

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4期 2026年7月25日出版

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

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)

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

JOURNAL OF HOHAI UNIVERSITY

(NATURAL SCIENCES)

Bimonthly, Founded in 1957

Vol. 54 No. 4 Jul. 2026

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

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



9 771000 198264

定价: 30.00 元

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)

第五十四卷 第四期

二〇二六年七月

河海大学学报

(自然科学版)

JOURNAL OF HOHAI UNIVERSITY

(NATURAL SCIENCES)



第54卷 第4期

Vol. 54_ No. 4

2026

7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 魏长赞

“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与讨论、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）

- 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
- 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
- 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
- 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
- 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

- 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。
- 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。
- 投稿网址
<https://jour.hhu.edu.cn/hhdxxbzh/home>，投稿时请注明“三峡水运新通道工程关键技术专题”。
- 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 4 期

2026 年 7 月

目 次

· 深海科技关键技术专题 ·

- 南海西北部台风过程风、浪统计特征研究 张 琪, 李佳谦, 谢波涛, 梁丙臣, 邵珠晓 (1)
- Yan Meng 风场模型的参数敏感性分析 逯智科, 洪俊玲, 周丽丹, 徐万海, 李 飒 (10)
- 中国邻近海域 Stokes 漂流流速分布特性 王京富, 陶爱峰, 解淑亚, 秦淑芳, 殷 妍, 王 岗 (16)
- 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
..... 孙铭萌, 秦 川, 唐 颖, 赵紫璇, 姜安妮 (21)
- 在役海底管道挖沟下沉过程中载荷对管道应力的影响
..... 梁 凯, 王亚琼, 徐万海, 赵云鹤, 翟立宾, 李屹楠 (30)

· 复杂荷载下海洋工程环境与结构装备安全专题 ·

- 黏性沙床面桩柱间距对局部冲刷特性的影响 巩 明, 杜升涛, 王超琳, 武国相, 梁丙臣 (36)
- 吸力桩深水油气建井贯入过程垂直度控制研究
..... 张明贺, 杨 进, 李甲豪, 傅 超, 朱国惊, 王佳康 (45)
- 软黏土中三脚架桶形基础水平循环承载特性分析 汤鹏辉, 王坤鹏, 崔春义, 刘海龙 (52)

· 水文水资源 ·

- 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
..... 张媛媛, 姚 成, 王 容, 杨丰源, 龚璐夫, 白云鹏, 郑爱民, 杜昀宸 (61)
- 感潮河网水位智能预测方法 万 安, 林佳威, 袁赛瑜, 唐洪武 (69)
- 考虑物理约束的多要素洪水模拟 LSTM 模型 何 畅, 李致家, 牛颢然, 梁世强, 李京兵 (78)
- 多元型复合灾害系统适应性评估 黄 莉, 张祎喆, 万旭哲, 王 伟, 宋 月 (88)

· 水利水电工程 ·

- 考虑混蓄电站季调节特性的水风光蓄互补调度研究
..... 苏华英, 王珍妮, 张 俨, 王融融, 王榆捷, 邓佳莉, 谭乔凤 (96)
- 基于云物元分析的水光互补容量配置方案评价
..... 郭晓茜, 黄显峰, 吴 迪, 李 旭, 周 文, 方国华 (106)
- 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
..... 郭金鹏, 邹 苹, 潘学萍, 张海燕, 孙晓荣 (116)
- 基于模型降阶方法的大坝静态响应快速计算方法 程 井, 胡乔桦, 余 雷, 牛志伟 (125)
- 超深厚复杂多层地基中防渗墙最优深度研究 刘雨婷, 王照杰, 王睿齐, 罗玉龙 (132)
- 水沙调控作用下植被对黄河三角洲河口坝地形演变的影响 于子奇, 武国相, 王柯萌, 梁丙臣 (140)
- 基于物理信息与符号回归耦合约束的桥墩局部冲刷深度预测模型
..... 耿兴乐, 陈 红, 王金权, 肖 龙, 夏晓亮, 魏荣灏, 张汇明 (151)

· 土木工程 ·

- 真空影响下铁尾矿-土工织物滤层渗透特性试验研究
..... 吴海民, 汪万升, 杨 龙, 张祖刚, 欧张文 (161)
- 未胶结钙质砂强度-剪胀特性试验研究 王晓丽, 裴会敏, 王振豪 (168)

JOURNAL OF HOHAI UNIVERSITY

(NATURAL SCIENCES)

Vol. 54 No. 4

Jul. 2026

CONTENTS

Study on statistical characteristics of wind and waves during typhoon processes in the northwestern South China Sea	Zhang Qi, Li Jiaqian, Xie Botao, Liang Bingchen, Shao Zhuxiao(1)
Parameter sensitivity analysis of Yan Meng wind field model	Lu Zhike, Hong Junling, Zhou Lidan, Xu Wanhai, Li Sa(10)
Distribution characteristics of Stokes drift velocity in adjacent seas of China	Wang Jingfu, Tao Aifeng, Xie Shuya, Qin Shufang, Yin Yan, Wang Gang(16)
Simplification of ocean energy power generation scenarios and optimal capacity allocation based on characteristic index clustering	Sun Yimeng, Qin Chuan, Tang Ying, Zhao Zixuan, Jiang Anni(21)
The influence of loads on pipeline stress during trenching and lowering of in-service subsea pipelines	Liang Kai, Wang Yaqiong, Xu Wanhai, Zhao Yunhe, Zhai Libin, Li Qinan(30)
Influence of pile spacing on local scour characteristics in cohesive sediment beds	Gong Ming, Du Shengtao, Wang Chaolin, Wu Guoxiang, Liang Bingchen(36)
Research on verticality control during suction pile penetration for deepwater oil and gas well construction	Zhang Minghe, Yang Jin, Li Jiahao, Fu Chao, Zhu Guojing, Wang Jiakang(45)
Analysis of horizontal cyclic bearing characteristics of tripod bucket foundations in soft clay	Tang Penghui, Wang Kunpeng, Cui Chunyi, Liu Hailong(52)
Retrospective simulation of “23 · 7” flood event in Qingshui River basin based on surface-subsurface dual retention grid model	Zhang Yuanyuan, Yao Cheng, Wang Rong, Yang Fengyuan, Gong Junfu, Bai Yunpeng, Zheng Aimin, Du Yunchen(61)
Intelligent prediction method for water level in tidal river networks	Wan An, Lin Jiawei, Yuan Saiyu, Tang Hongwu(69)
An LSTM model considering physical constraints for multi-factor flood simulation	He Chang, Li Zhijia, Niu Haoran, Liang Shiqiang, Li Jingbing(78)
Adaptive evaluation of multivariate compound disaster systems	Huang Li, Zhang Yizhe, Wan Xuzhe, Wang Wei, Song Yue(88)
Study on scheduling of hydro-wind-photovoltaic-storage complementary system considering seasonal regulation characteristics of hybrid pumped storage power stations	Su Huaying, Wang Zhenni, Zhang Yan, Wang Rongrong, Wang Yujian, Deng Jiali, Tan Qiaofeng(96)
Evaluation of hydro-photovoltaic complementary capacity allocation schemes based on cloud matter-element analysis	Guo Xiaoxi, Huang Xianfeng, Wu Di, Li Xu, Zhou Wen, Fang Guohua(106)
Research on siting and sizing of reactive power compensation devices considering multiple operating scenarios and multiple optimization objectives in new energy power systems	Guo Jinpeng, Zou Luo, Pan Xueping, Zhang Haiyan, Sun Xiaorong(116)
Rapid calculation method for static response of dams based on model order reduction	Cheng Jing, Hu Qiaohua, Yu Lei, Niu Zhiwei(125)
Research on optimal depth of cutoff walls in ultra-deep complex multilayer foundations	Liu Yuting, Wang Zhaojie, Wang Ruiqi, Luo Yulong(132)
Effect of vegetation on topographic evolution of river mouth bars in the Yellow River Delta under water and sediment regulation	Yu Ziqi, Wu Guoxiang, Wang Kemeng, Liang Bingchen(140)
Prediction model for local scour depth around bridge piers based on coupled physics-informed and symbolic regression constraints	Geng Xingle, Chen Hong, Wang Jinquan, Xiao Long, Xia Xiaoliang, Wei Ronghao, Zhang Huiming(151)
Experimental study on permeability characteristics of iron tailings-geotextile filter under vacuum conditions	Wu Haimin, Wang Wansheng, Yang Long, Zhang Zugang, Ou Zhangwen(161)
Experimental study on strength and dilatancy characteristics of uncemented calcareous sand	Wang Xiaoli, Pei Huimin, Wang Zhenhao(168)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.04.001

南海西北部台风过程风、浪统计特征研究

张琪¹, 李佳谦², 谢波涛¹, 梁丙臣^{2,3}, 邵珠晓²

(1. 中海油研究总院有限责任公司; 2. 中国海洋大学工程学院; 3. 中国海洋大学海岸与海洋工程全国重点实验室)

摘要: 为探究台风过程中风、浪统计特征, 基于 40 年(1979—2018 年)波浪后报数据和再分析风速数据, 采用轨迹追踪和时间匹配方法提取了南海西北部海域 3 个研究点台风显著影响期间风速和有效波高数据, 分析了风速风向与有效波高波向的联合分布特征以及台风过程中风浪延迟特征, 并基于极值理论, 提取了每场台风过境期间的最大有效波高和最大风速样本, 基于三参数威布尔分布模型和 Copula 模型计算了 50、100、150、200 a 单变量重现期和联合重现期下的外推值。结果表明: 在研究区域北部台风驱动的超过 6.0 m 强浪均主要分布在 33.75°~123.75°扇区, 且研究区域风速和有效波高达到峰值的时间差主要集中在 0~20 h; 由于考虑了更广泛的风险范围, 联合重现期的外推值大于单变量重现期的外推值。

关键词: 南海西北部; 台风过程; 统计特征; 联合分布; 三参数威布尔分布; Copula 模型

Study on statistical characteristics of wind and waves during typhoon processes in the northwestern South China Sea

Zhang Qi¹, Li Jiaqian², Xie Botao¹, Liang Bingchen^{2,3}, Shao Zhuxiao²

(1. CNOOC Research Institute Co., Ltd.; 2. College of Engineering, Ocean University of China;
3. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Ocean University of China)

Abstract: To investigate the statistical characteristics of wind and waves during typhoon processes, based on 40-year (1979-2018) hindcast wave data and reanalysis wind speed data, the wind speed and significant wave height data during periods of significant typhoon influence at three study sites in the northwestern South China Sea were extracted using trajectory tracking and time matching methods. The joint distribution characteristics of wind speed and wind direction, as well as significant wave height and wave direction, were analyzed, and the delay characteristics of wind and waves during typhoon processes were examined. Furthermore, based on the extreme value theory, the maximum significant wave height and maximum wind speed samples during each typhoon process were extracted. Based on the three-parameter Weibull distribution model and Copula model, the extrapolated values for 50-year, 100-year, 150-year, and 200-year return periods under univariate and joint return periods were calculated. The results indicate that in the northern part of the study area, strong waves exceeding 6.0 m driven by typhoons are mainly distributed in the 33.75°-123.75° sector, and the time difference between the peak wind speed and peak significant wave height in the study area is mainly concentrated in 0-20 h. Because a broader risk range is considered, the extrapolated values of the joint return periods are greater than those of the univariate return periods.

Key words: the northwestern South China Sea; typhoon process; statistical characteristic; joint distribution; three-parameter Weibull distribution; Copula model

台风作为一种破坏力极强的气旋系统,其驱动的巨浪对海上航运、海上油气开发、渔业生产及近岸港口、防波堤等基础设施构成严重威胁^[1-2]。南海作为西北太平洋最大的边缘海之一,地处热带气旋活跃区,是太平洋台风向我国华南沿海及东南亚地区移动的主要通道和影响区域,台风活动异常频繁^[3-4]。根据中国海洋灾害公报统计数据,2018—2023 年平均每年有 3 个台风进入南海或对南海海域造成显著影响,年均造成的直接经济损失超过 6.76 亿元。频发的台风灾害不仅严重威胁南海沿岸人民的生命财产安全,也对区域海洋经济发展造成巨大冲击。因此,探究台风影响下南海海域的波浪特征对于海洋工程实践是至关重要的。

鉴于台风期间波浪观测数据稀缺,目前国内外学者广泛利用后报数据研究南海海域台风驱动的波浪特

基金项目: 国家自然科学基金项目(52301344,42406249);海岸与海洋工程全国重点实验室开放基金项目(SL2507)

作者简介: 张琪(1995—),女,工程师,硕士,主要从事油气平台环境条件参数研究。E-mail:zhangqi52@cnooc.com.cn

通信作者: 李佳谦(1997—),男,博士研究生,主要从事海岸防灾减灾研究。E-mail:jiaqianli1727@163.com

征。石洪源等^[5]基于嵌套气压场与 Veno Takeo-ECMWF 合成风场驱动 SWAN 模型,探究了台风“山神”期间南海西北部台风浪的空间分布特征。沈旭伟等^[6]采用 WW3 模型揭示了在台风“鲇鱼”期间,北部湾以风浪为主,而南海开阔海域涌浪占优,且涌浪方向随台风路径北移由东向转为东北向。林金波等^[7]采用 SWAN 波浪模型对台风“天鸽”和“山竹”进行了模拟,研究结果表明台风路径右前侧波高显著增大。陈彤彤等^[8]利用 SWAN 波浪模型揭示了 2014 年台风“海鸥”期间南海北部海域波浪的时空变化特征。杨志衡等^[9]利用 SWAN 波浪模型模拟了 1959—2021 年显著影响海南岛周边的台风过程,揭示了波高和波向的联合分布特征。李军政等^[10]利用 WW3 模式模拟了台风“纳沙”期间南海北部海域的波浪特征,结果揭示该海域波浪在台风影响下以混合浪为主。Shao 等^[11]利用 SWAN 波浪模型模拟了南海 40 年(1975—2014 年)台风过程,并进一步探究了南海不同重现期波高的空间分布特征。

尽管台风引发的强浪已得到广泛研究,但对其伴随的对海洋工程构成巨大威胁的强风研究仍较少。此外,台风过程中风、浪要素的相对关系尚未完全明晰,这可能导致海洋工程从业人员难以预判台风过程中的风浪演变规律,无法科学规划施工窗口期和制定作业安全预案,导致极端海况下工程作业的安全风险显著增大。近年来,我国深水油气开发也逐步走向远海,相关工程建设与运营安全面临越来越多的挑战。由于南海多数深水开发区域处于台风频发区,台风驱动的极端海洋环境要素(强风、巨浪)对油田的安全生产构成严峻挑战。因此,亟须深入分析历史真实台风过程中的风、浪统计特征,为海洋工程实践、运营提供有力支撑。

本文基于 40 年(1979—2018 年)波浪后报数据和再分析风速数据,系统分析了南海西北部海域台风显著影响期间风、浪的统计特征,提取了 40 年每场台风过境期间的最大有效波高和风速样本,并基于三参数威布尔分布模型和 Copula 模型计算了单变量重现期和联合重现期下有效波高和风速的外推值,研究结果可为南海西北部海域海岸及近海工程的结构设计、风险分析提供数据支撑。

1 研究方法

1.1 研究区域与数据来源

本文聚焦于南海西北部海域(17°N~22°N, 110°E~118°E),深入探究 1979—2018 年台风过程中风、浪参数的统计特征。选取 3 个研究点(A1、A2 和 A3)进行详细分析,研究区域和研究点位置如图 1 所示。



图 1 研究区域及 3 个研究点位置

Fig. 1 Study region and locations of three study sites

波浪数据(有效波高和平均波向)采用 Shao 等^[12]基于 SWAN 模型模拟的 40 年(1979—2018 年)波浪后报数据。相比于实测数据,后报数据能够提供更高时空分辨率的波浪信息,弥补观测数据在空间覆盖和时间连续性上的不足。SWAN 模型基于球坐标系,计算域范围为 3.5°S~50°N, 99°E~150°E,经纬度空间分辨率为 0.1°,计算时间步长为 30 min,输出时间步长为 1 h。Shao 等^[12]将模拟的波浪数据与浮标实测波浪数据进行了详细的对比,结果显示与实测数据吻合较好。风速数据来自欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的 ERA5 数据集,时间跨度为 1979—2018 年,时间分辨率为 1 h,经纬度空间分辨率均为 0.25°。研究期间台风轨迹信息,如时间、纬度、经度和中心最大风速,均来自中国气象局上海台风研究所,该研究所提供了西北太平洋地区最佳热带气旋轨迹数据,时间间隔为 6 h。

1.2 台风过程中风、浪数据提取

以研究区域的 3 个研究点为中心,300 km(台风显著影响范围)^[11]为半径划定 3 个台风检索范围。基于该检索范围与 40 年台风路径信息,分别检索 1979—2018 年进入 3 个台风检索范围的台风事件。根据 40 年的波浪和风速数据集,记录每场台风从进入到离开检索范围期间研究点位置的逐时波浪数据和风速数据,这些数据作为每个研究点台风过程的待分析数据用于探究台风期间风、浪统计特征。图 2 为研究点位置台风过程风、浪数据提取的示意图。

1.3 分布模型

1.3.1 边缘分布模型

三参数威布尔分布具有较强的灵活性,其通过形状参数、尺度参数和位置参数的协同作用,能够灵活调

控概率分布的基本形态、离散程度和位置偏移,从而实现对不同偏度和峰度特征数据的拟合。这一特性使其在海洋工程和气象学等领域得到广泛应用^[13-14],尤其适用于描述波高、风速等具有明显非对称分布特征的海环境参数的概率分布特性^[15-16]。因此,本文采用三参数威布尔模型构建有效波高和风速样本的边缘分布,其累积分布函数表达式为:

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x - \gamma}{\eta}\right)^{\beta}\right] \quad (x \geq \gamma) \tag{1}$$

式中: x 为随机变量的取值; β 为形状参数; η 为尺度参数; γ 为位置参数。本文采用极大似然法估计三参数威布尔分布的参数,并采用 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 检验和均方根误差 (RMSE) 统计量定量评估拟合效果。

1.3.2 联合分布模型

Copula 模型被广泛用于描述海洋环境参数的联合分布^[17],其主要优势在于,每个海洋变量的分布模型选择具有灵活性^[18-19]。根据 Sklar 定理,存在一个 Copula 模型函数 $C(\cdot, \cdot)$,可以连接随机变量 X 和 Y 的边缘分布,其二元分布形式表示为:

$$F_{XY}(x, y) = C(F_X(x), F_Y(y)) \tag{2}$$

式中: $F_{XY}(x, y)$ 为联合累积分布函数; $F_X(x)$ 、 $F_Y(y)$ 为随机变量的边缘累积分布函数; x, y 分别为随机变量 X, Y 的取值。

本文选择常用的 Gaussian-Copula、 t -Copula、Clayton Copula、Frank Copula 和 Gumbel Copula 5 种二元 Copula 模型作为风速和有效波高联合分布的候选模型,采用极大似然法来估计这些 Copula 模型的参数、采用 Cramér-von Mises 统计量 (S_n)^[20] 来评估模型的拟合性能并确定最优的 Copula 模型。统计量 S_n 可以衡量二元经验 Copula 模型与理论 Copula 模型之间的偏差,其定义如下:

$$S_n = \sum_{i=1}^n |\hat{C}_E[(u_1)_i, (u_2)_i] - C[(u_1)_i, (u_2)_i]|^2 \tag{3}$$

其中 $(u_1)_i = F_X(x_i)$ $(u_2)_i = F_Y(y_i)$

式中: n 为样本数量; $C(\cdot, \cdot)$ 为所选择的 Copula 模型函数; $\hat{C}_E(\cdot, \cdot)$ 为经验 Copula 模型函数,其表达式如下:

$$\hat{C}_E(u_1, u_2) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I((u_1)_i \leq u_1, (u_2)_i \leq u_2) \tag{4}$$

式中: I 为指示函数。若 $(u_1)_i \leq u_1$ 且 $(u_2)_i \leq u_2$,则 $I((u_1)_i \leq u_1, (u_2)_i \leq u_2) = 1$ 。

1.4 重现期和外推值

对于单变量分析,当给定重现期 T 时,海洋变量 X 的外推值 R_T 可通过下式求得^[21]:

$$R_T = F_X^{-1}\left(1 - \frac{N}{T}\right) \tag{5}$$

式中: N 为两次连续极端事件之间的平均间隔; $F_X^{-1}(\cdot)$ 为海洋变量 X 的边缘累积分布函数的逆函数。

对于双变量分析,联合重现期 (T_{or}) 通常被用作海洋工程设计的标准^[22]。设 X 和 Y 分别表示台风过境期间最大有效波高和最大风速, x 和 y 分别表示二者的给定阈值,当 $X \geq x$ 或 $Y \geq y$ 中至少有一个条件成立时,即认为发生联合超越事件。基于 OR 联合超越准则,联合重现期可定义为:

$$T_{or} = \frac{N}{P(X \geq x \cup Y \geq y)} = \frac{N}{1 - F_{XY}(x, y)} \tag{6}$$

式中: $P(X \geq x \cup Y \geq y)$ 为联合超越概率。值得注意的是,所有具有相同联合超越概率水平的海洋变量组合将具有相同的联合重现期。因此对于给定重现期 T_0 ,海洋变量组合 (X_i, Y_i) 将是无穷无尽的。Li 等^[23] 建议将上述组合中联合概率密度最高的事件 (X_0, Y_0) 作为该给定重现期的联合外推值:

$$(X_0, Y_0) = \operatorname{argmax}_{(X_i, Y_i)} f_{xy}(X_i, Y_i) \quad ((X_i, Y_i) \in D) \tag{7}$$

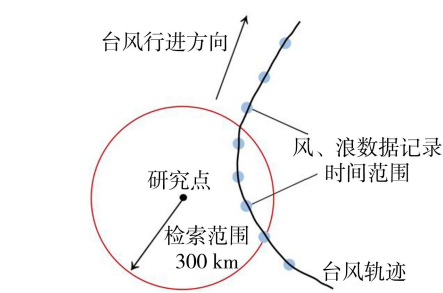


图 2 台风过程风、浪数据提取示意图
Fig. 2 Schematic diagram of wind and wave data extraction during typhoon process

式中; f_{xy} 为海洋变量的联合概率密度函数; D 为满足联合重现期 T_0 条件的所有海洋变量组合。

2 台风过程风、浪分布特征分析

探究台风过程中风、浪统计特征对于提升海洋工程的抗灾韧性、保障海上设施的安全运行以及优化海洋资源开发具有重要的指导意义。基于 40 年数据,通过轨迹追踪和时间匹配方法,在研究点 A1、A2、A3 分别记录到 188 次、173 次和 215 次台风事件。基于这些台风事件,本文分析了台风过境期间风速风向与有效波高波向的联合分布特征,研究结果可为海洋工程设计提供精准的环境载荷参数,优化工程结构的抗风浪能力。进一步,分析了台风过程中风浪延迟特征,可帮助海洋工程从业者准确预测风浪变化,合理安排施工和作业时间,降低极端海况下的安全风险。

2.1 风速风向联合分布特征

基于提取的 40 年台风过程的风速数据,以 4 m/s 为风速分级标准、22.5°为风向分级标准绘制了 3 个研究点的风速玫瑰图(图 3)。鉴于台风本身是一种气旋结构,其驱动的风向在其影响区域内呈现出全方向性分布特征:①研究点 A1,8~16 m/s 的风速在 191.25°~281.25°扇区的频率显著高于其他扇区,而 16~20 m/s 的风速在 123.75°~236.25°扇区的频率相对偏低。值得注意的是,超过 20 m/s 的强风表现出显著的方向性特征,主要分布在 258.75°~101.25°扇区。②研究点 A2,8~16 m/s 的风速在 326.25°~56.25°扇区的频率显著高于其他扇区。与研究点 A1 类似,16~20 m/s 的风速在 123.75°~236.25°扇区的频率相对较低。然而,与研究点 A1 不同的是,研究点 A2 的较强风速(超过 20 m/s)分布范围相对较广,为 213.75°~101.25°扇区。③研究点 A3,8~16 m/s 风速的分布特征与研究点 A1 相似,在 191.25°~258.75°扇区的频率相对较高。与研究点 A1 和 A2 不同的是,超过 20 m/s 的强风频率显著偏低。

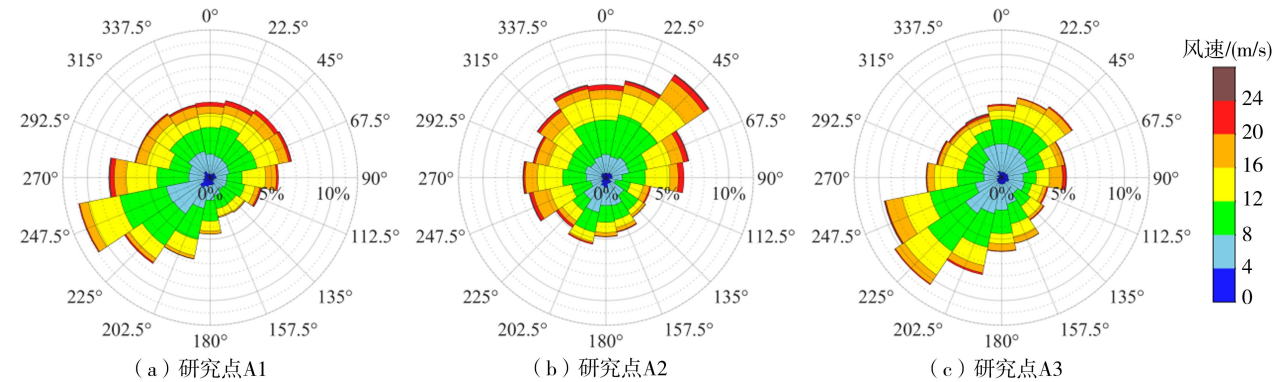


图 3 台风过程中风速风向联合分布玫瑰图

Fig. 3 Rose diagrams of joint distribution of wind speed and wind direction during typhoon processes

2.2 有效波高波向联合分布特征

图 4 为 3 个研究点的有效波高玫瑰图,其绘制依据为 1.5 m 的有效波高分级标准以及 22.5°的波向分级标准。结果显示,研究点 A1 和 A2 有效波高的方向分布特征显著相似,主要分布在 33.75°~213.75°方向扇

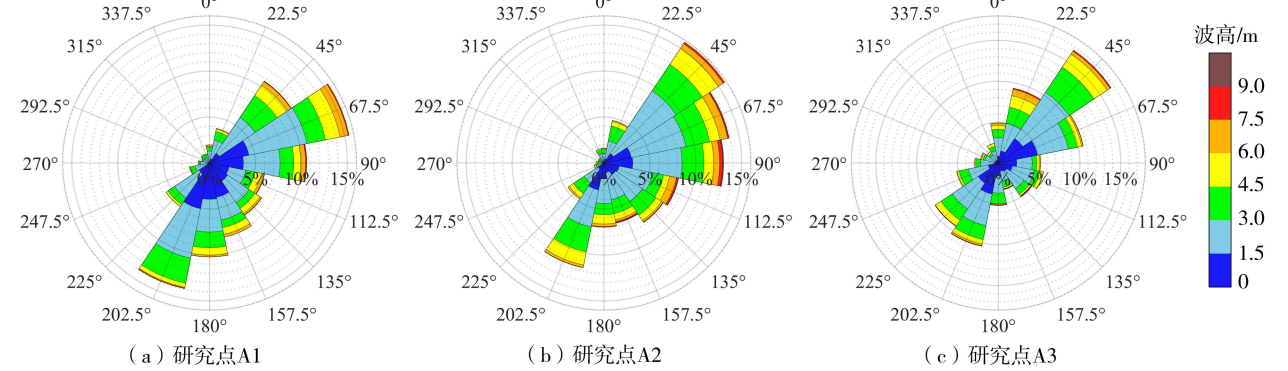


图 4 台风过程中有效波高波向联合分布玫瑰图

Fig. 4 Rose diagrams of joint distribution of significant wave height and wave direction during typhoon processes

区(占比约为 90%)。此外,在这两个研究点超过 6.0 m 的强浪均主要分布在 33.75°~123.75°扇区。值得注意的是,研究点 A2 超过 7.5 m 的强浪在正东方向扇区的频率显著大于其他扇区。与研究点 A1 和 A2 不同,研究点 A3 的有效波高主要分布在两个方向扇区内,即 11.25°~78.75°和 191.25°~236.25°扇区,且在 11.25°~78.75°扇区发生超过 6.0 m 强浪的频率显著大于 191.25°~236.25°扇区。除此之外,可以发现,研究点 A3 超过 6.0 m 的强浪频率显著低于研究点 A1 和 A2。

2.3 风、浪延迟关系统计特征

风是波浪生成和发展的主要能量来源^[24]。鉴于风能向波浪能转化需要经历复杂的物理过程,包括风对水面的摩擦、能量传递以及波浪的成长等,因此波浪的生成和发展相对于风速变化存在时间延迟^[25]。表 1 为 3 个研究点台风过程中风速与有效波高达到峰值的时间差统计结果。可以发现在台风显著影响期间,风速与有效波高达到峰值的时间差主要集中在 0~20 h。

表 1 台风过程中风速与有效波高峰值时间差统计结果
Table 1 Statistical results of the time differences between peak wind speed and peak significant wave height during typhoon processes

研究点	不同时间差的频次		
	0~<10 h	10~<20 h	≥20 h
A1	168	12	8
A2	150	14	9
A3	181	20	14

3 有效波高与风速外推值分析

有效波高和风速是海岸与近海工程(包括港口、防波堤、海上平台等)设计、建设、安装及运营活动中最为关键的环境参数。为了确保工程结构在整个设计使用寿命期间能够抵御极端海洋环境条件的冲击,保障其安全性与稳定性,通常需要基于长期历史数据匹配合适的概率分布模型来计算较长重现期下(如 50 年一遇或 100 年一遇)有效波高和风速的外推值^[15,26]。这些值可作为确定工程设计标准和安全裕度的基础依据。为满足极值理论各扇区数据相互独立的假设^[27],本文从每场台风过程中提取最大有效波高和最大风速样本作为重现期极值推算的样本,即在研究点 A1、A2、A3 分别提取 188 个、173 个和 215 个有效波高和风速样本。

3.1 单变量分析

分析最大有效波高和最大风速样本的频率分布特征有助于更好地理解数据的统计特性,为选择合适的边缘分布模型提供依据,从而更准确地计算长期外推值。表 2 给出了 3 个研究点有效波高和风速样本的频率分布特征,可见研究点 A3 波浪和风速的整体强度小于研究点 A1 和 A2,研究点 A2 的离散程度大于研究点 A1 和 A3。在偏度特征方面,3 个研究点的有效波高和风速样本均表现出显著的非对称性分布特征,具体表现为明显的右偏态分布。这种分布特征表明,与标准正态分布相比,样本分布右侧具有更长的拖尾现象。进一步分析峰度特征发现,研究点 A2 和 A3 的有效波高样本峰度值大于 3,这一统计特征揭示了有效波高样本的厚尾分布特性,表明极端波高事件发生的概率相对较高。

表 2 有效波高和风速样本的频率分布特征

Table 2 Frequency distribution characteristics of significant wave height and wind speed samples

研究点	有效波高				风速			
	平均值/m	标准差/m	偏度	峰度	平均值/(m/s)	标准差/(m/s)	偏度	峰度
A1	3.5953	1.8176	0.6928	2.7668	15.0709	4.9334	0.3630	2.7941
A2	3.8934	2.0227	0.8015	3.3884	15.2121	5.1939	0.3350	2.8716
A3	3.3074	1.7832	0.8913	3.5868	13.7664	4.6107	0.2644	2.8738

本文采用三参数威布尔分布模型对 3 个研究点从每场台风过程中提取的最大有效波高和最大风速样本进行拟合,并采用极大似然法得到该分布模型的参数,结果如表 3 所示。图 5 和图 6 对比了 3 个研究点有效波高和风速样本的经验概率分布和理论概率分布,结果显示整体差异较小,表明三参数威布尔分布能较好刻画有效波高和风速样本的概率分布特征。采用 K-S 检验和 RMSE 统计量定量评估拟合效果,结果见表 4,经验分布函数与理论分布函数之间的最大偏差 Δ 值和 RMSE 值均较小,进一步证明了三参数威布尔分布拟合的可靠性。基于构建的概率分布模型,计算了 50、100、150、200 a 重现期下的有效波高和风速外推值,结果如表 5 所示,可见研究点 A2 的有效波高外推值大于研究点 A1 和 A3,而研究点 A3 的风速外推值小于研究点 A1 和 A2。

表 3 有效波高和风速样本的参数估计结果

Table 3 Parameter estimation results of significant wave height and wind speed samples

研究点	有效波高			风速		
	位置参数/m	尺度参数/m	形状参数	位置参数/(m/s)	尺度参数/(m/s)	形状参数
A1	0.1960	1.9967	3.8510	3.5964	3.5964	3.5964
A2	0.2900	1.8858	4.0723	1.3531	1.3531	1.3531
A3	0.2690	1.8068	3.4313	2.4886	2.4886	2.4886

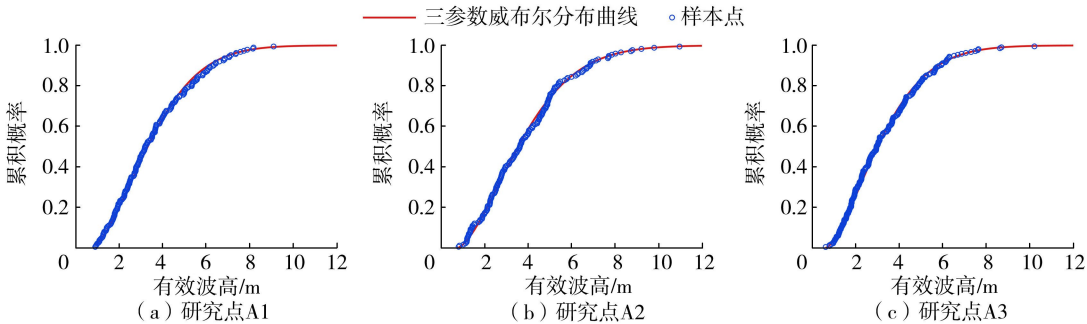


图 5 有效波高样本经验和理论累积概率分布

Fig.5 Empirical and theoretical cumulative probability distributions of significant wave height samples

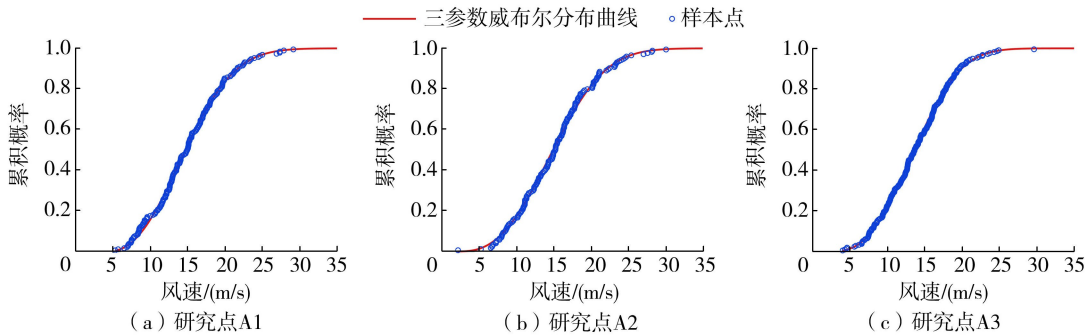


图 6 风速样本经验和理论累积概率分布

Fig.6 Empirical and theoretical cumulative probability distributions of wind speed samples

表 4 有效波高和风速样本的 K-S 检验和 RMSE 结果

Table 4 K-S test and RMSE results of significant wave height and wind speed samples

研究点	有效波高			风速		
	Δ 值	P 值	RMSE/m	Δ 值	P 值	RMSE/(m/s)
A1	0.0492	0.7334	0.0236	0.0368	0.9529	0.0121
A2	0.0436	0.8833	0.0171	0.0410	0.9217	0.0144
A3	0.0533	0.5085	0.0225	0.0305	0.9849	0.0120

表 5 不同重现期下有效波高和风速的外推值

Table 5 Extrapolated values of significant wave height and wind speed under different return periods

重现期/a	有效波高/m			风速/(m/s)		
	研究点 A1	研究点 A2	研究点 A3	研究点 A1	研究点 A2	研究点 A3
50	9.20	10.22	9.16	29.08	29.24	26.84
100	9.76	10.88	9.76	30.33	30.44	27.95
150	10.07	11.25	10.09	31.02	31.10	28.56
200	10.28	11.51	10.32	31.49	31.55	28.98

3.2 联合分布分析

基于三参数威布尔分布构建的概率分布模型,采用 Copula 模型进一步构建了有效波高和风速的联合分布。在 3 个研究点评估了 5 个候选 Copula 模型,使用 Cramér-von Mises 统计量(S_n)来计算拟合优度,结果如表 6 所示。表 6 结果表明, Frank-Copula 模型在 3 个研究点表现出最好的拟合性能, S_n 值均为最小。为了进一步验证建模的可靠性,将 Frank-Copula 模型得出的联合分布概率与这 3 个研究点的经验分布概率比较

(图 7),结果显示,经验和理论联合分布概率的整体差异较小,表明 Frank-Copula 模型可以较好地刻画有效波高和风速的联合分布特征。

表 6 联合分布的 Cramér-von Mises 统计量
Table 6 Cramér-von Mises statistics of joint distribution

研究点	S_n				
	Gaussian-Copula	t-Copula	Clayton-Copula	Frank-Copula	Gumbel-Copula
A1	0.025 9	0.025 5	0.037 4	0.020 3	0.029 9
A2	0.020 0	0.018 7	0.034 6	0.015 1	0.021 6
A3	0.024 0	0.023 1	0.040 1	0.019 9	0.024 2

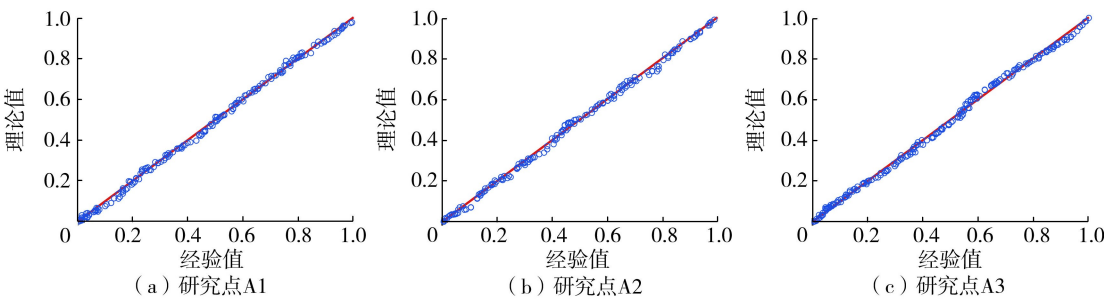


图 7 有效波高和风速样本的经验和理论联合分布概率

Fig. 7 Empirical and theoretical joint distribution probabilities of significant wave height and wind speed samples

基于构建的 Frank-Copula 模型,3 个研究点 50、100、150、200 a 联合重现期等值线如图 8 所示。进一步,基于式(7)计算得到 50、100、150、200 a 联合重现期下的有效波高和风速外推值,如表 7 所示。结果显示,在相同的重现水平下,联合重现期的外推值大于单变量重现期的外推值。这种现象与张琦等^[17]研究波高周期联合分布的结论一致,可以从超越概率的角度进行解释。例如,对于某一特定波高,单变量分析中的超越概率是指波高超过该特定波高的波浪事件的发生概率。然而,如式(6)所示,联合超越概率是指波高超过该特定波高或风速超过期望值的联合事件的发生概率,可以得出结论,对于某一特定波高,联合分布的风险域比单变量的风险域更宽(即联合超越概率通常大于单变量超越概率),从而导致联合分布的重现期缩短。因此,当联合重现期和单变量重现期相同时,联合重现期的外推值将大于单变量重现期的外推值,才能保证联合超越概率等于单变量超越概率。

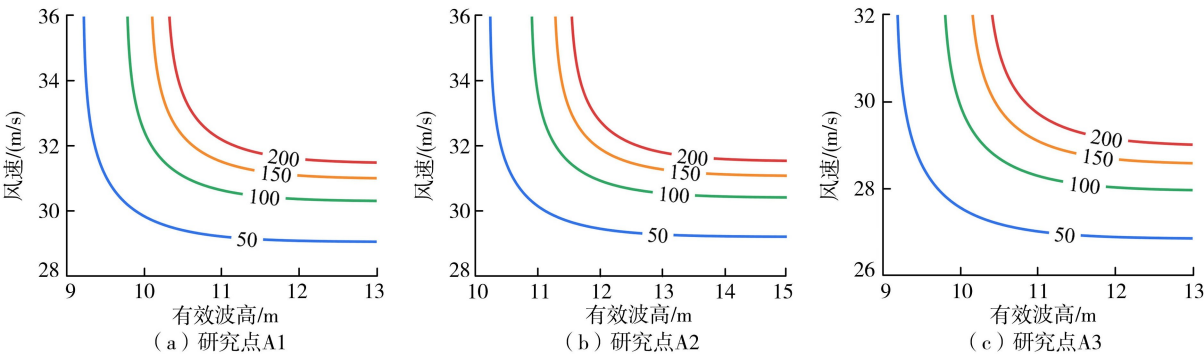


图 8 联合重现期等值线(单位:a)

Fig. 8 Contour lines of joint return period (unit: a)

表 7 不同联合重现期下有效波高和风速的外推值

Table 7 Extrapolated values of significant wave height and wind speed under different joint return periods

联合重现期/a	有效波高/m			风速/(m/s)		
	研究点 A1	研究点 A2	研究点 A3	研究点 A1	研究点 A2	研究点 A3
50	9.74	10.87	9.73	30.31	30.38	27.95
100	10.28	11.48	10.34	31.48	31.57	28.93
150	10.58	11.84	10.65	32.13	32.19	29.53
200	10.79	12.09	10.86	32.57	32.61	29.95

总的来说,这些外推结果可以为研究区域海岸和近海工程结构的设计提供重要支撑。例如,单变量重现期的外推值可以为只针对特定海洋变量敏感结构的设计提供参考,可以在保证结构安全的基础上有效降低工程成本。联合重现期的外推值考虑了更广泛的风险范围,能更真实反映台风过程中的多灾害耦合情景,可为复杂海洋工程结构的综合设计与风险评估提供更可靠的依据,从而提高工程的抗灾能力和适应性。

4 结 论

a. 台风影响下的风向呈现全方位分布,但不同风速等级表现出显著的空间差异性:①研究点 A1,8~16 m/s 风速主要分布在 191. 25°~281. 25°扇区内,强风(>20 m/s)表现出显著的方向性特征,主要分布在 258. 75°~101. 25°扇区内;②研究点 A2,8~16 m/s 风速主要分布在 326. 25°~56. 25°扇区内,强风分布范围更广,主要分布在 213. 75°~101. 25°扇区内;③研究点 A3,8~16 m/s 风速分布与研究点 A1 相似,主要分布在 191. 25°~258. 75°扇区内,但强风频率较低。

b. 3 个研究点的有效波高波向分布呈现显著空间差异。研究点 A1 和 A2 有效波高波向分布较为一致,主要集中于 33. 75°~213. 75°扇区内,且强浪(>6. 0 m)集中在 33. 75°~123. 75°扇区内;研究点 A2 超过 7. 5 m 的强浪在正东方向频率尤为突出。研究点 A3 有效波高呈双峰分布(即 11. 25°~78. 75°和 191. 25°~236. 25°扇区),强浪频率显著低于研究点 A1 和 A2,且集中于 11. 25°~78. 75°扇区内。此外,风浪延迟特征研究揭示了台风显著影响期间风速和有效波高达到峰值的时间差主要集中在 0~20 h。

c. 40 年每场台风过程中最大的有效波高和风速样本呈现明显的右偏分布特征;Frank-Copula 可以较好地刻画南海西北部海域台风过境期间最大有效波高和最大风速的联合分布特征;由于考虑了更广泛的风险范围,联合重现期的外推值大于单变量重现期的外推值。

参考文献:

[1] 胡正元,冯曦,冯卫兵,等. 基于盘古气象大模型的台风路径及台风浪波高预报研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2026,54(3):28-36. (Hu Zhengyuan,Feng Xi,Feng Weibing,et al. Research on prediction of typhoon tracks and typhoon wave heights based on Pangu-Weather[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2026,54(3):28-36. (in Chinese))

[2] 陈希,桂祁军,闵锦忠,等. 湛江港海域台风浪模拟研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2003,31(5):593-596. (Chen Xi,Gui Qijun,Min Jinzhong,et al. Simulation of typhoon waves in Zhanjiang Port sea area[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2003,31(5):593-596. (in Chinese))

[3] 王海平,向纯怡. 2024 年西北太平洋和南海台风活动概述[J]. 海洋气象学报,2025,45(3):137-150. (Wang Haiping,Xiang Chunyi. Overview of typhoon activities over western North Pacific and the South China Sea in 2024[J]. Journal of Marine Meteorology,2025,45(3):137-150. (in Chinese))

[4] 孙佳,左军成,黄琳,等. 东海沿岸台风及风暴潮灾害特征及成因[J]. 河海大学学报(自然科学版),2013,41(5):461-465. (Sun Jia,Zuo Juncheng,Huang Lin,et al. Characteristics and causes of typhoon and storm surge along coast of East China Sea [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2013,41(5):461-465. (in Chinese))

[5] 石洪源,曹雪峰,文先华,等. 台风“山神”过境期间南海西北部海南岛附近海区台风浪空间特征数值模拟研究[J]. 海洋环境科学,2016,35(3):366-373. (Shi Hongyuan,Cao Xuefeng,Wen Xianhua,et al. Numerical model research of the spatial characteristics of typhoon waves in the northwestern of the South China Sea near Hainan Island during the transmit of typhoon “Son-Tink”[J]. Marine Environmental Science,2016,35(3):366-373. (in Chinese))

[6] 沈旭伟,范力阳,陈国平,等. 台风“鲇鱼”作用下南海波浪场的数值模拟研究[J]. 水道港口,2016,37(4):369-374. (Shen Xuwei,Fan Liyang,Chen Guoping,et al. Numerical simulation studies of influence on wave field in the South China Sea caused by typhoon Megi[J]. Journal of Waterway and Harbor,2016,37(4):369-374. (in Chinese))

[7] 林金波,毛鸿飞,吴光林,等. 基于混合风场的南海台风浪数值模拟[J]. 广东海洋大学学报,2021,41(6):44-52. (Lin Jinbo,Mao Hongfei,Wu Guanglin,et al. Numerical modeling of typhoon waves in South China Sea based on mixed wind field [J]. Journal of Guangdong Ocean University,2021,41(6):44-52. (in Chinese))

[8] 陈彤彤,周良明,王智峰,等. 台风“海鸥”期间南海北部波浪和 SST 变化特征分析[J]. 海洋湖沼通报,2017(4):1-11. (Chen Tongtong,Zhou Liangming,Wang Zhifeng,et al. Surface waves and SST analysis in the northern of South China Sea during Typhoon “Kalmaegi”[J]. Transactions of Oceanology and Limnology,2017(4):1-11. (in Chinese))

[9] 杨志衡,牛小静. 海南岛历史台风浪模拟和评估[J]. 海洋预报,2024,41(5):26-33. (Yang Zhiheng,Niu Xiaojing. Simulation

and assessment of historical storm waves around Hainan Island[J]. Marine Forecasts,2024,41(5):26-33. (in Chinese))

[10] 李军政,马玉祥,艾丛芳,等. 台风“纳沙”影响下中国南海北部波浪特征研究[C]//中国海洋学会海洋工程分会. 第二十一届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(下). 青岛:中国海洋大学出版社,2024:125-129.

[11] Shao Zhuxiao,Liang Bingchen,Li Huajun,et al. Study of sampling methods for assessment of extreme significant wave heights in the South China Sea[J]. Ocean Engineering,2018,168:173-184.

[12] Shao Zhuxiao,Liang Bingchen,Gao Huijun. Extracting independent and identically distributed samples from time series significant wave heights in the Yellow Sea[J]. Coastal Engineering,2020,158:103693.

[13] Kong Lisha,Zhang Xiuzhi,Wu Huanping,et al. Estimation of extreme wind speeds with different return periods in the Northwest Pacific[J]. Meteorological Applications,2024,31(6):e70012.

[14] Albani A,Ghani S S A,Ibrahim M Z,et al. Three-parameter weibull for offshore wind speed distribution in malaysia[J]. Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology,2024,39(1):149-158.

[15] Muraleedharan G,Lucas C,Martins D,et al. On the distribution of significant wave height and associated peak periods[J]. Coastal Engineering,2015,103:42-51.

