index clustering[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2026, 54(4):21-29. (in Chinese))

[3] 李夫刚,李夫海,琚承乾,等. 新能源不确定性表征方法及关键技术问题研究现状、挑战及展望[J]. 电力系统保护与控制,2025,53(15):172-187. (Li Fugang, Li Fuhai, Ju Chengqian, et al. Methods for characterizing renewable energy uncertainty and key technical issues: research status, challenges, and prospects[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(15): 172-187. (in Chinese))

[4] 黄冬梅,吴冰,时帅,等. 基于 CEEMDAN-SAOA 的平抑风电波动混合储能系统定容优化配置[J]. 电力系统保护与控制,2025,53(15):59-70. (Huang Dongmei, Wu Bing, Shi Shuai, et al. Capacity optimization of a hybrid energy storage system for wind power fluctuation suppression based on CEEMDAN-SAOA[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(15): 59-70. (in Chinese))

[5] 郭敬梅,盛超,余超耘,等. 一种用于非平衡分布式微网的双重灵活模型预测功率控制方法[J]. 电力系统保护与控制,2024,52(23):107-118. (Guo Jingmei, Sheng Chao, Yu Chaoyun, et al. A dual flexible model predictive power control method for unbalanced distributed microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(23): 107-118. (in Chinese))

[6] Mokred S, Wang Yifei, Chen Tiancong. A novel collapse prediction index for voltage stability analysis and contingency ranking in power systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(1): 112-138.

[7] 于佰建,陈卓尔,宋长城,等. 基于改进萤火虫算法的含多种新能源地区电网的无功电压优化[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(5):93-100. (Yu Baijian, Chen Zhuoer, Song Changcheng, et al. Reactive power and voltage optimization based on improved firefly algorithm in regional power grids with a variety of new energies[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(5): 93-100. (in Chinese))

[8] 郭金鹏,邹荦,潘学萍,等. 计及新能源电力系统多运行场景和多优化目标的无功补偿装置选址定容研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2026,54(4):116-124. (Guo Jinpeng, Zou Luo, Pan Xueping, et al. Research on siting and sizing of reactive power compensation devices considering multiple operating scenarios and multiple optimization objectives in new energy power systems[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2026, 54(4): 116-124. (in Chinese))

[9] 曹武,杨铭,胡波,等. 基于构网变流器的新能源场站暂态电压分散协同控制策略[J]. 电力系统保护与控制,2025,53(14):1-12. (Cao Wu, Yang Ming, Hu Bo, et al. Transient voltage decentralized cooperative control strategy of renewable energy station based on the grid forming converter[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(14): 1-12. (in Chinese))

[10] 夏冰清,申丹枫,郑翔,等. 基于准稳态模型的中长期电压稳定轨迹多项式逼近方法[J]. 电力系统自动化,2020,44(8):116-123. (Xia Bingqing, Shen Danfeng, Zheng Xiang, et al. Quasi-steady-state model based polynomial approximation method of medium-and long-term voltage stability trajectory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(8): 116-123. (in Chinese))

[11] Rimorov D, Kamwa I, Joós G. Quasi-steady-state approach for analysis of frequency oscillations and damping controller design [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 31(4): 3212-3220.

[12] 周海强,鞠平,薛禹胜,等. 基于拟哈密顿理论的随机电力系统暂态稳定性分析[J]. 电力系统自动化,2016,40(19):9-14. (Zhou Haiqiang, Ju Ping, Xue Yusheng, et al. Transient stability analysis of stochastic power system based on Quasi-Hamiltonian

system theory[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(19):9-14. (in Chinese))

[13] Wan Can, Xu Zhao, Pierre P, et al. Optimal prediction intervals of wind power generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2013,29(3):1166-1174.

[14] Chang Xiaoheng, Wang Yiming. Peak-to-peak filtering for networked nonlinear DC motor systems with quantization[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics,2018,14(12):5378-5388.

[15] Shanmugam L, Joo Y H. Stability and stabilization for T-S fuzzy large-scale interconnected power system with wind farm via sampled-data control[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems,2020,51(4): 2134-2144.

[16] 冯斌,胡轶婕,黄刚,等. 基于深度强化学习的新型电力系统调度优化方法综述[J]. 电力系统自动化,2023,47(17):187-199. (Feng Bin, Hu Yijie, Huang Gang, et al. Review on optimization methods for new power system dispatch based on deep reinforcement learning[J]. Automation of Electric Power Systems,2023,47(17):187-199. (in Chinese))

[17] Nduka O S, Ahmadi A R. Data-driven robust extended computer-aided harmonic power flow analysis[J]. IET Generation, Transmission & Distribution,2020,14(20):4398-4409.

[18] Yang Jingxian, Zhang Shuai, Xiang Yue, et al. LSTM auto-encoder based representative scenario generation method for hybrid hydro-PV power system[J]. IET Generation, Transmission & Distribution,2020,14(24):5935-5943.

[19] Tang Hao, Wang Shiping, Chang Kejun, et al. Intra-day dynamic optimal dispatch for power system based on deep Q-learning[J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering,2021,16(7):954-964.

[20] Liu Yanli, Shi Xuejing, Xu Yan. A hybrid data-driven method for fast approximation of practical dynamic security region boundary of power systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2020,117:105658.

[21] Moore R E, Kearfott R B, Cloud M J. Introduction to interval analysis[M]. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics,2009.

[22] 廖小兵,刘开培,乐健,等. 电力系统区间潮流计算方法综述[J]. 中国电机工程学报,2019,39(2):447-458. (Liao Xiaobing, Liu Kaipei, Le Jian, et al. Review on interval power flow calculation methods in power system[J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(2):447-458. (in Chinese))

[23] Siahlooei E, Fazeli S A S. Two iterative methods for solving linear interval systems[J]. Applied Computational Intelligence and Soft Computing,2018,2018:2797038.

[24] 彭琰,余一平,鞠平,等. 计及不确定性的电力系统电压波动分析方法[J]. 电力自动化设备,2017,38(8):137-142. (Peng Yan, Yu Yiping, Ju Ping, et al. Voltage fluctuation analysis method considering uncertainties of power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,38(8):137-142. (in Chinese))

[25] Chen Yang, Zuo Kezheng, Fu Zhimei. New characterizations of the generalized Moore-Penrose inverse of matrices[J]. AIMS Mathematics,2022,7(3):4359-4375.

[26] Hiskens I A, Alseddiqui J. Sensitivity, approximation, and uncertainty in power system dynamic simulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2006,21(4):1808-1820.

[27] Zhang Junbo, Zheng Xiangtian, Wang Zejing, et al. Power system sensitivity identification-Inherent system properties and data quality[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2016,32(4):2756-2766.

[28] 彭琰. 功率随机波动下电压波动分析[D]. 南京:河海大学,2018.

[29] ICSEG. IEEE 39-Bus System[EB/OL]. [2025-12-03]. http://icseg.iti.illinois.edu/ieee-39-bus-system.

(收稿日期:2025-12-04 编辑:刘晓艳)