[16] Katalinić M,Parunov J. Comprehensive wind and wave statistics and extreme values for design and analysis of marine structures in the Adriatic Sea[J]. Journal of Marine Science and Engineering,2021,9(5):522.

[17] 张琦,梁丙臣,邵珠晓. 基于 Copula 函数的黄海波高周期联合统计分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(4):108-114. (Zhang Qi,Liang Bingchen,Shao Zhuxiao. Joint statistical analysis of wave height and wave period of Yellow Sea based on Copula function[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2023,51(4):108-114. (in Chinese))

[18] 万永静,刁秀媚,刘俊,等. 基于 Copula 函数的暴雨潮位组合分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(3):211-217. (Wan Yongjing,Diao Xiumei,Liu Jun,et al. Combined analysis of rainstorm and tide level based on Copula function[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2017,45(3):211-217. (in Chinese))

[19] 赵玲玲,张鑫辉,刘昌明,等. 华南中小流域设计暴雨洪水同频率检验与重现水平推算[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):157-163. (Zhao Lingling,Zhang Xinhui,Liu Changming,et al. Same frequency test and recurrence level estimation of design storm flood in a small and medium-sized basin of South Cina[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2023,51(2):157-163. (in Chinese))

[20] Mazas F,Hamm L. An event-based approach for extreme joint probabilities of waves and sea levels[J]. Coastal Engineering,2017,122:44-59.

[21] 王亚欣,梁丙臣,邵珠晓. 黄海南部海域的极值波高推算[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(6):117-122. (Wang Yaxin,Liang Bingchen,Shao Zhuxiao. Calculation of extreme wave height in southern Yellow Sea[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2023,51(6):117-122. (in Chinese))

[22] Li Jiangxia,Pan Shunqi,Chen Yongping,et al. The performance of the copulas in estimating the joint probability of extreme waves and surges along east coasts of the mainland China[J]. Ocean Enginerring,2021,237:109581.

[23] Li Jiaqian,Liang Bingchen,Shao Zhuxiao,et al. Joint probability analysis of significant wave height and wind speed under extreme weather conditions[J]. Ocean Engineering,2025,334:121664.

[24] 周悦,董增川,徐伟,等. 基于 SWAN 模型的风生波河道防浪林消浪模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(4):323-328. (Zhou Yue,Dong Zengchuan,Xu Wei,et al. Wave attenuation simulation of vegetation based on the SWAN model in rivers[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2019,47(4):323-328. (in Chinese))

[25] Valentina L,Felice A. On Correlation between Wind and Wave Storms[J]. Journal of Marine Science and Engineering,2021,9(12):1426.

[26] Liang Bingchen,Shao Zhuxiao,Li Huajun,et al. An automated threshold selection method based on the characteristic of extrapolated significant wave heights[J]. Coastal Engineering,2019,144:22-32.

[27] Li Jiaqian,Shao Zhuxiao,Liang Bingchen,et al. Regional assessment of extreme significant wave heights in the Bohai Sea and northern Yellow Sea[J]. Applied Ocean Research,2022,123:103182.

(收稿日期:2025-08-04 编辑:熊水斌)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.04.002

Yan Meng 风场模型的参数敏感性分析

逯智科¹, 洪俊玲², 周丽丹², 徐万海², 李 颀¹

(1. 中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司; 2. 天津大学建筑工程学院)

摘要: 为了研究风场模型的特征,以 2024 年超强台风“摩羯”为例,通过数值模拟开展了 Yan Meng 风场模型的参数敏感性分析。研究结果表明:Yan Meng 风场模型的表面风速计算结果与压力分布常数、最大风速半径呈正相关关系,压力分布常数与最大风速半径呈正相关关系;等效粗糙高度越小,表面风速越大;Yan Meng 风场模型表面风速计算结果的相对误差可稳定在 20% 以内,平均绝对误差均值在 2 m/s 以内;Yan Meng 风场模型在我国沿海台风风场研究中具有较好的适应性,可用于我国沿海台风灾害的评估。

关键词: Yan Meng 风场模型;台风风场模拟;“摩羯”台风;敏感性分析;误差分析

Parameter sensitivity analysis of Yan Meng wind field model

Lu Zhike¹, Hong Junling², Zhou Lidan², Xu Wanhai², Li Sa¹

(1. Huaneng Clean Energy Research Institute Co., Ltd.; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University)

Abstract: To explore the characteristics of wind field models, by taking Super Typhoon “Yagi” in 2024 as an example, a parameter sensitivity analysis of the Yan Meng wind field model was conducted via numerical simulation. The results show that the surface wind speed calculated by the Yan Meng wind field model is positively correlated with the pressure profile constant and the maximum wind speed radius, and the pressure profile constant is positively correlated with the maximum wind speed radius. A smaller equivalent roughness height leads to a higher surface wind speed. The relative error of the surface wind speed calculation results of the Yan Meng wind field model can be stabilized within 20%, and the average value of the mean absolute error is within 2 m/s. The Yan Meng wind field model exhibits good adaptability in the study of typhoon wind fields along the coast of China, and it can be applied to the evaluation of typhoon disasters along the coast of China.

Key words: Yan Meng wind field model; typhoon wind field simulation; Typhoon “Yagi”; sensitivity analysis; error analysis

中国拥有漫长的海岸线和辽阔的海洋面积,因此面临着复杂的海洋气候影响。台风是影响我国的最严重自然灾害之一,其带来的强风、暴雨、风暴潮严重威胁着人民生命财产安全^[1]。我国东南沿海超强台风频发,最大风力可达 17 级以上,海上设施备受影响,会造成重大生命财产损失,探索台风生成发展机理对台风灾害预测和海上设施设计与建造具有重要意义。

台风作为一种破坏性强、运动路径难以准确预测的气象灾害,20 世纪中叶就有气象学家开始对其进行研究。传统气象学中的台风数值模拟需要全面考虑多种复杂因素,模拟得到的风场更加精准,但计算周期长,计算效率低。随机理论被引入台风极值风速模拟后,兼顾计算精度和计算效率的台风风场模型应运而生。目前,工程领域常用 Batts、Yan Meng、Shapiro、CE 这 4 种台风风场模型,谢汝强等^[2]集中对比分析了 4 种台风风场模型在西北太平洋区域的风速计算结果与近地观测风速的误差,结果表明 Batts 风场模型适用性一般,Yan Meng 风场模型适用性较好,而 Shapiro 和 CE 风场模型适用性相对较好。Yan Meng 风场模型作为一种半经验半数值风场模型,引入了 Holland 气压模型和边界层摩擦力修正的梯度平衡方程,计算周期短且具有足够精度,被广泛应用在台风风场数值计算中^[3-4]。李涛等^[5]基于 Yan Meng 风场模型对台风“丹尼”进行数值模拟,研究了 Yan Meng 风场模型的适用性;孔莉莎等^[6]基于 Yan Meng 风场模型模拟台风“玛莉亚”的全过程分布,为计算海上风电场不同重现期风速提供了技术基础。此外,部分学者对不同台风风场模型开展了对比研究,如葛耀君等^[7]研究结果表明,Yan Meng 风场模型的计算结果与实际风速更加吻合,可以

基金项目: 华能集团总部科技项目(HNKJ22-H62)

作者简介: 逯智科(1985—),男,高级工程师,博士,主要从事风电机组定制化设计与开发工作。E-mail:zk_lu@qny.chng.com.cn

通信作者: 徐万海(1981—),男,教授,博士,主要从事海洋结构安全评价研究。E-mail:xuwanhai@tju.edu.cn

很好地模拟中国沿海台风,且计算简繁适当。因此,本文选取 Yan Meng 风场模型开展台风风场模拟。

Yan Meng 风场模型中关键参数的取值对风速计算结果具有不可忽视的影响,且关键参数取值具有区域特征,西北大西洋建立的参数统计模型不能直接应用于西北太平洋^[8-10]。本文以 2024 年 9 月发生在我国南海区域的超强台风“摩羯”为例开展研究,该台风因当年 9 月初弱冷空气南下和南海活跃季风共同作用增强了台风北侧低层流入,导致移动方向多次突变,曾 4 次登陆陆地,其中两次登陆我国,路径特征十分复杂,登陆时持续风速达 83 m/s,是 1949 年以来秋季登陆中国的最强台风,造成的经济损失近 600 亿元。本文重点研究最大风速半径 $R_{\max}$ 、压力分布常数 B 和等效粗糙高度 Z_0 这 3 个关键参数在 Yan Meng 风场模型中的敏感性,分析关键参数取值对风速计算结果的影响规律并给出参数取值建议,以期为西北大西洋台风灾害评估与工程防灾提供理论支撑。

1 Yan Meng 风场模型

1.1 风速计算

Yan Meng 风场模型采用的是 Holland 气压模型^[11],Holland 气压模型在国内外台风风场研究中也广泛应用^[12],该模型通过引入压力分布常数 B 简化了台风气压梯度。Yan Meng 风场模型将台风引起的表面风速 v_s 分解为气压梯度力引起的梯度风速 v_g 和地表摩擦力引起的摩擦风速 v_f ,通过迭代计算得到最终的表面风速,具体计算过程如图 1 所示,本文将求得的梯度风速作为表面风速的初始值。

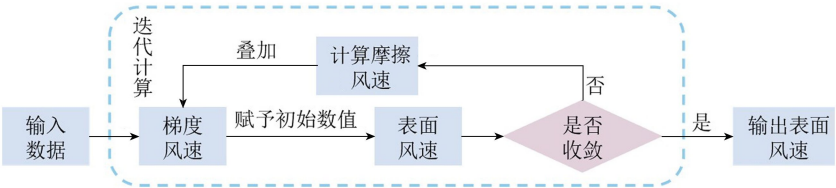


图 1 表面风速计算流程

Fig. 1 Calculation flow chart of surface wind speed

Yan Meng 风场模型得到的模拟风速相当于 1 h 平均风速^[13-14],而浮标站的监测风速为 3 s 平均风速,引入阵风系数的概念,将模拟风速转换为 3 s 平均风速,其表达式为:

$$G_{t,T_0} = v_{t,T_0} / v_{T_0} \tag{1}$$

式中; G_{t,T_0} 为 T_0 时间平均风速与 t 时间平均风速的转换系数,即阵风系数; v_{t,T_0} 为在 T_0 时间内的 t 时间平均风速; v_{T_0} 为 T_0 时间平均风速。在本文中, $t=3\text{ s}$, $T_0=1\text{ h}=3\,600\text{ s}$,根据世界气象组织(WMO)发布的建议标准(WMO/TD-No. 1555 *Guidelines for Converting Between Various Wind Averaging Periods in Tropical Cyclone Conditions*),位于沿海区域的浮标站风速转换系数取值为 1.60。

Yan Meng 风场模型计算得到的是 10 m 高度的模拟风速,采用对数定律对不同高度的风速进行转换,转换公式为:

$$\frac{v_H}{v} = \frac{\ln[(H+10)/Z_0]}{\ln(10/Z_0)} \tag{2}$$

式中: v 为 Yan Meng 风场模型计算的 10 m 高度的模拟风速; v_H 为浮标站 H 高度处的实际风速。

1.2 关键参数

在 Yan Meng 风场模型中,最大风速半径 $R_{\max}$ 、压力分布常数 B 和等效粗糙高度 Z_0 这 3 个参数的取值对模拟风速具有不可忽视的影响, $R_{\max}$ 与 B 的相关性也一直是学界的研究重点。表面风速受 3 个参数的影响情况如图 2 所示。本文考虑 $R_{\max}$ 与 B 的相关性,根据 Holland 气压模型推导压力分布常数 B ,选取不同的 Z_0 取值,开展 Yan Meng 风场模型的参数敏感性分析。

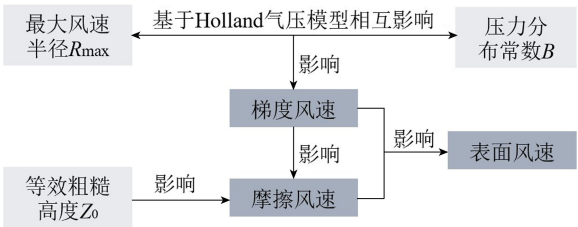


图 2 表面风速受 3 个参数的影响情况

Fig. 2 Influence of three parameters on surface wind speed

2 台风风场模拟试验

2.1 案例介绍

本文选取 2024 年的第 11 号超强台风“摩羯”作为研究对象,基于 Yan Meng 风场模型开展模拟试验。依据中央气象台台风网的资料,台风“摩羯”于 2024 年 9 月 1 日在菲律宾东南部形成,一路往西北方向移动,9 月 7 日登陆越南广宁省并于 9 月 8 日下午被中央气象台停止编号,期间进入我国南海区域时风力增强,最高风速达到了 68 m/s,造成的灾情遍及中国、菲律宾、越南和缅甸等国,影响范围十分广泛,具有重要的研究价值。

本文采用的台风中心位置、中心气压、移动速度等数据均来自中央气象台台风网。选取“摩羯”台风影响区域内的浮标站作为台风风场模拟风速的计算点,因浮标站数量有限且存在损坏情况,本文仅研究纬度为 20°53′53.39″N、经度为 112°06′33.15″E 的浮标站,该浮标站与“摩羯”台风运动路径的相对位置如图 3 所示。浮标站测风塔设置了多个测量高度层,最低测量高度为 50 m,数据记录的时间间隔为 10 min。



图 3 浮标站与台风相对位置

Fig. 3 Relative position map of buoy station and typhoon

2.2 数值模拟分析方案

试验前要对台风样本进行预处理,对数据进行标准化处理,依据台风行进位置筛选出影响浮标站的台风样本,本文设定模拟圆半径为 250 km。筛选后得到“摩羯”台风从 2024 年 9 月 5 日 23 时至 6 日 23 时共计 25 个逐时台风数据样本,为方便表述,将时间表示为从第 1 小时到第 25 小时。

在已有的大量最大风速半径经验公式中选取如表 1 所示的 7 个经验公式进行模拟分析。依据 Holland 气压模型,已知某时刻浮标站气压 P_r 、台风中心气压 P_c 、台风中心气压与外围气压的差值 ΔP 、台风中心与浮标站距离 r ,根据表 1 中的经验公式计算得到最大风速半径,进而推导得到压力分布常数。部分用于推导压力分布常数的浮标站数据如表 2 所示。

表 1 最大风速半径经验公式

Table 1 Empirical formulas of maximum wind speed radius

公式编号	来源文献	数据来源	公式
1	Fang 等 ^[15]	西北太平洋	$\ln R_{\max} = -38.36\Delta P^{0.025} + 46.75$
2	孔莉莎等 ^[16]	西北太平洋	$\ln R_{\max} = -0.1239\Delta P^{0.6003} + 5.1034$
3	江志辉等 ^[17]	中国沿海	$R_{\max} = 1.119 \times 10^3 \Delta P^{-0.805}$
4	Vickery 等 ^[18]	大西洋	$\ln R_{\max} = -7.7 \times 10^{-5} \Delta P^2 + 3.859$
5	Yasui 等 ^[19]	西北太平洋	$R_{\max} = 2.06 \times 10^4 \Delta P^{-1.27}$
6	李瑞龙 ^[20]	西北太平洋	$\ln R_{\max} = -0.163\Delta P^{0.555} + 5.212$
7	李泽培 ^[21]	中国沿海	$R_{\max} = -5.71 \times 10^{-4} \Delta P^3 + 0.137\Delta P^2 - 10.966\Delta P + 0.237C + 362.049$

注:李泽培^[21]经验公式包含两个公式,由于本文的台风样本处于台风增强阶段,因此只采用其增强阶段的公式,其中 C 为台风移动速度。

参考 Davenport^[22] 基于地形类别对 Z_0 取值的建议,基于地形特征的典型范围选取 0.000 2、0.005、0.01、0.05、0.1、1 m 共 6 个取值工况开展试验分析。因此共设置 25 个时刻、7 个最大风速半径经验公式、6 个等效粗糙高度取值共计 1 050 种试验工况,运用 Yan Meng 风场模型迭代计算不同工况下的表面风速,最大迭代次数设定为 50 次,最后的收敛判定精确到小数点后两位。基本分析流程如下:筛选台风样本→选择最大风速半径经验公式→Holland 气压模型推导压力分布常数→选择等效粗糙高度→Yan Meng 风场模型计算表面风速→结果分析。

表 2 推导压力分布常数的部分浮标站数据

Table 2 Partial buoy station data for deriving pressure profile constant

r/km	P_r/hPa	P_c/hPa	$\Delta P/\text{hPa}$
230.27	994	915	95
217.61	994	915	95
211.77	992	915	95
201.21	992	915	95
206.68	991	915	95
202.68	990	910	100
199.15	991	905	105
193.59	989	905	105
191.61	990	905	105
190.18	990	905	105

2.3 关键参数敏感性分析

2.3.1 最大风速半径和压力分布常数的影响

最大风速半径和压力分布常数的相关性不可忽略,采用 7 个最大风速半径经验公式,依据 Holland 气压模型计算得到对应的压力分布常数均值和最大风速半径均值,结果如图 4 所示。图 4 中数据点由左至右依次为经验公式 4、6、2、3、1、5、7 的结果,可看出压力分布常数的均值($\bar{B}$)随最大风速半径均值($\bar{R}_{\max}$)单调递增,两者之间存在明显的线性关系(式(3)),线性决定系数 R^2 达到 0.997。

$$\bar{B} = 0.33 + 0.02\bar{R}_{\max}$$

(3)

为研究最大风速半径和压力分布常数对表面风速的影响,固定等效粗糙高度 $Z_0 = 0.005\text{ m}$ 不变,计算得到不同经验公式下台风样本在浮标站的模拟风速值,结果如图 5 所示。可以发现,表面风速随着最大风速半径和压力分布常数的增大逐步升高,具有明显的正相关性,经验公式 7 的模拟风速最大,公式 4 最小。从图 5 可以发现 7 个经验公式得到的台风风速变化趋势基本与实际风速保持一致,验证了 Yan Meng 风场模型在我国东南沿海的适用性。

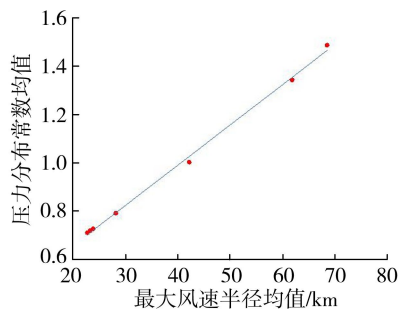


图 4 压力分布常数均值与最大风速半径均值关系

Fig. 4 Relationship between mean value of pressure profile constant and mean value of maximum wind speed radius

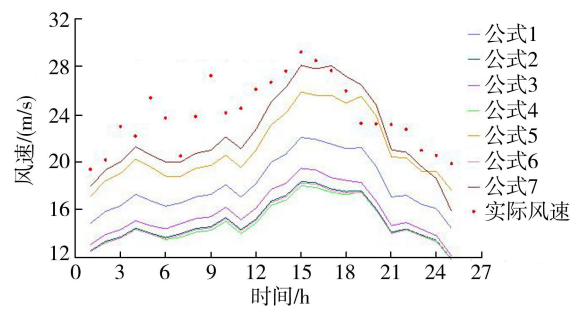


图 5 不同最大风速半径经验公式得到的模拟风速

Fig. 5 Simulated wind speed obtained from different empirical formulas of maximum wind speed radius

2.3.2 等效粗糙高度的影响

为判断等效粗糙高度对表面风速的影响,固定最大风速半径和压力分布常数的取值,选取经验公式 5 计算的最大风速半径和压力分布常数的均值作为固定参数,等效粗糙高度取值为 0.000 2、0.005、0.01、0.05、0.1、1 m 开展参数敏感性分析,得到浮标站模拟风速结果如图 6 所示。从图 6 可以看出,模拟风速随着等效粗糙高度的增大而减小,两者呈负相关关系。在第 17 小时之前,等效粗糙高度取值为 0.000 2 m 的工况计算结果更接近实际风速,在第 17 小时之后,实际风速骤降且更靠近等效粗糙高度取更大值对应的模拟风速,这是因为第 16 小时至第 17 小时“摩羯”台风开始登陆我国海南省,台风经过的地形地貌发生明显变化,台风强度开始衰减,实际风速降低明显,导致实际风速接近较大等效粗糙高度取值得到的模拟风速。因此,台风登陆之后的表面风速计算需要考虑更大的等效粗糙高度取值。

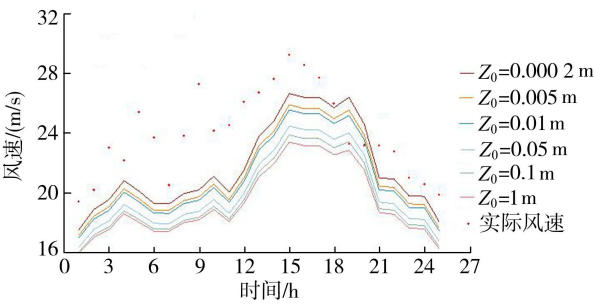


图 6 不同等效粗糙高度取值工况下的模拟风速

Fig. 6 Simulated wind speed under different values of equivalent roughness height

2.4 表面风速误差分析

由图 6 可以看出,台风登陆之前 $Z_0 = 0.000\ 2\text{ m}$ 对应的模拟风速与实际风速更加接近,本文选取 $Z_0 = 0.000\ 2\text{ m}$ 工况下不同最大风速半径经验公式得到的模拟风速与实际风速开展误差对比分析。

不同最大风速半径经验公式得到的模拟风速的相对误差如图 7 所示。可以看出,经验公式 6 的整体误差最大,相对误差集中在 30%~40%;而公式 7 的整体误差最小,相对误差基本集中在 20%以内。在气象预报领域,就随机性强、模拟尺度大的台风而言,20%的相对误差是可以接受的。7 种经验公式得到的大部分数据点都落在了图中右下部分,说明基于监测数据得到的最大风速半径经验公式在 Yan Meng 风场模型中的计算结果与实际结果相比偏小、偏保守。

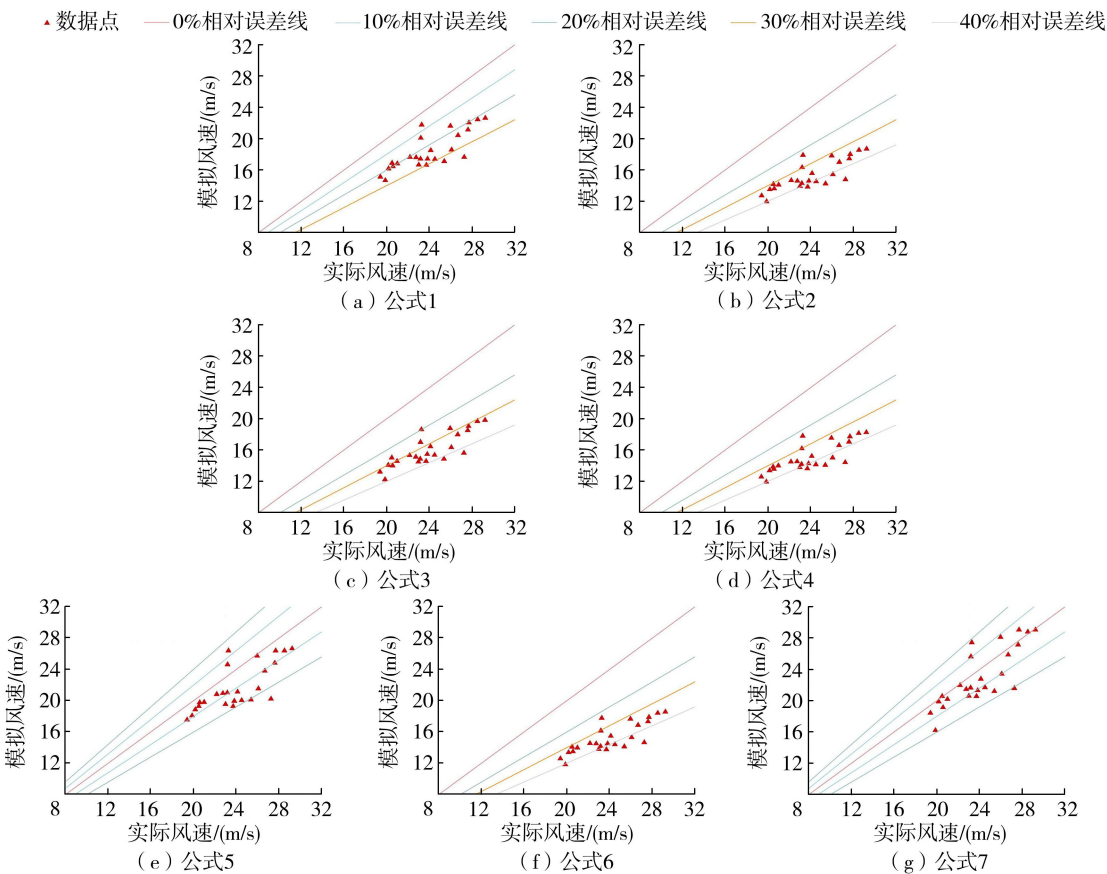


图 7 不同最大风速半径经验公式得到的模拟风速相对误差

Fig. 7 Relative errors of simulated wind speed obtained from different empirical formulas of maximum wind speed radius

纳什效率系数(NSE)可以衡量 Yan Meng 风场模型对实际台风风场风速的模拟精度,可用来验证模型的模拟结果的优劣,7 种最大风速半径经验公式对应的平均绝对误差(MAE)和 NSE 如表 3 所示。可以发现 NSE 越大,MAE 越小,两种指标呈现一个近似对称的趋势。经验公式 7 的 NSE 最接近于 1,其 MAE 也是最小的,低于 2 m/s,因此公式 7 计算的最大风速半径和压力分布常数更加接近实际情况,可信度最高。

3 结 论

a. Yan Meng 风场模型的表面风速计算结果与压力分布常数、最大风速半径呈正相关关系,压力分布常数与最大风速半径存在明显的正相关性,压力分布常数会影响风场结构和气压分布进而影响最大风速半径,其相关性不可忽略;最大风速半径主要受中心气压差影响,因此最大风速半径不同会显著影响 Yan Meng 风场模型的计算结果。

b. Yan Meng 风场模型的表面风速计算结果与等效粗糙高度呈负相关关系,台风登陆之后表面风速计算需要更大的等效粗糙高度取值。

c. 7 种最大风速半径经验公式得到的表面风速计算结果整体偏小,经验公式 7 更接近实际情况,可信度更高,对应的表面风速计算结果相对误差可以降低至 20% 以内,优于其他方法的 20% ~ 45%,MAE 值在 2 m/s 以内。

参考文献:

[1] 沈晓琳,胡艺,张恒德,等. 台风“美莎克”致洪暴雨精细化特征及成因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(3):23-30. (Shen Xiaolin, Hu Yi, Zhang Hengde, et al. Analysis on refined characteristics and causes of flooding rainstorm

表 3 不同最大风速半径经验公式的误差
Table 3 Errors of different empirical formulas of maximum wind speed radius

公式编号	MAE/(m/s)	NSE
1	5.5764	-3.3326
2	8.7200	-9.0522
3	7.9404	-7.3535
4	8.9292	-9.5595
5	2.6532	-0.2086
6	8.8292	-9.2953
7	1.8812	0.2814

caused by typhoon MAYSAK[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(3):23-30. (in Chinese))

[2] 谢汝强,吴韬,王艳华. 台风风场模型适应性研究[J]. 合肥学院学报(自然科学版),2014,24(2):84-88. (Xie Ruqiang, Wu Tao, Wang Yanhua. Adaptability research on typhoon wind-field model[J]. Journal of Hefei University (Natural Sciences), 2014,24(2):84-88. (in Chinese))

[3] Meng Yan, Matsui M, Hibi K. An analytical model for simulation of the wind field in a typhoon boundary layer[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,1995,56(2/3):291-310.

[4] Meng Yan, Matsui M, Hibi K. A numerical study of the wind field in a typhoon boundary layer[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,1997,67-68:437-448.

[5] 李涛,雷鹰,徐志谦,等. 基于 Yan Meng 模型模拟台风的初步探索[J]. 厦门大学学报(自然科学版),2009,48(6):840-843. (Li Tao, Lei Ying, Xu Zhiqian, et al. Initiative research on typhoon simulation by Yan Meng wind field model[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2009,48(6):840-843. (in Chinese))

[6] 孔莉莎,张秀芝. 2018 年 8 号超强台风“玛莉亚”风场模拟[J]. 船舶工程,2021,43(增刊 1):61-65. (Kong Lisha, Zhang Xiuzhi. Wind field simulation of 8th super typhoon “Maria” in 2018[J]. Ship Engineering,2021,43(S1):61-65. (in Chinese))

[7] 葛耀君,赵林,项海帆. 基于极值风速预测的台风数值模型评述[J]. 自然灾害学报,2003,12(3):31-40. (Ge Yaojun, Zhao Lin, Xiang Haifan. Review for numerical typhoon models based on extreme wind velocity prediction[J]. Journal of Natural Disasters,2003,12(3):31-40. (in Chinese))

[8] 叶庚姣,余晖,方平治,等. 拖曳系数参数化方案对工程台风模拟风场的影响研究[J]. 热带气象学报,2018,34(2):188-197. (Ye Gengjiao, Yu Hui, Fang Pingzhi, et al. Effects of the parameterization scheme of drag coefficient on the simulation of typhoon wind field in engineering application[J]. Journal of Tropical Meteorology,2018,34(2):188-197. (in Chinese))

[9] 曾祥锋. 基于 WRF 中尺度数值模式台风风场模拟及验证[D]. 广州:广州大学,2018.

[10] 赵林,葛耀君,宋丽莉,等. 广州地区台风极值风特性蒙特卡罗随机模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版),2007,35(8):1034-1038. (Zhao Lin, Ge Yaojun, Song Lili, et al. Monte-Carlo simulation analysis of typhoon extreme value wind characteristics in Guangzhou[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2007,35(8):1034-1038. (in Chinese))

[11] Holland G J. An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes[J]. Monthly Weather Review,1980,108(8):1212-1218.

[12] 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))

[13] Cardone V J, Greenwood C V, Greenwood J A, et al. Unified program for the specification of hurricane boundary layer winds over surfaces of specified roughness[R]. Washington D. C. :US Army Corps of Engineers,1992:12-35.

[14] Vickery P J, Skerlj P F, Steckley A C, et al. Hurricane wind field model for use in hurricane simulations[J]. Journal of Structural Engineering,2000,126(10):1203-1221.

[15] Fang Genshen, Zhao Lin, Cao Shuyang, et al. A novel analytical model for wind field simulation under typhoon boundary layer considering multi-field correlation and height-dependency[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2018,175:77-89.

[16] 孔莉莎,张秀芝. 基于 Yan Meng 风场模型的台风风场模拟及参数敏感性分析[J]. 船舶工程,2020,42(增刊 1):581-585. (Kong Lisha, Zhang Xiuzhi. Typhoon wind field simulation and parameter sensitivity analysis based on Yan Meng wind field[J]. Ship Engineering, 2020,42(S1):581-585. (in Chinese))

[17] 江志辉,华锋,曲平. 一个新的热带气旋参数调整方案[J]. 海洋科学进展,2008,26(1):1-7. (Jiang Zhihui, Hua Feng, Qu Ping. A new scheme for adjusting the tropical cyclone parameters [J]. Advances in Marine Science, 2008, 26(1):1-7. (in Chinese))

[18] Vickery P J, Wadhera D. Statistical models of holland pressure profile parameter and radius to maximum winds of hurricanes from flight-level pressure and H* Wind Data[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology,2008,47(10):2497-2517.

[19] Yasui H, Ohkuma T, Marukawa H, et al. Study on evaluation time in typhoon simulation based on Monte Carlo method[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2002,90(12/13/14/15):1529-1540.

[20] 李瑞龙. 基于改进的台风关键参数的台风极值风速预测[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.

[21] 李泽培. 中国东南沿海地区台风数值模拟与关键参数研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2023.

[22] Davenport A G. The relationship of reliability to wind loading[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1983,13(1/2/3):3-27.

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.04.003

中国邻近海域 Stokes 漂流流速分布特性

王京富^{1,2}, 陶爱峰^{1,2}, 解淑亚^{1,2}, 秦淑芳^{1,2}, 殷妍^{1,2}, 王岗^{1,2}

(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)

摘要: 基于 ERA5 再分析数据, 计算并分析了 1980—2023 年中国邻近海域 Stokes 漂流流速的四季空间分布规律, 并分析了典型台风条件下 Stokes 漂流速度的变化特性。结果表明: 中国邻近海域 Stokes 漂流流速存在显著的纬向分异与季节变化特征; 除夏季外, Stokes 漂流流速大值区均位于中国台湾海峡附近海域, 平均流速可以达到 0.1 m/s, 方向总体为南向和西南向; 夏季 Stokes 漂流流速大值区向西南部偏移, 位于中南半岛的东南部, 大值区流速范围为 0.08~0.09 m/s, 方向总体为北向和东北向; 受地形和季风影响, 黄渤海区域 Stokes 漂流呈现沿着海岸线向北传播的特征, 这一特征与海表漂浮物向北输运密切相关; 在台风等极端天气影响下, 尤其是在台风生成处附近海域, 沿台风路径的 Stokes 漂流流速会增大 1.5~2.3 倍。

关键词: 中国邻近海域; Stokes 漂流流速; ERA5 再分析数据; 时空分布特征

Distribution characteristics of Stokes drift velocity in adjacent seas of China

Wang Jingfu^{1,2}, Tao Aifeng^{1,2}, Xie Shuya^{1,2}, Qin Shufang^{1,2}, Yin Yan^{1,2}, Wang Gang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Coastal Disaster and Protection, Ministry of Education, Hohai University;

2. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University)

Abstract: Based on ERA5 reanalysis data, the spatial distribution characteristics of Stokes drift velocity in four seasons in adjacent seas of China from 1980 to 2023 were calculated and analyzed, and the variation characteristics of Stokes drift velocity under typical typhoon conditions were analyzed. The results show that the Stokes drift velocity in adjacent seas of China exhibits significant latitudinal differentiation and seasonal variation characteristics. Except in summer, the high-value areas of Stokes drift velocity are all located in the adjacent seas of the Taiwan Strait, China, where the average velocity can reach 0.1 m/s, and the direction is generally southward and southwestward. In summer, the high-value areas of Stokes drift velocity shift to the southwest, located in the southeast of the Indo-China Peninsula, with velocities ranging from 0.08 m/s to 0.09 m/s, and the direction is generally northward and northeastward. Affected by topography and monsoons, the Stokes drift in the Yellow Sea and Bohai Sea regions presents the characteristic of northward propagation along the coastline, which is closely related to the northward transport of floating objects on the sea surface. Under the influence of extreme weather such as typhoons, especially in the seas near the typhoon generation area, the Stokes drift velocity along the typhoon path increases by 1.5-2.3 times.

Key words: adjacent sea of China; Stokes drift velocity; ERA5 reanalysis data; spatiotemporal distribution characteristic

Stokes 漂流是波浪非线性的体现, 与朗缪尔环流及海表物质输运等密切相关^[1]。Stokes 漂流显著影响海洋上混合层的流场与温度场结构^[2], 在悬浮物短期输运及空间分布过程中起主导作用, 可为海洋物质输运相关研究提供重要参考^[3]。Stokes^[4]于 1847 年建立了 Stokes 漂流理论, 并给出了单频深水重力波的 Stokes 漂流表达式。近年来, 已有学者对全球表层 Stokes 漂流的季节和多年平均分布规律进行了研究。例如: 张晓爽等^[5]研究发现, 海面 Stokes 漂流呈现高纬度偏大的特征, 并以南极绕极流海域最为突出; 梁小力^[6]指出多年平均的表层 Stokes 漂流速度在赤道和南北纬 30°附近海域较小, 而在赤道外海和西风带附近海域较大, 全球大部分海域的表层 Stokes 漂流流速范围为 0.01~0.18 m/s; 肖林等^[7]基于 WAVEWATCH III 海浪模式模拟的海浪要素计算得到 Stokes 漂流, 发现全球范围内 Stokes 漂流整体呈带状分布, 强度表现为高纬度区域高于中低纬度地区; Li 等^[8]发现经向表面 Stokes 漂流与风浪高度相关, 且其在维持印度洋低纬度

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52271271); 江苏省自然科学基金杰出青年基金项目(BK20220082); 水利部重大科技项目(SKS-2022025)

作者简介: 王京富(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事水波动力学研究。E-mail: 211303020035@hhu.edu.cn

通信作者: 陶爱峰(1978—), 男, 教授, 博士, 主要从事水波动力学研究。E-mail: aftao@hhu.edu.cn

海域海表温度的稳定性方面发挥了积极作用;孙逊等^[9]分析了印度洋表面 Stokes 漂流与 IOD(Indian Ocean Dipole)事件的关系,发现印度洋纬向 Stokes 漂流的空间分布与风浪相似,受风带影响较大,而经向 Stokes 漂流则表现出了东边界强化的现象。但是目前的研究仅局限于对全球范围 Stokes 漂流季节性分布的大致描述,并且使用的数据时间跨度较短。

本文基于欧洲中期天气预报中心提供的 1980—2023 年 ECMWF Reanalysis v5(ERA5)再分析数据中较高分辨率的波浪数据^[10],计算并分析中国邻近海域 Stokes 漂流流速分布特性(包括流速大小和方向),并分析了该海域 Stokes 漂流的传递特性,以期提高对波浪非线性作用的认识,也为浒苔等海表物质输运预测提供科学支撑。

1 研究区概况

中国邻近海域包括渤海、黄海、东海、南海以及中国台湾岛东侧的西太平洋海域,本文研究区范围为 0°N~41.5°N、105°E~135°E。渤海为中国内海,面积约为 8 万 km²,平均水深 18 m,东面通过渤海海峡与黄海连通,可分为北部辽东湾、南部莱州湾、西部渤海湾、东部渤海海峡和中央海盆 5 个部分。黄海为半封闭的大陆架浅海,面积为 38 万 km²,平均水深 44 m。黄海的东南部通过济州海峡和朝鲜海峡与日本海相通。东海是比较开阔的边缘海,面积 77 万 km²,平均水深 340 m,由中国大陆、中国台湾岛、朝鲜半岛、日本九州和琉球群岛所围绕。南海面积约 350 万 km²,相当于渤海、黄海和东海总面积的 2.8 倍,平均水深 1 212 m。南海四周几乎被大陆和岛屿包围,北临我国广东、广西、海南和台湾,西临越南、柬埔寨、泰国、马来西亚和新加坡,东临菲律宾,南临苏门答腊岛、邦加岛以及马来西亚和文莱。

2 研究数据和研究方法

2.1 研究数据

ERA5 是欧洲中期天气预报中心推出的第五代再分析数据集,使用了 ECMWF 集合预报系统(Integrated Forecast System,IFS)中 CY41R2 的模型预报结果以及四维变分数据同化技术。相比于 ERA-Interim,ERA5 的水平和垂直分辨率显著提高,ERA5 还提供了更多的产品参数以及每小时的高分辨率产品,得到了国内外学者的认可和广泛运用。例如:殷妍等^[11]基于 ERA5 再分析数据,分析了 2017 年中国东部大陆架海域涌浪和混合浪波能流的时空分布特征,研究了该海域波能流的传递特性;刘威等^[12]利用 ERA5 再分析数据,分析了西非几内亚湾及邻近海域 1979—2020 年的能流密度空间分布、季节特征和多年变化趋势。

ERA5 可以提供较高精度的全球范围的波浪场数据,除了常见的天气变量外,也包括由耦合海浪模式提供的波向、波高、波周期等变量。本文使用 1980—2023 年的波浪场数据,其时间分辨率为 1 h,空间分辨率为 0.5°×0.5°,空间范围为 0°N~41.5°N、105°E~135°E,数据参数包括混合浪有效波高、平均波向、平均波周期。风场数据的时间分辨率为 1 h,空间分辨率为 0.25°×0.25°,数据参数包括 10 m 风 u 向分量和 10 m 风 v 向分量。

本文按照世界气象学会的定义划分季节:春季为 3—5 月;夏季为 6—8 月;秋季为 9—11 月;冬季为 12 月至翌年 2 月。

2.2 研究方法

对于单频深水重力波,在水平平均且无旋的条件下,Stokes 漂流流速 u_s 表达式为^[4]:

$$u_s = u_{s0} e^{2kz} \tag{1}$$

其中

$$u_{s0} = a^2 \sigma k K$$

式中: u_{s0} 为海洋表层 Stokes 漂流速度; a 为波振幅; σ 为波频率; k 为波数; z 为深度; K 为单位波速矢量。海洋表层 Stokes 漂流的计算主要分为两种方式:一是采用 Tamura 等^[13]的波浪谱积分方法,二是依托波浪参数通过参数化方程求解。由于 ERA5 再分析数据包含计算 Stokes 漂流流速所需的各项参数,因此本文选用波浪参数开展 Stokes 漂流流速计算。通过推导,可以得到用有效波高 H_s 、平均波周期 T 表示的 Stokes 漂流流速形式:

$$u_s = u_{s0} e^{8\pi^2 z / g T^2} \tag{2}$$

其中

$$u_{s0} = \frac{2\pi^3 H_s^2}{gT^3} K$$

式中: g 为重力加速度。

3 结果与分析

3.1 Stokes 漂流流速大小时空分布特征

波浪的 Stokes 漂流流速大小和风场密切相关。受亚澳季风系统调控,风场季节变化是影响 Stokes 漂流流速的主导尺度,故而风场季节内波动对其作用强于年际变化^[14]。本文采用 1980—2023 年 ERA5 再分析数据的混合浪波高、波周期资料,分析得到中国邻近海域 Stokes 漂流平均流速的季节分布特征;结合同期风场数据,进一步揭示了该海域平均风速的季节分布规律。

a. 中国邻近海域 Stokes 漂流流速大小呈明显的纬向分布和季节性分布特征。高纬度地区 Stokes 漂流流速大于中低纬度地区,接近赤道区域 Stokes 漂流流速大小逐渐减小至 0。综合分析表明,中国邻近海域风场季节性变化对 Stokes 漂流流速分布特征的影响明显,春季、夏季 Stokes 漂流流速总体较小,秋季、冬季流速较大。中国台湾海峡附近海域 Stokes 漂流流速随季节变化明显,黄渤海及南海海域四季变化不大。

b. 春季 Stokes 漂流流速大值区域主要集中在台湾海峡附近,大值区的流速范围为 0.07~0.08 m/s,这是由于春季中国邻近海域风速的大值区位于南海的北部,尤其以中国台湾海峡最大^[15],造成通过中国台湾海峡和朝鲜海峡的 Stokes 漂流流速最大。西太平洋海域虽然平均风速较大,波浪有效波高较大,达到 1.5~1.7 m,但是平均波周期也较长,达到 7.5 s,因此 Stokes 漂流流速数值较小,为 0.04~0.05 m/s。

c. 夏季 Stokes 漂流流速大值区域向西南部偏移,位于中南半岛的东南部,大值区的流速范围为 0.08~0.09 m/s。其他区域 Stokes 漂流流速较小,呈现随纬度和离岸距离减小而减小的特征。中国海夏季风速的大值区恰好位于中南半岛的东南部,与 Stokes 漂流流速大值区位置吻合。

d. 秋季 Stokes 漂流流速相较春夏两季总体有所增大,大值区域重新回到中国台湾海峡附近海域,最大值可达到 0.1 m/s。同时,巴士海峡附近海域 Stokes 漂流流速也有明显增大,数值可达 0.08~0.09 m/s。中国海在秋季处于季风过渡期,位于风速大值区的中国台湾海峡和巴士海峡已经完成季风的转换,风速的大值区分布在中国台湾海峡和台湾周边,其他海域如黄渤海以北、东海以北和南海南部海域的风速较小。

e. 冬季 Stokes 漂流流速分布与秋季十分相似,但整体数值稍有增大,大值区域中国台湾海峡和朝鲜海峡附近数值可达 0.13 m/s,中南半岛的东南部数值可达 0.08 m/s,日本海海域数值可达 0.08~0.09 m/s。冬季,整个中国海风速的大值区为东北—西南走向,南海有两个风速的极值区,一个在中国台湾海峡、中国台湾岛、菲律宾岛中间区域,一个在传统的南海大风区即中南半岛的东南区域。日本海秋冬两季均盛行西北风,但冬季风场强度大于秋季^[16],因此冬季 Stokes 漂流流速也略大于秋季。

3.2 Stokes 漂流流速方向时空分布特征

Stokes 漂流对海洋中的物质输移扩散和海岸地形演变具有重要作用^[17],因此研究 Stokes 漂流在一定时间范围内的传播方向,有助于了解海表漂浮物的扩散途径。基于 ERA5 再分析数据中的波浪方向数据,分析得到 1980—2023 年 Stokes 漂流平均流速矢量的四季分布情况。

除夏季外,中国邻近海域 Stokes 漂流流速方向总体为南向和西南向,夏季 Stokes 漂流流速方向总体为北向和东北向。局部海域如黄渤海部分区域受到地形和季节影响,Stokes 漂流会呈现出向近岸传播的特征。结合不同季节的中国邻近海域风场平均风速分布情况可以发现:①春季,南海、西太平洋和东海南部海域的 Stokes 漂流方向总体为西南向。东海北部受地形影响,部分 Stokes 漂流流速方向发生偏转,向近岸传播。这是由于春季中国邻近海域以东北风和东风为主,中国台湾海峡盛行东北风,南海北部、北部湾以东风为主,南海中部和南部仍然以东北风为主。除去地形条件影响外,Stokes 漂流流速方向与风场对应关系良好。②夏季,中国邻近海域 Stokes 漂流流速方向发生偏转。南海 Stokes 漂流流速方向由春季的西南向转变为东北向,东海、黄海和渤海海域的 Stokes 漂流流速方向变为北向,向岸传播。山东、江苏邻近海域的 Stokes 漂流整体沿海岸线向北,显著影响海表流场的季节演变,同时表层漂浮物的北向输运过程也会对区域生态环境产生一定影响。中国邻近海域夏季整体被西南季风控制,绝大部分海域为西南风和南风^[15],因此 Stokes 漂流流速方向与风向比较吻合。③秋季,南海和东海的 Stokes 漂流流速方向分布与春季比较相似,总体为西南向。在

黄渤海海域,Stokes 漂流流速方向仍为南向,并没有发生偏转,产生向近岸传播的 Stokes 漂流。中国邻近海域在秋季处于季风过渡期,整个海域的风向分布杂乱。中国台湾海峡和巴士海峡已经完成季风的转换,以东北风为主。其他海域如黄渤海以北以西北风为主,东海以北以东北风为主,而南海南部的西南风尚未完全消退^[18]。④冬季,中国邻近海域 Stokes 漂流流速方向分布与秋季十分相似,总体为西南向,仅在南海南部海域有细微差异,该海域 Stokes 漂流流速方向由秋季的东南向和西南向并存转变为西南向,这是由于该海域在冬季受到强大的东北信风控制,Stokes 漂流流速方向与风场对应关系良好。

3.3 典型台风条件下 Stokes 漂流流速分布特征

在台风这种极端气象条件影响下,Stokes 漂流流速的分布和传播特性会发生较大变化。本文以 2014 年第 10 号台风“麦德姆”为例,分析极端天气影响下的 Stokes 漂流流速分布特性。

台风“麦德姆”(强台风级)于 7 月 18 日 2 时在西北太平洋洋面生成,生成后稳定向西北方向移动,23 日 0 时 15 分在中国台湾省台县长滨乡沿海登陆,登陆时强度为强台风,中心附近最大风力 14 级(42 m/s);23 日 15 时 30 分在福建省福清市高山镇沿海再次登陆,登陆时强度减弱为强热带风暴,中心最大风力 11 级(30 m/s);登陆后西行,24 日 1 时在三明市尤溪转向偏北方向移动,24 日 8 时在武夷山境内减弱为热带风暴,之后进入江西继续北上;25 日 18 时在山东威海再次入海,强度为热带风暴级^[19]。

基于台风“麦德姆”期间的 ERA5 再分析数据,分析得到中国邻近海域 Stokes 漂流流速数值分布。此次台风期间正值夏季,通过和 1980—2023 年平均 Stokes 漂流流速夏季分布对比,可以发现台风对 Stokes 漂流流速的大小和方向均会产生较大影响。

沿台风“麦德姆”路径,Stokes 漂流流速可达到 0.07~0.08m/s,较夏季正常天气条件下 0.04 m/s 的流速有明显增大,方向与台风行进路径方向一致。在台风生成附近海域,Stokes 漂流流速均值达到 0.1 m/s,时间持续 2~3 d,整体方向由西北向变为东向;正常天气条件下,该海域的 Stokes 漂流速度仅为 0.03~0.04 m/s,增大了 1.5~2.3 倍。受台风强度和行进路径影响,波浪的非线性作用显著增强,导致 Stokes 漂流流速有明显增大,对波浪引起的物质输运产生重要影响。

4 结 论

a. 中国邻近海域 Stokes 漂流流速大小呈明显的纬向分布和季节性分布特征,接近赤道区域 Stokes 漂流流速大小逐渐减小至 0。除夏季外,Stokes 漂流流速大值区均位于台湾海峡附近海域,平均流速可以达到 0.1 m/s。夏季 Stokes 漂流流速大值区域向西南部偏移,位于中南半岛的东南部,大值区的流速范围为 0.08~0.09 m/s。

b. 除夏季外,中国邻近海域 Stokes 漂流流速方向总体为南向和西南向,夏季总体为北向和东北向。局部海域如黄渤海部分区域受到地形和季节影响,Stokes 漂流会呈现出向近岸传播的特征。

c. 2014 年第 10 号台风“麦德姆”影响下,台风路径上的 Stokes 漂流流速增大至 0.07~0.08 m/s,与正常天气条件下的漂流流速增大了 1.5~2.3 倍。尤其是在台风生成处附近海域,Stokes 漂流流速的大小可达到 0.1 m/s,方向由西北向变为东向。

参考文献:

[1] Langmuir I. Surface motion of water induced by wind[J]. Science,1938,87(2250):119-123.
[2] 仇颖. 不同 Stokes 漂流公式选取对模拟海洋上层 Langmuir 环流影响的大涡模拟研究[D]. 杭州:浙江大学,2019.
[3] 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))
[4] Stokes G G. On the theory of oscillatory waves. Appendix B: consideration relative to the greatest height of oscillatory irrotational waves which can be propagated without change of form[J]. Mathematical and Physical Papers, 1880, 1: 225-228.
[5] 张晓爽,王智峰,王斌,等. 全球 Stokes 漂流的时空分布特征研究[J]. 海洋科学,2015,39(1):93-103. (Zhang Xiaoshuang, Wang Zhifeng, Wang Bin, et al. Research on spatio-temporal characteristics of global Stokes drift in the ocean[J]. Marine Sciences, 2015, 39(1): 93-103. (in Chinese))
[6] 梁小力. UMWM 模式在全球海浪数值模拟及海气界面通量研究中的应用[D]. 北京:国家海洋环境预报中心,2016.

[7] 肖林,史剑,蒋国荣,等. Stokes 漂流对全球海表面温度模拟的影响[J]. 海洋通报,2018,37(1):55-62. (Xiao Lin, Shi Jian, Jiang Guorong, et al. The influence of Stokes-drift on the global sea surface temperature in the simulation[J]. Marine Science Bulletin, 2018, 37(1):55-62. (in Chinese))

[8] Li Rui, Wu Kejian, Li Jingkai, et al. Relating a large-scale variation of waves in the Indian Ocean to the IOD[J]. Journal of Geophysical Research:Oceans, 2022, 127(10):281-294.

[9] 孙逊,吴克俭,李瑞,等. 印度洋表面 Stokes 漂流对 IOD 事件的影响分析[J]. 海洋科学进展,2023,41(3):384-396. (Sun Xun, Wu Kejian, Li Rui, et al. Analysis of the effects of surface Stokes drift in the Indian Ocean on IOD events[J]. Advances in Marine Science, 2023, 41(3):384-396. (in Chinese))

[10] Shi Hongyuan, Cao Xuefeng, Li Qingjie, et al. Evaluating the accuracy of ERA5 wave reanalysis in the water around China[J]. Journal of Ocean University of China, 2021, 20(1):1-9.

[11] 殷妍,邓夕贵,王慧,等. 中国东部大陆架海域波能流特性研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(3):96-103. (Yin Yan, Deng Xigui, Wang Hui, et al. Characteristic study of wave energy flux in the continental shelf of eastern China[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(3):96-103. (in Chinese))

[12] 刘威,王广生,时健. 基于 ERA5 的几内亚湾及邻近海域波浪能空间分布和变化趋势[J]. 海岸工程,2023,42(3):253-262. (Liu Wei, Wang Guangsheng, Shi Jian. Spatial distribution and changing trends of wave energy in the gulf of Guinea based on ERA5[J]. Coastal Engineering, 2023, 42(3):253-262. (in Chinese))

[13] Tamura H, Miyazawa Y, Oey L Y. The Stokes drift and wave induced-mass flux in the North Pacific[J]. Journal of Geophysical Research-Oceans, 2012, 117:C08021.

[14] 林刚. 南中国海风场和海浪场统计分析及其应用[D]. 大连:大连理工大学,2019.

[15] 林刚,郑崇伟,邵龙潭,等. 南中国海海表风速长期变化趋势[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版),2013,14(6):704-708. (Lin Gang, Zheng Chongwei, Shao Longtan, et al. Long term linear trend of sea surface wind speed in the South China Sea [J]. Journal of Army Engineering University of PLA, 2013, 14(6):704-708. (in Chinese))

[16] 王天顺,刘玉光,荣增瑞. 近 30 年日本海热容海平面年际变化及其对 ENSO 的响应[J]. 海洋与湖沼,2010,41(4):614-620. (Wang Tianshun, Liu Yuguang, Rong Zengrui. Interannual variability of the thermosteric sea level in the Japan/East Sea and its response to El Niño and Southern Oscillation over the last 30-year[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2010, 41(4):614-620. (in Chinese))

[17] 闫圣,邹志利. 波浪场中浓度输移扩散 Stokes 漂移效应的欧拉描述[J]. 海洋通报,2017,36(4):416-423. (Yan Sheng, Zou Zhili. Eulerian description of wave-induced Stokes drift effect on the advective diffusion of tracer concentration[J]. Marine Science Bulletin, 2017, 36(4):416-423. (in Chinese))

[18] 耿殿鹏,郑崇伟,贾本凯. 中国海海表风场特征及资料现状[J]. 科技创新导报,2012(32):256. (Geng Dianpeng, Zheng Chongwei, Jia Benkai. Characteristics and current status of surface wind field in the China Sea [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2012(32):256. (in Chinese))

[19] 王晓芙,尹烈,郑美秀,等. 1410 号台风“麦德姆”气象服务分析[C]//中国气象学会. 第 32 届中国气象学会年会论文集. 天津:中国气象学会,2015:97-102.

(收稿日期:2024-11-13 编辑:刘晓艳)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.04.004

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

孙铨萌¹, 秦川¹, 唐颖¹, 赵紫璇², 姜安妮³

(1. 河海大学电气与动力工程学院; 2. 国网江苏省电力有限公司淮安供电分公司;
3. 国网江苏省电力有限公司仪征市供电分公司)

摘要: 针对海洋能发电的强随机波动性, 计算了波浪能和潮流能发电功率的幅值稳定性、持续时间稳定性和变异系数等指标, 基于功率特性指标形成的特征向量对海洋能发电功率时序数据进行降维聚类, 得到了海洋能发电典型出力场景; 以消纳率最优为目标, 构建了海洋能发电容量优化配置模型并转换为线性规划问题求解。基于实际数据的算例结果表明, 基于功率特性指标的降维聚类方法可实现海洋能发电场景简约, 功率特性指标聚类后的优化配置结果与实测出力数据场景基本一致, 验证了优化配置模型的有效性。

关键词: 波浪能; 潮流能; 特性指标聚类; 能发电场景简约; 容量优化配置

Simplification of ocean energy power generation scenarios and optimal capacity allocation based on characteristic index clustering

Sun Yimeng¹, Qin Chuan¹, Tang Ying¹, Zhao Zixuan², Jiang Anni³

(1. College of Electrical and Power Engineering, Hohai University;
2. State Grid Jiangsu Power Supply Company Huai'an Power Supply Branch;
3. State Grid Jiangsu Power Supply Company Yizheng Power Supply Branch)

Abstract: Aiming at the strong random volatility of ocean energy generation, power characteristic indexes, including amplitude stability, duration stability, and the coefficient of variation, were calculated for wave and tidal current power generation. A feature vector constructed from these power characteristic indexes was then used to perform dimensionality reduction and clustering of the time-series data of ocean energy generation power, thereby obtaining typical output scenarios of ocean energy generation. With the goal of optimizing the consumption rate, a model for optimizing the allocation of ocean energy generation capacity is constructed and transformed into a linear programming problem for solution. The calculation results based on actual data show that the optimized configuration results after clustering of characteristic indicators are basically consistent with the measured output data scenario, which verifies the effectiveness of the method.

Key words: wave energy; tidal current energy; characteristic indexes clustering; power generation scenario simplification; optimal allocation of capacity

中国海岸线漫长, 海洋能资源储量丰富^[1-6]。根据 2020 年国家海洋技术中心《中国海洋可再生能源发展年度报告》, 中国近海海洋能资源蕴藏量约为 16.7 亿 kW, 海洋能电站可装机容量达 8.1MW。中国沿海岛屿众多, 多数海岛存在化石燃料紧缺、难以与大陆联网等问题^[7-9], 近百万海岛居民长期处于缺电、少电状态。因此, 针对海岛用电需求与海岛电网特点, 合理开发海洋能发电资源, 既可有效缓解海岛一次能源短缺的问题, 实现海岛的开发建设, 也有利于保护海洋生态环境, 促进区域节能减排^[10-13]。

海洋能发电功率具有较强的随机波动性, 因此, 在海洋能资源优化配置过程中, 需对其发电典型出力场景进行分析。场景分析方法主要包括: ①场景生成。根据统计特征或概率分布进行抽样, 获得尽可能准确描述场景随机性和波动性的大量场景, 主要有蒙特卡罗洛抽样法、拉丁超立方抽样法、ARMA 误差模型法、场景树法、非参数的概率预测法、对抗生成网络法等。②场景缩减。通过提取场景关键特征, 减少周期内的相似场景, 以降低计算复杂度。要金铭等^[14]采用改进的 K-means 聚类算法, 将大量原始场景分成不同的类簇, 并

作者简介: 孙铨萌(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事波浪能发电系统控制理论研究。E-mail: 3299592280@qq.com

通信作者: 秦川(1981—), 男, 副教授, 博士, 主要从事广域电力系统建模、可再生能源发电系统控制理论研究。E-mail: cqin@hhu.edu.cn

利用考虑 Kantorovich 距离的同步回代缩减算法,将每个类簇内的场景集缩减为唯一的典型场景;王戌洁^[15]采用混合度量改进的 K -means 聚类算法判定聚类数与聚类中心,完成风电出力聚类并构建典型场景;闫晔^[16]围绕风电不确定性展开分析,采用基于粒子群的核极限学习机模型预测风功率区间,基于随机抽样法选取场景以处理风功率的不确定性,再通过二分 K -means 聚类算法优选典型场景以减小计算量。

在资源优化配置方面,目前研究多集中于风电、光伏、储能等能源类型。王晰等^[17]以投资收益最大化为目标,构建水下抽水蓄能(UPHS)容量优化配置模型,结合算例风速条件,求解风电机组与水下储能的最优容量及实时出力方案;田雪沁等^[18]以内层产氢量最大为目标,优化典型日各时刻的电解槽串、并联运行结构,外层以规划周期收益最高为目标,得到容量配置结果,并提出基于改进遗传算法的 PVE 直接耦合系统双层容量优化配置方法;端木陈睿等^[19]采用三电池组分组控制的电化学储能运行策略,建立了多时间尺度嵌套的双层储能容量优化配置模型。相较而言,针对波浪能、潮流能的发电资源优化配置研究较为有限,其中崔杨等^[20]采用高斯混合模型生成海洋能发电的出力场景,并进行了海洋能资源的优化配置。

针对海洋能发电功率的强随机波动性,本文采用发电功率的幅值稳定性、持续时间稳定性和变异系数 3 个特性指标^[21]对海洋能发电的功率时序数据开展降维聚类分析,得到海洋能的典型出力场景;以海岛电网为研究对象,以消纳率最优为目标构建海洋能发电容量优化配置模型,并将模型转化为线性规划问题求解,以确定最优容量配置方案。

1 海洋能发电功率计算

1.1 波浪能发电

以某型号摆式波浪能转换器为样本,该转换器输出波浪发电功率为^[22]:

$$P = \eta B \frac{\rho g^2}{32\pi} H^2 T' \approx \eta B H_{1/3}^2 T'_{1/3} \quad (1)$$

式中: P 为输出功率; B 为转换器的摆宽,本文取 5 m; ρ 为海水密度; H 为波高; T' 为波周期; g 为重力加速度; $H_{1/3}$ 为有效波高; $T'_{1/3}$ 为有效波周期; η 为转换效率,本文取 0.441。

1.2 潮流能发电

潮流能发电装置的输出功率可以表示为^[23]:

$$P_t = \begin{cases} 0 & v < 0.5 \\ \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p & 0.5 \leq v \leq 1.5 \\ \frac{1}{2} \rho A C_p \times 1.5^3 & v > 1.5 \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_t 为潮流能发电功率; v 为潮流流速; A 为水轮机叶片面积,选取叶片直径为 10 m; C_p 为潮流能利用系数,取 0.31。潮流可发电流速上、下界分别为 1.5、0.5 m/s。装置参数设置如下:摆式波浪能转换器使用寿命为 20 a,额定容量为 40 kW;潮流能发电装置使用寿命为 20 a,额定容量为 100 kW。

2 海洋能发电功率特性指标

波浪能与潮流能都具有较强的随机波动性,直接基于功率时序数据聚类生成典型出力场景效果较差。因此,从发电功率稳定性角度出发,采用幅值稳定性、持续时间稳定性和变异系数对波浪能与潮流能发电的功率时序数据进行特征提取,再进行聚类分析,进而得出典型时序出力场景集合。

a. 幅值稳定性:为周期内发电功率标准化后的最大值与最小值之差,可理解为周期内发电功率振荡值的大小。

b. 持续时间稳定性:指发电持续时间稳定性值的大小,可理解为周期内发电功率振荡次数。对发电功率标准化处理后,功率会在零点上下波动。为了量化该指标值,定义持续时间稳定性为发电功率在标准化处理后经过零点的个数。

c. 变异系数:反映发电功率离散程度的大小。

3 基于特性指标聚类的海洋能发电典型场景简约

选择基于划分的 K (聚类数)均值聚类算法提取场景特征^[24],对提取的大量场景进行缩减,筛选得出典型出力场景。由于波浪出力具有极强的随机性与波动性,直接依据发电功率时序聚类生成典型出力场景效果并不理想。因此先对发电功率时序数据进行特征提取,根据海洋能发电功率的 3 个特性指标构建特征向量,再进行 K -means 聚类分析,最终得到典型时序出力场景。

最佳聚类数的确定是聚类算法研究的难点及重点之一, K -means 聚类算法需在聚类前人为设定 K ;而在数据集标签未知时,仅能依据经验估算 K ,所得结果不具说服力且因人而异。因此,采用如下聚类评价指标^[24]选择最佳聚类数:①CHI 指标,该指标值越大,聚类效果越好;②DBI 指标,该指标值越小,聚类效果越好;③轮廓系数 s_i ,取值介于 $-1 \sim 1$, s_i 越接近 1,对样本 i 的聚类越合理, s_i 越接近 -1 ,对样本 i 的聚类越不合理;④KL 散度,其值越大,说明类间相似度越低,聚类效果越好;⑤Hart 指标,小于等于 10 的该指标最小值所对应的 K 值为最佳聚类数;⑥Wint 指标,同时考虑类内与类间聚类效果,其值越大,聚类效果越好;⑦紧密型分散性综合指标,同一类内的数据距离越近,不同类的中心距离越远,效果越好。

确定聚类评价指标后,对海洋能发电功率特性指标数据集进行多次重复聚类,每次均采用“拐点法”^[25]确定各聚类评价指标对应的最优聚类数;最后统计多次聚类结果,选取最多聚类评价指标共同对应的 K ,作为最终 K 。

确定最优聚类数并完成聚类后,所得聚类中心即为海洋能发电功率的典型出力场景,总体流程如图 1 所示。在此基础上,以各聚类中心替代该类各日发电功率时序数据,即可获得基于典型出力场景代替的海洋能发电功率时序数据,以应用于后续的资源优化配置研究。

4 基于消纳率最优的海洋能发电容量配置

4.1 优化配置方法

现有研究中,新能源微电网规划多以综合成本最优为目标进行资源优化配置。然而,海洋能发电开发利用的关键在于解决其消纳问题。因此,针对难以与陆地电网互联的海岛电网,本文以消纳率最优为目标,建立海洋能发电容量优化配置模型。

在配置与评估过程中,需要综合考量消纳率、渗透率和源荷匹配度^[26]3 项容量优化配置指标。其中,消纳率指能源计划出力占其实际出力的比值,表征计划出力与理论出力的接近程度;渗透率指能源计划出力占负荷的比值,反映新能源出力对负荷的供给水平;源荷匹配度则为理论总出力落在负荷上下特定区间的概率,表征了理论出力与用能需求的贴近程度。在进行资源优化配置时,不仅需要考虑消纳率最优,同时也需要结合渗透率与源荷匹配度进行综合分析,保证配置方案的可行性。

4.2 目标函数

以消纳率最优为目标,可表示为:

$$\max \left(\frac{\sum_{t=1}^T (N_w P_{w,t} + N_c P_{c,t})}{\sum_{t=1}^T (N_w P_{wt,t} + N_c P_{ct,t})} \right) \tag{3}$$

式中: N_w 、 N_c 分别为波浪能与潮流能发电机组数; $P_{w,t}$ 、 $P_{c,t}$ 分别为波浪和潮流在 t 时刻的计划出力; $P_{wt,t}$ 、 $P_{ct,t}$ 分别为波浪和潮流在 t 时刻的理论出力; T 为总时间。

4.3 约束条件

a. 功率平衡约束。假设电网中,仅当新能源出力小于负荷时由其他电源或外网平衡系统功率缺额,因

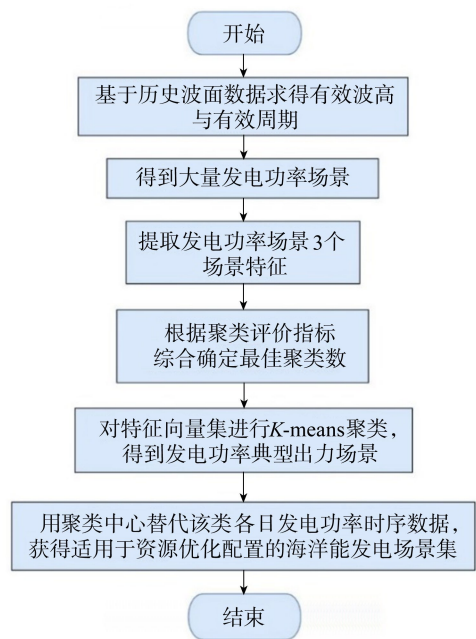


图 1 典型出力场景生成流程
Fig. 1 Implementation flow chart of typical scenarios

此任意时刻新能源总出力均不大于负荷。

b. 新能源出力约束。新能源理论出力是其计划出力的上限,因此每个时刻新能源计划出力均必须不大于理论出力。

c. 新能源渗透率。为提高系统的发电清洁性以及新能源场站的收益,要求新能源渗透率不低于某设定值。

4.4 函数求解

式(3)中,若以波浪能和潮流能的发电机组数(N_w 、 N_c)计划出力($N_w P_{w,t}$ 、 $N_c P_{c,t}$)作为决策变量,优化约束条件为线性约束,目标函数为决策变量的线性分式形式,则模型求解属于混合整数线性分式规划问题。通过变量代换将该分式规划转换为线性分式规划,借助 YALMIP 工具与 CPLEX 求解器,求得原问题的最优解。

使用 Charnes-Cooper 法,将以下非线性分式规划问题转为线性分式规划问题:

$$\left. \begin{aligned} &\min \left(\frac{\mathbf{p}^T \mathbf{x} + \alpha}{\mathbf{q}^T \mathbf{x} + \beta} \right) \\ &\text{s. t. } \begin{cases} \mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b} \\ \mathbf{x} \geq \mathbf{0} \\ \mathbf{q}^T \mathbf{x} + \beta > 0 \end{cases} \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

式中: $\mathbf{x}$ 为需要求解的优化变量向量; $\mathbf{p}$ 、 $\mathbf{q}$ 分别为分子、分母的系数向量; α 、 β 分别为分子、分母的常数项, $\mathbf{A}$ 为约束矩阵; $\mathbf{b}$ 为约束右端向量。对于任意满足约束条件的 $\mathbf{x}$ 均有 $\mathbf{q}^T \mathbf{x} + \beta > 0$,可作变量代换 $t = 1/(\mathbf{q}^T \mathbf{x} + \beta)$ 、 $\mathbf{y} = t\mathbf{x}$,则式(4)变为:

$$\left. \begin{aligned} &\min(\mathbf{p}^T \mathbf{y} + \alpha) \\ &\text{s. t. } \begin{cases} \mathbf{A}\mathbf{y} - \mathbf{b}t = \mathbf{0} \\ \mathbf{q}^T \mathbf{x} + \beta t = 1 \\ \mathbf{y} \geq \mathbf{0}, t \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

变换后的规划问题为线性规划问题,可采用线性规划算法得到其最优解($\mathbf{y}, t$),进而计算原线性分式规划的最优解 $\mathbf{x} = \mathbf{y}/t$ 。

因此,按照 Charnes-Cooper 法进行变量代换,令:

$$z = 1 / \sum_{t=1}^T (N_w P_{wt,t} + N_c P_{ct,t}) \tag{6}$$

则:

$$\begin{cases} P'_{w,t} = N_w P_{wt,t} z \\ P'_{c,t} = N_c P_{ct,t} z \end{cases} \tag{7}$$

$$\begin{cases} N'_{w,t} = N_w z \\ N'_{c,t} = N_c z \end{cases} \tag{8}$$

式中: $P'_{w,t}$ 、 $P'_{c,t}$ 分别为经 Charnes-Cooper 法变换后的波浪能和潮流能计划出力; $N'_{w,t}$ 、 $N'_{c,t}$ 分别为经 Charnes-Cooper 法变换后的波浪能和潮流能机组数。

此时目标函数以及约束条件表达式如下:

$$\left. \begin{aligned} &\max \sum_{t=1}^T (P'_{w,t} + P'_{c,t}) \\ &\text{s. t. } \begin{cases} \sum_{t=1}^T (P'_{w,t} + P'_{c,t}) \leq P_{load,t} z \\ P'_{w,t} \leq N'_{w,t} P_{wt,t} \\ P'_{c,t} \leq N'_{c,t} P_{ct,t} \\ \sum_{t=1}^T (P'_{w,t} + P'_{c,t}) \leq \alpha \sum_{t=1}^T P_{load,t} z \end{cases} \end{aligned} \right\} \tag{9}$$

式中: $P_{load,t}$ 为 t 时刻海岛电网负荷有功功率; α 为新能源渗透率要求。

现在需要解决一个线性分式规划问题,使用 YALMIP 和 CPLEX 求解器求解得到 N'_w 、 N'_c ,通过式(10)求出对应的波浪和潮流发电机组数,求出配置容量:

$$\begin{cases} N_w = N'_w/z \\ N_c = N'_c/z \end{cases}$$

(10)

5 算例分析

5.1 算例概况

以我国东海某海岛供电场景作为仿真算例。该海岛所在海域全年实测波浪有效波高见图 2,实测潮流流速数据见图 3,海岛全年负荷数据见图 4。该海岛用电高峰集中在夏季与冬季,用电低谷出现在秋季;夏、冬季最大用电负荷为 3.6 MW,用电高峰期最小负荷为 2.25 MW;秋季最大负荷为 0.8 MW,最小负荷为 0.2 MW。

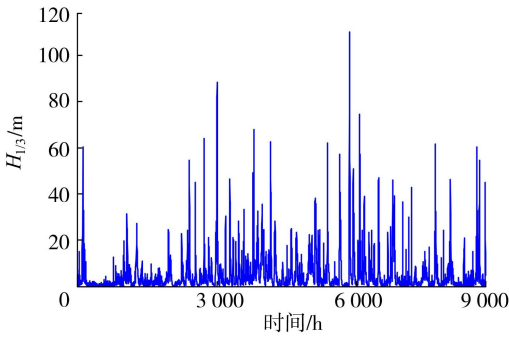


图 2 全年实测波浪有效波高

Fig. 2 Annual effective wave height

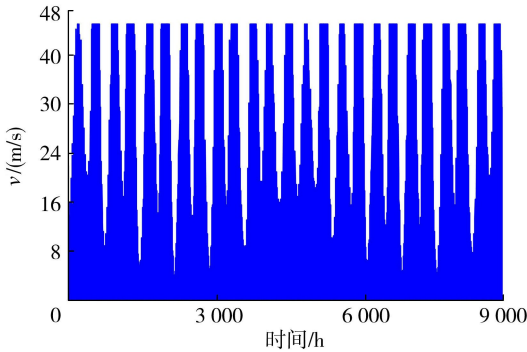


图 3 全年实测潮流流速

Fig. 3 Annual current velocity

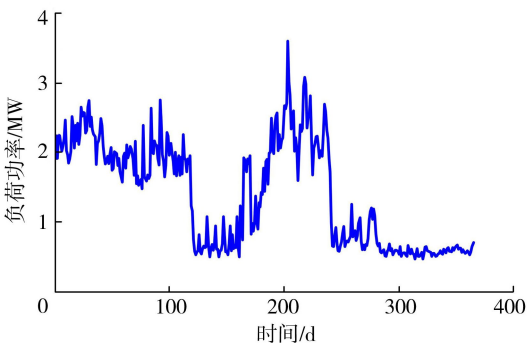


图 4 全年负荷

Fig. 4 Annual load data

5.2 发电功率特性指标聚类结果

5.2.1 波浪能发电

对波浪能发电功率的幅值稳定性、持续时间稳定性及变异系数 3 个特性指标数据集进行 50 次聚类,根据聚类评价指标随 K 的变化曲线,寻找其最优对应的曲线极值点处的 K 值作为最佳聚类数,得到各聚类评价指标最佳聚类数占比情况如表 1 所示。

表 1 波浪能发电各聚类评价指标最佳聚类数占比

Table 1 Proportion of optimal clustering numbers for each clustering evaluation index of wave power generation

指标	最佳聚类数占比/%						最终聚类数/个
	2	3	4	5	6	>7	
CHI 指标	0	84	2	2	2	10	3
DBI 指标	100	0	0	0	0	0	2
轮廓系数	0	4	20	44	14	18	5
KL 散度	0	16	52	14	2	16	4
Hart 指标	10	72	18	0	0	0	3
Wint 指标	2	22	24	34	10	8	5
紧密型分散性综合指标	0	4	28	42	16	8	5

综合分析各聚类评价指标对应的最佳聚类数可知,轮廓系数、Wint 指标和紧密型分散性综合指标指向的最佳聚类数均为 5,因此最终选取 $K=5$ 。对特征向量数据集进行 $K=5$ 的聚类数均值聚类分析,聚类中心与聚类结果分别见图 5 和图 6。可见,5 个聚类中心反映了波浪能日发电功率数据的典型波动规律与出力水平。其中,聚类中心 2 功率量级最大,聚类中心 5 波动较为频繁,但功率量级较小,其余 3 个聚类中心均呈现各自独立的出力波动特征。

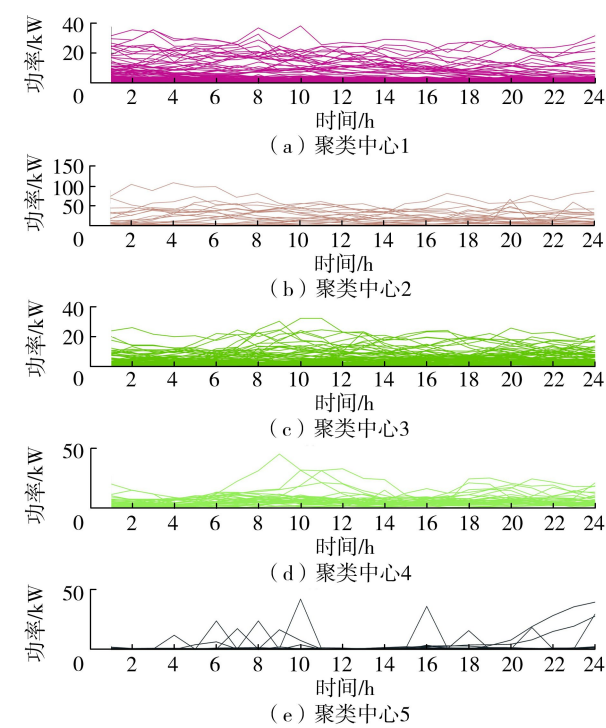


图 5 波浪能发电典型场景

Fig. 5 Wave power generation typical scenarios

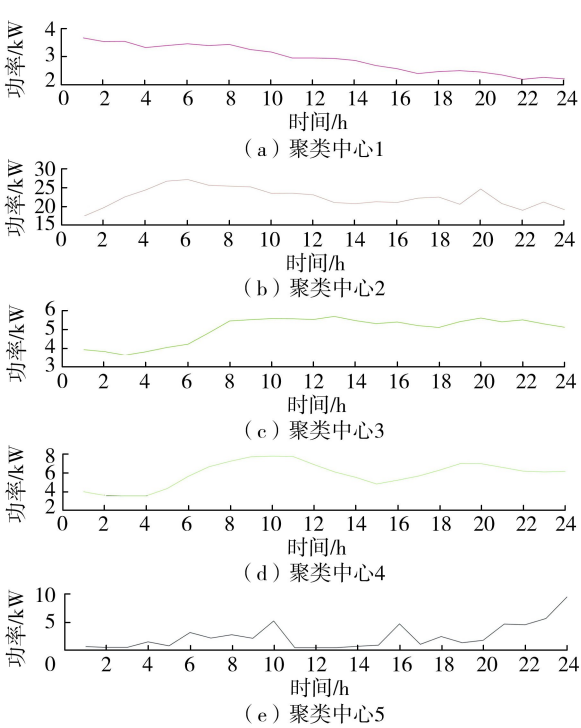


图 6 波浪能发电聚类结果

Fig. 6 Clustering results of wave power generation

5.2.2 潮流能发电

对潮流能发电功率幅值稳定性、持续时间稳定性及变异系数 3 个特性指标数据集重复进行 50 次试验,得到各聚类评价指标最佳聚类占比情况如表 2 所示。

表 2 潮流能发电各聚类评价指标最佳聚类数占比

Table 2 Proportion of optimal clustering numbers for each clustering evaluation index of tidal current power generation

指标	最佳聚类数占比/%						最终聚类数/个
	2	3	4	5	6	>7	
轮廓系数	100	0	0	0	0	0	2
DBI 指标	44	4	48	4	0	0	4
CHI 指标	0	0	0	4	0	96	7
KL 散度	68	0	0	4	0	8	2
Hart 指标	36	20	32	12	0	0	2
Wint 指标	0	36	28	20	8	4	3
紧密型分散性综合指标	100	0	0	0	0	0	2

综合分析表 2 中各聚类评价指标对应的最佳聚类数,根据轮廓系数、KL 散度、Hart 指标和紧密型分散性综合指标指向的最佳聚类数均为 2,选取 $K=2$,由此获得潮流能发电的聚类中心及聚类结果,分别见图 7 和图 8。可见潮流能功率变化的相对规律,两个聚类中心功率量级不同,可能分别对应大小潮差。

5.3 优化配置结果分析

以研究区海岛全年的实际负荷数据作为用电场景,波浪能与潮流能发电场景分别采用全年实测数据计算得到的时序出力曲线(实测出力数据场景)和基于特性指标聚类生成的典型出力场景(以各聚类中心替代对应类别逐日发电功率时序数据),基于消纳率最优的海洋能发电容量优化配置模型,开展海岛电网海洋能发电容量优化配置。

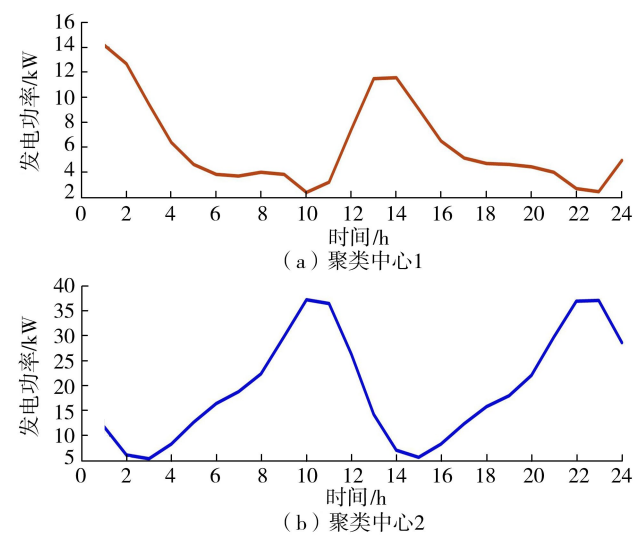


图 7 潮流能发电典型出力场景

Fig. 7 Typical scenarios of tidal current power generation

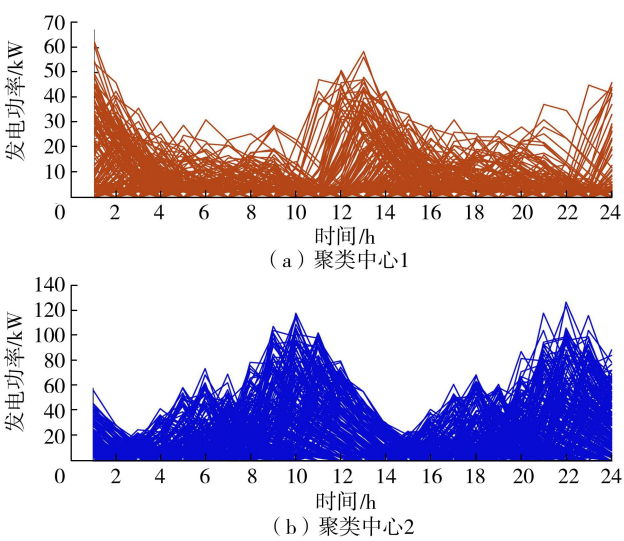


图 8 潮流能发电聚类结果

Fig. 8 Clustering results of tidal current power generation

由于渗透率取值不同,对应的资源优化配置结果存在差异。图 9 为实测出力数据消纳率、聚类数据消纳率和源荷匹配度随渗透率变化的关系曲线。为便于对比,图中消纳率和源荷匹配度均进行了归一化处理;计算源荷匹配度指标时,范围系数 γ 取 0.6。

由图 9 可以看出,随着渗透率逐步增大,消纳率逐渐下降,源荷匹配度则表现为先上升后下降。当渗透率为 0.6 时,源荷匹配度达到最大值 0.430 7,此时实测出力数据的消纳率为 0.549 9,聚类数据消纳率为 0.620 8;当渗透率增至 0.8 时,源荷匹配度降至 0.353 2,实测出力数据的消纳率为 0.292 0,聚类数据的消纳率为 0.472 2。可见,随着渗透率的增大,源荷匹配度反而降低,此时需要更多的常规发电机组或大陆联网供电。因此,在进行海洋能资源优化配置时,选择渗透率在 0.5~0.6 之间,可获得最优源荷匹配效果。

进一步以实测出力数据场景为例,图 10 为不同 γ 的源荷匹配度随渗透率变化曲线。可见,当 $0.2 < \gamma < 0.6$ 时,源荷匹配度均在渗透率约为 0.6 时最大,此时理论出力与负荷贴合程度最高;当 $0.6 < \gamma < 0.8$ 时,源荷匹配度在渗透率为 0.5~0.6 时最大,进一步验证了渗透率最优取值区间的合理性。表 3 为不同渗透率约束下源荷匹配度和消纳率的变化情况。可以看出,随着渗透率约束的增大,实测出力数据场景与典型出力场景下的消纳率均呈下降趋势,而源荷匹配度呈先增大后减小的变化特征。

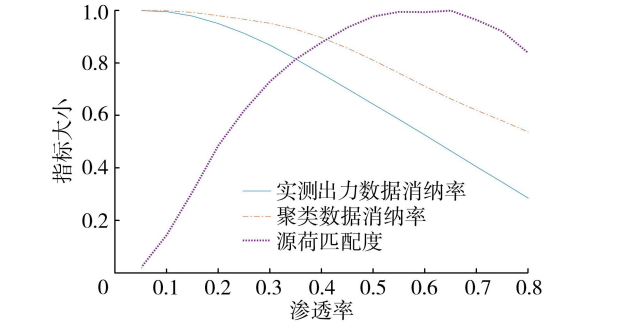


图 9 容量优化配置指标随渗透率变化曲线

Fig. 9 Curves of capacity optimal allocation indicators varying with penetration rate

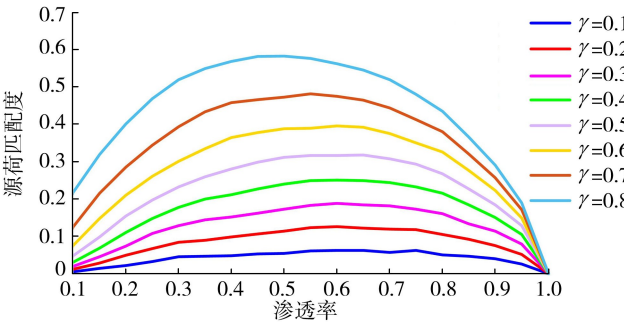


图 10 源荷匹配度随渗透率变化曲线

Fig. 10 Curve of source-load matching degree with penetration rate

综上,为了实现海洋能资源的充分利用,实现出力与海岛负荷最优匹配,宜将渗透率设定为 0.5~0.6,此时资源优化配置结果如表 4 所示。由表 4 可见:①渗透率取 0.6 时,两种场景下海洋能资源配置结果差异最大,波浪能、潮流能发电容量配置差异分别为 440、400 kW。但总体而言,渗透率在 0.5~0.6 时,两种场景的优化配置结果相差不大,且随渗透率变化的趋势一致。②不同渗透率下,实测出力数据场景的波浪能配置容量均略大于典型出力场景,潮流能配置容量略小于典型出力场景,其主要原因在于典型出力场景与实测出力数据场景之间存在一定的差异。渗透率越大,资源优化配置对典型出力场景要求越高,两种场景的配置结果

表 3 源荷匹配度和消纳率随渗透率变化情况

Table 3 Variation of source-load matching degree and consumption rate with penetration rate

渗透率	源荷匹配度	消纳率	
		实测出力数据场景	典型出力场景
0.1	0.0603	0.9445	0.8744
0.2	0.1981	0.9360	0.8569
0.3	0.2972	0.9144	0.8394
0.4	0.3661	0.8141	0.7695
0.5	0.4092	0.7110	0.7170
0.6	0.4307	0.5944	0.6208
0.7	0.4221	0.4028	0.5596
0.8	0.3532	0.2920	0.4722

表 4 消纳率最优配置结果

Table 4 Optimal allocation results of consumption rate

场景	波浪能/kW			潮流能/kW			消纳率			源荷匹配度		
	渗透率 为 0.50	渗透率 为 0.55	渗透率 为 0.60	渗透率 为 0.50	渗透率 为 0.55	渗透率 为 0.60	渗透率 为 0.50	渗透率 为 0.55	渗透率 为 0.60	渗透率 为 0.50	渗透率 为 0.55	渗透率 为 0.60
实测出力 数据场景	1800	2160	3400	3400	4000	4500	0.7110	0.6558	0.5944	0.4263	0.4317	0.4307
典型出力场景	1600	2040	2960	3500	4200	4900	0.7233	0.6752	0.6208	0.4306	0.4402	0.4398

差异也随之增大。因此,本文所提基于特性指标典型出力场景,在最优渗透率取值区间内是有效的。

6 结 语

本文针对海洋能发电的强随机波动性导致直接聚类效果不佳的问题,提出从发电功率稳定性角度出发,提取发电功率特性指标构建特征向量,对海洋能发电功率时序数据进行降维聚类,进而得到发电功率典型出力场景;以消纳率最优为目标,开展海岛微电网海洋能发电容量优化配置研究。算例结果表明,典型出力场景与实测出力数据场景的优化配置结果差异较小且变化趋势一致,验证了基于发电功率特性指标聚类得到的海洋能出力场景的有效性;当海洋能发电容量优化配置模型中的渗透率取 0.5~0.6 时获得最优的容量配置结果,可实现较高的源荷匹配度。

参考文献:

[1] 孙科,陈天宇. 海洋潮流能发电技术研究现状与趋势[J]. 船舶工程,2024,46(1):16-27. (Sun Ke, Chen Tianyu. Current status and trends of research on ocean tidal energy generation technology [J]. Ship Engineering, 2024, 46 (1) : 16-27. (in Chinese))

[2] 陈俊. 新能源发电技术在电力系统中的应用[J]. 光源与照明,2023(9):231-233. (Chen Jun. Application of new energy generation technology in power system [J]. Lamps & Lighting, 2023 (9) : 231-233. (in Chinese))

[3] 李文清,罗凌,齐晓曼,等. 海洋能技术发展现状及其在上海地区的适应性[J]. 电力与能源,2022,43(6):518-520. (Li Wenqing, Luo Ling, Qi Xiaoman, et al. Development status of marine energy technology and its adaptability in Shanghai area [J]. Power & Energy, 2022, 43 (6) : 518-520. (in Chinese))

[4] 李伟,史宏达,刘臻,等. 中国海洋能研究现状及未来发展建议[J]. 太阳能,2024(7):79-88. (Li Wei, Shi Hongda, Liu Zhen, et al. Research progress of ocean energy in China and its development proposals [J]. Solar Energy, 2024 (7) : 79-88. (in Chinese))

[5] 郑洁,杨淑涵,柳存根,等. 海洋可再生能源装备技术发展研究[J]. 中国工程科学,2023,25(3):23-32. (Zheng Jie, Yang Shuhan, Liu Cungen, et al. Development of marine renewable energy equipment and technologies [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25 (3) : 23-32. (in Chinese))

[6] 杨泽华,李猛,伍儒康,等. 振荡水柱波浪能发电技术研究进展[J]. 新能源进展,2023,11(4):381-387. (Yang Zehua, Li Meng, Wu Rukang, et al. Research progress of oscillating water column wave energy generation technology [J]. Advances in New and Renewable Energy, 2023, 11 (4) : 381-387. (in Chinese))

[7] 刘帆,肖健梅. 基于岛屿互联的远洋海岛群微电网系统优化设计[J]. 电气工程学报,2024,19(2):268-278. (Liu Fan, Xiao Jianmei. Optimized design of microgrid system for pelagic island group based on island interconnection [J]. Journal of Electrical

- Engineering,2024,19(2):268-278. (in Chinese))
- [8] 詹政东. 海岛型微电网系统规划与运行控制研究[D]. 北京:北方工业大学,2023.
- [9] 马宁,孙柏刚,罗庆贺. 绿氢内燃机及其在边无海岛地区的供电系统应用前瞻[J]. 中国电机工程学报,2024,44(5):1894-1904. (Ma Ning,Sun Baigang,Luo Qinghe. Prospects of green hydrogen internal combustion engine and its application in power supply system of remote uninhabited island[J]. Proceedings of the CSEE,2024,44(5):1894-1904. (in Chinese))
- [10] 陈虹宇,李星梅,王玉玮. 含电动船充电站的海岛光储微网系统容量优化配置[J]. 智慧电力,2024,52(2):48-54. (Chen Hongyu,Li Xingmei,Wang Yuwei. Optimal capacity configuration of island photovoltaic storage microgrid system with electric ship charging station[J]. Smart Power,2024,52(2):48-54. (in Chinese))
- [11] Miao Huiying,Yu Yadong,Kharrazi A,et al. Multi-criteria decision analysis for the planning of island microgrid system;a case study of Yongxing island,China[J]. Energy,2023,284:129264.
- [12] Li Hui,Ren Zhuoyang,Trivedi A,et al. Optimal planning of dual-zero microgrid on an island towards net-zero carbon emission [J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2023,15(2):1243-1257.
- [13] Psarros G N,Papathanassiou S A. Generation scheduling in island systems with variable renewable energy sources;a literature review[J]. Renewable Energy,2023,205:1105-1124.
- [14] 要金铭,赵书强,韦子瑜,等. 基于场景分析的电力系统日前调度及其快速求解方法[J]. 电力自动化设备,2022(9):46-52. (Yao Jinming,Zhao Shuqiang,Wei Ziyu,et al. Day-ahead dispatch and its fast solution method of power system based on scenario analysis[J]. Electric Power Automation Equipment,2022(9):46-52. (in Chinese))
- [15] 王戎洁. 含风电机组的多场景配电网无功优化研究[D]. 西安:西安理工大学,2019.
- [16] 闫晔. 考虑风电不确定性的分时电价研究[D]. 西安:西安理工大学,2020.
- [17] 王晰,苏开元,谢小荣. 面向海上风电高效利用的水下抽水蓄能容量优化配置分析[J]. 电网技术,2024,48(4):1428-1436. (Wang Xi,Su Kaiyuan,Xie Xiaorong. Underwater hydro pumped storage optimized capacity configuration for offshore wind power utilization[J]. Power System Technology,2024,48(4):1428-1436. (in Chinese))
- [18] 田雪沁,姚红雨,袁铁江,等. 考虑动态调节特性的光伏直接耦合制氢系统容量优化配置[J]. 中国电机工程学报,2024,45(17):6764-6777. (Tian Xueqin,Yao Hongyu,Yuan Tiejiang,et al. Capacity optimization configuration of photovoltaic hydrogen production direct coupling system considering dynamic regulation characteristics[J]. Proceedings of the CSEE,2024,45(17):6764-6777. (in Chinese))
- [19] 端木陈睿,史林军,蹇德平,等. 计及多时间尺度的梯级水-风-光互补基地储能容量优化配置[J]. 电力自动化设备,2024(7):173-179. (Duanmu Chenrui,Shi Linjun,Jian Deping,et al. Optimization of energy storage capacity allocation in multi-time scales cascaded hydro-wind-solar base[J]. Electric Power Automation Equipment,2024(7):173-179. (in Chinese))
- [20] 崔杨,杨海威,李鸿博. 基于高斯混合模型的风电场群功率波动概率密度分布函数研究[J]. 电网技术,2016,40(4):1107-1112. (Cui Yang,Yang Haiwei,Li Hongbo. Probability density distribution function of wind power fluctuation of a wind farm group based on the gaussian mixture model[J]. Power System Technology,2016,40(4):1107-1112. (in Chinese))
- [21] 解蛟龙. 风/光/负荷典型场景缩减方法及在电网规划中的应用[D]. 安徽:合肥工业大学,2017.
- [22] 刘延俊,武爽,王登帅,等. 海洋波浪能发电装置研究进展[J]. 山东大学学报(工学版),2021,51(5):63-75. (Liu Yanjun,Wu Shuang,Wang Dengshuai,et al. Research progress of ocean wave energy converters[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science),2021,51(5):63-75. (in Chinese))
- [23] 项雯,顾晓庆,李慧,等. 风浪流发电功率计算方法与综合发电评估新概念[J]. 能源与环境,2017,39(12):100-104. (Xiang Wen,Gu Xiaoqing,Li Hui,et al. Calculation method and new evaluation concepts for integrated power generation of wind,wave and tidal current[J]. China Energy and Environmental Protection,2017,39(12):100-104. (in Chinese))
- [24] 张亚迪,孙悦,刘锋,等. 结合密度参数与中心替换的改进 K-means 算法及新聚类有效性指标研究[J]. 计算机科学,2022,49(1):121-132. (Zhang Yadi,Sun Yue,Liu Feng,et al. Study on density parameter and center-replacement combined K-means and new clustering validity index[J]. Computer Science,2022,49(1):121-132. (in Chinese))
- [25] 万志伟,张翼,王聪,等. 基于生成对抗网络和改进均值漂移聚类的微电网运行场景生成方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2024,36(11):110-117. (Wan Zhiwei,Zhang Yi,Wang Cong,et al. An operational scenarios generation method for microgrids based on generative adversarial networks and improved mean-shift clustering algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2024,36(11):110-117. (in Chinese))
- [26] 万家豪,苏浩,冯冬涵,等. 计及源荷匹配的风光互补特性分析与评价[J]. 电网技术,2020,44(9):3219-3226. (Wan Jiahao,Su Hao,Feng Donghan,et al. Analysis and evaluation of the complementarity characteristics of wind and photovoltaic considering source-load matching[J]. Power System Technology,2020,44(9):3219-3226. (in Chinese))

DOI:10. 3876/j. issn. 1000 - 1980. 2026. 04. 005

在役海底管道挖沟下沉过程中载荷对管道应力的影响

梁 凯¹,王亚琼¹,徐万海²,赵云鹤¹,翟立宾¹,李屹楠¹

(1. 中国石油天然气管道工程有限公司; 2. 天津大学建筑工程学院)

摘要:针对现阶段尚缺乏对在役海底管道挖沟下沉过程载荷作用机理及管道应力规律的系统性分析和定量研究的问题,采用 OrcaFlex 软件对在役海底管道二次挖沟下沉过程进行数值模拟,定量分析了不同挖沟深度下关键载荷变化对管道应力的影响。结果表明:温差、管道压差、波流载荷与管道应力呈现出线性或非线性的正相关关系,管道残余张力对管道应力影响很小,土体阻力的存在可有效降低波流载荷的应力效应;对于不同挖沟深度,同一温差下管道等效应力变化率最大可达 130 MPa/m,同一压差下应力变化率最大接近 175 MPa/m。

关键词:在役海底管道;管道载荷;管道应力;二次挖沟; OrcaFlex

The influence of loads on pipeline stress during trenching and lowering of in-service subsea pipelines

Liang Kai¹, Wang Yaqiong¹, Xu Wanhai², Zhao Yunhe¹, Zhai Libin¹, Li Qinan¹

(1. China Petroleum Pipeline Engineering Corporation; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University)

Abstract: In view of the current lack of systematic analysis and quantitative research on the load mechanism and pipeline stress evolution during the trenching and lowering of in-service subsea pipelines, OrcaFlex software was used to numerically simulate the secondary trenching and lowering of in-service subsea pipelines, and the influence of key load variations on pipeline stress under different trenching depths was quantitatively analyzed. The results indicate that temperature difference, pipeline pressure difference, and wave-current load show a linear or nonlinear positive correlation with pipeline stress; the pipeline residual tension has little effect on the pipeline stress; the existence of soil resistance can effectively reduce the stress effect of wave-current load. Under different trenching depths, the maximum variation rate of pipeline equivalent stress under the same temperature difference can reach 130 MPa/m, and the maximum stress variation rate under the same pressure difference approaches 175 MPa/m.

Key words: in-service subsea pipeline; pipeline load; pipeline stress; secondary trenching; OrcaFlex

海底管道在近岸段铺设后通常进行埋设保护。然而,受波浪、海流常年冲刷作用,导致海床发生演变,管道会出现裸露或悬跨(非掩埋)问题^[1]。针对此类问题,可采用覆盖砂袋或混凝土连锁排等措施进行防护,但这些方法存在成本高、二次修复困难等缺点^[2]。此外,也可采用二次挖沟下沉法治理,即在裸露管道下方的海床开挖沟槽,使管道下沉至预定深度后回填掩埋。然而,在役管道进行挖沟下沉时,管道将经历复杂的应力状态,若控制不当可能导致管道变形甚至破裂,引发严重事故,造成环境污染和重大经济损失。因此,研究在役管道挖沟下沉过程中的应力问题具有重要的现实意义。

目前,针对挖沟过程中的管道研究主要集中在应力分布、管-土相互作用及应力缓解等方面,而挖沟后管道的应力分布对其完整性至关重要。熊海荣^[3]采用理论公式计算了不同挖沟深度下的管道应力。夏梦莹等^[4]基于弹性梁理论,建立了挖沟过程中管道挠曲线的微分方程,并通过边界条件与协调方程,提出了考虑几何非线性管道应力与变形解析计算方法。倪玲英等^[5]利用 AutoPIPE 模拟了悬空管道治理过程中的应力,发现相较于一次挖沟成型,多次挖沟成型可显著降低应力峰值;在悬空管道挖沟埋设过程中,随着挖沟深度和管道温差的增加,管道应力和屈服位移均呈增大趋势。靳嵩等^[6]分析评估了在役管道下沉施工期与在位期的应力状态,以及下沉施工期的抗上浮稳定性,并提出了相应的下沉施工措施。Thusyanthan 等^[7]研究了一条 16 英寸(1 英寸=2.54 cm)在役管道下沉 6 m 的实施方案及评估方法,就管道下沉项目应如何规划、

基金项目: 国家自然科学基金项目(52525110, U25A6020)

作者简介: 梁凯(1989—),男,工程师,硕士,主要从事海洋石油天然气管道研究。E-mail:lk1895@163.com

通信作者: 徐万海(1981—),男,教授,博士,主要从事海工细长结构研究。E-mail:xuwanhai@tju.edu.cn

评估与执行提出了建议。刘可安等^[8]研究了犁式挖沟法埋管中各项参数对悬跨段海底管道屈曲压溃压力的影响,并建立了相应的临界曲线。刘绪都等^[9]开展了海底悬跨管道二次挖沟物理模拟试验,揭示了二次挖沟过程中管-土相互作用的变化特性。赵刚等^[10]研究了海底管道后挖沟强度分析方法与校核标准,并分析了计算结果的变化趋势与相关规律。刘冠良等^[11]利用 SAGE 软件分析了后挖沟过程中海底管道的有效轴力和最大弯矩,依据 DNV-OS-F101 *Submarine Pipeline Systems* 的荷载控制极限状态进行校核。

在管-土相互作用影响研究方面,Phillips 等^[12]针对承受侧向土体位移的管沟敷设管道开展了研究,旨在量化沟槽几何形状、回填材料及其强度对黏性土中管道力-位移响应的缓解效果。Kianian 等^[13]则定性研究了浅埋与深埋条件下,沟槽开挖与回填对管道横向土体阻力的影响,并利用粒子图像测速(PIV)技术分析了沟槽/回填管道周围的土体内部变形与破坏机制。在应力缓解方面,Yang 等^[14]研究了管-土相互作用机理,并提出了一种新型回填材料以保护管道免受破坏。

综上所述,国内外学者围绕挖沟过程中的管道应力分布、管-土相互作用及应力缓解开展了广泛的研究。在管道应力方面,学者们运用理论分析和有限元方法,重点关注悬跨管道在挖沟治理过程中的应力状态及其影响因素。然而,现有研究仍存在以下局限:①载荷分析系统性不足,研究多集中于单一或少数载荷的作用,缺乏对二次挖沟过程中复杂载荷组合及其作用规律的系统性分析与定量研究;②研究对象覆盖不全,对于工程实践中更为常见的裸置非悬跨海底管道(即直接铺设在海床上但未形成悬跨的裸露管道)的挖沟治理,其特有的力学响应特征尚缺乏针对性研究。

针对上述不足,本文基于 OrcaFlex 软件,对裸置非悬跨海底管道二次挖沟下沉过程进行数值模拟,系统化分析影响管道应力的关键载荷及其作用规律,旨在为后续工程实践提供理论参考依据。

1 理论模型

在役管道运营工况下,作用在裸置非悬跨海底管道上的载荷主要包括重力、浮力、土壤阻力、内压(介质)、外压(海水)、热膨胀应力、波浪与海流载荷、挖沟坡肩边界载荷以及管道铺设后的残余张力。

海床的模拟方法通常采用刚性基底、Winkler 地基模型或 p - y 曲线等^[15]。研究表明,土壤刚度越大,后挖沟引发的管道应力越高。基于刚性海床假设,本文仅考虑管道与海床间的摩擦力(F)作用,可表示为:

$$F = \begin{cases} -k_s A s & -s_{br} < s < s_{br} \\ \mu G & s \leq -s_{br} \text{ 或 } s \geq s_{br} \end{cases} \tag{1}$$

式中: k_s 为海床土壤剪切刚度; A 为管道与海床接触面积; s 为管道位移; s_{br} 为管道滑动位移; μ 为土体摩擦系数; G 为管道重力。

根据 ASME B31.4 *Pipeline Transportation Systems for Liquids and Slurries*,海底管道内压或外压产生的管道环向应力可表示为:

$$S_H = PD/2t \tag{2}$$

式中: S_H 为管道环向应力; P 为管道内压或外压; D 为管道外径; t 为管道壁厚。

海底管道铺设完成后,如果温度发生变化将会产生热膨胀应力(S_E),其表达式为:

$$S_E = E\alpha(T_1 - T_2) \tag{3}$$

式中: E 为杨氏模量,钢材取 207 GPa; α 为热膨胀系数,钢质管道一般取 $11.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$; T_1 为管道安装温度; T_2 为管道运营温度。

单位长度上水平波浪力,一般可按莫里森方程计算。单位长度海底管道上的上升力 F_L 计算公式为:

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho_{sw} D u^2 \tag{4}$$

式中: C_L 为升力系数,按照 DNVGL-RP-C205 *Environmental Conditions and Environmental Loads* 取值 0.7; ρ_{sw} 为海水密度; u 为垂直于管轴线的水质点相对于管道的速度分量。

挖沟条件下海底管道在坡肩处的最大弯矩 M_B 为:

$$M_B = -\frac{1}{4} q l_1^2 = -0.9604 \sqrt{\Delta E I} q \tag{5}$$

式中: q 为管道在海水中的单位长度重力; l_1 为管道在海床上的悬空长度; Δ 为挖沟深度; I 为管道截面惯性矩。

理论方法虽可用于计算挖沟下沉时的海底管道载荷,但其得出的管道应力仅基于线性叠加原理,且无法考虑波浪与海流等动态载荷效应。因此,本文采用数值模拟方法,计及海底管道在耦合载荷作用下的应力状态,研究关键载荷对管道应力的影响规律。

2 有限元模型

采用海洋动力学软件 OrcaFlex 进行数值模拟,该软件已广泛应用于海上风电、石油和天然气以及深水海洋研究等领域,能够高效地模拟海洋环境下的复杂动态系统,包括但不限于拖曳、安装、维护以及海洋结构物之间相互作用的模拟。

在 OrcaFlex 软件中建立数值模型,模型管道总长 300 m,该长度用于模拟实际海底管道已足够^[16]。设置环境参数:海平面高程 0 m,海水运动黏度及密度采用软件默认值;海床设置为平坦海床,海床高程-10 m,选用弹性土体模型,基于刚性海床假定土壤刚度为无限大;作用在管道上的波流载荷作用均采用莫里森方程计算,将作用在管道上的波流载荷等效转换为海流载荷,对应的海流流速称为等效水质点速度。

采用 Line 单元模拟管道,单元长度 0.2 m,每个单元由无质量的中段和两端的节点组成,如图 1 所示。中间单元段仅用于模拟管道的轴向和扭转特性,管道的扭转特性由扭转弹簧和阻尼器控制,轴向特性由轴向弹簧和阻尼器控制,中间段末端处的弯曲弹簧和阻尼器用于控制管道的弯曲特性。其他属性都集中在节点上,每个节点承受其两侧各一半分段的重力、浮力和阻力等,力和力矩施加在节点处。管道参数参照东海海域某海底管道项目,具体为:管道外径 1 016 mm,管道壁厚 25.4 mm,杨氏模量 207 GPa,泊松比 0.3,混凝土配重层厚度 120 mm,混凝土配重层密度 3 040 kg/m³,防腐层厚度 3.7 mm,防腐层密度 940 kg/m³,海水密度 1 025 kg/m³。

挖沟段设置在管道中部,管道两端通过 End Connection-Fixed 命令设置为固定约束。作用在管道上的载荷包括温差产生的胀缩力、管道内外压力、波流环境载荷、管道残余张力以及土壤阻力。软件根据设置的环境参数对波流载荷和土壤阻力进行计算,胀缩力和管道残余张力通过施加管道轴向力的方式实现,管道内压通过软件 Contents 模块设置。OrcaFlex 管道数值模型如图 2 所示。

软件计算分析时先通过静态分析确定管道初始构型,然后通过时域动态分析确定管道在各载荷作用下的结构响应。动力分析设置 2 个分析步,初始分析步步长 8 s,用于实现环境载荷从零到最大值的平稳加载,动态分析步步长 16 s。

为探究挖沟时关键载荷参数变化对管道应力的影响,基于以下基本假定进行管道应力分析:①管道与沟槽底部始终保持接触,这与裸置管道后挖沟状态是相符的;②计算时不考虑管道的许用应力,只探究应力变化规律;③海床平坦且为完全刚性地基。

为验证数值模型的准确性,建立未施加载荷的管沟及管道模型,设置挖沟深度为 0.8 m,只考虑坡肩弯矩,按照式(5)计算,管道截面惯性矩为 0.009 7 m⁴,最大弯矩为 3 110 kN·m;数值模拟结果如图 3 所示,最大弯矩为 3 078 kN·m,与理论计算结果误差为 1%,表明数值模型模拟结果是准确的。

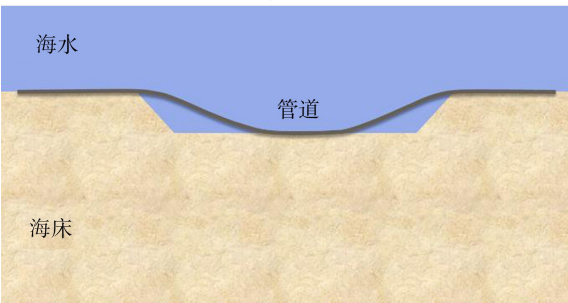


图 2 OrcaFlex 管道数值模型
Fig. 2 OrcaFlex pipeline numerical model

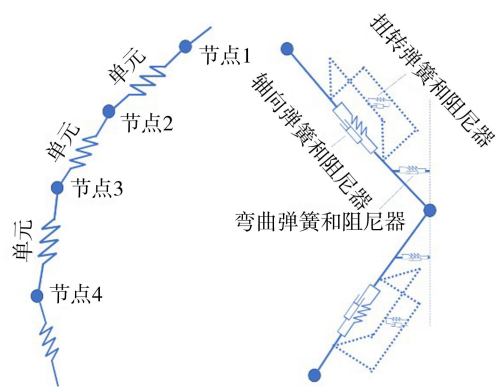


图 1 Line 模型
Fig. 1 Line model

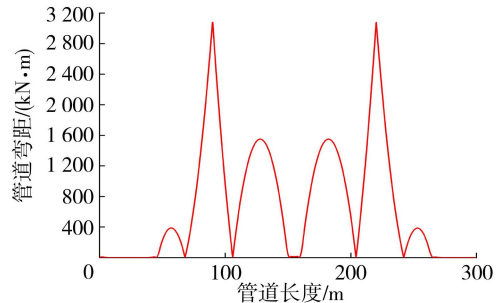


图 3 管道弯矩数值模拟结果
Fig. 3 Numerical simulation results of pipeline bending moment

3 结果与分析

在役海底管道运营阶段,温差、管道压差、波流载荷、管道残余张力和土体阻力等因素,对挖沟过程中的管道应力具有不同程度的影响。本文以输送常规介质的近岸海底油气管道为研究对象,设置关键载荷参数的不同取值范围,分析其在挖沟下沉过程中对管道应力的影响规律。

3.1 温差

管道运营时,由于管内介质温度异于海水温度,从而产生胀缩应力,影响管道安全。对于输送常规介质的长输海底油气管道,介质温度通常不超过 100℃。为研究温差变化对管道应力的影响,设定 10 组温差(范围 0~90℃,步长 10℃)进行模拟分析。其他参数设置如下:等效水质点速度 2 m/s(垂直于管道轴向),管道压差(内压大于外压为正)10 MPa,管道残余张力 1 000 kN,土体摩擦系数 0.3。

不同挖沟深度下的管道最大等效应力结果见图 4,可见不同挖沟深度下,管道应力随温差变化的趋势基本一致;同一挖沟深度下,管道最大等效应力随温差增大而增大。随着温差的增大,应力先呈现出非线性变化,在 35℃ 左右时热膨胀产生的管道轴向压应力与其他载荷产生的轴向拉应力在数值上趋于相等,随着压差进一步增大,热膨胀产生的管道轴向压应力起主导作用,由式(3)可知,热膨胀应力与温差线性相关,因此 35℃ 之后应力随温差变化趋于近似线性变化。与等效水质点速度为 0 m/s 的结果曲线对比可知,波流载荷的存在增强了温差作用的非线性变化,导致温差越低,温差变化对管道应力的影响越小。在近似线性段,应力变化率(应力增量与温差增量之比)达到最大,最大值约为 2 MPa/℃。同一温差下,随着挖沟深度逐渐增加,应力变化率(应力增量与挖沟深度增量之比)呈减小趋势,最大变化率约为 130 MPa/m,最小变化率约为 80 MPa/m。

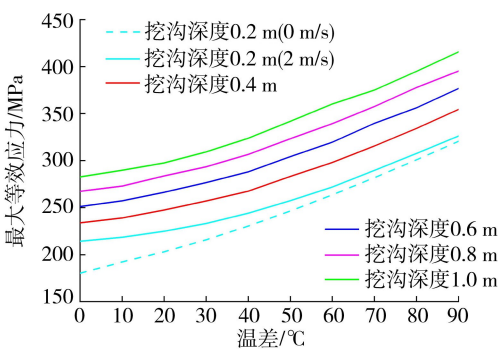


图 4 温差对管道应力的影响
Fig. 4 Effect of temperature difference on pipeline stress

3.2 管道压差

因海底管道停输作业经济损失巨大,对在役管道进行后挖沟作业的主要特点是管道带压,因此探究带压作业的可行性、评估挖沟作业时管道内外压对管道应力的影响至关重要。

近岸长输海底油气管道内压一般小于 14 MPa,设定 2、4、6、8、10、12、14 MPa 共 7 组管道压差(内压大于外压为正)进行模拟分析。其他参数设置如下:等效水质点速度 2 m/s(垂直于管道轴向),温差 20℃,管道残余张力 1 000 kN,土体摩擦系数 0.3。

不同挖沟深度下管道最大等效应力结果见图 5,可见同一挖沟深度下,管道最大等效应力与压差呈正相关关系,随着压差增大,最大等效应力先呈现非线性变化,而后逐渐趋于线性变化。在非线性阶段,挖沟深度越大,坡肩弯矩越大,压差在有效应力中的占比越小,压差变化对应力影响越小,因此挖沟深度越大,非线性段曲线越平缓。随着压差增大,压差产生的应力起主导作用,由式(2)可知,压差产生的管道应力与压差为线性关系,因此有效应力随压差变化趋近于线性变化。与等效水质点速度为 0 m/s 的结果曲线对比可知,波流载荷不会改变压差对应力的影响趋势,压差越大,管道应力变化率越大,在近似线性段,应力变化率达到最大。挖沟深度越小,应力变化率越大;挖沟深度 0.2 m 时,最大应力变化率接近 14.3 MPa/MPa;挖沟深度 1 m 时,最大应力变化率为 11.7 MPa/MPa。同一管道压差下,随着挖沟深度增加,应力变化率(应力增量与挖沟深度增量的比值)呈减小趋势;压差越小,应力变化率越大,在压差为 2 MPa 时出现最大应力变化率(约 175 MPa/m),在压差为 14 MPa 时出现最小应力变化率(约 68 MPa/m)。

3.3 波流载荷

为确保研究成果尽量涵盖近岸段海底管道所能遭遇的波流条件,根据我国近海岸常见海洋环境条件,考虑最大有效波高 5 m,平均波周期 10.165 s,最大流速 2.3 m/s,按照海床位于 10 m 水深处,计算转换后的海床上管道中心处的等效水质点速度约为 4.5 m/s。因此,设定 10 组等效水质点速度(范围 0~4.5 m/s,步长 0.5 m/s,垂直于管道轴向)进行模拟分析。其他参数设置如下:温差 20℃,管道压差 10 MPa,管道残余张力

1 000 kN,土体摩擦系数 0.3。

不同挖沟深度下管道最大等效应力结果见图 6,可见不同挖沟深度下管道等效应力随等效水质点速度的变化趋势基本一致。同一挖沟深度下,当等效水质点速度小于某一特定值时,土体摩擦力和波流载荷平衡,等效水质点速度增加对管道应力几乎没有影响。当等效水质点速度超过该特定值时,管道在波流载荷作用下发生横向位移,产生横向弯矩,致使管道应力增大,呈线性变化趋势,应力变化率(应力增量与等效水质点速度增量的比值)趋于 86 MPa/(m·s⁻¹)。

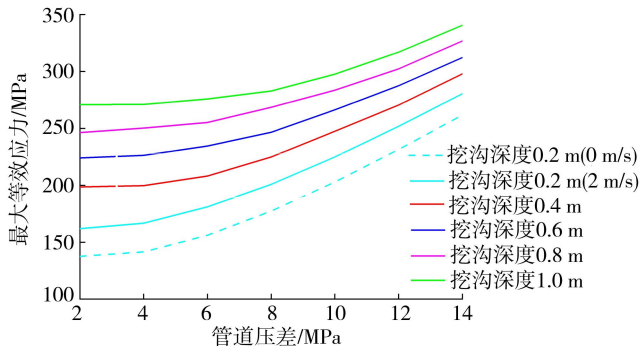


图 5 管道压差对管道应力的影响

Fig. 5 Effect of pipeline pressure difference on pipeline stress

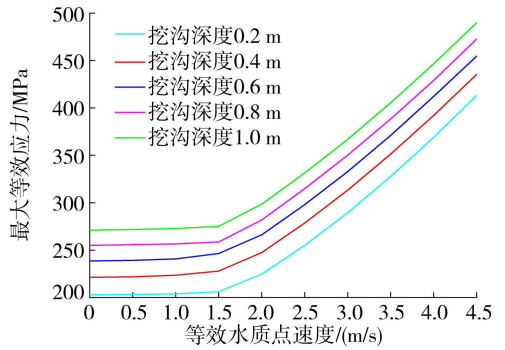


图 6 等效水质点速度对管道应力的影响

Fig. 6 Effect of equivalent water particle velocity on pipeline stress

3.4 管道残余张力

管道在安装就位后有残余张力存在,运营中的管道进行后挖沟下沉时应考虑管道上的残余张力,管道残余张力主要来源为管道铺设张力,根据工程经验,采用铺管船法施工的近岸段海底管道实际施工张紧力通常小于 1 000 kN。为研究管道残余张力变化对管道应力的影响,取张力范围 500~1 000 kN,步长 100 kN,共 6 组管道残余张力进行模拟分析。其他参数设置如下:温差 20℃,管道压差 10 MPa,等效水质点速度 2 m/s(垂直于管道轴向),土体摩擦系数 0.3。

不同挖沟深度下管道最大等效应力结果见图 7,可见管道残余张力增加时,管道总应力变化非常小,这是由于管道残余张力在管道总应力中占比非常小,根据中国船级社海底管道系统规范要求,采用铺管船法施工时,管道的应变一般不能超过 0.3%。

3.5 土体阻力

海床土体不仅能为海底管道提供支撑力,当管道受波流载荷作用时,土体还能提供侧向阻力,保证管道的在位稳定性,进而影响管道的应力状态。后挖沟作业时,由于坡肩的存在,管道的部分区域出现悬空状态,土壤阻力发生变化,因此需要研究土体阻力变化对管道应力的影响。

根据库仑理论,以不同的摩擦系数表征土体阻力,设定 10 组土体摩擦系数(0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0)进行模拟分析。其他参数如下:等效水质点速度 2 m/s(垂直于管道轴向),温差 20℃,管道压差 10 MPa,管道残余张力 1 000 kN。

不同挖沟深度下管道最大等效应力结果见图 8,可见不同挖沟深度下管道应力随土体摩擦系数的变化

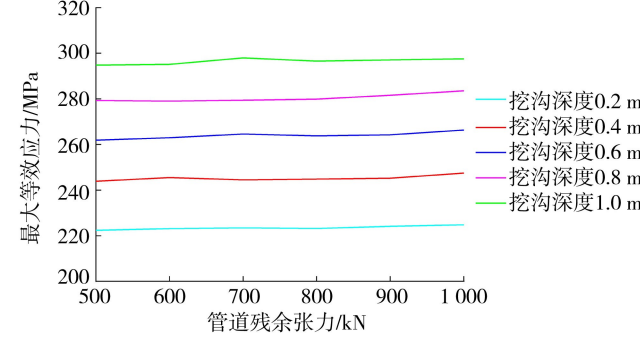


图 7 管道残余张力对管道应力的影响

Fig. 7 Effect of pipeline residual tension on pipeline stress

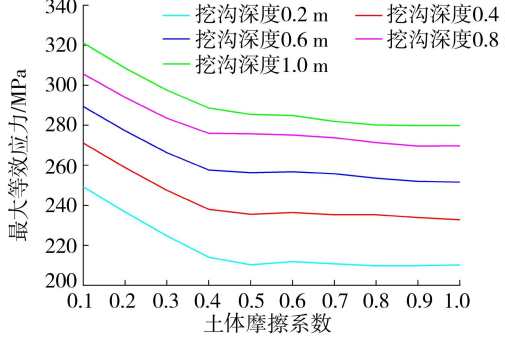


图 8 土体摩擦系数对管道应力的影响

Fig. 8 Effect of soil friction coefficient on pipeline stress

趋势基本一致。当土体摩擦系数小于 0.4 时,管道应力随摩擦系数的增大而降低,几乎呈线性变化;当摩擦系数大于 0.4 后,管道应力几乎保持不变。分析原因可知,当摩擦系数为 0.4 时,单位长度管道的摩擦力和波流载荷拖曳力几乎相等,管道受力达到平衡,摩擦系数继续增大对管道应力不再产生影响。在线性变化段,应力变化率(应力减少量与摩擦系数增量绝对值的比值)最大约为 120 MPa,即摩擦系数每增加 0.1,管道最大等效应力会降低 12 MPa。同一摩擦系数时,随着挖沟深度增加应力变化率(应力增量与挖沟深度增量的比值)呈减小趋势,挖沟深度 0.2~0.4 m 时出现最大应力变化率(约为 110 MPa),0.8~1.0 m 时应力变化率较小,最小约为 40 MPa。

4 结 论

- a. 同一温差下,随着挖沟深度增加管道等效应力变化率最大可达约 130 MPa/m;同一挖沟深度时最大应力变化率约为 2 MPa/℃。
- b. 同一管道压差下,随着挖沟深度增加管道等效应力变化率最大约 175 MPa/m;挖沟深度 0.2 m 时,最大应力变化率接近 14.3 MPa/MPa。
- c. 鉴于海底管道铺设时通常将应变限制在 0.3% 以内,对于在役管道的后挖沟治理,管道残余张力对管道应力的影响很小,可忽略。
- d. 波流载荷和土体阻力相互影响,当两者达到平衡时,管道应力几乎不再受波流载荷和土体阻力的影响。当波流载荷大于土体阻力时,由波流载荷变化引起的管道应力变化率趋于 86 MPa/(m·s⁻¹)。
- e. 由于裸露管道的后挖沟治理多发生于近岸区域,本文研究基于典型近岸海底管道尺寸进行,未深入探讨管道尺寸效应的影响,有待后续进一步研究。

参考文献:

[1] 熊春宝,李志,孙轩,等. 基于声波探测的海底管道非掩埋状态检测方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(5): 425-431. (Xiong Chunbao, Li Zhi, Sun Xuan, et al. Integrated acoustic survey method for inspecting the unburied status of submarine pipeline[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2017, 45(5): 425-431. (in Chinese))

[2] 张传旭,王海锋,刘亮,等. 渤海油田海底管道裸露和悬空疲劳治理技术对比[J]. 中国石油和化工标准与质量,2022,42(9): 185-187. (Zhang Chuanxu, Wang Haifeng, Liu Liang, et al. Comparative study on fatigue remediation techniques for exposed and free-spanning subsea pipelines in Bohai oilfield[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2022, 42(9): 185-187. (in Chinese))

[3] 熊海荣. 海底管道后挖沟分析[C]//2009 年度海洋工程学术会议论文集(下册). 厦门:中国造船工程学会近海工程学术委员会,2009:149-154.

[4] 夏梦莹,张宏,吴锴,等. 海底管道后挖沟过程的应力解析分析方法[J]. 石油管材与仪器,2017,3(6): 41-43. (Xia Mengying, Zhang Hong, Wu Kai, et al. Analytical stress analysis method for submarine pipeline during trenching[J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2017, 3(6): 41-43. (in Chinese))

[5] 倪玲英,耿光伟,刘秉德. 基于 AutoPIPE 的海底悬空管线挖沟埋设应力分析[J]. 船海工程,2017,46(4): 182-185. (Ni Lingying, Geng Guangwei, Liu Bingde. Stress analysis about post-trenching of submarine suspended pipelines based on AutoPIPE [J]. Ship & Ocean Engineering, 2017, 46(4): 182-185. (in Chinese))

[6] 靳嵩,唐彪,张晓春,等. 海底管道穿越航道段不停输下卧技术[J]. 中国海洋平台,2023,38(2): 97-102. (Jin Song, Tang Biao, Zhang Xiaochun, et al. Lowering technology of live subsea pipeline on crossing channel section[J]. China Offshore Platform, 2023, 38(2): 97-102. (in Chinese))

[7] Thusyanthan N I, Williams K A J, Selwood T, et al. Challenges of lowering a live subsea buried gas pipeline by 6m[C]//Offshore Technology Conference(OTC 2014). Houston: Society of Petroleum Engineers, 2014: 25211.

[8] 刘可安,李修波,王华昆,等. 犁式挖沟机后挖沟埋管对海底管道屈曲压溃压力影响分析[J]. 中国造船,2020,61(1): 101-108. (Liu Kean, Li Xiubo, Wang Huakun, et al. Influence of post-trench burying on buckling pressure of subsea pipeline[J]. Shipbuilding of China, 2020, 61(1): 101-108. (in Chinese))

[9] 刘绪都,李明昊,冯新,等. 海底悬跨管道二次挖沟结构响应演变[J]. 油气储运,2022,41(8): 924-930. (Liu Xudu, Li Minghao, Feng Xin, et al. Evolution of structural response to post-trenching of free-spanning submarine pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(8): 924-930. (in Chinese))

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.04.006

黏性沙床面桩柱间距对局部冲刷特性的影响

巩明^{1,2}, 杜升涛^{3,4}, 王超琳³, 武国相^{1,4}, 梁丙臣^{1,4}

(1. 中国海洋大学工程学院; 2. 自然资源部第二海洋研究所; 3. 宁波大学土木工程与地理环境学院;
4. 中国海洋大学山东省海洋工程重点实验室)

摘要: 针对黏性沙床面群桩局部冲刷问题,通过室内水槽试验,采用 0.038 mm 石英粉模拟淤泥质黏性沙,结合土力学参数测定与三维地形扫描技术,研究了单桩及 5×5 群桩在多种桩间距条件下的局部冲刷特性,分析了冲刷深度随时间的变化规律、群桩冲刷的整体性特征以及桩间距对冲刷效率的影响,讨论了黏性沙与非黏性沙冲刷机制的差异及其物理驱动因素。结果表明:黏性沙局部冲刷深度随时间变化可分为初始冲刷阶段、冲刷发展阶段和冲刷平衡阶段,桩后冲刷深度一般大于或等于桩前冲刷深度,与非黏性沙桩柱局部冲刷特征显著不同;群桩局部冲刷效率随桩间距增大而降低,3 倍桩间距时最大冲刷深度接近 6 倍桩径,为单桩局部冲刷深度的 2.4 倍;前 3 行桩柱局部冲刷深度普遍小于下游桩,且第 3 行后冲刷深度趋于稳定。

关键词: 群桩;黏性沙;桩间距;局部冲刷;冲刷深度;水槽试验

Influence of pile spacing on local scour characteristics in cohesive sediment beds

Gong Ming^{1,2}, Du Shengtao^{3,4}, Wang Chaolin³, Wu Guoxiang^{1,4}, Liang Bingchen^{1,4}

(1. College of Engineering, Ocean University of China; 2. Second Institute of Oceanography, MNR;
3. School of Civil and Environmental Engineering, Ningbo University;
4. Shandong Provincial Key Laboratory of Ocean Engineering, Ocean University of China)

Abstract: In view of the local scour problem around pile groups in cohesive sediment beds, the local scour characteristics of a single pile and 5×5 pile groups under various pile spacing conditions were investigated through laboratory flume experiments. In the experiments, 0.038 mm quartz powder was used to simulate silty cohesive sediment. Combined with geotechnical parameter measurements and three-dimensional topographic scanning technology, the variation law of scour depth over time, the integral characteristics of pile group scour, and the influence of pile spacing on scour efficiency were analyzed. Moreover, the differences in scour mechanisms between cohesive and non-cohesive sediments and their physical driving factors were discussed. The results show that the temporal variation of local scour depth in cohesive sediment can be divided into an initial scour stage, a scour development stage, and a scour equilibrium stage. The scour depth behind the pile is generally greater than or equal to that in front of the pile, which is significantly different from the local scour characteristics around piles in non-cohesive sediment. Furthermore, the local scour efficiency of pile groups decreases with the increase in pile spacing; the maximum scour depth reaches nearly six times the pile diameter at three times the pile spacing, which is 2.4 times the local scour depth of a single pile. The local scour depth of the piles in the first three rows is generally smaller than that of the downstream piles, and the scour depth tends to be stable after the third row.

Key words: pile group; cohesive sediment; pile spacing; local scour; scour depth; flume experiment

随着我国“海洋强国”战略的深入推进,跨海桥梁、海上风电、近海光伏、高桩码头等重大工程在沿海地区密集建设。此类工程下部结构多采用大直径单桩或小直径群桩作为基础,长期受潮流、波浪等动力作用,在沙质或淤泥质海床中易引发桩柱周围的局部冲刷,导致泥沙掏蚀、桩基暴露长度增加,弱化结构的安全性^[1-4]。例如,杭州湾跨海大桥桥墩在强潮流作用下局部冲刷深度超过 10 m^[5],桩基稳定性面临严峻考验。尽管国内外学者对桩基局部冲刷机理开展了大量研究,但由于海洋水动力环境复杂多变,加之床面泥沙特性(如粒径、黏性)差异显著,冲刷机制与深度预测仍存在较大不确定性^[6-8]。因此,亟须针对黏性沙床面群桩局部冲刷机理开展系统性研究,为近海工程安全设计与灾害防控提供理论支撑。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52301324);山东省海洋工程重点实验室开放基金项目(kloe202011)

作者简介: 巩明(1984—),男,高级工程师,博士研究生,主要从事港口与海岸工程研究。E-mail:gm-321@163.com

通信作者: 杜升涛(1988—),男,讲师,博士,主要从事海岸工程研究。E-mail:dushengtao303@163.com

非黏性沙条件下,桩前马蹄涡、桩侧流线集中效应及桩后尾流涡旋是冲刷的主控流体机制^[9]。针对无黏性沙,一些学者通过试验与数值模拟揭示了冲刷深度与波浪 KC 数、涨落潮流参数、冲刷时间(t)、水流强度(u/u_c , u 为水流平均流速, u_c 为泥沙临界起动流速)、桩径(D)、桩间距(S)及泥沙粒径(d_{50})等参数的定量关系^[2-15]。目前针对单桩冲刷平衡深度预测模型(如 Melville 冲刷公式^[11]、HEC-18 式^[13])已有较多研究,但群桩冲刷因桩与桩之间流场相互作用呈现非线性特征^[16-18],因此桩间距及桩柱数量对冲刷深度影响显著^[19-21],导致冲刷平衡深度预测更为复杂。Liang 等^[14]针对双柱串列、并列及三行三列矩形布置群桩开展局部冲刷试验,结果表明串列布置时上游桩对下游桩屏蔽效应显著,上游桩冲刷深度与范围更大;桩间距增大后,上下游桩冲刷深度逐步接近;并列双柱冲刷规律一致,冲刷深度随桩间距增加而减小;Hamidi 等^[18]通过数值模拟对串列双桩柱流场及局部冲刷进行研究,发现随着冲刷坑的发展,两桩之间的冲刷坑逐渐由相互独立合并为一个较大的冲刷坑;Solaimani 等^[20]针对多种排列方式的桩群进行局部冲刷研究,发现冲刷特征与桩间距和群桩的布置形式相关性强,当桩间距 $S>3D$ 时冲刷坑的尺度随着 S/D 增大而显著增大;Zhou 等^[21]认为并列双桩因间隙流挤压形成不对称冲刷坑,Ataie-Ashtiani 等^[22]指出错列布置则因入射角差异导致涡旋脱落频率变化。

相较于非黏性沙,黏性沙因颗粒间黏聚力、高含水率及固结特性,其泥水起动流速计算及冲刷机制呈现显著差异^[23-36]。单桩冲刷特性方面,Hosny^[23]根据试验结果,得出了最大冲刷深度与桩柱直径、黏性沙含量、黏性沙压缩系数、初始含水量、弗劳德数的关系;Debnath 等^[24-25]指出黏性沙临界起动流速受塑性指数、初始含水率及固结度共同控制,且冲刷过程中泥沙以聚集块形式剥离床面,导致冲刷坑坡度陡峭。预测模型方面,Briaud 等^[28]采用 SRICOS-EFA 方法,通过现场取样与室内冲刷率测试,建立了冲刷深度与剪应力的经验关系,但其未考虑群桩相互作用。另外,其他学者^[5,13,26,29,31]利用实验室测试或 Dou^[32]的黏性沙起动流速计算公式,在多种水动力条件下提出或讨论了一些经验公式,但大部分在较小桩间距条件下以等效桩径概念计算群桩整体冲刷深度,对群桩单个桩柱局部冲刷分析不够深入。

现有桩柱局部冲刷的研究多集中于非黏性沙床面单桩或小规模群桩(如双桩、三桩)^[37-40],针对大规模群桩(如 5×5 桩阵),尤其黏性沙床面条件下的局部冲刷规律仍不清晰。鉴于此,本文以淤泥质黏性沙为研究对象,通过室内水槽试验揭示恒定流作用下群桩局部冲刷时空演变规律。

1 试验方法

我国淤泥质海岸线总长约 4 000 km,占大陆海岸线总长度的 25%^[36],广泛分布于长江、黄河等河口三角洲及浙江、广东沿海海域。杭州湾跨海大桥桥墩桩基布置形式多样,多处布设桩径 2.5~2.8 m 的直立群桩,桩间距为 2~3 倍桩径^[5];浙江省宁波港大树高桩码头桩基桩径 2.3 m,桩间距为 4~5 倍桩径^[40-41];墨西哥西海岸的曼萨尼约港高桩码头直立桩桩径 1.2 m,桩间距为 5 倍桩径^[42];深圳某高桩码头的直立桩桩径 0.8 m、桩间距为 6~7 倍桩径^[43]。由于淤泥质滩涂具有重要的生态功能,是众多底栖生物和候鸟的栖息地,近年我国自然资源部规定近海光伏桩基工程须布设于 6 m 等深线以深海域。因此,本文综合借鉴前述跨海桥梁、高桩码头工程实例中的桩基直径与桩距参数,以宁波象山海域底质粒径 0.006~0.016 mm 的海床环境为工程背景开展模型试验设计,探究黏性沙海床中群桩基础的局部冲刷演化规律。试验原型设定水深 8 m,海床为中值粒径 0.1 mm 的淤泥质黏性沙;结合现场实测数据与 Dou^[32]泥沙起动理论公式计算,该底质泥沙临界起动流速为 1.4 m/s。针对近海光伏工程群桩基础,原型桩径取 0.5 m、桩间距 1.5~3.5 m,采用 1:25 几何比尺缩制模型,对应模型桩径 2 cm、模型桩间距 6~14 cm;对于跨海大桥桥墩、高桩码头等大尺度桩基结构,原型桩径 1 m、桩间距 3~7 m,若保持模型桩径统一为 2 cm,则几何比尺取 1:50。Sarmiento 等^[44]通过理论分析与物理模型试验证实,桩柱局部冲刷试验可采用泥沙起动相似准则,控制无量纲水流强度 u/u_c 实现相似设计。基于试验水槽工况条件与模型沙材料特性综合比选,本文选用粒径 0.038 mm 石英粉模拟黏性沙,试验水深控制为 0.4 m 开展系列冲刷试验。

通过水槽试验验证,0.038 mm 石英粉模拟的黏性沙 u_c 为 32.7 cm/s(与式(1)计算的理论值 31.3 cm/s 偏差仅 4.5%)。本文共设置 4 组试验 A、B1、B2、B3,其中试验 A 为单桩局部冲刷;试验 B1、B2、B3 为顺流向、横向桩间距相同,但横向桩间距分别为 $3D$ 、 $5D$ 、 $7D$ 的 5 行 5 列桩柱(即 5×5)。所有试验均在流量(Q)为 $0.068\text{ m}^3/\text{s}$ 、水深 $h=0.4\text{ m}$ 、石英粉粒径 0.038 mm、单桩直径为 2 cm、水流强度 $u/u_c=0.65$ 、冲刷持续时间为

10 h 条件下进行。

$$u_c = 0.32 \ln \left(11 \frac{h}{\Delta} \right) \left(\frac{\Delta}{\Delta_*} \right)^{1/6} \sqrt{3.6 \frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d_{50} + \left(\frac{\gamma_0}{\gamma_{0*}} \right)^{2.5} \frac{\varepsilon_0 + gh\delta(\delta/d_{50})^{0.5}}{d_{50}}}$$

(1)

式中： Δ 为床面粗糙度； Δ_* 为参考粒径； ε_0 为内聚力综合系数，取为 $1.75 \text{ cm}^3/\text{s}^2$ ； ρ_s 、 ρ 分别为泥沙和水的密度，取 $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$ ， $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ； g 为重力加速度； δ 为水膜厚度，取 $2.31 \times 10^{-5} \text{ cm}$ ； γ_0 、 γ_{0*} 分别为黏性沙干重度与平均干容重度，取 $\gamma_0 = 1150 \text{ kN/m}^3$ ， $\gamma_{0*} = 1200 \text{ kN/m}^3$ 。中值粒径 $d_{50} < 0.5 \text{ mm}$ 时， $\Delta = 1 \text{ mm}$ 、 $\Delta_* = 10 \text{ mm}$ 。

开展局部冲刷试验前，于土力学实验室内系统测定了石英粉床面的土力学参数。将石英粉搅拌并重新整平床面后，分别在静置 24、48、72 h 后测量其含水率、液限、塑限、湿密度及孔隙比，每次试验均取 3 组平行试样，并以 3 次试验平均值作为最终试验结果（表 1）。静置 24 h 与 48 h 的土力学参数变化幅度较小，而 72 h 后孔隙比从初始的 0.466 显著降至 0.152，床面呈现高度密实状态。石英粉与水混合后呈现淤泥质特性，初始 24 h 内具有显著流塑性，其塑限随静置时间逐步增大。经过对比分析发现，静置 36 h 后床面状态（塑限 29.4%、液性指数 1.12）可有效模拟实际海岸淤泥质的流变特性。基于实际淤泥质海岸高含水量（62.3%~58.1%）、强流塑性的典型特征，所有局部冲刷试验均采用静置 36 h 后的黏性沙进行，以确保床面材料与天然沉积物力学行为的相似性。

表 1 黏性沙土力学参数

Table 1 Geotechnical parameters of cohesive sediment

时间/h	含水率/%	液限/%	塑限/%	湿密度/(kg/m ³)	孔隙比
24	23.43	31.27	13.87	2290	0.466
48	26.12	27.30	18.47	2150	0.600
72	14.38	28.22	17.15	2700	0.152

桩柱局部冲刷试验在宁波大学多功能变坡水槽开展，水槽主体尺寸为 18 m（长）×0.8 m（宽）×0.7 m（高），最大设计流量 $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 。如图 1 所示，试验采用闭式循环水力系统，水流经离心泵加压输送至进水箱，通过蜂窝式整流器消除湍流后形成均匀稳定流。试验段下游水位通过电动尾门开度（分辨率 0.1° ）精确调控，流量由电磁流量计实时监测（分辨率 0.1 L/s ，系统误差小于或等于 0.15%）。水泵变频器（频率分辨率 1 Hz）与尾门构成全闭环自动控制系统，可实现流量动态平衡（波动率小于 0.5%）。流速测量采用声学多普勒流速仪（ADV，Nortek Vectrino+），精度为 $\pm 0.1 \text{ mm/s}$ ，探头搭载于三维高精度位移平台（定位精度 $\pm 0.5 \text{ mm}$ ）导轨纵向移动，实现测点毫米级定位。试验段位于水槽中轴区，铺设长 2 m、厚 15 cm 的 0.038 mm 石英粉模拟黏性沙床面，床面两侧设置 1：1.5 边坡以固定沙体，与试验区平顺衔接。

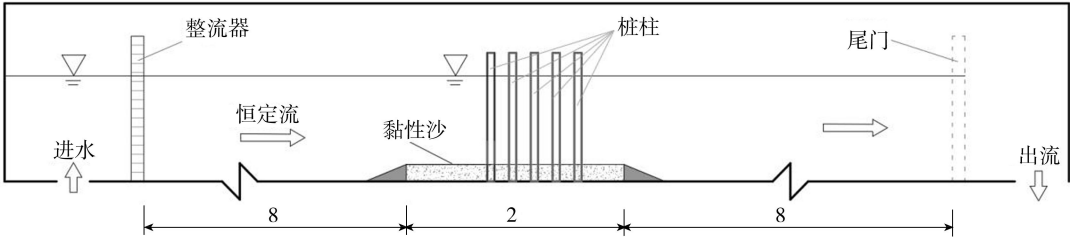


图 1 黏性沙试验水槽布置示意图(单位:m)

Fig. 1 Schematic diagram of experimental flume layout for cohesive sediment (unit: m)

在流量 $Q = 0.068 \text{ m}^3/\text{s}$ 、水深 $h = 0.4 \text{ m}$ 的工况下，采用 16 MHz 声学多普勒流速仪（ADV，Nortek Vectrino+）对桩位预设区域沿水深开展顺流向流速场精细测量。根据 ADV 近场干扰特性（盲区 4~5 cm），测量范围限定为床面以上 0.3 m 水层，垂向按 0.3~1.3 cm 梯度布设测点（近床面加密），单点采样频率 50 Hz、采样时长 200 s（有效数据量 ≥ 10000 组）。实测床面流速随水深的分布曲线如图 2 所示，符合经典指数模型，验证了水流边界层发育的充分性。

试验 A 的单桩垂直安装于床面中心位置，用于获取基础冲刷特性参数。试验 B1、B2、B3 为群桩工况，采用 5×5 正方形布置（图 3），顺流向与横向桩间距等值设定。桩柱按从上游看向

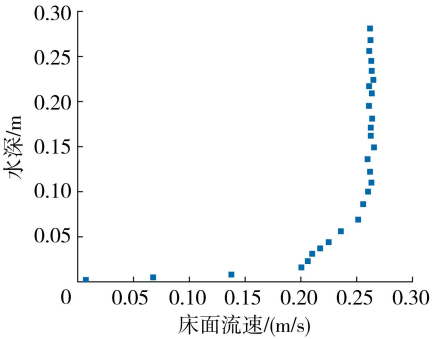


图 2 黏性沙床面流速沿水深分布曲线

Fig. 2 Distribution curve of flow velocity along water depth on cohesive sediment bed

下游视角编号,行号自上游至下游递增(第 1~5 行),列号自上至下递增(第 1~5 列),如第 2 行第 5 列桩记为 P25。坐标系原点设于中心桩 P33 轴线处(第 3 行第 3 列), x 轴顺水流方向, y 轴垂直水流方向, z 轴垂直于 xy 平面且向上为正。水流自第 1 行桩(P11~P15)均匀入流,经桩群作用后由第 5 行桩(P51~P55)下游流出。试验每冲刷 1 h 后停止造流,水槽缓慢放水,待泥沙床面无水后在桩群周围粘贴标记点(图 4),然后用水平向和垂向精度分别为 ± 0.3 、 ± 0.1 mm 的手持式激光地形扫描仪(EinScan Pro 2X)对群桩周围进行地形扫描并生成点云数据,借助 EXScan 后处理软件完成点云数据解算与转换,再导入 Tecplot 软件绘制地形等值云图。

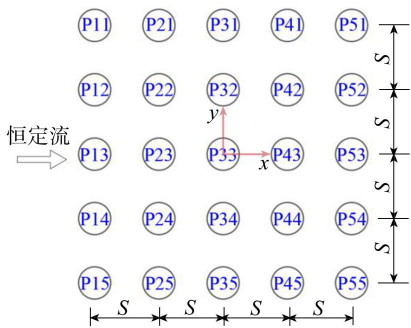


图 3 群桩局部冲刷试验平面布置示意图
Fig. 3 Schematic diagram of plan layout for local scour experiment of pile groups

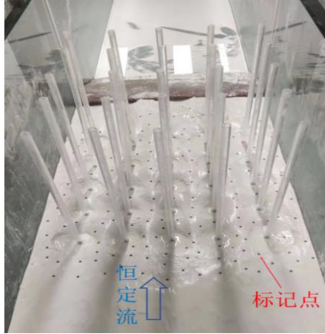


图 4 试验 B3 冲刷 1 h 后地形照片
Fig. 4 Topographic photo after scouring for 1 h in test B3

2 试验结果与分析

2.1 群桩局部冲刷特性

单桩条件下,局部冲刷坑围绕桩柱呈现不规则形状,与非黏性沙床面的局部冲刷形态显著不同。非黏性沙床面的局部冲刷坑坡度较为平缓,通常接近泥沙的水下休止角。而黏性沙在局部冲刷过程中,泥沙以单颗粒、小碎块和大碎块 3 种形式运动^[24-25,30],冲刷坑形成后,边坡常以塌落的方式进入坑内,导致冲刷坑的坡度较为陡峭。由图 5(a)可知,冲刷坑在顺流向和横向的最大尺寸分别为 $15D$ 和 $13D$,最大冲刷深度约为 $2.5D$,且桩前和桩后的冲刷深度相近。由于激光地形扫描仪水平向和垂向扫描精度分别为 ± 0.3 、 ± 0.1 mm,因此平面和垂向最大相对测量误差分别为 0.1%、0.6%,具有较高精度。尽管试验 A 的水流强度为 0.65,其冲刷深度却比 Gong 等^[45]非黏性沙局部冲刷试验在更高水流强度下的冲刷深度($2.0D$)更大,这一现象与 Ansari 等^[46]的试验结论一致,即黏性沙的局部冲刷深度可能小于或大于非黏性沙的冲刷深度,主要取决于黏性沙的含水量和流塑性等特性。当塑性指数大于 4、黏土含量超过 30%时,黏性沙床面局部冲刷深度可远小于非黏性沙,二者比值范围为 0.1~1^[46]。当黏性沙处于低含水率和密实状态时,泥沙颗粒间的电学吸引力形成较强的胶结力^[35],泥沙主要以聚集体的形式运动^[35-36],导致其临界起动剪应力显著增大,从而使黏性沙的局部冲刷深度小于非黏性沙^[27];反之,则冲刷深度更大。因此,与非黏性沙相比,黏性沙条件下桩柱局部冲刷的影响因素更为复杂,冲刷特性也更为多样化。此外,桩后尾涡引起的冲刷现象也表现出与非黏性沙不同的特点,黏性沙颗粒较细,冲刷坑泥沙易被水流携带至下游,沉积较少。

由图 5 可知,当桩柱为 5×5 群桩时,试验 B1 在桩侧后方水槽壁面附近因预先埋设的抽水泵导致形成了较大的冲刷坑,但未观测到对群桩周围局部冲刷地形的影响。整体来看,当桩间距为 $3D$ 时,试验 B1 中桩柱之间的冲刷坑在冲刷后已连成一个整体。随着桩间距增大至 $5D$ 和 $7D$,尽管桩柱之间的床面均位于冲刷坑以下,但从形态上仍表现出一定的独立性。此外,试验 B1~B3 的最大冲刷深度变化较小,范围为 $5D\sim 6D$ 。上游桩柱的局部冲刷深度小于下游桩柱,且当桩柱位于第 3 行及以后时,局部冲刷深度的变化趋于稳定。

2.2 局部冲刷深度随时间变化

为分析局部冲刷深度随时间的变化规律,每隔 1 h 对桩柱周围地形进行扫描,每组试验共获得 10 组冲刷地形数据。基于这些数据,沿顺流向截取每列桩柱的中轴线断面,分别得到单桩局部冲刷的 $y/D=0$ 剖面,以及桩间距为 $3D$ 、 $5D$ 、 $7D$ 的群桩局部冲刷二维断面($y/D=-10$ 、 $y/D=-5$ 、 $y/D=5$ 、 $y/D=10$ 、 $y/D=0$ 剖面)。由

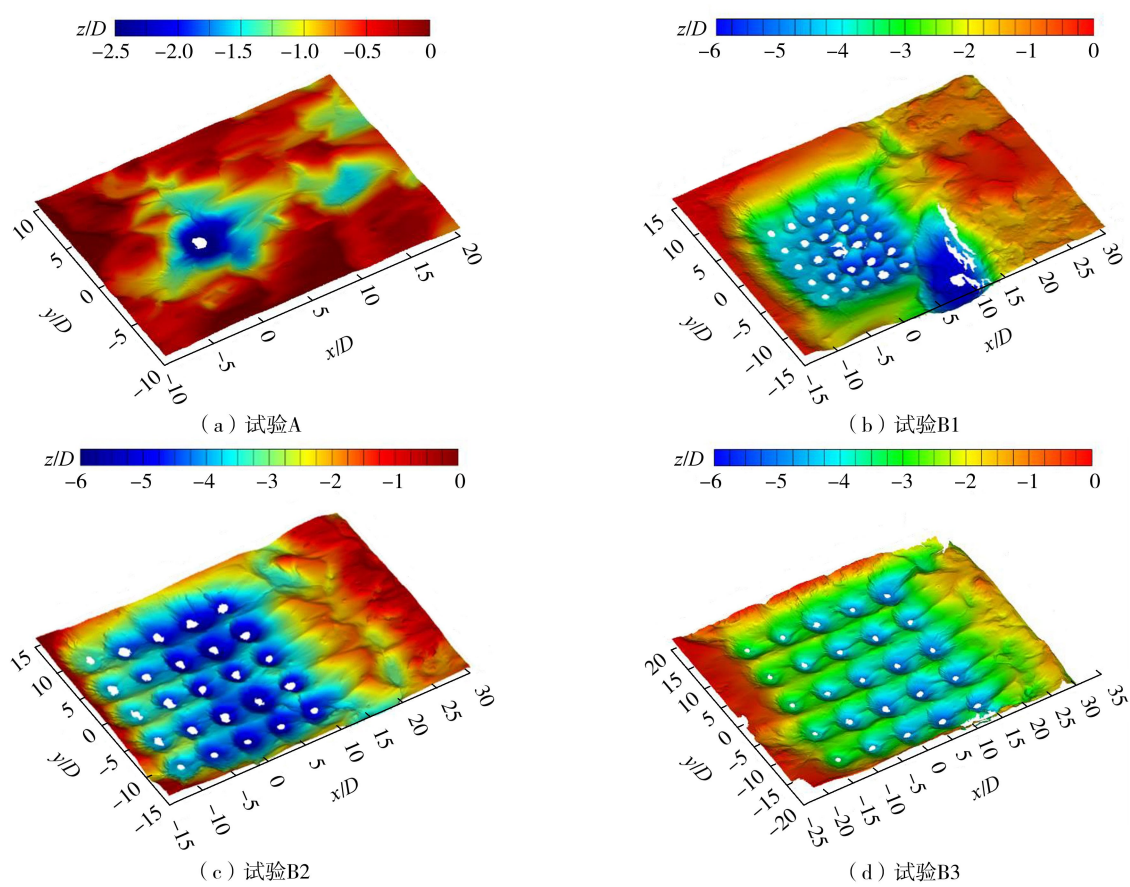


图 5 单桩与群桩局部冲刷试验三维地形云图

Fig. 5 Three-dimensional topographic cloud maps of local scour experiments for single pile and pile groups

于同一试验中每列桩柱的二维断面形态较为相似,以下选取桩柱 P13、P23、P33、P43、P53 所在断面的 $y/D=0$ 剖面进行讨论,其地形变化见图 6。

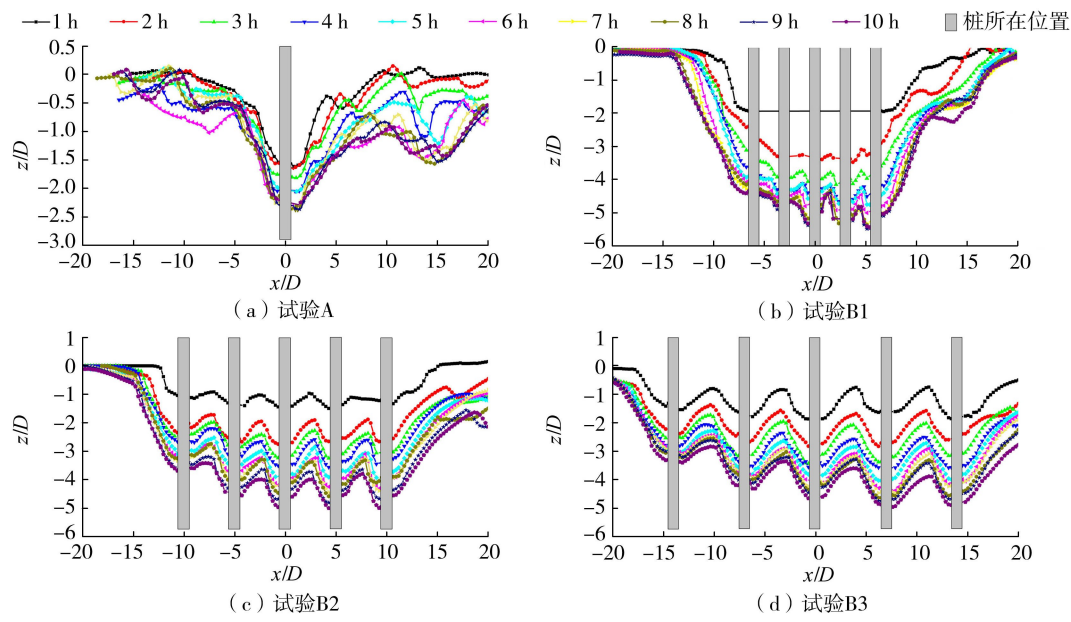


图 6 单桩与群桩中轴线断面 $y/D=0$ 地形变化

Fig. 6 Topographic changes at central axis section ($y/D=0$) for single pile and pile groups

由图 6(a)可知,单桩条件下,顺流向 $y/D=0$ 剖面的床面冲刷深度随冲刷时间逐渐增大至一定值后趋于稳定。冲刷初始阶段(例如冲刷 1h),桩前和桩后的局部冲刷深度分别为 $1.55D$ 和 $1.61D$,两者基本一致,分

别占冲刷 10 h 后冲刷深度的 68.0%和 68.2%。随着冲刷的持续进行,冲刷深度增长逐渐放缓,至冲刷 7 h 时,床面地形趋于稳定,剖面线与 8、9、10 h 的冲刷剖面线基本重合,表明局部冲刷已达到平衡状态。与非黏性沙试验中桩前冲刷深度通常大于桩后冲刷深度的特性不同,试验 A 中桩后冲刷深度为 2.36*D*,略大于桩前冲刷深度 2.28*D*。Ting 等^[27]在非黏性沙局部冲刷试验中也观察到了类似现象,并通过研究 2.5、7.5、15 cm 3 种桩径在流速 0.21 m/s 条件下的冲刷规律,发现高雷诺数时桩后冲刷深度可能大于桩前冲刷深度。然而,Ettema 等^[37]认为圆柱局部冲刷与桩柱雷诺数(Re_D)无关,与 Re_D 相关的斯特劳哈尔数(Sr)可通过改变桩柱后方旋涡脱落频率影响尾流结构,是决定局部冲刷发展的关键因子。Debnath 等^[25]根据试验得出桩后冲刷深度明显大于桩前冲刷深度的结果,并指出床面剪切力和水流强度是导致桩前、桩后冲刷深度与非黏性局部冲刷试验现象相反的原因。Ting 等^[27]采用最大剪应力(τ_{max})公式^[28]计算了非黏性沙床面的 τ_{max} ,通过分析可知, $\tau_{max}=2.26\sim4.83$ Pa 时桩前冲刷深度大于桩后冲刷深度, $\tau_{max}=0.54\sim2.59$ Pa 时桩前冲刷深度小于桩后冲刷深度。但 Debnath 等^[25]在试验中发现 $\tau_{max}=2.54\sim6.44$ Pa 时仍有一些局部冲刷深度桩前小于桩后现象,因此未明确给出 τ_{max} 的范围与桩前、桩后冲刷深度的具体关系。试验 A 中 $Re_D=4\,250$,计算得到 $\tau_{max}=0.746$ Pa,与 Ting 等^[27]在桩径 2.5 cm 低雷诺数条件下试验结果及 Debnath 等^[25]指出的较小 τ_{max} 结果一致。

由图 6(b)可知,当桩柱为 5×5 阵列且桩间距为 3*D* 时(试验 B1),冲刷速率显著加快,冲刷至 7 h 基本达到平衡状态,冲刷 10 h 后的冲刷深度约为单桩条件下的 2 倍。根据第 3 列桩柱可知,当桩柱行数 $R<3$ 时,上游桩柱的冲刷深度小于下游桩柱;当 $R\geq 3$ 时,桩柱的冲刷深度在任意行或列中的变化较小,基本稳定在 5.5*D* 左右。群桩局部冲刷表现出整体冲刷特性,整体冲刷坑的顺流向长度约为 34*D*。然而,Gong 等^[45]在非黏性沙床面中开展了水流强度为 0.6、0.8、1.0 的群桩 5×5 阵列局部冲刷试验,发现桩柱局部冲刷深度随着群桩行数的递增而呈线性减小。

由图 6(b)~(d)可知,随着桩间距增大,桩柱周围局部冲刷效率逐渐降低,以冲刷时间 2 h 为例, $S=3D$ 时,最大冲刷深度约为 3.5*D*; $S=5D,7D$ 时,逐渐减小为 2.5*D* 左右。然而,冲刷 10 h 后,群桩局部冲刷深度的差异较小,例如第 1 行桩柱的冲刷深度仍为最小,而第 3~5 行桩柱的冲刷深度基本保持不变。尽管群桩绕流过程中桩柱之间存在复杂的湍流相互作用,但同一行中 5 列桩柱的局部冲刷深度非常接近,且上游桩柱的冲刷深度通常小于下游桩柱。此外,在较大桩间距条件下,中间位置桩柱(如桩柱 P33、P23、P43)的桩前、桩后冲刷深度及冲刷坑坡度表现出较好的前后对称性。单桩试验表明,冲刷 1 h 后的冲刷坑顺流向长度为 18*D*,因此在试验 B1~B3 中,桩间距为 3*D*、5*D*、7*D* 的情况下,群桩桩柱之间床面的一般冲刷可以忽略不计。

选取试验 B1~B3 群桩冲刷深度最大的桩柱,分析其桩前相对冲刷深度(d_s/D , d_s 为冲刷深度)随时间($t^*=gt^2/D$)的变化关系,并与试验 A 进行对比,结果如图 7 所示。利用 Du 等^[38]提出的双指数型公式对数据点进行拟合,拟合效果较好,其中试验 B1 的决定系数最小($R^2=0.96$),其他试验 R^2 均为 0.99。由图 7 中拟合曲线可知,黏性沙床面群桩局部冲刷深度可类似于非黏性沙局部冲刷,分为 3 个冲刷阶段,即冲刷初始阶段、冲刷发展阶段、冲刷平衡阶段。图 7 冲刷深度变化趋势与无黏性沙冲刷演化过程基本一致,结合 Ettema^[39]的无黏性沙冲刷机理展开分析:冲刷初始阶段,桩体扰流产生下潜水流,桩前马蹄涡未充分发育,桩侧流线汇聚效应主导冲刷,桩身两侧率先形成冲蚀;待桩前马蹄涡生成后,桩前床面同步发生淘刷,冲刷坑在涡旋作用下持续拓宽加深;当冲刷坑规模达到马蹄涡作用极限,坑内泥沙无法向外输运,冲刷坑形态不再明显变化,冲刷进入平衡阶段。试验 A、B1、B2、B3 的冲刷初始时刻均在极短时间内完成, $t^*<6.5\times10^{10}$,即 $t<1$ h;试验 A、B1、B2、B3 冲刷发展阶段分别为 $t^*=10^{11}\sim2.2\times10^{11}$ (即 $t=1\sim6$ h)、 $t^*=10^{11}\sim5\times10^{11}$ (即 $t=1\sim9$ h)、 $t^*=10^{11}\sim4\times10^{11}$ (即 $t=1\sim8$ h)。由于 $t^*=4\times10^{11}$ (即 $t\approx8$ h)时,4 条曲线中的 d_s/D 基本保持为恒定值,因此可认为试验结束时($t^*=6.4\times10^{11}$ 或 $t=10$ h)均已达到冲刷平衡状态。取冲刷 10 h 后最大冲刷深度为平衡深度,则试验 A、B1、B2、B3 分别为 2.43*D*、5.85*D*、5.59*D*、5.06*D*。群桩局部冲刷约为单桩冲刷深度的 2 倍以上,群桩最大冲刷深度随着桩间距增大而减小,且 3*D*、5*D* 桩间距时群

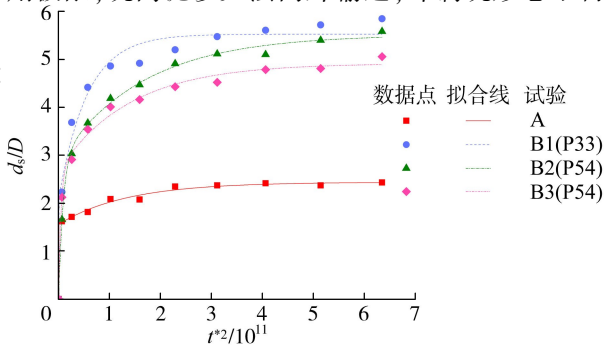


图 7 冲刷深度随时间变化关系

Fig. 7 Relationship between scour depth and time

桩最大冲刷平衡深度较为近似。

2.3 冲刷平衡深度规律

利用桩柱顺流向断面,获得 5×5 群桩、桩间距 3*D*、5*D*、7*D* 条件下每个桩柱相对冲刷平衡深度 d_{se}/D (d_{se} 为桩柱冲刷平衡深度),结果如图 8 所示。当 $S=3D$ 时,第 1~5 行桩柱的 d_{se}/D 平均值分别为 4.15、4.60、5.10、5.15、5.10;同一行桩柱冲刷深度变化相对较大,最大变化出现在第 3 行桩柱,最大、最小 d_{se}/D 分别位于桩柱 P32、P35,其值分别为 5.65、4.70。当 $S=5D$ 时,同一行桩柱局部冲刷平衡深度变化幅度小;第 1~5 行桩柱的 d_{se}/D 平均值分别为 3.75、4.50、5.00、5.20、5.10。当 $S=7D$ 时,第 1~5 行桩柱的 d_{se}/D 平均值分别为 3.40、4.20、4.70、4.90、4.80;总体上,上游桩柱局部冲刷深度小于下游冲刷深度,第 3~5 行桩柱局部冲刷深度在各组试验中分别趋于各自稳定值。随着桩间距的增加,第 1 行桩柱冲刷平衡深度逐渐减小,桩间距 3*D*、5*D*、7*D* 条件下分别为 4.15*D*、3.75*D*、3.40*D*。但桩间距 3*D*、5*D* 时,第 2~5 行桩柱冲刷平衡深度值基本相等;桩间距达到 7*D* 时,第 1~5 行桩柱冲刷平衡深度均小于桩间距 3*D*、5*D* 的桩柱冲刷平衡深度。由此可见,黏性沙床面群桩局部冲刷的临界桩间距为 5*D*。

3 结 论

- a. 在黏性沙条件下,即使水流强度较低(本文为 0.65),桩前与桩后的局部冲刷深度基本相等,这与非黏性沙条件下桩前冲刷深度明显大于桩后冲刷深度的特性显著不同。黏性沙群桩局部冲刷中,上游桩柱的冲刷深度通常小于下游桩柱,与非黏性沙群桩的冲刷特性相反,表明黏性沙床面中,尾流涡旋对桩柱局部冲刷深度的贡献不小于桩前马蹄涡的作用。
- b. 无论是单桩还是 5×5 群桩(桩间距为 3*D*、5*D*、7*D*),桩柱冲刷深度随时间的变化均可划分为冲刷初始阶段、冲刷发展阶段和冲刷平衡阶段,在 10 h 内,冲刷均可达到平衡状态。群桩在桩间距为 3*D* 和 5*D* 时,实时冲刷深度的变化历程基本相同。
- c. 当桩间距为 3*D*、5*D*、7*D* 时,群桩中每个桩柱的局部冲刷深度均为单桩条件下的 2 倍以上,第 1~3 行桩柱冲刷深度逐渐增大,第 3~5 行桩柱冲刷深度基本保持为同一水平。随着桩间距的增大,第 2~5 行桩柱的冲刷深度在桩间距为 3*D* 和 5*D* 时较为接近;当桩间距达到 7*D* 时,群桩局部冲刷深度变化不再受桩间距影响。

参考文献:

[1] 李永乐,房忱,裴放,等. 海洋桥梁波流力作用与基础冲刷问题及对策研究[J]. 中国工程科学,2019,21(3):18-24. (Li Yongle,Fang Chen,Qiu Fang,et al. Wave current force action and foundation scour of marine bridges[J]. Strategic Study of CAE,2019,21(3):18-24. (in Chinese))

[2] Zhang Fengpeng, Chen Xuguang, Yan Jiahao, et al. Countermeasures for local scour around offshore wind turbine monopile foundations:a review[J]. Applied Ocean Research,2023,141:103764.

[3] 贾家喻,张金凤,郑斌,等. 潮流作用下海上风电群桩基础局部冲刷与防护试验研究[J]. 海洋工程,2023,41(1):159-168. (Jia Jiayu,Zhang Jinfeng,Zheng Bin,et al. Experimental study on local scouring and protection of offshore wind power pile groups foundation under tidal current[J]. The Ocean Engineering,2023,41(1):159-168. (in Chinese))

[4] Sui Titi,Yang Yunhan,Yang Zhendi,et al. Experimental study on the irregular wave-induced pore pressure of a sloping beach with cross-shore profile evolution[J]. Ocean Engineering,2025,324:120680.

[5] Zhang Zhiyong,Du Shengtao,Guo Yakun,et al. Field study of local scour around bridge foundations on silty seabed under irregular tidal flow[J]. Coastal Engineering,2023,185:104382.

[6] Liang Bingchen,Du Shengtao,Pan Xinying,et al. Local scour for vertical piles in steady currents: review of mechanisms, influencing factors and empirical equations[J]. Journal of Marine Science and Engineering,2020,8(1):4.

[7] Guan Dawei,Xie Yuxuan,Yao Zishun,et al. Local scour at offshore windfarm monopile foundations:a review[J]. Water Science

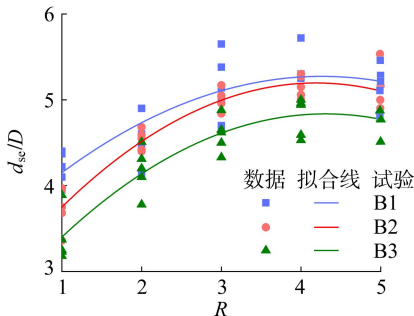


图 8 试验 B1~B3 单个桩柱冲刷平衡深度
Fig. 8 Equilibrium scour depths of individual piles in tests B1-B3

- and Engineering,2022,15(1):29-39.
- [8] Zhao Peiqing, Qi Wengang, Liu Bo, et al. A physics-based model for clear-water scour development around a pile foundation in clayey soils[J]. Applied Ocean Research, 2025, 155: 104436.
- [9] Reddy S K, Chandra V. Prediction models for scour depth around circular compound bridge piers[J]. Water Science and Engineering, 2025, 18(3): 378-390.
- [10] 陈汨梨, 林祥峰, 张明宗, 等. 往复流作用下潮流能水轮机单桩基础冲刷试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(2): 17-22. (Chen Mili, Lin Xiangfeng, Zhang Mingzong, et al. Experimental study on scour process around mono-pile foundation of a tidal stream turbine under bidirectional flow[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(2): 17-22. (in Chinese))
- [11] Melville B W. Pier and abutment scour: integrated approach[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 123(2): 125-136.
- [12] Sheppard D M, Melville B, Demir H. Evaluation of existing equations for local scour at bridge piers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 140(1): 14-23.
- [13] Richardson E V, Davis S R. Evaluating scour at bridges[R]. 4th ed. Washington: Federal Highway Administration, U. S. Department of Transportation, 2001.
- [14] Liang Fayun, Wang Chen, Huang Maosong, et al. Experimental observations and evaluations of formulae for local scour at pile groups in steady currents[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2017, 35(2): 245-255.
- [15] Sui Titi, Liu Chenglin, Zhang Jisheng, et al. 3D numerical modeling of wave-monopile-seabed interaction in the presence of a scour hole[J]. Ocean Engineering, 2024, 298: 117254.
- [16] Kim H S, Nabi M, Kimura I, et al. Computational modeling of flow and morphodynamics through rigid-emergent vegetation[J]. Advances in Water Resources, 2015, 84: 64-86.
- [17] Kim H S, Nabi M, Kimura I, et al. Numerical investigation of local scour at two adjacent cylinders[J]. Advances in Water Resources, 2014, 70: 131-147.
- [18] Hamidi A, Siadatmousavi S M. Numerical simulation of scour and flow field for different arrangements of two piers using SSIIM model[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2018, 9(4): 2415-2426.
- [19] 高鹏程, 牟献友, 赵奕涵, 等. 冰盖下串列桥墩局部冲刷及水流特性研究[J]. 水利水电科技进展, 2026, 46(1): 74-82. (Gao Pengcheng, Mou Xianyou, Zhao Yihan, et al. Study on local scour and flow characteristics around tandem piers under ice cover[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2026, 46(1): 74-82. (in Chinese))
- [20] Solaimani N, Amini A, Banejad H, et al. The effect of pile spacing and arrangement on bed formation and scour hole dimensions in pile groups[J]. International Journal of River Basin Management, 2017, 15(2): 219-225.
- [21] Zhou Y, Yiu M W. Flow structure, momentum and heat transport in a two-tandem-cylinder wake[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2006, 548: 17-48.
- [22] Ataie-Ashtiani B, Aslani-Kordkandi A. Flow field around single and tandem piers[J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2013, 90(3): 471-490.
- [23] Hosny M M. Experimental study of local scour around circular bridge piers in cohesive soils[D]. Fort Collins: Colorado State University, 1995.
- [24] Debnath K, Chaudhuri S. Local scour around non-circular piers in clay-sand mixed cohesive sediment beds[J]. Engineering Geology, 2012, 151: 1-14.
- [25] Debnath K, Chaudhuri S. Laboratory experiments on local scour around cylinder for clay and clay-sand mixed beds[J]. Engineering Geology, 2010, 111(1/2/3/4): 51-61.
- [26] 张玮, 濮勋, 廖迎娣. 淤泥质海岸近海风电塔基局部冲刷计算研究[J]. 海洋工程, 2010, 28(2): 105-109. (Zhang Wei, Pu Xun, Liao Yingdi. Calculation of local scour around piles of offshore wind power on muddy coast[J]. The Ocean Engineering, 2010, 28(2): 105-109. (in Chinese))
- [27] Ting F C K, Briaud J L, Chen H C, et al. Flume tests for scour in clay at circular piers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 127(11): 969-978.
- [28] Briaud J L, Ting F C K, Chen H C, et al. SRICOS: prediction of scour rate in cohesive soils at bridge piers[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(4): 237-246.
- [29] 梁发云, 王琛, 王玉, 等. 黏性-砂性土层中群桩基础冲刷特性波流水槽试验研究[J]. 水利学报, 2015, 46(增刊1): 79-83. (Liang Fayun, Wang Chen, Wang Yu, et al. Analysis on flume test of local scour around pile groups embedded in sandy-cohesive soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(S1): 79-83. (in Chinese))

[30] Dey S, Helkjær A, Sumer B M, et al. Scour at vertical piles in sand-clay mixtures under waves[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2011, 137(6): 324-331.

[31] 李嘉隆. 黏性土地基桩基础局部冲刷深度预测方法[J]. 船舶工程, 2023, 45(增刊1): 15-19. (Li Jialong. Prediction method of local scour depth of pile foundations in cohesive soil[J]. Ship Engineering, 2023, 45(S1): 15-19. (in Chinese))

[32] Dou G R. Incipient motion of sediment under currents[J]. China Ocean Engineering, 2000, 14(4): 391-406.

[33] 杜升涛, 王超琳, 杨博, 等. 水流强度对淹没式方桩局部冲刷特性的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(2): 92-100. (Du Shengtao, Wang Chaolin, Yang Bo, et al. Influence of flow intensity on local scour characteristics of a submerged square pile[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(2): 92-100. (in Chinese))

[34] 陈秉如, 冀鸿兰, 高鹏程, 等. 冰盖下组合桥墩的局部冲刷特性及水力特性[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(2): 53-60. (Chen Bingru, Ji Honglan, Gao Pengcheng, et al. Local scour and hydraulic characteristics of composite piers under ice sheet[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(2): 53-60. (in Chinese))

[35] 刘洁, 刘洁玉, 白玉川. 黏性泥沙流变特性及其临界起动的研究[J]. 泥沙研究, 2015, 40(6): 59-64. (Liu Jie, Liu Jieyu, Bai Yuchuan. Experimental study on rheological characteristics and incipient motion of the cohesive sediment[J]. Journal of Sediment Research, 2015, 40(6): 59-64. (in Chinese))

[37] 郭超, 何青. 黏性泥沙絮凝研究综述与展望[J]. 泥沙研究, 2021, 46(2): 66-73. (Guo Chao, He Qing. Review of the research on cohesive sediment flocculation[J]. Journal of Sediment Research, 2021, 46(2): 66-73. (in Chinese))

[37] Ettema R, Kirkil G, Muste M. Similitude of large-scale turbulence in experiments on local scour at cylinders[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 132(1): 33-40.

[38] Du Shengtao, Wang Zhenlu, Wang Risheng, et al. Effects of flow intensity on local scour around a submerged square pile in a steady current[J]. Physics of Fluids, 2022, 34(8): 085126.

[39] Ettema R. Scour at bridge piers[D]. Auckland: University of Auckland, 1980.

[40] 潘新颖, 郭云辉, 梁丙臣, 等. 水流作用下的群桩流场特性 PIV 试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2024(5): 54-62. (Pan Xinying, Guo Yunhui, Liang Bingchen, et al. PIV experimental study on the flow field characteristics of pile groups under hydraulic action[J]. Hydro-Science and Engineering, 2024(5): 54-62. (in Chinese))

[41] 徐忠琨. 宁波大榭招商国际集装箱码头工程设计[J]. 水运工程, 2008(10): 113-119. (Xu Zhongkun. Design of Ningbo Daxie merchants steam navigation international container terminal[J]. Port & Waterway Engineering, 2008(10): 113-119. (in Chinese))

[42] Wang Jianfeng, Su Lei, Xie Libo, et al. Seismic response analysis of pile-supported wharf under three types of near-fault ground motion[J]. Structures, 2023, 57: 105144.

[43] Li Panpan, Li Jingpei, Li Lin, et al. Overall structural degradation of a high-piled wharf under chloride invasion and the impact force of ship berthing[J]. Ocean Engineering, 2024, 312: 119320.

[44] Sarmiento J, Guanche R, Losada I J, et al. Scour processes around pile clusters of jacket foundations under steady currents[J]. Ocean Engineering, 2024, 313: 119502.

[45] Gong Ming, Pan Xinying, Du Shengtao, et al. Laboratory study of local scour around an array of pile groups in clear-water scour conditions[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2025, 13(1): 137.

[46] Ansari S A, Kothiyari U C, Raju K G R. Influence of cohesion on scour around bridge piers[J]. Journal of Hydraulic Research, 2002, 40(6): 717-729.

(收稿日期: 2025-03-20 编辑: 刘晓艳)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.04.007

吸力桩深水油气建井贯入过程垂直度控制研究

张明贺,杨进,李甲豪,傅超,朱国惊,王佳康

(中国石油大学(北京)安全与海洋工程学院)

摘要:针对桩体非竖直安装易导致浅层土体失稳、井口倾覆等事故的问题,通过理论分析和模拟试验相结合的方法,对不同直径和安装深度的吸力桩进行了垂直度控制研究,提出了根据吸力桩结构尺寸和地层土体性质进行吸力桩深水油气建井垂直度控制的计算方法,并采用模拟试验进行了验证。结果表明:吸力桩直径、吸力桩下入深度、海底土层性质是影响吸力桩垂直度控制的主要因素;其他条件相同的工况下,吸力桩直径越小、下入深度越浅,对井口垂直度的控制要求越高;为了确保深水水下井口稳定,吸力桩井口倾角应不超过 6° 。

关键词:吸力桩;深水油气井;水下井口;垂直度控制;模拟试验

Research on verticality control during suction pile penetration for deepwater oil and gas well construction

Zhang Minghe, Yang Jin, Li Jiahao, Fu Chao, Zhu Guojing, Wang Jiakang

(College of Safety and Ocean Engineering, China University of Petroleum (Beijing))

Abstract: To address the problem that non-vertical installation of suction pile can easily lead to shallow soil instability and wellhead overturning, a study on verticality control of suction piles with different diameters and installation depths was conducted through a combination of theoretical analysis and simulation tests. A calculation method for verticality control of suction piles in deepwater oil and gas well construction was proposed based on the structural dimensions of the suction pile and the properties of the formation soil and was validated through simulation tests. The results show that the diameter of the suction pile, the penetration depth of the suction pile, and the properties of the seabed soil are the main factors affecting the verticality control of the suction pile. Under the same other conditions, a smaller diameter of the suction pile and a shallower penetration depth pose higher verticality control requirements on the wellhead. To ensure the stability of the deepwater seabed wellhead, the inclination angle of the suction pile wellhead shall not exceed 6° .

Key words: suction pile; deepwater oil and gas well; subsea wellhead; verticality control; simulation experiment

吸力桩技术作为一种新型深水油气建井技术,在挪威等国率先应用,并逐渐推广至全球^[1-2]。我国 2020 年在南海神狐海域的天然气水合物试采中,首次采用大直径吸力桩(直径 6.5 m,贯入深度 12 m,质量 96 t)结合表层建井、浅部定向造斜及动力导向技术,实现了日产量 2.87 万 m^3 (持续 30 d)的突破^[3]。然而,国内吸力桩设计仍处于起步阶段,缺乏系统的理论指导,导致设计偏保守,增加了制作、运输及安装成本。因此,优化吸力桩结构尺寸(如直径、长径比)以匹配地层参数和井口载荷,成为深水油气开发降本增效的关键。

现有研究主要围绕桩-土相互作用机理,针对不同荷载工况下的基础稳定性开展分析^[4-6]。在竖向承载特性方面,刘梅等^[7]通过试验与数值模拟证实,长径比显著影响基础的竖向承载力,其失效模式主要表现为大位移冲剪破坏。在水平承载特性方面,金书成等^[8]研究表明,长径比是控制水平极限承载力的关键参数,失稳时主要表现为桩-土挤压分离。

为提高基础性能,李大勇等^[9]和 Kan 等^[10]分别采用了裙式结构和宽浅式裙结构,并证实此类优化设计可显著提升水平承载力和抗弯性能。然而,增大基础尺寸虽能改善力学性能,但会显著增加施工成本,需进行综合优化。此外,海底土体参数作为影响基础稳定性的根本因素,其与吸力桩在下入过程中的相互作用机制仍需深入研究,尤其是针对非竖直安装工况。

基金项目: 中国石油大学(北京)科研基金项目(2462026XKBH002);国家重点研发计划项目(2022YFC2806110);国家自然科学基金企业创新发展联合基金重点支持项目(U22B20126)

作者简介: 张明贺(1994—),男,助理研究员,博士,主要从事海洋油气钻采研究。E-mail:Zmh@cup.edu.cn

通信作者: 杨进(1966—),男,教授,博士,主要从事石油工程和海洋油气工程研究。E-mail:yjin@cup.edu.cn

在吸力桩基础稳定性方面,刘书杰等^[11]和李舒展等^[12]针对深水吸力桩井口稳定性分别开展了物理模拟试验和数值模拟研究,提出了吸力桩基础稳定性计算和校核方法,证明了吸力桩基础在提高深水井口水平和竖直承载力方面的显著优势。刘书杰等^[13]和马文冠等^[14]分别针对单桩和复合型吸力桩基础安装过程承载力特性开展了模拟试验研究,提出可通过重力安装和吸力安装两个关键过程实现吸力桩的贯入,其中重力安装会产生较大的倾角,需要严格控制。季一帆等^[15-16]通过离心试验模拟非竖直状态下吸力桩基础的极限承载力,研究表明,倾斜程度对吸力桩基础的承载力影响显著,安装初期倾斜会产生偏心载荷,严重影响基础稳定性,导致安装倾角不断增大,诱发倾覆风险。

桩体结构参数、土体特性、安装工艺等是影响垂直度控制的关键参数,目前通过高精度监测方法,如采用“牛眼”气泡水平仪、水下机器人等,都可以实时调整井口倾角。但目前关于吸力桩基础在下入和回收过程中的垂直度控制及极限倾角设计仍缺乏系统的理论指导,本文通过理论分析与模型试验相结合的方法,综合考虑地层土体特性^[17-18]和吸力桩结构尺寸参数^[7,19-23],建立了非竖直工况下的贯入阻力计算模型,提出了倾斜条件下的基础失效模式判别准则,并结合模拟试验探讨了不同工况下吸力桩的承载特性及极限倾角,以期对深水吸力桩建井的垂直度控制提供参考。

1 吸力桩深水油气建井优势

目前南海深水油气建井方式主要采用喷射法,将表层导管作为水下井口的主要持力结构贯入海底浅层泥线以下 60~100 m,通过表层导管与周围土体的侧向摩擦力来提供水下井口结构的竖向载荷^[24]。采用喷射法建立水下井口对表层导管贯入深度设计有较高的要求,同时海底浅层土体性质差异也给表层导管的喷射安装带来了挑战^[25-26]。

吸力桩海底建井方法的主要优势为安装高效便捷,浅层土体参数适应性强,承载力高,抗弯性能强,井身结构优化空间大,作业可重复等。吸力桩安装无需大型设备,其通过泵吸排水形成负压使桩体自主下沉,省去传统打桩所需的巨型锤击设备,从而缩短了工期;该安装过程可精准控制且负压下沉过程可实时监测;此外,吸力桩通常采用薄壁钢筒结构,材料用量较传统桩基减少 30%~50%,且其承载能力强,通过桩体内外土体共同作用提供抗压、抗拔及抗侧向载荷能力,尤其适合承受深水复杂动态环境荷载;吸力桩技术适用水深范围广,可灵活应用于几十米至上千米的海水深度范围,适应未来深水、超深水油气勘探开发及作业需求^[27-28]。

2 吸力桩深水油气建井垂直度控制方法

2.1 吸力桩井口倾角的影响

如果贯入过程非竖直,桩体轴线与竖直方向存在倾角(图 1),其贯入阻力及动力分布将与垂直贯入时显著不同。基于静力平衡原理,建立吸力桩在非竖直条件下的受力平衡方程:

$$PS + G\cos\beta = F + N \tag{1}$$

$$G\sin\beta = W \tag{2}$$

式中: P 为桩体抽吸贯入产生的压差, kPa; S 为桩体上端部面积, m^2 ; G 为桩体重力, kN; β 为井口倾角, $(^\circ)$; F 为桩-土侧向摩擦力, kN; N 为土体对吸力桩下端面的支撑力, kN; W 为土体对吸力桩侧面的支撑力, kN。

分析发现,在重力贯入阶段 $P=0$,若存在井口倾角 β ,则重力一部分作为倾斜下入的动力($G\cos\beta$),一部分用于对周围地层施加压力($G\sin\beta$)。吸力桩基础重力贯入阶段动力降低,同时由于桩-土间的压力增大,导致贯入阻力增大,使得该阶段的贯入深度降低。重力贯入阶段如果不控制井口倾角,倾角可能会在重力作用下增大,影响后续贯入过程。

在抽吸贯入过程中,压差 P 作用在吸力桩基础上端部,压力方向与吸力桩轴线方向相同。若桩体发生

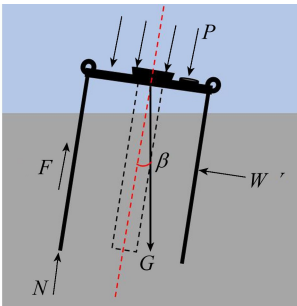


图 1 吸力桩基础井口倾角示意图
Fig. 1 Schematic diagram of wellhead inclination angle of a suction pile foundation

旋转,则旋转中心位于轴线倾斜方向一侧,不会增加桩体的倾角,相反会有一定的回拉作用,这主要取决于桩体直径、贯入深度、压差和土体性质等因素。

在吸力桩下入到预定深度后,承担上部井口系统载荷,若存在井口倾角 β (图 2),在水平环境载荷 H 作用下,其水平方向的受力平衡方程可表示为:

$$H = (W_1 + W_2 + W_3 + W_4) G_1 \sin \beta \tag{3}$$

式中: W_1 、 W_2 、 W_3 、 W_4 分别为桩体内壁、钻井管柱内壁、钻井管柱外壁、桩体外壁与周围土体作用产生的侧面支撑力, kN; G_1 为上部井口系统载荷, kN。

如果吸力桩基础非竖直安装,会导致井口载荷在筒壁与周围土体间产生附加压力作用,如果井口所受水平载荷较大,会产生平台井口失稳、倾覆的危险。由于地层土体各个方向压力相同,土体对吸力桩基础的支撑力求法与上述方法相同。

如果井口倾角过大,地层对吸力桩基础提供的水平分力降低,对侧壁土体施加的额外压力增加,会使得地层土体性质改变,增加浅层土体失稳及井口倾覆的风险。在设计过程中极限倾角的理论计算对工程安全有重要指导意义。

2.2 吸力桩井口极限倾角控制

吸力桩井口非竖直安装对井口稳定性构成较大威胁,针对上述分析,本文提出考虑土体性质、桩体尺寸、竖向载荷等条件下的极限倾角计算方法。

吸力桩水下井口重力安装阶段,井口倾角控制是建井的关键,此时基础下入地层深度浅,地层浅部松软土体难以有效限制和固定吸力桩基础(图 3)。此时根据下入动力与下入阻力的关系:

$$G \cos \beta = F + N \tag{4}$$

$$G \sin \beta \leq W \tag{5}$$

可得到重力贯入阶段允许倾角的极限值 β_1 :

$$\beta_1 \leq \arcsin \frac{W}{G} \tag{6}$$

分析发现在抽吸压差产生的压力垂直于吸力桩基础上端面时,压差全部转化为下入的动力,不会增大井口倾角,在此不做考虑。

当吸力桩贯入至预定深度后(图 4),其极限倾角的确定需综合校核上部井口系统重力载荷与环境最大水平载荷。

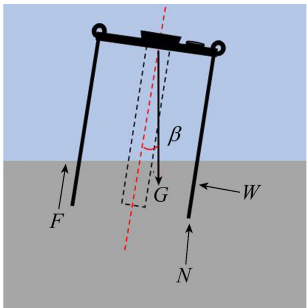


图 3 重力下入阶段的极限倾角示意图

Fig. 3 Schematic diagram of ultimate inclination angle during gravity penetration stage

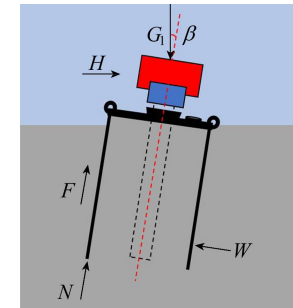


图 4 吸力桩贯入至预定深度后的极限倾角示意图

Fig. 4 Schematic diagram of ultimate inclination angle after suction pile penetrates to preset depth

由于吸力桩基础在小倾角工况下完全贯入海底地层后,能够提供充足的竖向承载力,极易满足式(7)的竖向平衡要求,因此竖向承载通常不作为确定极限倾角的控制条件。

$$G_1 \cos \beta \leq F + N \tag{7}$$

考虑在水平环境载荷条件下基础稳定性的要求,需满足:

$$F\cos\beta + G_1\sin\beta \leqslant W$$

(8)

解得:

$$\beta_2 \leqslant \arcsin \frac{W}{\sqrt{F^2 + G_1^2}} - \arccos \frac{F}{\sqrt{F^2 + G_1^2}}$$

(9)

则极限倾角为 β_1 和 β_2 最小值:

$$\beta = \min(\beta_1, \beta_2)$$

(10)

上述分析方法均考虑土体性质、桩体尺寸、井口载荷等,其中土体性质和桩体尺寸参数体现在侧向摩擦力 F 、土体对吸力桩下端面的支撑力 N 和土体对吸力桩侧面的支撑力 W 的分析计算中。

根据上述计算方法,在贯入过程中如果发现井口倾角出现增大的趋势或接近极限倾角,需要采取措施对倾角进行控制,可以采取水下机器人向桩内反向注水加压后上提桩体进行重新贯入,或者在贯入过程中利用水下机器人对吸力桩施加与井口倾角方向相反的拉力进行矫正。

2.3 旋转控制方法及措施

若吸力桩在贯入过程中出现旋转的情况,则需要进行吸力桩上提,并再次重新贯入。一般认为在吸力桩贯入过程中,没有安装井口工具,不会出现旋转的极限条件。如果地层中土体出现较大性质差异或出现局部贯入障碍,则可能出现旋转情况。

由于局部土体性质差异,导致旋转中心位于桩体下部与硬地层或硬石块的边缘,发生旋转倾覆会带来井口安装失败的严重后果。在重力贯入过程中,如果桩体由于地层硬度差异产生旋转,则需要减小重力贯入过程的速度,桩体下边缘与地层充分接触,保证贯入速度均匀,直至贯入地层硬度差异较小的深度后,适当增大重力贯入速度,或增加桩体上提次数,反复调整井口倾角,直至完成重力贯入过程。

在抽吸贯入过程中,如果出现了地层硬度差异,由于已贯入地层一定深度,周围土体对桩体旋转阻碍增大,此时需要控制抽吸压力,保证桩体以均匀的速度贯入地层。若井口倾角明显增大,则需要打压上提,并在水下机器人辅助控制井口倾角的条件下再次抽吸贯入^[17-20]。

3 模拟试验

3.1 试验原理与装置

采用室内模拟试验的方式来探索吸力桩基础在水平载荷作用下的位移失效破坏与初始井口倾角的关系。模拟试验装置示意图如图 5 所示。

在吸力桩下入到位后,可以模拟井口在水平载荷设计条件下的承载力和位移关系,通过带有滑轨的定滑轮组合可以调节滑轮位置,以确保井口受水平载荷作用(图 5),同时可以测量吸力桩水平载荷和位移的关系。

用于水下井口安装的吸力桩直径为 6 m、长 12 m,为了探索安装过程垂直度及稳定性,试验模型长度设置为 40 cm,与实际尺寸比为 1 : 30。试验中土体性质参数参考深水海底土质参数配置,土体基本参数如下:含水率 20.2%,相对密实度 0.667,土体比重 2.65,液限 25.6%,塑限 16.9%,液性指数 0.38,塑性指数 8.7。

3.2 试验过程与结果

吸力桩模型的直径采用 20、25、30、40 cm,贯入深度均为 40 cm,分别模拟长径比为 2.0、1.6、1.3、1.0 条件下的井口稳定性。分别测量模型井口倾角为 2°、4°、6°、8°、10°、12°、14°、16°、18°时,在拉力作用下产生 1 cm 位移的水平拉力(水平拉力方向与吸力桩基础倾斜方向相同),此时认为井口发生旋转破坏,水平承载力急剧降低。最大水平拉力与不同直径吸力桩模型井口倾角的变化关系如图 6 所示。

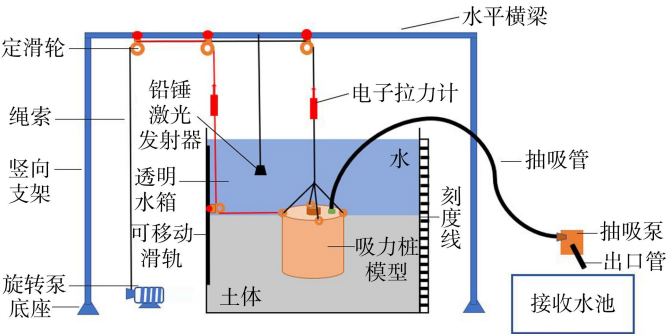


图 5 模拟试验装置示意图
Fig. 5 Schematic diagram of experimental setup

通过分析发现,不同直径的吸力桩模型,井口发生 1 cm 位移条件下最大水平拉力随井口倾角的变化趋势相近:初始阶段最大水平拉力几乎不发生变化,随后加速下降,最后又趋于平缓。井口倾角小于 6°时,最大水平拉力变化幅度较小,在井口倾角约为 10°时,最大水平拉力降低幅度最大。随着吸力桩模型直径的增大,初始水平段变长,由于直径的增大导致倾角对水平承载力影响降低,同时水平拉力降低速率最大处的倾角也随之增大。研究发现,增大吸力桩模型的直径可以增强井口抵抗水平载荷的能力,降低垂直度控制要求。

在井口倾角约为 10°时,井口的水平载荷抵抗能力降低超过 10%,此时已难以满足深水建井的安全要求,所以设计时井口倾角要小于 10°,为了增加安全系数,不超过 6°为最佳,此时相对安全系数为 1.66。

为了验证试验数据的准确性,选取井口倾角为 10°的不同直径吸力桩模型的最大水平拉力测试数据进行验证,结果如图 7 所示。

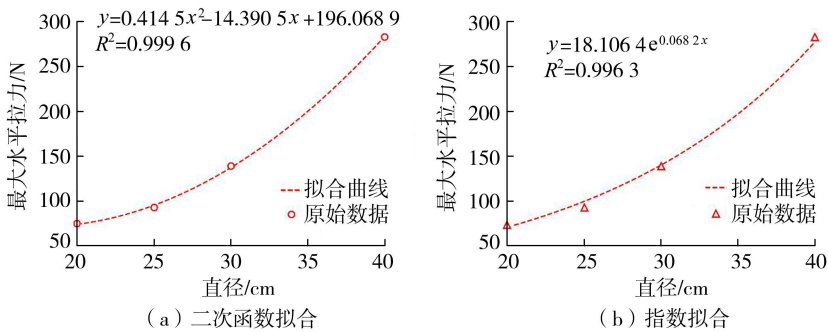


图 7 不同直径吸力桩模型井口 10°倾角下的最大水平拉力变化规律拟合

Fig. 7 Fitting of variation law of maximum horizontal pulling force for suction pile models with different diameters at an welhead inclination angle of 10°

采用拟合方法对试验的 4 个数据点进行拟合,分析发现采用二次函数和指数拟合方法可以满足较高的精度要求,其中二次函数拟合的决定系数更接近 1,为 0.9996(图 7(a))。从理论分析来看,吸力桩井口的承载力主要与管-土的接触面积正相关,接触面积又与吸力桩半径平方正相关,在直径较小时二次函数和指数函数的变化规律相似,所以可以解释此处指数拟合关系同样具有较高的精度,随着直径的增大,指数拟合的误差会逐渐增大。

选取吸力桩模型井口倾角为 0°、12°、18°的水平承载力曲线上具有变化特点的 3 组数据进行二次函数拟合验证,结果如图 8 所示,3 组数据拟合结果都满足精度要求,再次验证了理论分析和试验数据的准确性。

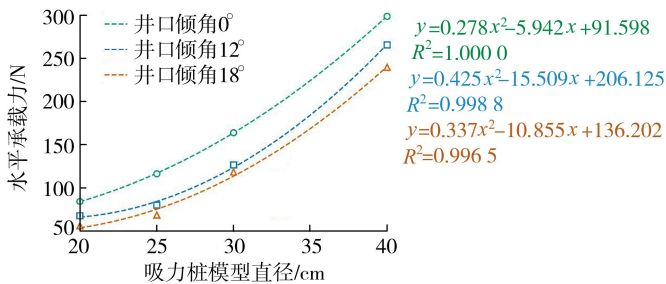


图 8 不同模型井口倾角下的水平承载力拟合曲线

Fig. 8 Fitting curves of horizontal bearing capacity for the model at different wellhead inclination angles

4 结 论

a. 构建了深水吸力桩井口安装过程中井口倾角的理论计算模型,地层土体性质、吸力桩直径和吸力桩的安装深度是影响井口垂直度控制的主要因素。提出了初始井口倾角和井口载荷条件下的吸力桩极限安装倾角的理论计算方法,并给出了针对地层非均质性等特殊情况下吸力桩发生旋转的控制方法和措施。

b. 通过模拟试验得出井口抵抗水平载荷的能力随井口倾角的增大而降低的变化规律,井口倾角小于 6° 时水平承载力变化不大,倾角约为 10° 时水平承载力下降最快,降低约10%。吸力桩深水油气建井的垂直度控制原则为井口倾角小于 6° 。

c. 井口水平承载力随吸力桩直径呈二次函数关系变化,验证了理论模型的正确性。该结论是基于小比尺模型试验得到的,虽然与实际工程会存在一定的差别,但是其普遍规律对于实际工程仍具有一定的参考意义。

参考文献:

[1] Sivertsen T, Strand H. New well foundation concept, as used at a norwegian sea well[C]//SPE Arctic and Extreme Environments Conference and Exhibition. Richardson, Texas; Society of Petroleum Engineers, 2011; SPE-149584-MS.

[2] Mathis W, Strand H, Hollinger G. Case history: how to enable the horizontal development of shallow reservoirs[C]//SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition. Richardson, Texas; Society of Petroleum Engineers, 2017; SPE-184667-MS.

[3] 天工. 我国海域天然气水合物第二轮试采成功[J]. 天然气工业, 2020, 40(4): 103. (Tian Gong. The second round of successful trial he second round of successful trial production of natural gas hydrate in China's sea area[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(4): 103. (in Chinese))

[4] 周松望, 王建华. 组合桶形基础水平循环承载力模型试验[J]. 海洋工程, 2014, 32(1): 106-111. (Zhou Songwang, Wang Jianhua. Model tests on bearing capacities of combined bucket foundations under lateral cyclic loads [J]. The Ocean Engineering, 2014, 32(1): 106-111. (in Chinese))

[5] 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))

[6] 韦芳芳, 包淑珉, 邵盛, 等. 砂土中螺旋桩在斜拉荷载作用下的承载性能[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(2): 77-83. (Wei Fangfang, Bao Shumin, Shao Sheng, et al. Bearing performance of helical piles in sand under oblique tensile load [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(2): 77-83. (in Chinese))

[7] 刘梅梅, 练继建, 杨敏, 等. 宽浅式筒型基础竖向承载力研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(2): 379-384. (Liu Meimei, Lian Jijian, Yang Min, et al. Vertical bearing capacity of wide-shallow bucket foundation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(2): 379-384. (in Chinese))

[8] 金书成, 张永涛, 杨炎华, 等. 饱和砂土地基中吸力式桶形基础水平承载力研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊1): 221-227. (Jin Shucheng, Zhang Yongtao, Yang Yanhua, et al. Research on horizontal ultimate bearing capacity of suction bucket foundation in saturated sand ground [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S1): 221-227. (in Chinese))

[9] 李大勇, 冯凌云, 张雨坤, 等. 饱和细砂中裙式吸力基础水平单调加载模型试验: 承载力及变形分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(11): 2030-2037. (Li Dayong, Feng Lingyun, Zhang Yukun, et al. Model tests on lateral bearing capacity and deformation of skirted suction caissons in saturated fine sand under horizontal monotonic loading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(11): 2030-2037. (in Chinese))

[10] Kan Changbin, Yang Jin, Yu, Xiacong, et al. Load bearing characteristics study on novel deepwater composite drilling conductor by simulation and experimental methods [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 171: 289-301.

[11] 刘书杰, 黄熠, 张明贺, 等. 深水吸力桩井口稳定性研究[J]. 中国海上油气, 2022, 34(5): 132-140. (Liu Shujie, Huang Yi, Zhang Minghe, et al. Study on the subsea wellhead stability of suction bucket foundation [J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(5): 132-140. (in Chinese))

[12] 李舒展, 杨进, 朱国倬, 等. 深水钻井井口吸力桩稳定性计算和校核方法[J]. 石油钻采工艺, 2024, 46(1): 13-24. (Li Shuzhan, Yang Jin, Zhu Guojing, et al. Stability calculation and verification method for conductor suction piles in deepwater drilling [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2024, 46(1): 13-24. (in Chinese))

[13] 刘书杰, 黄熠, 刘和兴, 等. 深水吸力桩建井过程及承载力特性的试验研究[J]. 石油机械, 2022, 50(3): 32-41. (Liu Shujie, Huang Yi, Liu Hexing, et al. Experimental study on well construction process and bearing capacity characteristics of deepwater suction pile [J]. China Petroleum Machinery, 2022, 50(3): 32-41. (in Chinese))

[14] 马文冠, 邱旭, 刘鑫, 等. 海上风电桩-桶复合基础吸力安装特性研究[J]. 太阳能学报, 2025, 46(2): 522-528. (Ma Wenguan, Qiu Xu, Liu Xin, et al. Research on installation characteristics of suction pile-bucket composite foundation for offshore wind turbines [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2025, 46(2): 522-528. (in Chinese))

[15] 季一帆, 谢立全, 黄文财. 倾斜状态下的吸力式基础极限承载力离心试验模拟[J]. 海洋科学前沿, 2019, 6(4): 128-135.

(Ji Yifan,Xie Liquan,Huang Wencai. The centrifuge experiments on maximum bearing capacity of the suction bucket under the state of inclination[J]. Advances in Marine Sciences,2019,6(4):128-135. (in Chinese))

[16] Zhang Puyang,Pang Yabo,Xu Yunlong,et al. Risk control in integrated leveling of multi-compartment bucket foundation with offshore wind turbines[J]. Ocean Engineering,2025,337:121920.

[17] 严驰,李亚坡,袁中立. 土性参数对桶形基础竖向地基承载力影响的敏感性分析[J]. 水运工程,2009(1):155-160. (Yan Chi,Li Yapo, Yuan Zhongli. Sensitivity analysis of the effect of soil parameters on the vertical bearing capacity of bucket foundation[J]. Port & Waterway Engineering,2009(1):155-160. (in Chinese))

[18] 贺瑞,朱元张,张继生,等. 地震作用下大直径嵌岩单桩动力响应数值分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(1):66-76. (He Rui,Zhu Yuanzhang, Zhang Jisheng, et al. Numerical analysis of dynamic response of large-diameter rock-socketed monopiles under seismic loads[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2023,51(1):66-76. (in Chinese))

[19] 刘同芳,吴跃东,周云峰,等. 基于透明黏土的取土器贯入扰动变形试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(1):77-83. (Liu Tongfang,Wu Yuedong,Zhou Yunfeng,et al. Experimental study on disturbance deformation of soil sampler penetration based on transparent clay[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2024,52(1):77-83. (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] 刘振纹,王建华,秦崇仁,等. 负压桶形基础地基水平承载力研究[J]. 岩土工程学报,2000,22(6):691-695. (Liu Zhenwen, Wang Janhua, Qin Chongren, et al. Research on the horizontal bearing capacity of bucket foundations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2000,22(6):691-695. (in Chinese))

[22] 曹卫平,李贺,陶鹏. 水平荷载-扭矩耦合作用下斜桩承载变形特性数值模拟[J]. 水利水电科技进展,2023,43(6):44-49. (Cao Weiping, Li He, Tao Peng. Numerical simulation of bearing and deformation behavior of batter piles under combined horizontal load and torque[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(6):44-49. (in Chinese))

[23] Liu Haoyuan,Kaynia A M. Monopile responses to monotonic and cyclic loading in undrained sand using 3D FE with SANISAND-MSu[J]. Water Science and Engineering,2022,15(1):69-77.

[24] 李文轩,曹永勇. 海上筒型基础的筒壁土压力计算[J]. 水利水运工程学报,2018(3):65-70. (Li Wenxuan,Cao Yongyong. Earth pressure calculation for bucket wall of offshore bucket foundation[J]. Hydro-Science and Engineering,2018(3):65-70. (in Chinese))

[25] 杨进. 深水油气井表层导管下入深度计算方法[J]. 石油学报,2019,40(11):1396-1406. (Yang Jin. Calculation method of surface conductor setting depth in deepwater oil and gas wells [J]. Acta Petrolei Sinica,2019,40(11):1396-1406. (in Chinese))

[26] 张辉,高德利,唐海雄,等. 深水导管喷射安装过程中管柱力学分析[J]. 石油学报,2010,31(3):516-520. (Zhang Hui,Gao Deli,Tang Haixiong, et al. Tubular mechanics in jetting operation of conductor under deepwater condition [J]. Acta Petrolei Sinica,2010,31(3):516-520. (in Chinese))

[27] 管志川,苏堪华,苏义脑. 深水钻井导管和表层套管横向承载能力分析[J]. 石油学报,2009,30(2):285-290. (Guan Zhichuan,Su Kanhua,Su Yinao. Analysis on lateral load-bearing capacity of conductor and surface casing for deepwater drilling [J]. Acta Petrolei Sinica,2009,30(2):285-290. (in Chinese))

[28] 陈国明,李家仪,畅元江,等. 深水油气水下井口系统疲劳损伤影响因素[J]. 石油学报,2019,40(增刊2):141-151. (Chen Guoming, Li Jiayi,Chang Yuanjiang, et al. Influencing factors for fatigue damage of underwater wellhead system of deepwater oil and gas [J]. Acta Petrolei Sinica,2019,40(S2):141-151. (in Chinese))

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.04.008

软黏土中三脚架桶形基础水平循环承载特性分析

汤鹏辉,王坤鹏,崔春义,刘海龙

(大连海事大学交通运输工程学院)

摘要: 基于 HSS 本构模型建立了软黏土海床中三脚架桶形基础的三维有限元模型,分析了水平循环荷载作用下三脚架桶形基础的承载特性,并采用极差分析法对基础累积变形开展了多参数敏感性分析。结果表明:循环加载过程中沿三脚架传至桶顶的轴力对抵抗外部总倾覆弯矩的贡献最大;在正常使用极限状态下,基础刚度退化为初始值的 96.3%,前后桶的竖向位移差较小,导致累积转角增长速率较缓慢;在疲劳极限状态下,基础刚度退化为初始值的 86.5%,前后桶的竖向位移差相对增大,累积转角也随循环次数的增加不断增大;随着基础桶间距的增大,旋转中心的位置下移,基础愈加趋向于平动;加载频率和桶间距对基础累积变形影响的敏感性较高,土体初始剪切模量和桶体长径比次之,土体阈值剪应变的影响最低。

关键词: 三脚架桶形基础;软黏土;循环荷载;承载特性;HSS 本构模型

Analysis of horizontal cyclic bearing characteristics of tripod bucket foundations in soft clay

Tang Penghui, Wang Kunpeng, Cui Chunyi, Liu Hailong

(College of Transportation Engineering, Dalian Maritime University)

Abstract: Based on the HSS constitutive model, a three-dimensional finite element model of a tripod bucket foundation in a soft clay seabed was established; the bearing characteristics of the tripod bucket foundation under horizontal cyclic loading were analyzed, and a multi-parameter sensitivity analysis on the accumulated deformation of the foundation was conducted using the range analysis method. The results indicate that during cyclic loading, the axial force transmitted to the top of the buckets via the tripod frame contributes the most to resisting the external total overturning moment. Under the serviceability limit state, the foundation stiffness degrades to 96.3% of its initial value, and the vertical displacement difference between the front and rear buckets is relatively small, resulting in a slow growth rate of the accumulated rotation angle. Under the fatigue limit state, the foundation stiffness degrades to 86.5% of its initial value; the vertical displacement difference between the front and rear buckets increases correspondingly, and the accumulated rotation angle continuously increases with the number of cycles. As the spacing between the foundation buckets increases, the rotation center becomes deeper, and the foundation tends to exhibit a translational movement. The accumulated deformation of the foundation is highly sensitive to the loading frequency and bucket spacing, followed by the initial shear modulus of the soil and the aspect ratio of the buckets, while it is least sensitive to the threshold shear strain of the soil.

Key words: tripod bucket foundation; soft clay; cyclic loading; bearing characteristic; HSS constitutive model

近年来中国的海上风电行业发展迅速,“十四五”期间各地规划的海上风电规模已达 8 000 万 kW,到 2030 年累计装机将超过 2 亿 kW^[1]。海上风电基础作为海上风电体系的关键支撑结构,其造价占整个风电体系的 30%^[2]。然而,海上风电基础在长期服役过程中,不仅要承受上部风机自重荷载的作用,还需频繁抵御风浪、潮汐等周期性循环荷载^[3]。三脚架桶形基础是一种适应复杂海洋环境的新型基础形式,但在极端气候频发与海洋动力作用加剧的背景下,其循环承载特性成为制约结构安全性与耐久性的核心因素。在循环荷载幅值、频率及作用次数的动态变化下,三脚架桶形基础可能发生累积位移、土体刚度退化等渐进性破坏现象,探究其循环承载性能演化规律,是保障海洋结构长期稳定运行的核心问题。

三桶基础在循环荷载作用下的承载性能演化机制已成为近海工程领域的重要研究课题。在砂土海床条件下,Jeong 等^[4-6]基于离心试验揭示了循环荷载方向和幅值对三桶基础力学行为的影响规律,并提出了基于试验数据的简化位移预测方法和一种基于单桶拉压刚度的三脚架基础旋转刚度简化估算方法。Wang 等^[7]

基金项目: 国家自然科学基金项目(52508369);辽宁省教育厅高校基本科研项目(LJ212510151004)

作者简介: 汤鹏辉(2001—),男,硕士研究生,主要从事桶形基础承载特性研究。E-mail:tp1010@dlmu.edu.cn

通信作者: 王坤鹏(1992—),男,讲师,博士,主要从事海洋岩土与基础工程研究。E-mail:wkp@dlmu.edu.cn

和何奔等^[8]均通过离心试验对比了砂土中单桶、三桶基础卸载刚度与阻尼比随循环次数的变化规律,发现单桶基础累积变形和刚度随循环次数增加,而三桶基础的累积变形由于“自愈效应”明显小于单桶基础,卸载刚度呈现先增后减趋势。赵婧一^[9]基于 Mohr-Coulomb 模型,系统研究了深水环境下三桶导管架基础的结构优化与动力响应,通过优化设计和动力特性分析,验证了其在深水大容量风电场景下的适用性。陈立等^[10]通过砂土中的物理模型试验,发现循环荷载可有效增加桶周土的致密性,进而提高基础在循环加载后的水平单向极限承载力。

在黏土海床条件下,汪明元等^[2]基于黏土中弹塑性界面本构模型,揭示了循环荷载下迎风桶与背风桶的沉降差是基础旋转的主要原因,且加载方向与桶土接触方式对基础的极限承载力有显著影响。王永康等^[11]通过模型试验分析了黏土中双向循环加载下循环幅值比对三桶基础累积变形和旋转中心的影响规律,发现幅值比为 0.4 时变形在 50 次循环后稳定,为 0.6 时变形持续增长,且旋转中心均随循环次数的增加上移。Zhang 等^[12]基于修正剑桥(MCC)模型,提出了一种结合界面理论与小应变非线性弹性模量的循环塑性黏土本构模型,揭示了三桶导管架基础在软黏土中的循环响应机制,量化了水平荷载与弯矩对累积旋转的影响。

相较于砂土海床,目前关于黏土中三脚架桶形基础循环承载特性的研究仍非常有限。当前关于桶形基础承载特性的有限元分析中,较常用的本构模型有 Mohr-Coulomb 模型^[13-15]、修正 Drucker-Prager 模型^[16]、MCC 模型^[17]、硬化土(HS)模型^[18]和硬化土小应变(HSS)模型^[19-20]。然而前 4 种本构模型不能合理表征土体小应变范围内的桶与土的相对刚度衰减特性,因此无法较好地模拟土体在循环荷载作用下的力学特性。相比之下,HSS 本构模型通过引入小应变刚度衰减曲线及区分加载与卸载硬化规律,不仅能精确描述高初始刚度、应力路径依赖性和循环滞回效应等关键特征,同时具有较高的数值计算效率。因此,本文通过 PLAXIS 3D 软件,基于其内置的 HSS 本构模型对软黏土中三脚架桶形基础进行三维有限元分析,并采用离心试验验证模型的合理性,分析最不利工况下三脚架桶形基础的水平循环承载特性。

1 三脚架桶形基础有限元建模

1.1 软黏土的 HSS 本构模型

Jardine^[21]通过大量的试验研究得出结论:土体在极小的应变($10^{-7} \sim 10^{-6}$)情况下,变形是线弹性的;在小应变($10^{-6} \sim 10^{-3}$)情况下,变形部分可恢复,具有非线性等特点;大应变($>10^{-3}$)时,土体只发生不可恢复的塑性变形。针对传统硬化土模型在小应变阶段土体刚度非线性响应表征不足的问题,Benz^[22]通过引入小应变范围内土体剪切刚度随剪应变的非线性衰减关系,基于 HS 本构模型提出了 HSS 本构模型。由于不同屈服准则的影响,相比于 HS 本构模型的棱锥体屈服面,HSS 本构模型的屈服面变成了圆锥体屈服面,帽盖屈服面也变得更加光滑和圆润^[23]。圆锥体剪切屈服面通过消除棱角处的应力奇异性,更符合土体在三轴应力空间中的渐进屈服特性;光滑帽盖屈服面则通过连续曲率刻画土体从弹性到塑性的平滑过渡,能够更准确地模拟土体塑性应变的累积规律。此外,有些传统模型(如 Mohr-Coulomb 模型)在剪应变 γ 小于 10^{-4} 时采用弹性假定($G=G_0$, G_0 为土体的初始剪切模量),实际上土体刚度为完全弹性的应变范围十分狭小,随着应变范围的扩大,土体刚度会显示出非线性,因此这些传统本构模型无法表征土体的复杂力学行为,而 HSS 本构模型采用非线性刚度衰减函数(式(1)),能够精确描述小应变范围内土体刚度的渐进退化特性。

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + 0.385 |\gamma/\gamma_{0.7}|} \tag{1}$$

式中: $\gamma_{0.7}$ 为阈值剪应变,即割线模量 G_s 减小到 $0.7G_0$ 时的应变,当 γ 远小于 $\gamma_{0.7}$ 时, G/G_0 趋近于 1,土体表现为高刚度,接近线弹性;当 γ 趋近于 $\gamma_{0.7}$ 时,刚度按双曲线规律显著降低,模拟土体进入非线性变形。因此,HSS 本构模型考虑了小应变刚度的非线性衰减,更符合真实情况下小应变范围内土体的刚度变化,在动力分析中具有显著优势,更适用于循环加载工况的模拟。

1.2 有限元模型

桶体与三脚架分别采用板单元与梁单元进行建模。本文研究大幅提高了桶顶的刚度以避免桶顶在受力时发生较大变形,进而影响三脚架与桶体的整体旋转性能。三脚架桶形基础尺寸参数如图 1 所示。为提高计算精度,对有限元模型进行局部加密;以三脚架各支脚底部为中心,分别设置长 $\times$ 宽 $\times$ 高为 $10\text{ m}\times10\text{ m}\times5\text{ m}$ 、

14 m×14 m×7 m、20 m×20 m×10 m 的长方体加密区,其粗糙因子依次为 0.25、0.3、0.5,三脚架与桶体的粗糙因子为 0.2,土体粗糙因子为 0.8,单元分布为中等密度,确保由内向外网格尺寸逐步过渡。

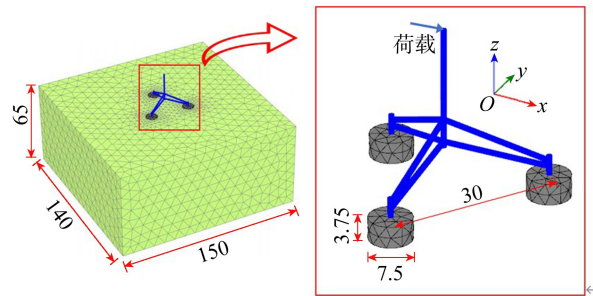


图1 三脚架桶形基础有限元模型(单位:m)

Fig. 1 Finite element model of tripod bucket foundation (unit: m)

土体采用 HSS 本构模型,模型参数参照寇海磊等^[20]的研究(表 1)。土体侧面约束法向自由度,底面完全固定。此外,为减少波的反射,提高计算精度,设置黏性边界以吸收边界上的动力波。

表 1 黏土 HS 与 HSS 本构模型参数^[20]

Table 1 Constitutive model parameters of HS and HSS for clay^[20]

模型	c'/kPa	$\varphi'/(^{\circ})$	$\psi/(^{\circ})$	R_f	$P_{\text{ref}}/\text{kPa}$	$E_{\text{oed,ref}}/\text{MPa}$	$E_{50,\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{ur,ref}}/\text{MPa}$	ν_{ur}	K_0	m	$G_{0,\text{ref}}/\text{MPa}$	$\gamma_{0.7}$
HS	2.8	21.4	0	0.9	100	0.82	1.02	15.12	0.2	0.64	1		
HSS	2.8	21.4	0	0.9	100	0.82	1.02	15.12	0.2	0.64	1	42	1×10^{-4}

注: c' 为有效黏聚力; φ' 为有效内摩擦角; ψ 为剪胀角; R_f 为破坏比; P_{ref} 为参考压力; $E_{\text{oed,ref}}$ 为参考压力对应的切线压缩模量; $E_{50,\text{ref}}$ 为参考压力下偏应力达到极限破坏应力 50%时所对应的割线模量; $E_{\text{ur,ref}}$ 为参考应力下卸载再加载模量; ν_{ur} 为卸载再加载泊松比; K_0 为正常固结静止侧压力系数; m 为描述刚度随应力水平变化关系的幂指数; $G_{0,\text{ref}}$ 为参考应力下的初始剪切模量。

1.3 有限元模型验证

鉴于目前对三脚架桶形基础的研究较少,仅建立单桶基础模型进行验证,具体参数与前述一致。图 2 为本文构建的 HS 本构模型、HSS 本构模型模拟结果与离心试验结果^[24]的对比,横轴为水平位移(u),纵轴为水平荷载(H)与桶顶面积(A)的比值。由图 2 可见,两种有限元模型的模拟结果与离心试验结果在总体趋势上基本一致,但 HSS 本构模型与离心试验结果吻合度更高,因此本文研究中土体本构模型采用 HSS 本构模型更加合适。

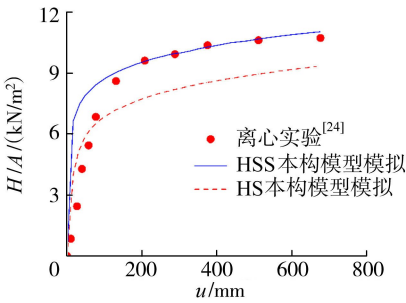


图2 有限元模型验证结果

Fig. 2 Validation results of finite element model

2 承载能力分析

基础在单桶受拉和单桶受压两种工况下的荷载-位移关系曲线如图 3 所示,其加载示意图见图 4。利用切线相交法^[25]确定两种工况的极限承载力。由图 3 可知,单桶受压工况的基础水平极限承载力为 2 548 kN,对应失效位移为 181 mm;而单桶受拉工况的极限承载力为 1 301 kN,约为受压工况的 51%,且失效位移仅为 47 mm,相较于单桶受压工况,基础在单桶受拉时的承载能力显著降低,因此在循环加载模拟中优先选取单桶受拉方式以表征最不利荷载作用模式。

考虑到海上风机在极端循环加载工况下主要处于单向循环受荷状态^[26],将周期性风浪简化为正弦曲线形式,并定义两个无量纲参数循环荷载幅值比 ζ_b 和循环荷载对称比 ζ_c ,分别表征循环荷载的幅值大小和对称性:

$$\zeta_b = F_{\text{ult}}/F_{\text{max}} \tag{2}$$

$$\zeta_c = F_{\text{min}}/F_{\text{max}} \tag{3}$$

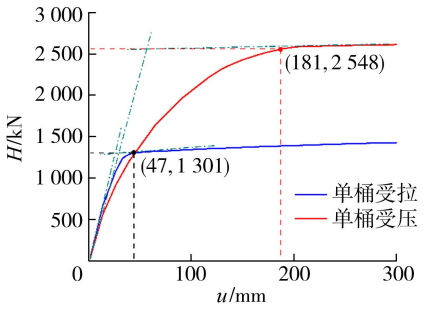


图3 单调加载水平荷载-位移曲线

Fig. 3 Horizontal load-displacement curves under monotonic loading

式中: F_{ult} 为基础水平极限承载力; F_{max} 、 F_{min} 分别为循环周期内荷载最大值与最小值。当 $\zeta_c \geq 0$ 时为单向加载, $\zeta_c < 0$ 时为双向加载。循环参数含义如图 5 所示,本文 ζ_c 取 0,表示完全单向加载; ζ_b 取 0.3、0.5,分别对应海上风机运行时的正常使用极限状态(SLS)和疲劳极限状态(FLS),循环周期为 10 s。根据挪威船级社海上风机设计规范 DNV-OS-J101 *Design of Offshore Wind Turbine Structure*,针对海洋工程中周期性风浪荷载作用下的结构分析,当等效循环次数设定为 100 次时,能够充分考虑循环荷载效应的影响。

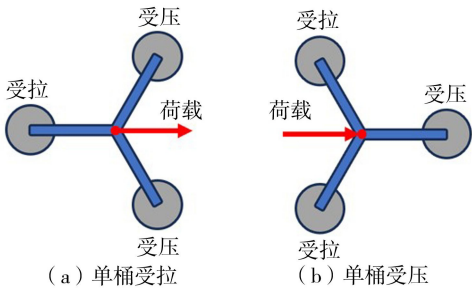


图 4 加载工况

Fig. 4 Loading conditions

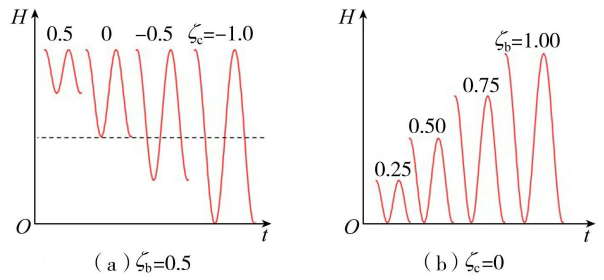


图 5 循环参数的定义

Fig. 5 Definition of cyclic parameters

图 6 为三脚架桶形基础在两种循环荷载幅值比下的水平荷载-位移曲线,随着循环次数的增加,基础累积位移呈现显著增长趋势且增速逐渐加快,滞回曲线密度由密集向稀疏演变。当循环荷载幅值比为 0.3 时,前 50 个循环的滞回圈近乎重叠,说明基础累积变形前期较稳定,在后 50 个循环基础累积变形逐渐增加;当循环荷载幅值比为 0.5 时,前 50 个循环的滞回圈仅有少部分重叠,由于桶周土体的刚度下降,基础的位移增长趋势显著加快。两种循环荷载幅值比工况在经历 100 次循环后最终累积位移分别达到 5.17 mm 和 15.06 mm,即疲劳极限状态下最终累积位移量约为正常使用极限状态的 2.9 倍。

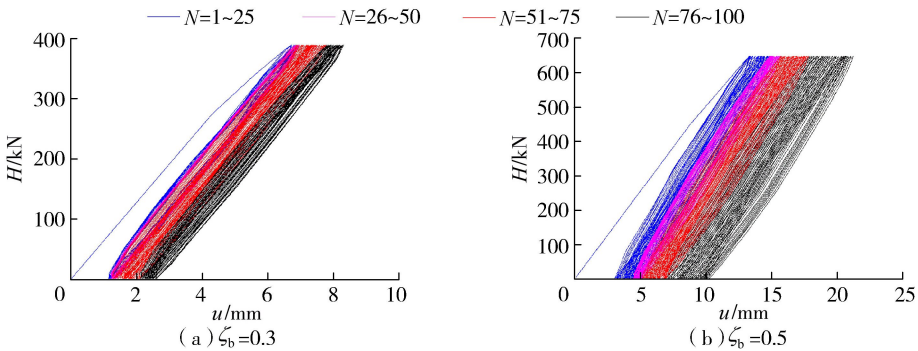


图 6 水平荷载-位移响应

Fig. 6 Horizontal load-displacement response

为量化循环过程中三脚架支脚底部的受力特性,各内力分量对三脚架桶形基础总倾覆弯矩(M_t)的分担比 R 如图 7 所示。具体来说,可根据式(4)~(7)计算循环过程中传递至各桶顶的水平荷载(剪力) H 、轴力 V 和弯矩 M 的分担比例。

$$M_t = \sum_{i=1}^3 M_i + \sum_{i=1}^3 V_i L_V + \sum_{i=1}^3 H_i L_H \tag{4}$$

$$R_M = \frac{\sum_{i=1}^3 M_i}{M_t} \tag{5}$$

$$R_V = \frac{\sum_{i=1}^3 V_i L_V}{M_t} \tag{6}$$

$$R_H = \frac{\sum_{i=1}^3 H_i L_H}{M_t} \tag{7}$$

式中: L_V 、 L_H 分别为轴力和剪力到旋转中心的垂直距离; R_M 、 R_V 、 R_H 分别为弯矩、轴力和剪力对总倾覆弯矩的分担比; $i=1,2,3$ 代表 3 个桶体。

由图 7 可知,当施加较小幅值的循环荷载时,随着循环次数的增加,轴力对总倾覆弯矩的分担比逐渐减小,而剪力的分担比则呈增大趋势。在整个循环过程中,两种循环荷载幅值比下的弯矩对总倾覆弯矩的分担比均较小,主要原因是每个桶相对于三脚架基础的转动自由度接近零,无法产生显著的相对旋转。相比之下,两种循环荷载幅值比下轴力对总倾覆弯矩的贡献均最大,最终对总倾覆弯矩的分担比分别为 83.8% 和 82.8%。这是因为基础受到水平荷载时,前桶通过桶内土体的被动吸力和侧摩阻力抵抗竖向拉力;后桶主要承受竖向压力,通过桶与土体之间的端部承载力和侧摩阻力提供抗压支撑。这种“拉-压”机制通过 3 个桶的协同作用,将水平荷载转化为竖向力。因此,在桶体的设计过程中,需特别注重其竖向承载能力的优化与设计。

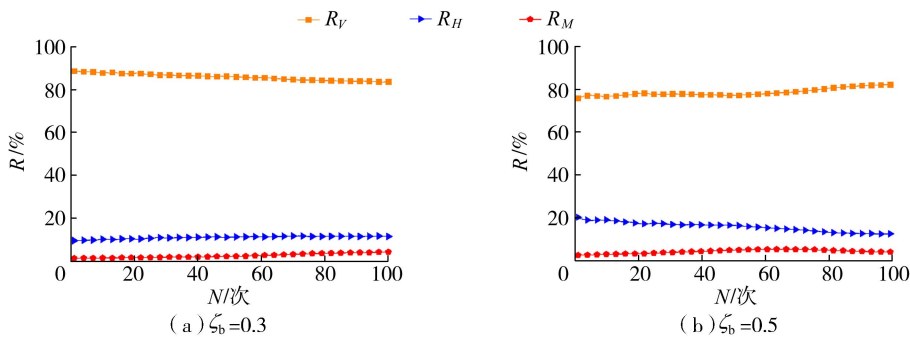


图 7 内力分量的分担比
Fig. 7 Sharing ratios of internal force components

3 旋转特性分析

水平循环荷载作用下,三脚架桶形基础的旋转特性主要与前后桶的竖向位移差有关,因此分析各桶的竖向位移至关重要。不同循环荷载幅值比下前桶与后桶随时间变化的竖向位移(v)响应如图 8 所示,在循环过程中,前后桶表现出不同方向的竖向累积位移。前桶产生了上拔位移,但未表现出显著的增长趋势,这是因为前桶所受的竖向上拔荷载与基础的自重荷载方向相反,导致其受力合力较小;而后桶受到的下拉荷载与基础自重方向相同,且循环加载过程中桶周围土体的强度和刚度逐渐弱化,因此在竖直向下的合力作用下,后桶的累积沉降量随循环次数增加而增大。

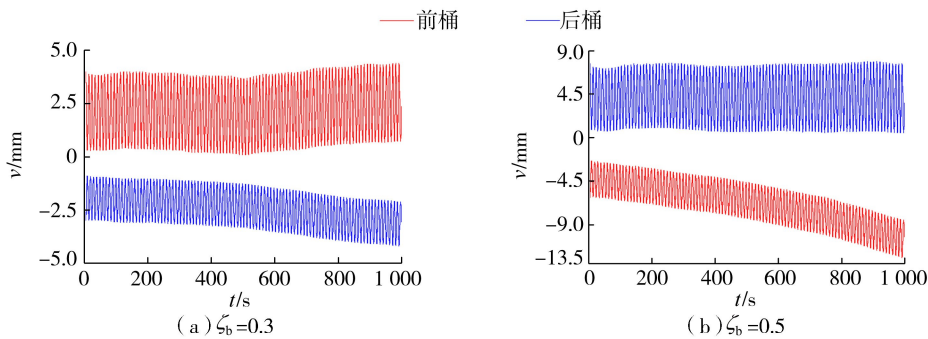


图 8 前后桶竖向位移时程曲线
Fig. 8 Time-history curves of vertical displacements of front and rear buckets

图 9 为两种循环荷载幅值比下,三脚架桶形基础累积转角(θ)随循环次数(N)的变化关系。位移响应特征分析表明,前 50 次循环中,基础的转角增长速率较为平缓,经过 50 次循环后,转角的增长速率显著增大。当 $\zeta_b=0.3$ 时,前后桶间的竖向位移差相对较小,基础累积转角涨幅也比较平缓,最终的累积转角仅为 0.0093° ;当 $\zeta_b=0.5$ 时,后桶的竖向位移明显大于前桶,且两者的位移差随着循环次数的增加呈渐进式增长,导致其累积转角也随循环次数的增加不断增大,最终达到 0.023° 。中国陆上大型风电机组塔架允许倾斜 0.17° ,英国 Thornton Bank 海上风电基础允许最大循环累积转角为 0.25° ^[27], 0.023° 的微小转角对大尺度

工程无明显影响。

基于归一化方法对累积转角进行无量纲化处理,建立与循环次数的关系式,用于揭示归一化的累积转角变化规律。图 10 表明,归一化累积转角与循环次数之间呈现幂指数增长特性。在此基础上,采用 Leblanc 等^[28]提出的方法(式(8)、式(9)),对三脚架桶形基础在长期不同幅值单向循环荷载作用下的累积转角进行预测。

$$\frac{\theta_N - \theta_1}{\theta_1} = \beta N^\alpha$$

(8)

$$\beta = T_b T_c$$

(9)

式中: θ_1 、 θ_N 分别是第一个和第 N 个累积转角; α 、 β 为表征初始旋转量和累积旋转速率的无量纲常数; T_b 、 T_c 分别为只与 ζ_b 和 ζ_c 有关的无量纲常数。当 $\zeta_c = 0$ 时, T_c 的值为 1^[28]。由拟合结果可知,当 ζ_b 为 0.3、0.5 时, α 分别为 1.172 和 1.061,可根据式(8)和式(9)反算得到 T_b ,分别为 0.002 和 0.005。

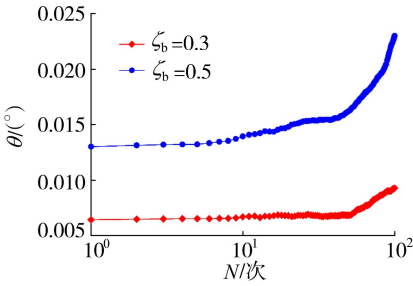


图 9 累积转角与循环次数的关系

Fig. 9 Relationship between accumulated rotation angle and number of cycles

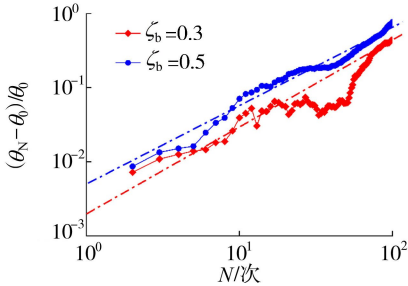


图 10 归一化累积转角与循环次数的关系

Fig. 10 Relationship between normalized accumulated rotation angle and number of cycles

旋转中心的变化趋势可反映土体塑性区扩展或刚度退化规律,对基础承载力预测至关重要。因此,本文研究了在单向水平循环荷载作用下,不同桶间距 S_e 的三脚架桶形基础瞬时旋转中心的运动轨迹,并进行了对比分析。基础瞬时旋转中心的位置可由式(10)和式(11)得到。

$$x_0 = \frac{S_s v_f}{v_f + v_r} - S_o$$

(10)

$$z_0 = \frac{S_s u}{v_f + v_r} - S_h$$

(11)

式中: x_0 为旋转中心与基础中心线的水平距离; z_0 为泥面以下的深度; S_s 为前桶与后桶垂直位移测点间的水平间距; S_o 为前桶中心线至基础中心轴的 horizontal 距离; S_h 为三脚架加载点高度与泥面基准线的垂直距离; v_f 、 v_r 分别为前桶与后桶的垂直位移; u 为加载点的水平位移。参数的具体细节如图 11 所示。

图 12 为不同桶间距下三脚架桶形基础瞬时旋转中心的运动轨迹,坐标系的原点位于海床面上各桶形基础中心点,图中曲线的箭头表示旋转中心的移动方向。瞬时旋转中心的水平坐标以前后桶垂直位移测点间的水平距离(S_s)归一化,垂直坐标则以桶高(L)归一化。从图 12 可以看出,随着桶间距的增大,基础的旋转中心逐渐向深层土体移动。当桶间距 $S_e = 20$ m 时,在第一个循环结束后旋转中心位于约 $(0.009S_s,$

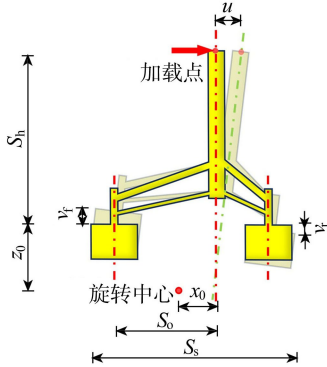


图 11 三脚架桶形基础旋转中心计算方法中的参数定义

Fig. 11 Parameter definitions in calculation method for rotation center of tripod bucket foundation

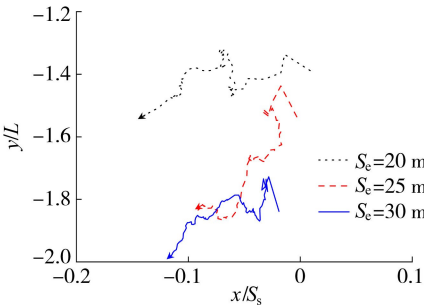


图 12 旋转中心位置随循环次数的演变规律

Fig. 12 Evolution of rotation center position with number of cycles

-1.39L)处。随着循环次数的增加,最终移动到约(-0.137S_s, -1.56L)处;当S_e=25 m时,在第一个循环结束后旋转中心位于约(-0.003S_s, -1.54L)处,100次循环结束后移动至约(-0.091S_s, -1.83L)处;当S_e=30 m时,基础的旋转中心经过100次循环从约(-0.019S_s, -1.80L)处移动至约(-0.116S_s, -1.99L)处。表明基础的移动模式逐渐趋向于平动,这是由于随着桶间距的增大,外侧桶与基础中心的距离增加,其抗力产生的力矩显著增大,为了平衡更大的外部弯矩,基础需要更深的力臂,这进一步导致旋转中心的下移。

4 卸载刚度变化趋势分析

卸载刚度是表征循环荷载作用下基础动态响应特性的核心参数,其动态变化会显著影响支撑结构的固有频率,若与波浪、叶片旋转频率等环境激励频率接近,可能引发共振效应,加速疲劳损伤并缩短设计寿命^[29]。因此,研究基础的卸载刚度变化至关重要。卸载刚度由单次水平循环荷载周期内荷载-转角曲线的滞回特性决定,可通过荷载幅值极值点间的线性段斜率绝对值量化。具体表达式为:

$$k_N = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{\theta_{\max} - \theta_{\min}}$$

(12)

式中:k_N为卸载刚度变化率;H_{max}、H_{min}分别为单次循环中水平荷载H的峰值与谷值;θ_{max}、θ_{min}分别为基础转角θ的极大值与极小值。

不同循环荷载幅值比下三脚架桶形基础刚度演化规律如图13所示。由图13可知,基础刚度随着循环次数的增加不断减小,这可能是由于上拔桶在循环过程中受到拉-拔双向循环作用,对应的桶周土体经历双向循环剪切,导致土体的组构损伤更严重,塑性应变更大,引起基础整体刚度的弱化^[30]。由图13可见,当ζ_b=0.3时,基础刚度经过100次循环后衰减幅度较小,仅减小为初始值的96.3%;而当ζ_b=0.5时,基础刚度下降至原来的86.5%。

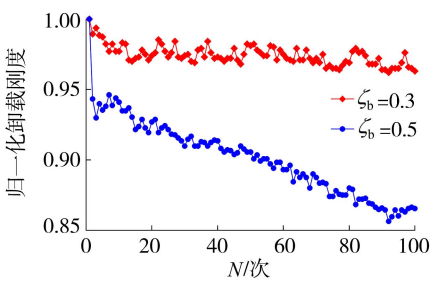


图13 归一化卸载刚度随循环次数的变化规律
Fig. 13 Variation of normalized unloading stiffness with number of cycles

5 累积变形影响因素敏感性分析

鉴于影响三脚架桶形基础累积变形的因素较多,本文通过正交试验综合分析桶体长径比λ、桶间距S_e、加载频率ω、土体初始剪切模量G₀和土体阈值剪应变γ_{0.7}5种因素对基础累积变形的影响,各影响因素水平如表2所示。

极差分析法^[31]是一种用于分析试验数据的统计方法,主要用于评估各因素对试验结果的影响程度。极差分析法通过计算各因素在不同水平下的极差来确定各因素的显著性,极差越大,表明该因素在不同水平下的试验结果差异越大,即敏感度越高。各因素的累积变形极差值如下:λ为3.16 mm,S_e为4.27 mm,ω为4.36 mm,G₀为3.58 mm,γ_{0.7}为2.53 mm。由此得到的敏感度从大到小排序为:加载频率(ω)、桶间距(S_e)、土体初始剪切模量(G₀)、桶体长径比(λ)、土体阈值剪应变(γ_{0.7}),可见各因素对土体累积变形影响的敏感度存在显著差异:加载频率与桶间距为关键控制因素,二者敏感度分列前两位且差异较小;土体初始剪切模量与桶体长径比次之;相比之下,土体阈值剪应变的敏感度最低,极差值仅为加载频率的58%,表明其对基础累积变形演化的影响最小。

6 结 论

a. 相较于单桶受压工况,三脚架桶形基础在单桶受拉状态下的水平极限承载力与破坏位移均显著降低。因此,循环加载模拟中优先采用单桶受拉工况表征最不利荷载作用模式,以准确评估基础在极端条件下的力学响应。

表2 正交试验各影响因素水平

水平	λ	S _e /m	ω/Hz	G ₀ /GPa	γ _{0.7} /10 ⁻⁴
1	0.50	20.0	0.1	28	0.6
2	0.75	22.5	0.2	35	0.8
3	1.00	25.0	0.3	42	1.0
4	1.25	27.5	0.4	49	1.2
5	1.50	30.0	0.5	56	1.4

- b. 循环荷载作用下,上部结构传递至桶顶的轴力对总倾覆弯矩的贡献率最大,主导抗倾覆机制,故设计基础时需优先强化桶体的竖向承载能力以优化抗倾覆性能。
- c. 当循环荷载幅值比为 0.3 时,基础刚度衰减至初始值的 96.3%,此时前后桶竖向位移差值较小,累积转角增长较为平稳;当循环荷载幅值比为 0.5 时,基础刚度衰减至初始值的 86.5%,前后桶竖向位移差相对增大,促使累积转角也随循环次数的增加不断增大。
- d. 三脚架桶形基础旋转中心的位置会随着桶间距的增大而下移,运动模式逐渐转变为平动。
- e. 加载频率与桶间距是控制基础累积变形的主要因素,土体初始剪切模量和桶体长径比次之,土体阈值剪应变影响最弱。该排序表明优化桶间距可有效减小基础的累积变形。

参考文献:

[1] 卜宪标,陈昕,李华山,等. 面向海上风电的水下压缩空气储能性能分析及提效技术[J]. 电力建设,2024,45(8):106-117. (Bu Xianbiao,Chen Xin,Li Huashan,et al. Performance analysis and efficiency-improving technology of underwater compressed air energy storage for offshore wind power[J]. Electric Power Construction,2024,45(8):106-117. (in Chinese))

[2] 汪明元,陆佳清,巴盼锋,等. 软黏土中吸力式三桶基础承载特性分析[J]. 太阳能学报,2024,45(6):589-598. (Wang Mingyuan,Lu Jiaqing,Ba Panfeng,et al. Analysis of bearing characteristic of tripod suction bucket foundation in soft clay[J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2024,45(6):589-598. (in Chinese))

[3] 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))

[4] Jeong Y H,Ko K W,Kim D S,et al. Studies on cyclic behavior of tripod suction bucket foundation system supporting offshore wind turbine using centrifuge model test[J]. Wind Energy,2021,24(5):515-529.

[5] Jeong Y H,Lee S W,Kim J H. Centrifuge modeling for the evaluation of the cyclic behavior of offshore wind turbine with tripod foundation[J]. Applied Sciences,2021,11(4):1718.

[6] Jeong Y H,Kim J H,Ko K W,et al. Simplified estimation of rotational stiffness of tripod foundation for offshore wind turbine under cyclic loadings[J]. Applied Ocean Research,2021,112:102697.

[7] Wang L Z,Wang H,Zhu B,et al. Comparison of monotonic and cyclic lateral response between monopod and tripod bucket foundations in medium dense sand[J]. Ocean Engineering,2018,155:88-105.

[8] 何奔,罗金平,李炜,等. 海上风力机吸力桶基础循环特性离心机试验研究[J]. 太阳能学报,2021,42(9):332-337. (He Ben,Luo Jinping,Li Wei,et al. Investigation on cyclic response of suction bucket foundation supporting offshore wind turbine [J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2021,42(9):332-337. (in Chinese))

[9] 赵婧一. 深水海上风电三筒导管架基础结构优化与动力特性研究[D]. 天津:天津大学,2019.

[10] 陈立,张浦阳. 三筒吸力式导管架基础循环承载特性研究[J]. 太阳能学报,2023,44(11):382-386. (Chen Li,Zhang Puyang. Study on cyclic bearing characteristics of tripod suction bucket foundations[J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2023,44(11):382-386. (in Chinese))

[11] 王永康,杨丹良,张西鑫,等. 黏性土地基海上风机三桶基础水平承载特性试验研究[J]. 海洋工程,2025,43(5):70-79. (Wang Yongkang,Yang Danliang,Zhang Xixin,et al. Experimental study on the horizontal bearing performance of tripod bucket foundations for offshore wind turbines in clayey soil [J]. The Ocean Engineering,2025,43(5):70-79. (in Chinese))

[12] Zhang Baofeng,Liu Rui,Wang Lizhong,et al. Cyclic response and load transfer mechanism of suction bucket jackets supporting offshore wind turbines in soft clay[J]. Ocean Engineering,2024,313:119135.

[13] 徐文强,袁凡凡,韦昌富,等. 斜壁桶形基础承载特性三维有限元分析[J]. 岩土工程学报,2011,33(增刊1):492-497. (Xu Wenqiang,Yuan Fanfan,Wei Changfu,et al. Bearing capacity of suction tapered bucket foundations based on three-dimensional finite element numerical analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2011,33(S1):492-497. (in Chinese))

[14] 武科,栾茂田,范庆来,等. 复合加载模式下桶形基础破坏包络面特性研究(英文)[J]. 岩土工程学报,2008,30(4):574-580. (Wu Ke,Luan Maotian,Fan Qinglai,et al. Failure envelopes of bucket foundation subjected to combined loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2008,30(4):574-580. (in Chinese))

[15] Harb N,Hammoud I. Numerical modeling of seismic behavior of caisson foundation for offshore wind Turbines taking into account wave and marine currents forces[J]. Marine Georesources & Geotechnology,2025,43(9):1702-1717.

[16] 张伟,王晖,孙克俐. 桶形基础承载力的三维弹塑性有限元分析[J]. 天津大学学报,2009,42(12):1041-1047. (Zhang Wei,Wang Hui,Sun Keli. Three-dimensional elasto-plastic FEM analysis of bearing capacity of bucket foundation[J]. Journal of Tianjin University,2009,42(12):1041-1047. (in Chinese))

[17] 陈佳莹,滕竞成,吴则祥. 黏土中吸力式桶形破坏包络面数值模拟研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文),2022,44(4):45-51. (Chen Jiaying,Teng Jingcheng,Wu Zexiang. Numerical modelling of failure envelope for suction bucket foundation in clay [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering,2022,44(4):45-51. (in Chinese))

[18] 邢占清,黄立维,张金接,等. 黏土地基桶形基础承载特性与参数敏感性分析[J]. 水利与建筑工程学报,2016,14(4):11-16. (Xing Zhanqing,Huang Liwei,Zhang Jinjie,et al. Bearing capacity and parameter sensitivity analysis of soft clay bucket foundation[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering,2016,14(4):11-16. (in Chinese))

[19] Barari A,Glittrup K,Christiansen L R,et al. Tripod suction caisson foundations for offshore wind energy and their monotonic and cyclic responses in silty sand:numerical predictions for centrifuge model tests[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2021,149:106813.

[20] 寇海磊,房伟伟,徐祥程,等. 基于 HSS 模型海上风电桶形基础水平循环承载特性对比研究[J]. 海洋工程,2024,42(4):1-12. (Kou Hailei,Fang Weiwei,Xu Xiangcheng,et al. Comparative study on horizontal cyclic bearing characteristics of offshore wind turbine bucket foundation based on HSS model[J]. The Ocean Engineering,2024,42(4):1-12. (in Chinese))

[21] Jardine R J. Some observations on the kinematic nature of soil stiffness[J]. Soils and Foundations,1992,32(2):111-124.

[22] Benz T. Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences[D]. Stuttgart:Universität Stuttgart,Institut für Geotechnik,2007.

[23] 李子健. 天津市区 HSS 模型参数及其在深基坑变形分析中的应用[D]. 天津:天津大学,2022.

[24] Watson P. Performance of skirted foundations for offshore structures[D]. Perth:The University of Western Australia,1999.

[25] Tran N X, Hung L C,Kim S R. Evaluation of horizontal and moment bearing capacities of tripod bucket foundations in sand[J]. Ocean engineering,2017,140:209-221.

[26] Jalbi S,Arany L,Salem A,et al. A method to predict the cyclic loading profiles (one-way or two-way) for monopile supported offshore wind turbines[J]. Marine Structures,2019,63:65-83.

[27] Zhu B,Byrne B W,Houlsby G T. Long-term lateral cyclic response of suction caisson foundations in sand[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering,2013,139(1):73-83.

[28] Leblanc C,Houlsby G T,Byrne B W. Response of stiff piles in sand to long-term cyclic lateral loading[J]. Géotechnique,2010,60(2):79-90.

[29] 陶文艳,贺瑞,郑金海. 海上风机大直径单桩水平-摇摆耦合振动特性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(3):260-267. (Tao Wenyan,He Rui,Zheng Jinhai. Analysis on horizontal-rocking vibrations of monopile supporting wind turbine[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2018,46(3):260-267. (in Chinese))

[30] 王欢. 砂土海床大直径单桩基础和桶形基础水平受荷特性研究[D]. 杭州:浙江大学,2020.

[31] 刘毅,赵斌滨,殷坤龙,等. 基于正交设计的麻柳林滑坡稳定性敏感分析[J]. 地球科学,2019,44(2):677-684. (Liu Yi,Zhao Binbin,Yin Kunlong,et al. Sensitivity analysis of Maliulin landslide stability based on orthogonal design[J]. Earth Science,2019,44(2):677-684. (in Chinese))

(收稿日期:2025 - 04 - 07 编辑:熊水斌)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.04.009

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

张媛媛¹, 姚成^{1,2}, 王容³, 杨丰源⁴, 龚珺夫⁵, 白云鹏⁴, 郑爱民⁴, 杜昀宸⁴

(1. 河海大学水文水资源学院; 2. 河海大学中国气象局水文气象重点开放实验室;

3. 水利部信息中心(水利部水文水资源监测预报中心); 4. 河北省水文勘测研究中心; 5. 河海大学农业科学与工程学院)

摘要: 针对海河流域“23·7”特大暴雨洪水事件,选取清水河北辛店流域为研究对象,基于网格新安江模型构建了耦合地表与地下拦蓄模块的双拦蓄网格模型,对“23·7”洪水过程进行了模拟复盘,并分析了降雨-土壤水-地下水响应关系以及地表与地下拦蓄水库的调蓄效应。结果表明:对1980—2000年的11场历史洪水,双拦蓄网格模型模拟径流深合格率达100%,洪峰合格率64%,确定性系数大于0.5的场次占64%,优于网格新安江模型和研究流域现有预报方案;对于“23·7”洪水过程,双拦蓄网格模型模拟的洪峰、径流深误差均控制在4%以内,确定性系数为0.91;土壤湿度的时空变化对“23·7”洪水形成与消退过程具有调控作用,双拦蓄网格模型地表拦蓄模块具有拦洪削峰效应,地下拦蓄模块使退水曲线吻合度提升。

关键词: 双拦蓄网格模型;海河“23·7”特大洪水;洪水预报;复盘分析;北辛店流域;清水河流域

Retrospective simulation of “23·7” flood event in Qingshui River basin based on surface-subsurface dual retention grid model

Zhang Yuanyuan¹, Yao Cheng^{1,2}, Wang Rong³, Yang Fengyuan⁴, Gong Junfu⁵, Bai Yunpeng⁴, Zheng Aimin⁴, Du Yunchen⁴

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University;

2. Key Laboratory of Hydro-Meteorology, China Meteorological Administration, Hohai University;

3. Information Center (Hydrology Monitor and Forecast Center), Ministry of Water Resources;

4. Hydrological Survey and Research Center of Hebei Province;

5. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University)

Abstract: In response to the “23·7” extreme storm-flood event in the Haihe River basin, the Beixindian watershed of the Qingshui River was selected as the study area. Based on the grid Xin’ anjiang model, a dual retention grid model was developed by coupling surface and subsurface retention modules. The “23·7” flood process was retrospectively simulated, and the rainfall-soil water-groundwater response relationship and the regulation and storage effects of the surface and subsurface retention reservoirs were analyzed. The results show that for 11 historical flood events from 1980 to 2000, the dual retention grid model achieves a 100% qualification rate for runoff depth and a 64% qualification rate for flood peaks, and the proportion of events with a deterministic coefficient greater than 0.5 is 64%, which are superior to the grid Xin’ anjiang model and the existing forecasting schemes in the study basin. For the “23·7” flood process, the simulated errors of flood peak and runoff depth by the dual retention grid model are constrained within 4%, with a deterministic coefficient of 0.91. The spatiotemporal variation of soil moisture has a regulating effect on the formation and recession processes of the “23·7” flood. The surface retention module of the dual retention grid model has a flood-retention and peak-reduction effect, and the subsurface retention module improves the agreement of the recession curve.

Key words: dual retention grid model; “23·7” extreme flood in Haihe River; flood forecasting; retrospective analysis; Beixindian watershed; Qingshui River basin

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)

作者简介: 张媛媛(2000—),女,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:231301010121@hhu.edu.cn

通信作者: 姚成(1982—),男,教授,博士,主要从事水文物理规律模拟及水文预报研究。E-mail:yaocheng@hhu.edu.cn

随着城市化进程的加速与全球气候变暖,我国极端降雨事件频发^[1],其中海河流域因其特殊地理位置成为极端暴雨多发区。如 1963 年 8 月,受台风影响,海河流域出现持续性特大暴雨,创全国暴雨极值,产洪总量 301 亿 m³^[2]。2012 年 7 月,京津冀地区遭遇 1951 年以来最强降水天气过程^[3]。2023 年 7 月 28 日至 8 月 1 日,海河流域受台风“杜苏芮”残余环流叠加地形抬升等综合影响,引发海河流域极为罕见的强降雨过程,呈现“降雨总量极大、洪水量级极大”特点:全流域累计降水量 494 亿 m³,洪水径流量约 200 亿 m³,均创“63·8”洪水后最大值^[4]。此次“23·7”暴雨导致海河流域发生自 1963 年以来首次流域性特大洪水,洪水过程随降雨过程移动自南向北出现,导致先后 22 条河流超警戒水位,7 条河流超保证水位,8 条河流突破历史实测洪水位,其中子牙河、永定河和大清河相继发生编号洪水^[5]。

作为典型半湿润流域,海河流域人口密度高且人类活动剧烈^[6],近年来其洪水预报精度受下垫面影响有恶化趋势。据 2018 年海河流域洪水预报方案数据显示^[7],仅 38%的预报断面精度达到 B 级及以上标准,10%的断面处于 C 级,而其余 52%的断面预报精度较差,甚至无法评级。水利部海河水利委员会指出,海河流域洪水预报精度较差的主要原因是人类活动引起的下垫面变化导致产汇流机制发生改变,目前下垫面的剧烈变化主要归因于地下水超采导致包气带增厚、水利基础设施的密集建设和城市不透水面的增加,而传统水文模型无法精确考虑到这些改变,这一现象普遍存在于海河流域和大多数地下水过度开采的半湿润地区^[8]。

近年来,学者们对海河流域的人类活动响应进行了大量水文模拟研究。例如:段新光等^[9]针对高强度人类活动影响下原有模型适应性不足的问题,通过在模型结构中加入水利工程调度模块,并提出调度反演方法,显著提升了缺资料地区的洪水预报精度;李致家等^[10]应用新安江模型与新安江-海河模型在海河流域进行对比分析,得出在人类活动影响较大的流域,新安江-海河模型模拟效果更好;张珂等^[11]提出了考虑地表水利工程和地下水开采双重人类活动影响的半湿润地下水超采区分布式水文模型,该模型在清水河流域的模拟效果比新安江-海河模型更好。针对“23·7”特大洪水,吴滨滨等^[12]基于 IFMS/Urban 软件构建了蓄滞洪区一维-二维水动力学耦合模型,模拟结果与遥感检测及实测数据吻合度较高;蔡阳^[13]对降雨特性开展了深入剖析,并耦合数字孪生平台对流域防洪“四预”体系效能进行了评估,归纳了存在的问题,进而提出了针对性优化措施。部分学者还对“23·7”洪水进行了复盘分析,如北京洪水复盘^[14]、永定河流域洪水复盘^[15]以及密云水库洪水复盘^[16]等。

关于“23·7”特大洪水,已有研究主要围绕降雨时空特征分析、防御工作及问题短板总结、蓄滞洪区洪水演进模拟以及复盘分析等方面开展,而对暴雨特性与水文过程中要素的关联研究较少。本文在分布式水文模型——双拦蓄网格模型(Grid-XAJ-DAR 模型)的基础上结合 PE-EUZI 方法^[17]计算张力水蓄水容量,融合多源遥感数据反演研究区内水库初始蓄水容量,选取清水河流域的典型子流域——北辛店流域开展“23·7”特大洪水复盘模拟,并系统分析暴雨-径流-调蓄全过程中水文要素的动态变化,以期强降雨条件下的洪涝灾害预警提供技术支撑。

1 双拦蓄网格模型原理

双拦蓄网格模型是在网格新安江模型(Grid-XAJ 模型)分布式框架^[18]基础上构建的耦合人类活动干扰的流域降雨径流模型。该模型以 DEM 网格为计算单元,在植被截留和蒸散发计算部分与网格新安江模型相同,但在产汇流计算中考虑了地表水利工程与地下水超采:①通过考虑水库河闸等人类水利工程对产汇流的影响,新增了地表拦蓄模块;②通过考虑地下水超采造成的区域性地下漏斗现象(即产汇流过程中产生的地下径流可能无法汇入河道),新增了地下拦蓄模块。本文主要介绍双拦蓄网格模型中的新增模块,其他模块原理与网格新安江模型一致,详见文献[18]。

1.1 地表拦蓄模块

双拦蓄网格模型不考虑水库河闸的调节能力。各水库河闸的蓄水容量及所处位置通过遥感技术提取,并结合水利普查信息加以验证和完善。模型在河道网格上新增地表拦蓄库容 V_{chm} ,该库容在任意水库河闸以上河段的河道网格中共享,即每个河道网格的入流量都会汇入对应拦蓄主体中,消耗于蒸散发或灌溉。水源划分后,模型基于工程控制范围识别受控网格,其产流将优先被对应的拦蓄主体截留储存,仅当累计入流量超过 V_{chm} 时,超额流量才作为有效径流参与后续河网汇流。

1.2 地下拦蓄模块

双拦蓄网格模型在分水源部分新增了下层自由水库以及对应的参数。透水网格中表层自由水库中的自由水量会被划分为地表径流 R_s 、壤中流 R_i 和下层自由水库入流 F_d 。其中 F_d 与新安江模型中的地下径流 R_g 不同,为了模拟地下水开采导致地下渗漏的现象, F_d 将会流入下层自由水库中。该下渗过程通过 Green-Ampt 渗透方程^[19]进行描述:

$$f(t) = K\left(1 + \frac{\psi \Delta \theta}{F(t)}\right)$$
 (1)

式中: $f(t)$ 为下层自由水库流入能力, mm/h; K 为土壤饱和导水率, mm/h; ψ 为湿润锋处土壤吸力, mm; $\Delta \theta$ 为湿润锋处土壤含水量的变化量; $F(t)$ 为累计入渗量, mm。

下层自由水库入流受潜在入流量和下层自由水库入渗能力双重制约,故最终取二者中的较小值,第 t 时段下层自由水库入流 $F_{d,t}$ 为:

$$F_{d,t} = \min\{R_t + S_t - R_{s,t}, f(t) \Delta t\}$$
 (2)

式中: R_t 为第 t 时段的产流量, mm; S_t 为第 t 时段初上层自由水库中蓄存的自由水, mm; $R_{s,t}$ 为第 t 时段的地面径流, mm; Δt 为第 t 时段的时间步长, h。

只有当下层自由水库被蓄满时,超出下层自由水蓄水容量阈值 (S_{LM}) 的部分径流才能成为地下径流参与河网汇流过程^[11]。双自由水库通过概念化的方法,模拟了地下水位下降对地下径流的影响。

1.3 参数计算方法

网格新安江模型计算张力水蓄水容量的理论基于包气带厚度与地形指数存在负相关关系的假设,该假设能较好地刻画我国南方湿润地区的张力水蓄水容量空间异质性,但在地下水超采平原区存在局限性:无论地形指数的大小,开采井周围的地下漏斗区域均呈现较厚的包气带和较大的土壤含水量,并且未考虑城市化导致的不透水面扩张对张力水蓄水能力机制的影响。故本文采用 Chen 等^[17]提出的 PE-EUZI 方法,通过可蒸发包气带厚度以及不透水面比例计算张力水蓄水容量 W_M :

$$W_M = aD(\theta_{fc} - \theta_{wp})(1 - \sigma) + b$$
 (3)

式中: a 、 b 为待定系数; θ_{fc} 、 θ_{wp} 分别为田间持水量和凋萎含水量; σ 为不透水面所占比例; D 为可蒸发包气带厚度,指受蒸散发作用影响的包气带厚度,这部分土层下方的土壤含水量保持在田间持水量与饱和含水量之间。

待定系数 a 、 b 可通过网格单元中 $D(\theta_{fc} - \theta_{wp})(1 - \sigma)$ 的最大值、最小值对应的 W_M 最大值与最小值(一般取 0)确定。

双拦蓄网格模型的参数与流域地貌特征、土地利用类型、土壤类型、植被类型及地下水埋深等下垫面特征有着明确的关系^[19],其中大部分参数及其确定方法与网格新安江模型相同,新增了以下参数:流域出口断面河道下方弱不透水层高程 Z_i 、地下水位变动带给水度 μ 、水利工程防洪库容 V_f 和湿润锋处土壤吸力 ψ ,参数确定方法可参考文献[17-18,21]。中间参数初始水库蓄水量通过多源数据同化方法估算获得,该方法基于 GF1-WFV4 多光谱遥感数据反演水域面积,耦合地面实测数据及水库的水位-面积曲线与水位-库容曲线联合推求。

2 研究区概况与暴雨洪水过程分析

海河流域清水河水系是下泄白洋淀、维持淀区水文连通性以及入淀水量的重要支流。以清水河为研究对象,选取其控制站——北辛店水文站控制断面以上流域(地理坐标 38.6°N~39.2°N, 114.8°E~115.5°E)作为典型研究区(图 1)。研究流域面积约为 1 650 km²,主河道长 108.6 km,河道纵坡 3.0‰,属于华北半湿润山丘-平原过渡带。流域包含两大基本地貌单元:西北部为山地丘陵区,中部及东部为平坦开阔平原区,土层深厚疏松。流域内土壤以黏壤土为主,伴有砂壤土和

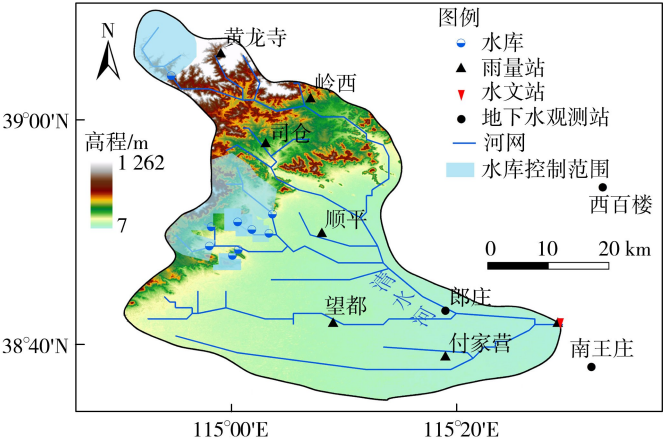


图 1 北辛店流域水系及水库控制范围
Fig. 1 River system and reservoir control areas in Beixindian watershed

粉壤土,主要作物为小麦、玉米、高粱及豆类等。

流域多年平均降水量为 460.0 mm,最大年降水量为 833.7 mm(2008 年),出口断面北辛店水文站 1966—2010 年多年平均年径流量为 0.29 亿 m³,实测最高洪峰水位为 19.70 m。该流域常年洪峰流量在 200 m³/s 以下,2023 年发生有记录以来第三大洪水,洪峰为 366 m³/s。流域内设有 1 个水文站、7 个雨量站、3 个地下水观测站、9 座水库。流域内地下水开采严重(2010 年平原区地下水位埋深已超 15 m),叠加流域内水库、闸坝等水利工程分布,形成典型的人类活动影响剧烈的地下水超采流域,加之洪水资料匮乏,洪水预报难度大。

2.1 “23·7”暴雨过程

“23·7”极端降雨发生于 2023 年 7 月 29 日至 8 月 2 日,累计持续时间 82 h,降雨主峰集中在 48 h 内,具有雨量大、雨强突出、时段集中的特点。流域平均降水量为 489.0 mm,超过 1966—2010 多年平均值。暴雨中心主要位于上游岭西一带,空间分布极不均匀(图 2(a)):最大 1 h 降水量为北辛店水文站的 65.0 mm,最大 24、48 h 降水量为岭西雨量站的 357.8、580.8 mm,分别占单站累计降水量的 13%、53%和 86%。研究区内 7 个雨量站的总降水量介于 438.4 ~ 674.4 mm 之间,岭西站最大,付家营站最小,极差达 1.5 倍(图 2(b))。具体降雨过程:7 月 29 日暴雨雨量 77.0 mm;7 月 30 日特大暴雨雨量 324.3 mm,占整场降雨过程的 66%;7 月 31 日暴雨雨量 74.6 mm;8 月 1 日中雨雨量 13.2 mm。

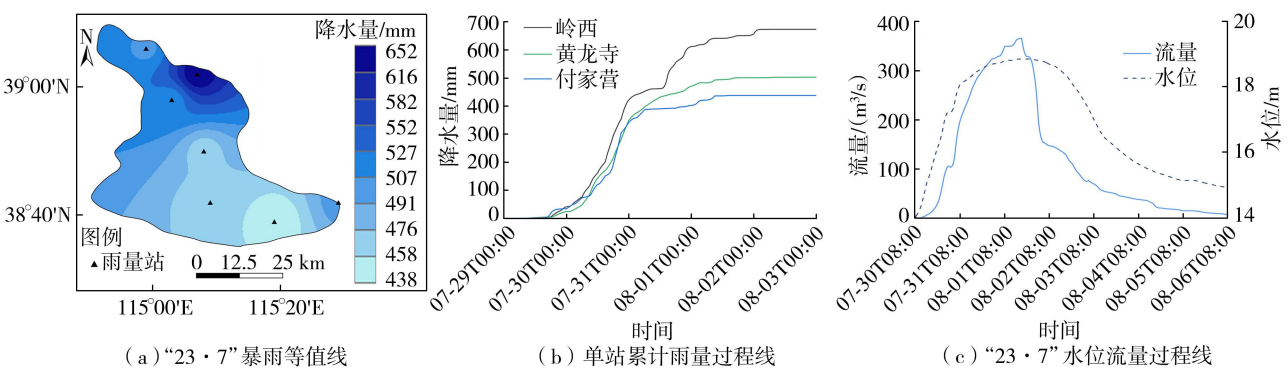


图 2 北辛店流域“23·7”暴雨洪水过程
Fig. 2 “23·7” storm-flood process in Beixindian watershed

2.2 洪水过程

本场洪水出现北辛店流域自 1989 年以来最大洪峰,位列历史第三大洪水。洪水演进过程分为 4 个阶段:①起涨阶段(7 月 29 日 8 时),降雨前初始水位为 13.88 m(相应流量为 0.37 m³/s);②涨洪阶段(7 月 30 日 8 时至 31 日 0 时),受降雨入渗补给作用,水位开始抬升并出现明显涨水过程,流量过程滞后 3 h,至 31 日 0 时水位涨至 17.14 m(流量 96 m³/s);③峰型变化阶段(7 月 31 日 1 时至 8 月 1 日 15 时),受雨强波动影响,出现短暂小洪峰后继续递增,但涨洪速率趋缓,至 8 月 1 日 15 时水位、流量分别达最大值 18.86 m、366 m³/s,峰现时间较降雨峰值滞后 44 h;④退水阶段(8 月 1 日 17 时至 7 日 7 时),流量过程线陡降,初期退水速率 18.5(m³·s⁻¹)/h,而后升至 29.2(m³·s⁻¹)/h,至 2 日 4 时进入平缓退水期,揭示地表径流快速消退与地下水延迟补给的耦合机制(图 2(c))。

2.3 研究数据

本文用到的数据包括 DEM 数据、土壤类型数据、全球 30 m 不透水面空间分布以及 CLDAS 数据,分别源于美国国家海洋和大气管理局(NOAA)、联合国粮农组织(FAO)、中国科学院空天信息创新研究院^[22]以及中国气象局陆面数据同化系统。清水河流域的降水、蒸散发、实测径流量、河道水位资料、水利工程空间分布及拦蓄量、多年平均地下水埋深空间分布资料均来源于河北省水文水资源勘测局。地形指数、最陡坡度、累计汇水面积等地形特征均通过流域数字化及地貌特征提取系统(DWTES 系统)^[18]计算得到。

海河流域的洪水事件数据非常有限,清水河流域也不例外^[23]。除 2023 年外,2000 年之后该流域未发生较大洪水,鉴于清水河流域洪涝事件较少以及洪水预报的实际需求,选取洪峰流量大于 25 m³/s、具有完整实测数据的 12 场洪水开展参数率定与检验。基于清水河流域下垫面数据及同期雨水情数据,构建双拦蓄网格模型与网格新安江模型,计算时间步长为 1 h。

3 洪水模拟复盘分析

3.1 洪水过程模拟分析

基于式(3),本文对比了新安江模型^[24-25]、网格新安江模型和双拦蓄网格模型 3 种模型张力水蓄水容量分布曲线的模拟特性(蓄水容量曲线指数均取 0.4),结果显示,在标准化处理(最大单元蓄水量设为 1)条件下,网格新安江模型模拟的流域总蓄水量最小,新安江模型中等,双拦蓄网格模型最大(图 3)。这与双拦蓄网格模型综合考虑了地下水超采及城市化对张力水蓄水容量的影响有关,所以 PE-EUZI 方法更真实地反映了清水河流域地下水超采导致包气带增厚使得流域整体的张力水蓄水容量偏大的实际现状。

采用网格新安江模型和双拦蓄网格模型对清水河流域 11 场洪水数据进行模拟。所用模型参数大都可根据土壤类型和植被覆盖数据进行预估,或者从物理意义上与土壤类型与植被覆盖建立联系。网格新安江模型与双拦蓄网格模型待率定参数的优选结果为:蒸散发折算系数 K 均取值 0.9,河网水流消退系数 C_s 分别取值 0.95 和 0.50,河网汇流滞时 L_{ag} 分别取值 10h 和 11h,逐网格河道汇流参数 K_{ech} 分别取值 0.01h 和 0.02h,河道汇流比重因子 X_{ech} 分别取值 0.20 和 0.45,逐网格坡面汇流参数 K_{es} 均为 0.04h,坡面汇流比重因子 X_{es} 分别取值 0.1 和 0.4,流域出口断面河道下方弱不透水层高程 Z_i 取值 13.0 m。

为验证模型的实际应用效果,本文依据 GB/T 22482—2008《水文情报预报规范》,对 1980—2000 年的 11 场历史洪水进行模拟精度评估。目前清水河流域洪水预报由于缺乏合适且足够的洪水事件用于水文模型参数率定以及现有的水文模型适用性存疑,导致现有的预报方案洪峰合格率仅有 40%,预报效果较差^[17]。对清水河流域而言,洪峰模拟合格率和洪峰出现时间模拟合格率是流域管理机构最为关心的两项指标。验证结果表明,11 场洪水网格新安江模型径流深模拟合格率达 91%,洪峰合格率为 45%,峰现时间合格率 64%,确定性系数大于 0.5 的占比为 36%;双拦蓄网格模型径流深模拟合格率达 100%,洪峰模拟合格率为 64%,峰现时间达到 82%的合格率,确定性系数大于 0.5 的占比为 64%,整体精度都优于网格新安江模型。

图 4 为 1980—2000 年历史洪水率定期模拟结果。由图 4 可见:在历史洪水模拟的误差中,双拦蓄网格模型和网格新安江模型两者径流深平均相对误差分别为 11%和 12%,其中双拦蓄网格模型在 5 场洪水中误差更低,如 19890722 场次双拦蓄网格模型误差为-1.15 mm,网格新安江模型为 4.03 mm,显著减小了高估现象(图 4(a));两者洪峰平均相对误差分别为-18%和-21%,双拦蓄网格模型在 8 场洪水中表现更优,如 19800827 场次双拦蓄网格模型误差为 15.98%,网格新安江模型为 45.84%,中小洪峰捕捉能力显著提升(图 4(b));两者平均确定性系数分别为 0.56 和 0.45,其中双拦蓄网格模型在 9 场洪水中精度更高,典型场次如 19890722 场次,双拦蓄网格模型为 0.92,网格新安江模型为 0.86,反映其对洪水流量过程模拟还原能力更优(图 4(c))。可见双拦蓄网格模型通过耦合地表-地下调蓄机制,提升了强人类活动扰动地区的洪水

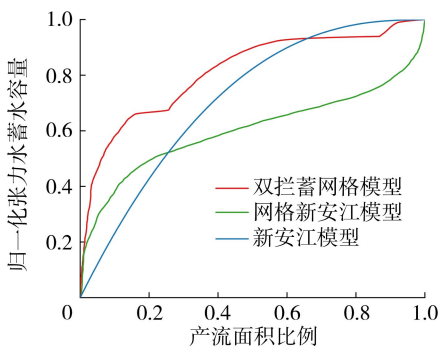


图 3 归一化张力水蓄水量计算方法对比
Fig.3 Comparison of calculation methods for normalized tension water storage capacity

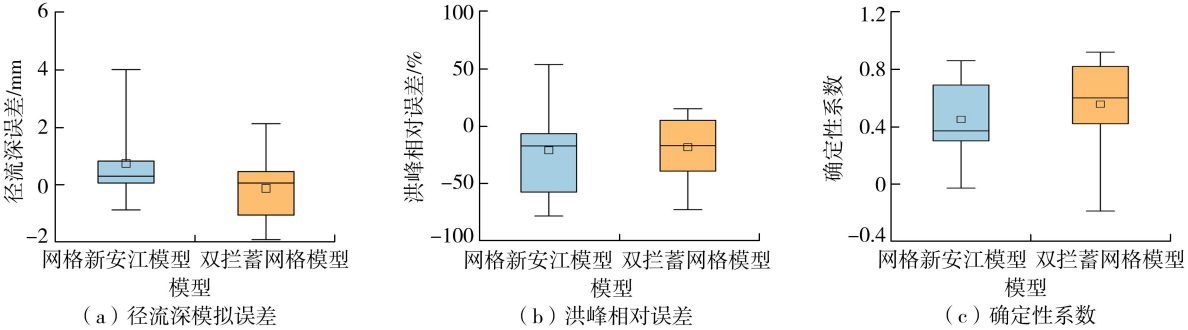


图 4 1980—2000 年历史洪水率定期模拟结果箱型图

Fig.4 Box plots of simulation results in calibration period of historical floods from 1980 to 2000

模拟精度与可靠性。

综合以上洪水场次模拟效果,发现双拦蓄网格模型在跨量级洪水适应性方面表现稳定,如图 5 所示,特大洪水(1989072201 场次)与较小洪水(1988081000 场次)的径流深相对误差分别在 5% 和 2% 以内,洪峰相对误差分别控制在 6% 和 3% 以内,确定性系数均优于网格新安江模型,证明其在高强度人类活动扰动地区的水文模拟可靠性。

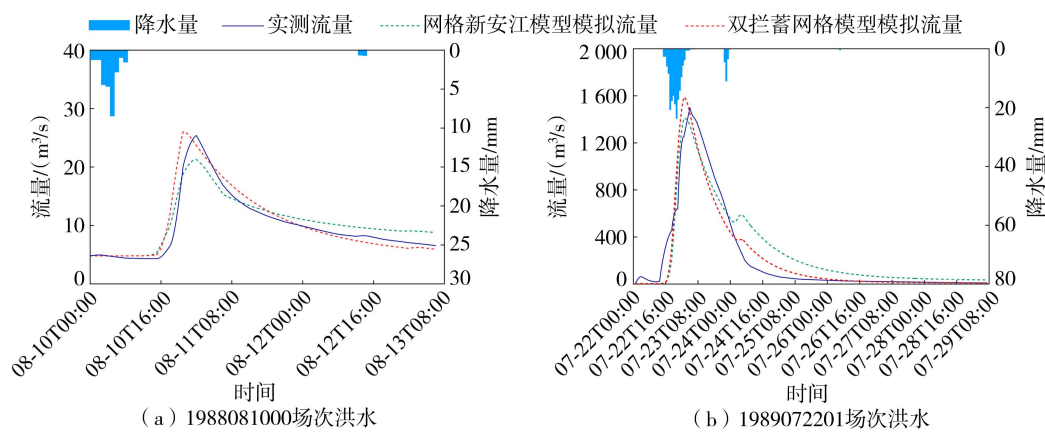


图 5 典型洪水模拟过程
Fig. 5 Simulation processes of typical floods

对于北辛店流域“23·7”洪水过程,双拦蓄网格模型的模拟效果较好(图 6)。根据洪水过程线来看,清水河流域洪水历时较长,洪水过程呈现“快速起涨—急剧消退—缓慢退水”的演变特征,模拟洪水过程线与实测过程趋势吻合良好,其中洪峰相对误差与径流深相对误差均控制在 4% 以内,确定性系数为 0.91,表明该模型能够较为准确地模拟以北辛店流域为代表的清水河流域洪水过程。但峰现时间误差较大,分析原因可能在于北辛店流域属于丘陵-平原过渡区,其主要产流区并非深山区,而平原区因长期地下水超采导致包气带厚度异常增厚,地表与地下径流比例发生改变,使得洪峰传播时间延长。

考虑水库、河闸等水利工程对洪水的调蓄作用对于提高洪水预报精度具有重要意义,其拦洪削峰作用不容忽视^[26],因此通过在模型中引入地表拦蓄模块,评估水库群对洪水过程的调节效应。北辛店流域内共分布 9 座水库,其中包括中型水库 1 座,小(二)型水库 8 座,均位于河道上游,总控制面积为全流域的 11%。由图 6 可见,未启用地表拦蓄模块时导致洪峰流量高估 11 m³/s(对应水位降幅 0.03 m),累计洪量偏差 3%,表明流域内水库群因控制面积有限,主要发挥短历时洪峰调节功能,而对洪水总量的调控较弱。研究^[26]显示,将中小型水库拦蓄效应纳入水文模型可有效改善洪峰流量与洪量模拟精度,且水库控制面积与调控效能呈正相关关系。

在北辛店流域的水文循环过程中,秋冬季地下水超采易形成区域性降落漏斗,故汛期地表径流会通过优先流通道下渗补给地下水,促使地下水位动态回升。双拦蓄网格模型通过地下自由水库模块刻画此过程,忽略该模块时模拟过程中洪水总量虚增 31%,退水曲线趋平,无法反映真实径流缓慢衰减过程。该模块的引入有效校正了人类活动干扰下的地表-地下水再分配过程,提升了强人类活动扰动流域洪水模型的物理机制完备性。

3.3 土壤湿度分析

中国气象局陆面数据同化系统(CLDAS-V2.0)通过融合气象观测、卫星遥感及数值模式数据,驱动 Noah-MP 陆面模式实现土壤湿度的垂向分层模拟,并结合集合卡尔曼滤波同化地面实测与卫星反演数据,生

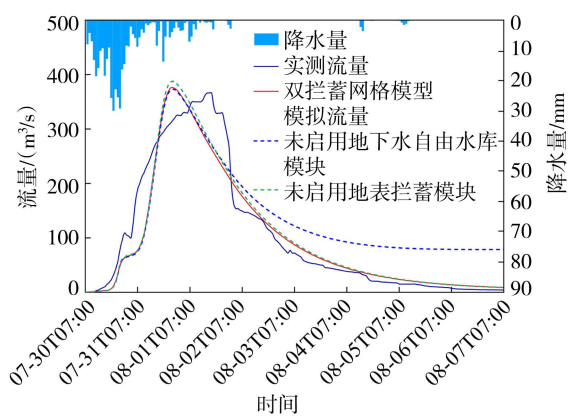


图 6 “23·7”洪水过程线
Fig. 6 Hydrographs of “23·7” flood

成东亚区域逐时土壤湿度产品(空间分辨率 0.062 5°),其垂向分层包括 0~5、0~10、10~40、40~100、100~200 cm 5 个层级^[27]。针对“23·7”洪水事件,本文选取 2023 年 7 月 24 日至 8 月 15 日 0~200 cm 土层日尺度土壤湿度数据解析暴雨过程中土壤水分的时空响应机制。

土壤湿度作为水循环的核心参量,调控着地表水与地下水间的交换过程,也与北辛店流域洪水过程的演变紧密相关^[28]。洪水起涨前(7 月 29 日),流域内 0~10 cm 表层土壤含水率维持在 0.305 m³/m³ 的低值,表明土壤具备较高的入渗能力,有利于后续降雨入渗。7 月 30 日,流域遭遇降水量高达 401.3 mm 的特大暴雨,导致表层土壤迅速饱和,0~10 cm 土层含水率在 24 h 内骤增至 0.418 m³/m³(增幅达 37%),10~40 cm 土层含水率同步达到峰值 0.412 m³/m³,40~100 cm 与 100~200 cm 深层土壤存在响应延迟,但其含水率也在增大。此时,表层和深层土壤迅速饱和导致入渗能力显著下降,促使降雨转变为地表径流,迅速汇流并推高水位,使流量从 7 月 30 日 8 时的 0.37 m³/s 逐步增至 7 月 31 日 0 时的 96 m³/s。

在 7 月 31 日至 8 月 1 日的涨洪阶段,尽管降雨强度出现波动,但前期土壤中累积的水分仍持续作用于径流的形成。同时,40~100 cm 与 100~200 cm 深层土壤含水率的滞后响应逐渐显现,分别达到峰值 0.398 m³/m³ 和 0.383 m³/m³(较表层延迟 24~48 h)。此时土壤的饱和状态与持续的地表径流共同作用,促使流量于 8 月 1 日 15 时达到 366 m³/s 的洪峰极值。8 月 1 日 17 时降雨停止,洪水进入退水阶段,表层土壤含水率开始快速下降,而深层土壤水分则以较缓的速度逐步释放(图 7)。这种分层次的水分消退机制延长了退水过程,使洪水过程从急剧下降逐步转为平缓衰减,退水历时持续 72 h 以上,体现出地表快速消退与地下缓释补给之间的耦合效应。

综合这一阶段的土壤湿度数据分析表明,在涨洪阶段,强降雨引发的土壤快速饱和显著增强了径流过程并加速洪峰形成;而在退水阶段,各层土壤水分的持续释放则有效延缓了洪水消退。这种耦合关系表明,土壤湿度的动态变化不仅反映降雨入渗的即时响应,更通过控制水分转移速度和累积效应,深刻影响洪水过程的演变特征及其持续时间。

4 结 论

a. 双拦蓄网格模型通过耦合地表拦蓄和地下拦蓄模块,构建地表-地下水协同调蓄机制。基于 PE-EUZY 方法融合不透水面比例与可蒸发包气带厚度,重构张力水蓄水容量 W_M ;同时融合多源遥感数据反演研究区内水库初始蓄水容量,优化人类活动影响下的参数估算方法,提高了极端降雨条件下的洪水模拟精度。

b. 双拦蓄网格模型模拟结果表明,1980—2000 年历史洪水模拟的径流深合格率达 100%,洪峰合格率为 55%,精度优于网格新安江模型和该流域现有预报方案;对于“23·7”洪水过程,洪峰与径流深相对误差均控制在 4% 以内,确定性系数为 0.91。双拦蓄网格模型中地表拦蓄模块通过调蓄作用削峰 11 m³/s(水位降幅 0.03 m),洪量降幅 3%;未考虑地下拦蓄模块时,退水段斜率变陡,洪水总量骤增 31%。

c. 清水河北辛店流域“23·7”暴雨过程具有降水量大、强度高且时段集中等特点,其降雨分布不均且暴雨中心位于上游。强降雨使土壤快速蓄满,促进径流形成并推动洪峰形成,而土壤深层水分的滞后释放则延缓洪水消退,导致退水过程持续 72 h 以上,表明土壤湿度的时空变化对洪水过程的形成与消退具有重要影响。

参考文献:

[1] 张存杰,张思齐,宁惠芳.近 60 a 中国极端天气气候事件变化趋势及 2023 年特征分析[J].干旱气象,2024,42(4):536-552. (Zhang Cunjie,Zhang Siqi,Ning Huifang. Trends of extreme weather and climate events in China in recent 60 years and their characteristics in 2023[J]. Journal of Arid Meteorology,2024,42(4):536-552. (in Chinese))

[2] 程宸,房小怡,张硕,等.极端暴雨过程对海河流域暴雨分布特征的影响[J].大气科学学报,2025,48(2):289-299. (Cheng Chen,Fang Xiaoyi,Zhang Shuo,et al. Influence of extreme rainstorms on the spatial distribution characteristics of rainfall in

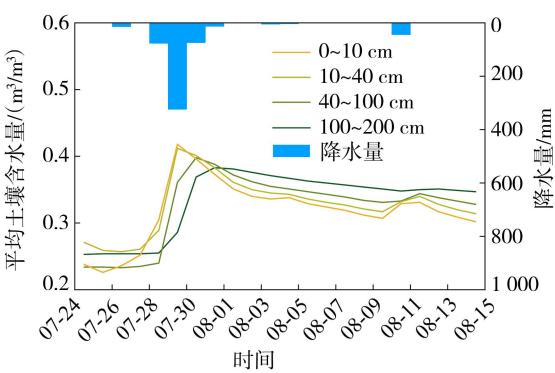


图 7 日平均土壤含水量变化

Fig. 7 Variation of daily average soil moisture

China's Haihe River basin[J]. Transactions of Atmospheric Sciences,2025,48(2):289-299. (in Chinese))

[3] 徐宗学,陈浩,任梅芳. 变化环境下我国典型特大城市洪涝灾害成因分析[J]. 水资源保护,2025,41(5):33-40. (Xu Zongxue,Chen Hao, Ren Meifang. Analysis on causes of flooding/waterlogging disasters in typical megacities of China under changing environment[J]. Water Resources Protection,2025,41(5):33-40. (in Chinese))

[4] 姚文广. 抗御海河“23·7”流域性特大洪水的实践启示和检视思考[J]. 中国水利,2023(18):1-4. (Yao Wenguang. Practice and reflection of flood defense of “July 23” catastrophic flood in the Haihe River Basin[J]. China Water Resources, 2023(18):1-4. (in Chinese))

[5] 乔建华. 防御海河“23·7”流域性特大洪水经验启示[J]. 中国水利,2023(18):9-12. (Qiao Jianhua. Experience and enlightenment of preventing “July 23” flood in the Haihe River[J]. China Water Resources,2023(18):9-12. (in Chinese))

[6] 张婧,马贵宏,高雅,等. 华北山前平原典型井灌区地下水水位变化影响因素分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022,50(1):21-28. (Zhang Jing, Ma Guihong, Gao Ya, et al. Analysis on influencing factors of groundwater level change in typical well irrigation area in piedmont plain of North China[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(1): 21-28. (in Chinese))

[7] 韩瑞光,杨邦. 破解海河流域洪水监测预报难题的措施[J]. 水利发展研究,2020,20(7):29-32. (Han Ruiguang, Yang Bang. Measures to solve the problem of flood monitoring and forecasting in the Haihe River Basin [J]. Water Resources Development Research,2020,20(7):29-32. (in Chinese))

[8] Li Zepeng, He Xin, Lu Chuilu. Assessment and analysis of groundwater overexploitation in China[J]. E3S Web of Conferences, 2021,228(10):01008.

[9] 段新光,陈然,潘连和,等. 基于数据与机理驱动的密云水库洪水预报技术研究及应用[J]. 中国水利,2024(8):33-39. (Duan Xinguang, Chen Ran, Pan Lianhe, et al. Research and application of data and mechanism driven flood forecasting technology for the Miyun Reservoir[J]. China Water Resource,2024(8):33-39. (in Chinese))

[10] 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))

[11] 张珂,张企诺,陈新宇,等. 栅格新安江-地表地下双人工调蓄分布式水文模型[J]. 水资源保护,2021,37(5):94-101. (Zhang Ke,Zhang Qinuo,Chen Xinyu, et al. Gridded Xin’ anjiang-dual anthropogenic aboveground and underground regulation distributed hydrological model[J]. Water Resources Protection,2021,37(5):94-101. (in Chinese))

[12] 吴滨滨,马奉泉,胡珊珊,等. 海河“23·7”流域性特大洪水东淀蓄滞洪区洪水演进复盘分析[J]. 水资源保护,2025,41(5):96-105. (Wu Binbin, Ma Fengquan, Hu Shanshan, et al. Retrospective analysis of flood propagation in Dongdian flood storage-detention area during “23·7” catastrophic flood in the Haihe River Basin[J]. Water Resources Protection,2025,41(5):96-105. (in Chinese))

[13] 蔡阳. 数字赋能海河“23·7”流域性特大洪水防御[J]. 中国水利,2023(18):13-18. (Cai Yang. Digital enables the Haihe River “July 23” basin-wide catastrophic flood prevention[J]. China Water Resources,2023(18):13-18. (in Chinese))

[14] 麦合木提·图达吉,童瑞,徐宝宁,等. 北京“23·7”特大洪水复盘分析[J]. 水力发电学报,2024,43(4):12-22. (Mahmut Tudaji,Tong Rui, Xu Baoning, et al. Hindcasting on “July 2023” flood event in Beijing [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2024,43(4):12-22. (in Chinese))

[15] 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))

[16] 陈然,段新光,刘华杰. 密云水库“23·7”暴雨洪水复盘分析[J]. 水资源开发与管理,2024,10(12):54-61. (Chen Ran, Duan Xinguang,Liu Huajie. Retrospective analysis of the “23·7” rainstorm and flood event at Miyun Reservoir[J]. Water Resources Development and Management,2024,10(12):54-61. (in Chinese))

[17] Chen Xinyu,Zhang Ke,Luo Yuning, et al. A distributed hydrological model for semi-humid watersheds with a thick unsaturated zone under strong anthropogenic impacts;a case study in Haihe River Basin[J]. Journal of Hydrology,2023,623:129765.

[18] 姚成. 基于栅格的新安江(Grid-Xinjiang)模型研究[D]. 南京:河海大学,2009.

[19] 霍文博,李致家,张珂,等. 分布式格林-安普特降雨径流模型研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(3):47-54. (Huo Wenbo, Li Zhijia, Zhang Ke, et al. Study on the distributed Green-Ampt rainfall-runoff model [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2022,50(3):47-54. (in Chinese))

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.04.010

感潮河网水位智能预测方法

万安¹, 林佳威¹, 袁赛瑜^{1,2}, 唐洪武^{1,3}

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室; 2. 河海大学水利部水循环与水动力系统重点实验室;
3. 华南理工大学土木与交通学院)

摘要:为解决感潮河网水位受潮汐、径流、泵闸调控耦合作用呈现非线性波动,且水系地形差异致使全域统一模拟精度低、分站点建模成本与复杂度过高的问题,基于时空聚类的多尺度融合时空注意力网络(MSTANet),提出了一种面向感潮河网的智能水位预测方法。该方法通过融合多尺度时序特征与空间依赖关系,提升了模型对潮汐、泵闸调控等多扰动下水位演化过程的模拟能力;同时引入时空聚类实现流域分区建模,有效缓解了空间异质性带来的性能下降问题。上海蕴南水利控制片区的实例验证表明,该方法具有良好的模拟精度、较高的计算效率,具备工程实用性与推广前景。

关键词:感潮河网;多扰动;水位预测;聚类算法;集成模型;机器学习

Intelligent prediction method for water level in tidal river networks

Wan An¹, Lin Jiawei¹, Yuan Saiyu^{1,2}, Tang Hongwu^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University;
2. Key Laboratory of Hydrologic-Cycle and Hydrodynamic-System of Ministry of Water Resources, Hohai University;
3. School of Civil Engineering & Transportation, South China University of Technology)

Abstract: To address the problems that the water level of tidal river networks exhibits nonlinear fluctuations under the coupling effects of tides, runoff, and sluice-pump regulation, and that topographic differences of water systems result in low accuracy of holistic unified simulation and high cost and complexity of individual station modeling, an intelligent water level prediction method for tidal river networks was proposed based on a multi-scale fusion spatiotemporal attention network (MSTANet) with spatiotemporal clustering. By integrating multi-scale temporal features and spatial dependencies, this method enhanced the simulation capability for water level evolution processes under multiple disturbances, such as tides and sluice-pump regulation; meanwhile, spatiotemporal clustering was introduced to achieve watershed subdivision modeling, effectively mitigating the performance degradation caused by spatial heterogeneity. The validation in Wennan Water Control Area of Shanghai shows that this method has good simulation accuracy and computational efficiency and possesses engineering practicability and application prospects.

Key words: tidal river network; multiple disturbance; water level prediction; clustering algorithm; ensemble model; machine learning

感潮河网作为典型的陆海交互地貌单元,承载着重要的水资源与生态功能,其沿岸地区的资源富集性与区位优势造就了人口密集、经济发达的城市群^[1-2]。然而,高强度的人类活动与感潮河网特殊的水文特性相互叠加,显著加剧了该区域的洪涝灾害风险^[3-5],因此亟须建立高精度流域水位预测模型^[6],以提升区域水安全保障能力。传统水动力预测方法主要依赖曼宁公式、圣维南方程组等物理模型,具有良好的可解释性与精度,但感潮河网尺度大、边界扰动复杂^[7],参数繁多^[8],计算成本高,传统方法难以满足实时性要求。人工神经网络(ANN)^[9]、递归神经网络(RNN)^[10]及其衍生时序模型,诸如长短期记忆网络(LSTM)^[11-12]和门控循环网络(GRU)^[13],凭借复杂场景与海量数据下高效建模能力^[14-15],在水位预测领域展现出明显优势,尤其适用于河道单一站点预测。但在感潮河网复杂动力系统中的应用仍面临两方面挑战:①时间维度上,水位过程同时受天文潮、径流与人控等^[16]多扰动影响,叠加长周期^[17]与短期随机波动^[18],动态过程高度非线性,模型拟合困难;②空间维度上,不同水系间水位驱动机制差异显著,整体建模易掩盖局部特性^[19],导致模型性能在不同区域之间有很大差异^[20],而逐站建模又造成建模成本和复杂度急剧上升,制约模型实用性。

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2340221);国家重点研发计划项目(2022YFC3202602)

作者简介: 万安(2000—),男,硕士研究生,主要从事水位预测研究。E-mail:374891682@qq.com

通信作者: 袁赛瑜(1987—),男,教授,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:yuansaiyu@hhu.edu.cn

本文提出面向感潮河网的流域水位预测方法。时间维度上,聚焦多扰动边界特性,构建融合长周期性与短期随机性的集成模型建模框架;空间维度上,提出基于水位响应差异的子流域划分策略,以降低建模复杂度并提升模型区域泛化能力,实现流域整体与局部最优的模型建模表现。在上海蕴南河网数字孪生系统中的应用表明,本文方法可为提升洪涝风险预警能力、水资源调度效率及水环境治理能力提供有力支撑。

1 研究方法

针对河网的空间异质性和水位变化的多尺度特征,本文融合时空聚类策略与集成学习模型提出了感潮河网的水位预测方法。该方法依托时空聚类算法完成水位时序预处理,将水文特征相近的子流域归为同类,可有效降低建模复杂度并缓解维度灾难;针对潮汐、陆域径流、泵闸调度等多重扰动驱动因子,基于耦合卷积网络、门控循环单元、残差网络与注意力机制,引入线性校正模块,多维度提升感潮河网非线性水位过程的拟合与预测性能。

1.1 水位预测流程

感潮河网水位预测流程如图 1 所示,具体步骤如下:①时空聚类。基于动态时间规整(dynamic time warping, DTW)算法^[21],分别构建各站点水位时序、全域站点分月水位数据的序列相似度距离矩阵,然后采用层次聚类算法,对水位变化趋势相近的站点时序与分月样本实现分组划分,完成时空聚类处理,同类样本表征水位演变具备一致的时空变化规律。②子流域建模。确定最佳聚类后将站点和各月的水位数据分别分类为 n 、 m 个类别($n \in \{1, 2, \dots, N\}$, $m \in \{1, 2, \dots, 12\}$, 其中 N 为总站点数),分别构建 $n \times m$ 个多尺度融合时空注意力网络(MSTANet)模型,用于预测同一聚类下各站点水位。

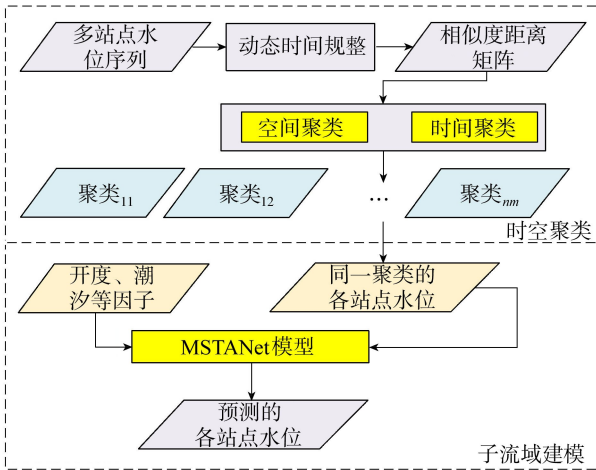


图 1 感潮河网水位预测流程

Fig. 1 Flowchart of water level prediction for tidal river networks

1.2 时空聚类

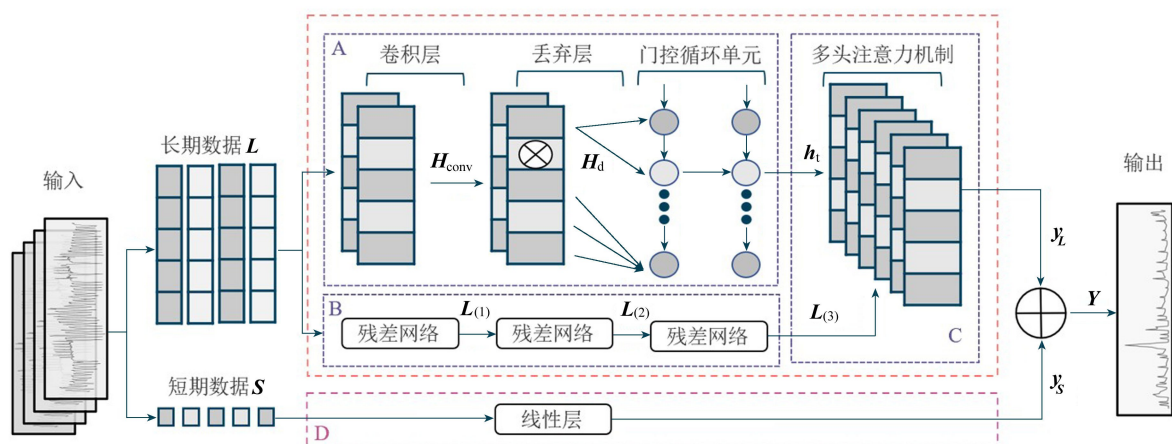
潮汐涨落、泵闸调度等多重驱动因子共同作用下,感潮河网各站点水位演变存在显著空间异质性,为全域水位预测带来挑战:对全部 N 个站点逐一搭建独立模型会造成模型参数量随站点数量大幅增长,极易诱发维度灾难;而采用单一全域统一模型时,不同站点水文驱动机制的差异性易造成特征混杂,大幅削弱局部区域的水位预测精度。为此,本文采用分区建模思路:先通过聚类方法划分水文特征相近的子流域,将全域河网拆解为 n ($n < N$) 个内部水文特性均质的分区,再针对各分区分别构建预测模型。子流域聚类的关键在于度量站点水位序列间的相似性,常用方法为 DTW 算法,该算法通过动态规划计算最优匹配路径,最小化序列间的累计距离,可处理序列间时间轴非线性变形,具备无需参数、时间偏移鲁棒性强等优势,可有效挖掘序列间的整体相似程度^[22]。

基于 DTW 算法的时空聚类流程如下:①初始化和空间聚类。提取各站点的水位时间序列向量合并为空间簇 $C = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_N\}$;将全部站点水位归一化处理后逐时刻计算全域站点均值构建综合时间序列,并按月份切分成 12 个时间片段作为时间簇 $T = \{T_1, T_2, \dots, T_{12}\}$ 。②根据 DTW 算法分别计算空间与时间各簇内部各个特征的相似度距离矩阵。③根据相似度距离矩阵,合并各簇内距离最近的两个特征 (Z_i, Z_j) 、 $(T_a,$

T_b), 并生成新的特征 Z_{ij} 、 T_{ab} 。④更新相似度距离矩阵, 以反映新的特征与原始其余特征簇之间的邻近性。⑤重复步骤③, 直到只剩一个特征, 并分别记录合并过程至空间与时间聚类树。⑥输出空间站点聚类与时间各月份聚类结果, 完成空间与时间聚类。

1.3 MSTANet 模型

针对感潮河网系统的水位时序特征, MSTANet 模型的整体结构如图2所示, 模型包括处理长期部分和短期部分, 以增强模型抑制局部扰动与长期趋势学习能力。长期部分经过不同的网络模块(长期依赖提取模块 A 和局部空间特征处理模块 B)处理后, 由多头注意力机制(时空特征融合模块 C)进行特征融合, 短期部分针对突变扰动, 采用线性模型(短期线性增强模块 D)对预测值进行校正。



注: 包含完整时间窗口的多站点水位时序数据为长期数据 L , 仅取最后一个时间步长的多站点水位数据为短期数据 S ; H_{conv} 为卷积层输出; H_d 为丢弃层输出; h_t 为门控循环网络输出; $L_{(1)}$ 、 $L_{(2)}$ 、 $L_{(3)}$ 分别为第 1、2、3 层残差网络输出; y_L 为长期组件最终输出; y_S 为短期组件最终输出; Y 为模型最终输出。

图2 MSTANet 模型整体结构

Fig. 2 Overall structure of MSTANet model

1.3.1 长期依赖提取模块

在潮汐主导的长周期水动力系统中, 降水、调度等噪声干扰导致传统基于门控机制的 LSTM、GRU 记忆单元遗忘河网水位的关键趋势信息。为此, 建立基于 CNN-GRU^[23] 耦合的长期依赖提取模块, 利用卷积核的频域滤波特性消除短期高频噪声, 增强 GRU 的长期依赖学习能力, 确保天文潮汐主导的周期趋势能够稳定捕捉。

a. 将长期水位数据输入卷积层中, 过滤水位序列噪声:

$$H_{\text{conv}} = \text{ReLU}(W_{\text{conv}} * L + b_{\text{conv}}) \quad (1)$$

式中: $*$ 为卷积操作; W_{conv} 、 b_{conv} 为卷积层可学习的参数; ReLU 为激活函数。

b. 经过卷积后, 为了抑制过拟合的发生, 应用了丢弃层 (Dropout), 使神经元以一定的概率 P 保留:

$$H_d = \text{Dropout}(H_{\text{conv}}, P) \quad (2)$$

式中: H_d 为丢弃层输出; P 为保留节点的概率。

c. 将数据输入门控循环单元^[24], 捕捉水位对时间的长期依赖关系。

1.3.2 局部空间特征处理模块

在高密度的感潮河网中, 邻近站点水位具有显著空间相关性, 为此设计了局部空间特征处理模块, 利用擅长处理空间信息的残差网络 (ResNet)^[25], 通过残差跳跃连接增强对空间特征的感知能力, 从而提高空间信息的传递效率和模型的鲁棒性。将长期数据中周边水文站水位时序输入由多个卷积层组成的 ResNet, 学习河网水位的空间特征信息。

1.3.3 时空特征融合模块

构建集成模型时, 基于简单累加权重分配下的多模型融合无法灵活适应感潮河网水动力系统的复杂性, 为提高河网水位多尺度相关性建模能力, 建立了多头自注意力^[26] 驱动的时空特征融合模块。

1.3.4 短期线性增强模块

处理长期部分的模块可以有效地提取水文序列长期趋势, 但其受记忆能力限制存在响应滞后问题, 对短

期突变的水位扰动并不敏感。因此,引入线性模型来增强捕捉短期突变的能力^[27],公式如下:

$$y_s = \text{Linear}(S)$$

(3)

2 实例验证

2.1 研究区概况和研究数据

上海蕴南水利控制片区^[24](以下简称“蕴南片”)地处长江及太湖流域下游,滨江临海,河网水系密布,属于典型的感潮河网地区。蕴南片整体上可分为3个子流域系统:桃浦河-彭越浦-虹口港、树浦港、新江湾城水系(图3)。流域水位序列在天文潮汐主导下呈周期性波动,但支流交汇和泵闸调度等短时扰动使水位在时间维度上出现多尺度频谱混叠;水位的驱动因子及波动特征在空间维度上表现出明显的异质性。

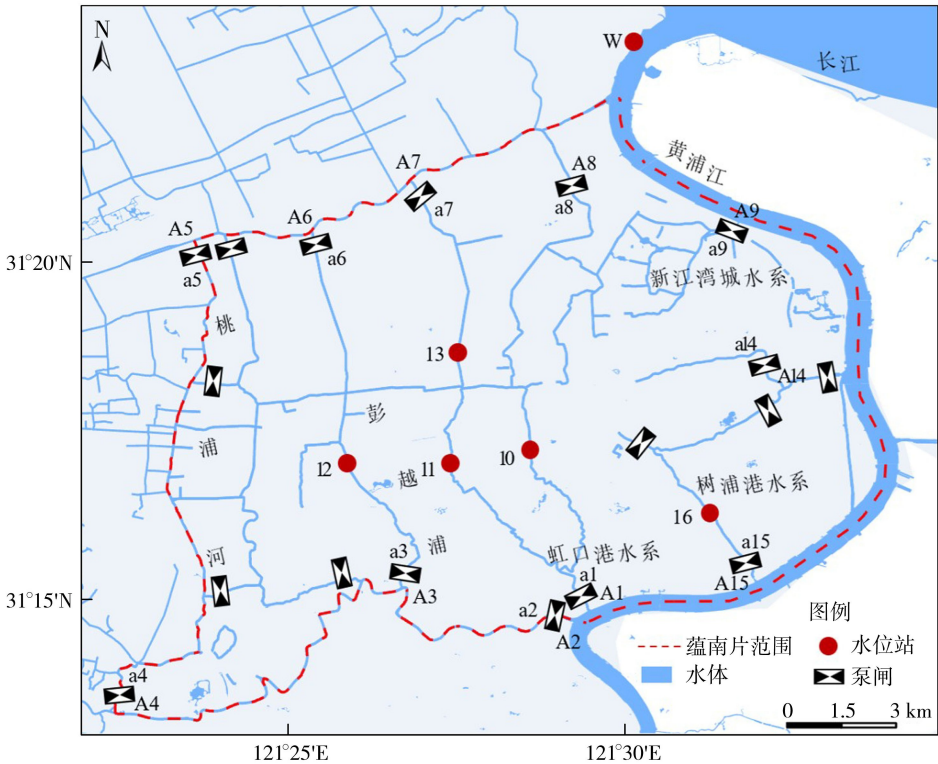


图3 研究区域概况
Fig.3 Overview map of study area

为支撑流域水位预测模型的构建与评估,收集了该流域内共计27个站点的水位数据,包括11个泵闸站点(闸内、闸外分别以小写a与大写A标识)以及5个内江水位站点,辅以吴淞口站(W)潮位数据及10个泵闸站点的开度数据(9号泵闸缺失)。数据范围覆盖2021年2月1日至2022年2月1日,时间分辨率为5min,经缺失值处理、线性插值清洗以及滑动时间窗口构造后,共获得100369条有效数据。为了正确评估模型在各个月的精度,将每个月1—6日划分为测试集(9774条)与验证集(9768条),剩余部分划分为训练集(80827条)。

2.2 实验设置

鉴于泵闸调度多以小时为单位,为更有效支持调度决策,预测模型以过去12个步长为输入窗口,预测同一聚类内各站点未来第12个步长的水位。输入包括同聚类站点的水位序列、邻近站点的泵闸开度和潮位信息(无聚类模型则统一输入全流域控制站点数据)。模型基于Python3.8、TensorFlow2.10和Keras框架开发,运行于Windows11平台(CPU:AMD Ryzen5 7500F;RAM:32GB;GPU:NVIDIA RTX4070Super,12GB)。训练采用Adam优化器、MSE损失函数,迭代60轮,批次大小为512,初始学习率为0.001。为避免超参数选择对模型性能造成干扰,使用Optuna框架基于贝叶斯优化策略在预设空间内搜索1000次以确定最优超参数配置。为验证模型与聚类策略效果,设置4个实验,其信息见表1。

表 1 时空聚类 MSTANet 模型的评估实验设置

Table 1 Evaluation experiment setup of spatiotemporal clustering MSTANet model

实验	实验目的	实验安排
实验 1	验证时空聚类方法的有效性	基于时空聚类方法,对水位序列进行时间与空间聚类,评估其在感潮河网中的适用性与合理性
实验 2	分析聚类数量对精度影响	设置不同时间(1~12 类)与空间(1~27 类)聚类数,结合不同 GRU 单元规模(8~128),评估对预测精度的影响
实验 3	评价时空聚类 MSTANet 性能	比较有无聚类的 MSTANet 模型相较于 ANN、RNN、LSTM、GRU 等经典模型的预测表现
实验 4	探析时空聚类提升性能机制	分析聚类的作用路径,可视化有无时空聚类的 MSTANet 模型在特定站点与极端水位条件下的表现

2.3 评估指标

本文采用 4 种常用的统计指标对模型预测效果进行定量评估,包括纳什效率系数(NSE)、平均绝对误差(MAE)、均方根误差(RMSE)以及对称平均绝对百分比误差(SMAPE)。NSE 用于衡量模型拟合优度,MAE 和 RMSE 反映预测误差的绝对大小,SMAPE 适用于评估相对误差,特别是在数据尺度变化较大的情况下,能够提供稳定的误差衡量。通常当 MAE、RMSE 和 SMAPE 趋于 0,NSE 趋近 1,表明模型达到了理想的拟合效果。

2.4 结果与分析

2.4.1 聚类结果分析

基于实验 1,采用基于 DTW 算法的时空聚类方法,分别对 28 个站点(为表征下游潮汐边界影响,将吴淞口水位序列作为参考序列纳入空间聚类)以及各月份水位时间序列进行聚类分析,得到空间与时间聚类结果(图 4)。通过调整聚类树的截断高度,可以获得不同层级的分类结果。例如,当截断线位于图 4(a)中黑色虚线所示位置时,将在空间上对 28 条水位序列划分为两类:A1、A2、A5、A6、A7、A8、A9、A14、A15 和 W 站点水位序列为第一类,其余序列为第二类。第一类主要由不受闸门约束、以自然涨落为主的泵闸外江水位序列组成,受潮汐影响程度远高于其他序列;从空间分布看,A9 与 A15 紧邻黄浦江,在潮汐上溯过程中较 A6、A7、A8、A14 以及 A1、A2、A5 更早受到潮汐顶托作用影响,且受影响程度更强,因此表现出相似的水位特征;进一步提高分类分辨率,第一类可继续划分为 5 个子类,分别为 W、A9、A15、A6、A7、A8、A14、A1、A2、A5,上述子类在空间位置上呈现出由下游向上游递进的分布特征,反映出潮汐扰动的沿程变化。此外,同一个泵闸站点闸内外水位序列相似距离很远,说明泵闸调度等人为扰动显著改变了内外江的水位特征。由图 4(b)可知,7 月、8 月、9 月和 10 月划分为同一类,表明汛期及汛后初期水位过程可能受到暴雨、台风、外江潮汐及泵闸调度等因素共同影响,水位特征区别于其他月份。

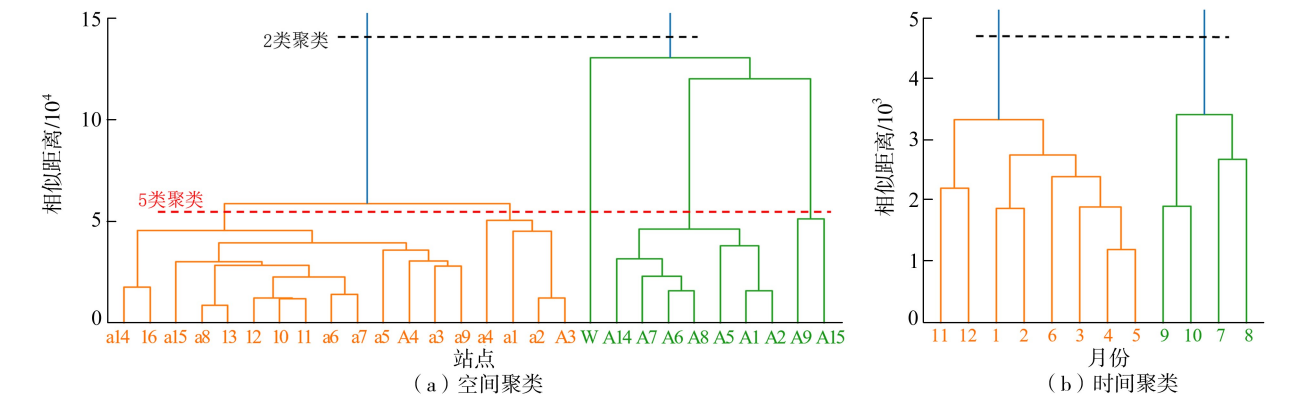


图 4 聚类结果

Fig.4 Clustering results

对于流域多站点水位预测,聚类数越少,同一个类内各站点的水位特征差异越大,越不利于模型捕获输入、输出间关系;但是聚类数越多,计算成本越高。例如,当空间聚类数分为 6 个类时,A15 和 A9 被进一步分为仅由一个水位站点组成的类。因此,权衡性能和计算成本,最后的聚类结果见表 2。

2.4.2 最佳时空聚类数目

为探究时空聚类数对预测精度的影响,基于实验 2,测试神经元个数(代表模型的复杂性)和时空聚类个

数的各种组合在测试集上的平均预测精度。由图 5 可知,GRU 单元个数较少(如 8 个)会导致预测的 NSE 降低,随着 GRU 单元个数增多,NSE 呈现增长的趋势,表明增加模型的复杂性可以在一定程度上提高预测精度。

表 2 时空聚类结果

Table 2 Spatiotemporal clustering results	
序号	站点/月份
空间聚类 1	a3、A4、a5、a6、a7、a8、a9、10、11、12、13、a14、a15、16
空间聚类 2	a1、a2、A3、a4
空间聚类 3	A1、A2、A5、A6、A7、A8、A14
空间聚类 4	A9、A15
时间聚类 I	1、2、3、4、5、6、11、12
时间聚类 II	7、8、9、10

由图 5(a)可知,GRU 单元个数较少(如 8~32 个)时,随着聚类个数的增多,整体上 NSE 显著提升,这是因为增加空间聚类个数可以将数据划分为更多相对简单的子集从而简化模型的学习任务,使模型能够更有效地捕捉数据中的模式和空间特征,从而提高精度。由图 5(b)可知,适当的时间聚类(如 2~4 个)能显著提升模型的 NSE;当聚类数达到 6 个及以上时,模型的 NSE 开始下降,特别是在 GRU 单元个数较少时,这种下降更明显。随着时间聚类个数增多,各聚类内样本量随之缩减,数据稀疏程度进一步加剧。同时,时间聚类会将全年时序数据切分为多组子集,易把具备相同时序特征的样本拆分至不同聚类中,破坏数据固有的季节性与周期性规律。聚类个数增多后,模型需拟合更多复杂时序模式;若 GRU 单元个数偏少,模型表征容量不足,难以充分学习与提取此类复杂时序特征。因此,综合考虑性能与计算成本,后续实验选择将 27 个站点的水位时间序列聚类为空间上 4 类和时间上 2 类。

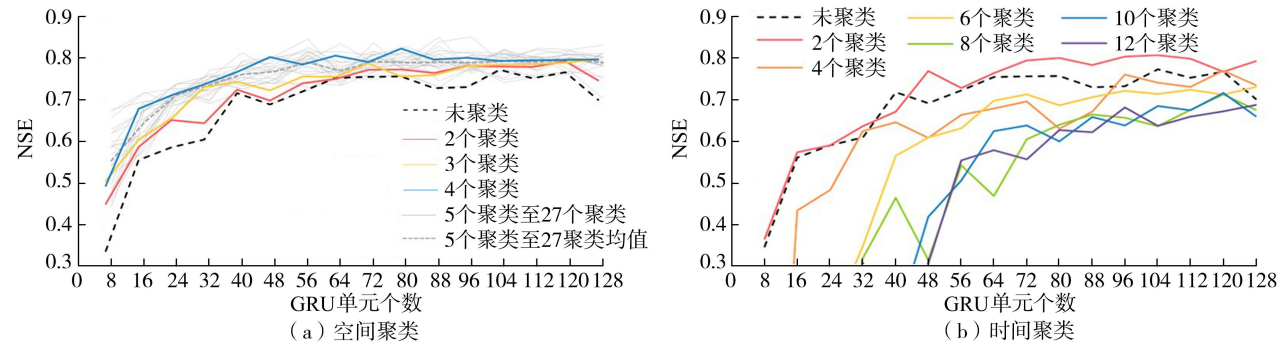


图 5 聚类数与神经元数对 NSE 的影响

Fig. 5 Effect of cluster number and neuron number on NSE

2.4.3 模型性能对比评估

为评估时空聚类 MSTANet 模型在复杂水文条件下的预测性能,基于实验 3,得到该模型与各基准模型在测试集上的整体平均预测精度。由表 3 可知,GRU 等改进循环网络模型明显优于 RNN,表明门控机制在处理时间序列数据时具有一定的优势,避免了循环网络算法存在的长期依赖问题。整体性能排序由优至差依次为时空聚类 MSTANet、MSTANet、GRU、LSTM、RNN、ANN。时空聚类 MSTANet 在所有评价指标上均显著优于其他基准模型,NSE 突破 0.94(较基准 MSTANet 模型提高了 0.022),RMSE 降低至 0.052 m(较基准 MSTANet 相对降幅约 21%),SMAPE 与 MAE 分别较 MSTANet 基准模型减少 19.6%和 20%,验证了时空聚

表 3 各模型在测试集上的预测精度

Table 3 Prediction accuracy of each model on test set				
模型	NSE	RMSE/m	SMAPE/%	MAE/m
ANN	0.775	0.131	4.325	0.098
RNN	0.850	0.092	2.912	0.066
LSTM	0.883	0.082	2.543	0.057
GRU	0.883	0.081	2.504	0.056
MSTANet	0.925	0.066	2.001	0.045
时空聚类 MSTANet	0.947	0.052	1.609	0.036

类机制的有效性。此外,MSTANet 模型在性能上也要优于其他基准模型,尤其是 MAE 指标仅为 0.045 m,表明其相较于传统预测模型(如 ANN、LSTM、GRU 等),在感潮河网水位流域整体预测精度上具有显著优势。

由图 6 可知,内江各站点(空间聚类 1、2)的水位预测精度整体低于外江站点(空间聚类 3、4),主要是因为内江水位序列除受天文潮汐驱动外,还叠加多支流汇流、人工泵闸群调度等多重扰动因素,水文过程更为复杂,建模难度显著提升。相较于 ANN 等传统基础预测模型,MSTANet 整体预测性能更优,说明其更适配感潮河网多站点水位预报场景。引入时空聚类后的 MSTANet 在绝大多数站点上实现最优预测效果,在内江区域(即空间聚类 1)的提升效果尤为显著,例如 a9 站点的 NSE 提升超过 0.2,充分验证时空聚类机制能够有效强化模型对复杂水文演变规律的拟合能力。

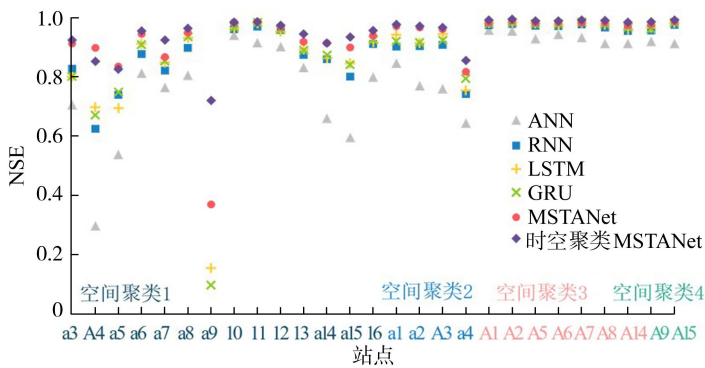


图 6 各模型在测试集上不同站点的 NSE

Fig. 6 NSE of each model at different stations on test set

综上,MSTANet 模型融合潮汐扰动、邻近站点水文顶托以及泵闸调度规则等关键控制要素,使得模型在整体以及各站点的预测能力均优于传统模型。尤其是结合时空聚类策略后,进一步提升了全流域的预测准确性和稳定性,有效缓解了在进行流域整体建模时,高密度河网中不同区域站点的水位驱动因子与波动特征因地形、水系连通等因素,所带来的局部站点预测性能下降的问题^[19-20]。

2.4.4 时空聚类作用机制

实验 4 进一步分析聚类在提升流域建模精度的作用路径。图 7(a)为 MSTANet、时空聚类 MSTANet 在虹口闸内江水位(a1 站点)部分测试集(2021 年 2 月 2 日 11 时 10 分至 2021 年 2 月 3 日 18 时)的预测结果。整体来看,内江水位变化虽与外江(即吴淞口)潮位高度相关,但受泵闸调控影响,水位在周期性波动的同时也出现短时突变波动,对模型拟合能力提出较高要求。时空聚类 MSTANet 预测值与观测值趋势高度一致,明显优于 MSTANet。MSTANet 虽能跟踪整体趋势,但在波峰与波谷尤其是泵闸启闭前后局部细节上误差较大(如图 7(a)中的红色与紫色圆圈所示)。需要注意的是,在泵闸开启期间,MSTANet、时空聚类 MSTANet 均能有效预测水位走势,而在泵闸关闭期间误差较大,这是因为泵闸开启时,内江水系与外江水系连通,外江水位对内江影响增强,此时外江站点水位信息为模型提供了更具价值的输入,短暂提高了模型的性能。然而,泵闸关闭后,内江变为相对独立的系统,由于 MSTANet 仍然依赖外江站点数据作为输入,导致输入特征中包含的噪声增加,进而影响了预测精度。时空聚类可以精简输入特征,使子模型更专注于学习局部水系动

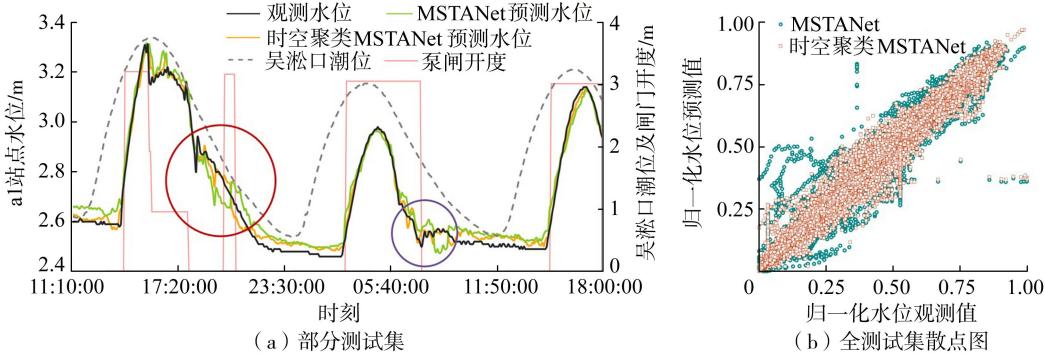


图 7 a1 站点 MSTANet、时空聚类 MSTANet 在测试集的预测结果

Fig. 7 Prediction results of MSTANet and spatiotemporal clustering MSTANet at station a1 on test set

态,提升了对调控响应的精度和适应性。

图 7(b)归一化的水位预测值与观测值散点图可以定量对比评估 MSTANet、时空聚类 MSTANet 在测试集上的预测性能,结果表明,在小于 0.25 和大于 0.75 的极端水位区间,两种模型预测值均存在一定程度的发散,但未聚类模型的偏差更加显著,说明该模型在极端条件下的预测稳定性较低。这一发散现象主要由于数据分布的不均衡,极端水位样本较少尤其在极端高水位区间(仅占 3%数据量),数据驱动模型难以充分学习极端水位过程中的关键特征及驱动因素,进而放大了模型预测的误差;同时,由于极端水位条件下流域水力特性非线性增强,水位变化对驱动因素(如潮汐、降雨、泵闸调度)更为敏感。MSTANet 采用统一的参数配置,难以精确学习局部水位对驱动因子的不同响应,因此预测误差较大。对于神经网络模型,参数总数通常用来衡量模型复杂度和表达能力^[28],但过多的参数可能导致过拟合。相对而言,经过时空聚类将流域划分为多个子流域后,聚类模型参数配置更灵活(表 4),有助于提升泛化能力,降低过拟合风险。

综上,时空聚类基于水位时间序列的相似性,优化了输入特征和模型复杂度,实现了对不同水系特征的自适应建模,显著提升了复杂和极端条件下的预测能力,尤其是在极端水位条件与人为强扰动情况下,这一特性对于感潮河网的水位预报和调控决策具有重要的应用价值。

3 结 语

本文构建的 MSTANet 模型及基于时空聚类的流域水位建模方法能够准确地预测感潮河网水位变化过程。流域水位平均纳什效率系数(NSE)达 0.947,高于传统 GRU 模型的 0.883;特别是受水闸启闭和泵站调度影响较强的典型站点,模型仍保持较高预测精度。上述结果表明,面向感潮河网水位受潮汐、径流和工程调控共同影响的特点,本文构建的多尺度时空建模框架能够有效提升复杂扰动条件下河网水位预测的精度与稳定性。

时空聚类结果表明,感潮河网内部不同区域的水位响应并非完全一致,呈现出可识别的空间分区特征。基于该特征进行分区建模,在保持流域整体建模效率的同时,缓解了统一建模造成的局部站点预测性能下降问题,也避免了逐站建模带来的高计算成本与模型冗余。本文方法在上海蕴南水利控制片河网水位预报中得到成功应用,表明其具备一定的工程适用性。后续研究可进一步从多源数据融合、自适应聚类优化、物理约束融合、极端水位建模与提升计算效率等方面拓展方法的实用性与智能化水平。

参考文献:

[1] Savenije H H G. Prediction in ungauged estuaries: an integrated theory[J]. Water Resources Research, 2015, 51(4): 2464-2476.

[2] Tao Hai, Al-Bedry N K, Khedher K M, et al. River water level prediction in coastal catchment using hybridized relevance vector machine model with improved grasshopper optimization[J]. Journal of Hydrology, 2021, 598: 126477.

[3] Talke S A, Jay D A. Changing tides: the role of natural and anthropogenic factors[J]. Annual Review of Marine Science, 2020, 12(1): 121-151.

[4] Luo Xiaoya, Zhang Wei, Chen Shijia, et al. Evolution of reversal of the lowest low waters in a tidal river network[J]. Journal of Hydrology, 2020, 585: 124701.

[5] 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))

[6] 袁赛瑜, 陈逸鸿, 罗霄, 等. 知识数据双驱动的感潮河网水力智能模拟方法[J]. 水科学进展, 2025, 36(1): 28-38. (Yuan Saiyu, Chen Yihong, Luo Xiao, et al. Knowledge-and data-driven intelligent simulation method for tidal river network hydrodynamics[J]. Advances in Water Science, 2025, 36(1): 28-38. (in Chinese))

[7] Zhang Wei,Feng Haochuan,Hoitink A J F,et al. Tidal impacts on the subtidal flow division at the main bifurcation in the Yangtze River Delta[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science,2017,196:301-314.

[8] Devia G K,Ganasri B P,Dwarakish G S. A review on hydrological models[J]. Aquatic Procedia,2015,4:1001-1007.

[9] Mihel A M,Lerga J,Krvavica N. Estimating water levels and discharges in tidal rivers and estuaries;review of machine learning approaches[J]. Environmental Modelling & Software,2024,176:106033.

[10] Bowes B D,Sadler J M,Morsy M M,et al. Forecasting groundwater table in a flood prone coastal city with long short-term memory and recurrent neural networks[J]. Water,2019,11(5):1098.

[11] 梁晨. 基于长短时记忆网络的洞庭湖水位预测以及三峡工程对洞庭湖水位的影响研究[D]. 武汉:武汉大学,2019.

[12] 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))

[13] Pan Mingyang,Zhou Hainan,Cao Jiayi,et al. Water level prediction model based on GRU and CNN[J]. IEEE Access,2020,8:60090-60100.

[14] Luo Xiao,Yuan Saiyu,Tang Hongwu,et al. Enhanced physics-informed neural networks for efficient modelling of hydrodynamics in river networks[J]. Hydrological Processes,2024,38(4):e15143.

[15] Zhou Lanting, Long Guanlin, Hu Cancan, et al. Reservoir water level prediction using combined CEEMDAN-FE and RUN-SVM-RBFNN machine learning algorithms[J]. Water Science and Engineering,2025,18(2):177-186.

[16] 朱晓琳,李一平,许益新,等. 时间尺度对平原感潮河网水动力水质模拟精度的影响[J]. 水资源保护,2020,36(3):67-75. (Zhu Xiaolin,Li Yiping,Xu Yixin,et al. Effects of time scale on simulation accuracy of hydrodynamic water quality of plain tidal river network[J]. Water Resources Protection,2020,36(3):67-75. (in Chinese))

[17] Pawlowicz R,Beardsley B,Lentz S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE[J]. Computers & Geosciences,2002,28(8):929-937.

[18] 张小琴,包为民. 感潮河段水位预报方法浅析[J]. 水电能源科学,2009,27(3):8-10. (Zhang Xiaoqin,Bao Weimin. Brief review on water level forecasting for tidal river[J]. Water Resources and Power,2009,27(3):8-10. (in Chinese))

[19] Kratzert F,Klotz D,Shalev G,et al. Towards learning universal, regional, and local hydrological behaviors via machine learning applied to large-sample datasets[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2019,23(12):5089-5110.

[20] Beven K. Deep learning,hydrological processes and the uniqueness of place[J]. Hydrological Processes,2020,34(16):3608-3613.

[21] Salvador S,Chan P. Toward accurate dynamic time warping in linear time and space[J]. Intelligent Data Analysis,2007,11(5):561-580.

[22] Izakian H,Pedrycz W,Jamal I. Fuzzy clustering of time series data using dynamic time warping distance[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence,2015,39:235-244.

[23] Kashem A,Das P,Hasan M M,et al. Hybrid deep learning models for multi-ahead river water level forecasting[J]. Earth Science Informatics,2024,17(4):3021-3037.

[24] 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))

[25] He Kaiming,Zhang Xiangyu,Ren Shaoqing,et al. Deep residual learning for image recognition[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Las Vegas:IEEE,2016:770-778.

[26] Vaswani A,Shazeer N,Parmer N,et al. Attention is all you need[C]//Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems. Long Beach:Curran Associates Inc.,2017:6000-6010.

[27] Chen Yongping,Gan Min,Pan Shunqi,et al. Application of auto-regressive (AR) analysis to improve short-term prediction of water levels in the Yangtze estuary[J]. Journal of Hydrology,2020,590:125386.

[28] Moosavi V,Gheisoori Fard Z,Vafakhah M. Which one is more important in daily runoff forecasting using data driven models;input data,model type,preprocessing or data length? [J]. Journal of Hydrology,2022,606:127429.

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.04.011

考虑物理约束的多要素洪水模拟 LSTM 模型

何 畅¹, 李致家¹, 牛颢然¹, 梁世强², 李京兵³

(1. 河海大学水文与水资源学院; 2. 北京市水文总站; 3. 安徽省水文局)

摘要: 针对用数据驱动模型替代传统水动力模型实现快速预报时存在模拟结果单一与缺乏可解释性的问题, 基于多任务学习框架, 构建了一种用于多要素联合模拟的 LSTM 模型, 并将要素间的拟合物理关系作为约束项加入损失函数; 结合随机森林、斯皮尔曼秩相关系数法与 PCA 主成分分析法的特征综合评价结果, 进一步探讨了模型可解释性的问题。基于二维水动力数值模型对屯溪区 17 场洪水过程模拟结果的数据库, 分别训练考虑物理约束前后的 LSTM 模型, 结果表明: 考虑物理约束后 LSTM 模型运算速度并未显著降低, 能够在 1 s 内实现多要素的模拟; 对于多场洪水的整体模拟, 考虑物理约束的 LSTM 模型效果更优, 水位、流量、流速和淹没面积的模拟精度分别提升了 20.38%、17.03%、4.02%、14.07%; 考虑物理约束的 LSTM 模型对小洪水的捕捉能力更强; 对常规洪水的模拟精度较高, 但在极端复杂情况下性能仍需提升。

关键词: 城市洪水; 多要素洪水模拟; 二维水动力模型; 物理约束; LSTM 模型

An LSTM model considering physical constraints for multi-factor flood simulation

He Chang¹, Li Zhijia¹, Niu Haoran¹, Liang Shiqiang², Li Jingbing³

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University; 2. Beijing Hydrological Station;
3. Anhui Provincial Hydrological Bureau)

Abstract: In response to the issues of single simulation results and lack of interpretability when using data-driven models to replace traditional hydrodynamic models for rapid forecasting, an LSTM model for joint simulation of multiple factors was constructed based on a multi-task learning framework, and the fitted physical relationships among factors were incorporated into the loss function as constraint terms. Furthermore, the interpretability of the model was explored by combining the comprehensive feature evaluation results of random forest, Spearman rank correlation coefficient method, and principal component analysis (PCA). Based on a database of simulation results of 17 flood events in Tunxi District by a two-dimensional hydrodynamic numerical model, the LSTM models with and without physical constraints were trained, respectively. The results indicate that the computational speed of the LSTM model with physical constraints does not decrease significantly, which can realize multi-factor simulation within 1 s. For the overall simulation of multiple flood events, the LSTM model with physical constraints performs better, and the simulation accuracies of water level, discharge, flow velocity, and inundation area are improved by 20.38%, 17.03%, 4.02%, and 14.07%, respectively. The LSTM model with physical constraints demonstrates a stronger capability in capturing small floods and higher accuracy in simulating regular floods, but its performance still needs to be improved under extremely complex conditions.

Key words: urban flood; multi-factor flood simulation; two-dimensional hydrodynamic model; physical constraint; LSTM model

受全球气候变化影响, 近年来我国极端强降水事件频发, 气候风险指数呈升高趋势^[1]。与此同时, 随着京津冀、长三角、粤港澳、成渝、长江中游等城市群的不断发展, 我国城镇化率快速提升, 对城市防洪排涝体系建设提出了更高要求。2021 年, 郑州市遭遇历史罕见“7·20”特大暴雨; 2023 年 7 月底至 8 月初, 受台风“杜苏芮”影响, 京津冀等地遭遇严重洪涝灾害, 均凸显了极端天气事件对城市安全构成的重大威胁, 也进一步强调了加强城市防洪排涝能力建设的紧迫性。提升城市洪水预报技术不仅关乎城市防洪排涝系统的完善, 更是有效精准防控城市极端暴雨洪水、实现高质量发展和高水平安全良性互动的重要基石和必要保障^[2]。

随着数值模拟技术的发展, 一二维水动力耦合模型因能准确反映建筑物周围的积水情况以及水流绕过

基金项目: 国家自然科学基金项目(52079035); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(B240203007); 安徽省自然科学基金重点项目(2208085US06)

作者简介: 何畅(2001—), 女, 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: 15110551182@163.com

通信作者: 李致家(1962—), 男, 教授, 博士, 主要从事水文模型与水文预报研究。E-mail: zjli@hhu.edu.cn

建筑物的具体路径,在城市洪水预报中得到了广泛应用。众多研究表明,一二维耦合的水动力模型在提高洪灾预警的准确性方面具有显著优势^[3-6],但其伴随的更精细的网格划分与更为频繁的数据交互无疑给模型的计算带来了更大的负担,即使借助 GPU 的并行计算架构,对一场降雨事件的完整模拟仍需耗费数小时,这一时间成本对于防洪预报的时效性要求构成了严峻挑战。

随着多学科交叉研究的深入,研究焦点逐渐转向构建具有强大数据分析能力的人工智能替代模型,以提升洪水模拟的速度。但受限于洪泛区内匮乏的逐时段实测数据,替代模型通常需要依赖水动力模型的模拟结果,通过学习其输入与输出数据间的关系^[7],实现快速预报。在众多机器学习模型中,卷积神经网络(CNN)^[8]虽在图像等二维结构数据处理上表现出色,却难以捕捉洪水数据这类序列中的长期依赖关系,且对输入数据位置变化敏感;生成对抗网络(GAN)^[9]训练过程不稳定,易出现模式崩溃等问题,在洪水模拟所需的精准数据生成上存在挑战。长短期记忆神经网络(LSTM)相关研究论文的引用量曾登顶 20 世纪人工智能领域高被引论文的榜首^[10],又因其擅长处理时序数据中的长期依赖关系而被广泛应用于水文预报领域^[11-12],能有效克服其他模型在洪水模拟数据处理时面临的困境,成为洪水模拟研究中的有力工具。

值得注意的是,多数深度学习模型以数据拟合精度为核心优化目标,常忽略水文水力学基本规律,因此主动引入物理约束十分必要。对此,Yang 等^[13]基于水动力模型生成的城市洪水淹没数据,以及水文站实时水位数据构建的初始条件,开发了一个深度学习模型,该模型能充分考虑洪水淹没的物理机制与输入、输出特征属性,具有较高的鲁棒性。然而,现有的相关研究一方面更倾向于模拟单一洪峰,或者模拟淹没水深的时间序列,难以完整地反映实际情况;另一方面,机器学习本质上属于“黑箱”模型,其决策过程难以直观理解,其预测结果也缺乏明确的物理意义和可解释性。有学者尝试通过降阶近似、归因于输入信息、发掘内部特征等方法^[14]分析模型的内部机理以解决这一问题,Kratzert 等^[15-17]少数学者更是将这种思想运用到了洪水预报的算法分析中。至此,机器学习模型开始被视作“灰箱”模型^[18],针对模型可解释性继续开展研究逐渐成为提高其普适性与接受度的重要方向。

基于上述现状,为尽可能在提升计算效率与维持模型可信度之间寻求平衡,本文仅针对水文—二维水动力耦合模型中,对城市复杂地形洪水的模拟效用更好,但计算更缓慢的二维水动力模块^[19-20]搭建 LSTM 替代模型,以各要素之间存在的客观物理联系作为反向约束嵌入模型,使得模拟结果不仅符合数据拟合的要求,还遵循物理规律。

1 模型构建

1.1 二维水动力模型

本文研究采用非结构化网格有限体积法离散二维浅水方程^[21],网格糙率值依据 2015 年中国年度土地覆盖数据集(CLCD)的土地覆盖类型信息,分别赋值为:农田 0.08,森林 0.8,灌木 0.4,草地 0.05,水面 0.025,裸地 0.04,不透水层 0.025。研究聚焦于短期暴雨积水情况,不考虑渗透因素。

在进行离散数值计算时,对于每个控制体 V ,在时间 $[t_n, t_{n+1}]$ 上对浅水方程积分可得:

$$\int_V \left(\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{U})}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}(\mathbf{U})}{\partial y} \right) dV = \int_V \mathbf{S} dV \tag{1}$$

式中: $\mathbf{U}$ 为守恒向量; $\mathbf{F}(\mathbf{U})$ 、 $\mathbf{G}(\mathbf{U})$ 分别为 x 、 y 方向通量向量; $\mathbf{S}$ 为源项向量。

根据高斯散度定理,将通量向量的偏导数转化为控制体积边界上的通量积分,并用 n_x 、 n_y 分别表示单位外法向量的分量,转换关系满足:

$$\int_V \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{U})}{\partial x} dV = \oint_A \mathbf{F}(\mathbf{U}) n_x dA \quad \int_V \frac{\partial \mathbf{G}(\mathbf{U})}{\partial y} dV = \oint_A \mathbf{G}(\mathbf{U}) n_y dA \tag{2}$$

式中: A 为控制体闭合边界。

将式(2)代入式(1),整理得到有限体积法核心离散积分格式:

$$\int_V \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} dV + \oint_A \mathbf{F}(\mathbf{U}) n_x dA + \oint_A \mathbf{G}(\mathbf{U}) n_y dA = \int_V \mathbf{S} dV \tag{3}$$

数值求解时选用 Osher 黎曼近似解^[22]计算跨单元的水量、动量的法向数值通量,并依托通量的坐标旋

转不变性,在每个控制体内,将二维问题转化为一维问题求解。

1.2 多要素模拟的 LSTM 模型构建

1.2.1 模型及参数设定

LSTM 作为一种由循环神经网络发展而来的具备特殊门结构的模型,较循环神经网络(RNN)能更好地处理序列数据中的长期依赖关系。多任务学习(multi-task learning)^[23]旨在同时学习多个相关任务,通过利用任务间的共享信息来提高模型的泛化能力与学习效率。在水文要素的模拟中,搭建多任务学习框架有助于挖掘各个物理量间的内在联系,进而避免单独学习导致的信息孤立问题。

用 LSTM 模型基于多任务学习框架,实现多目标协同模拟之前,需要按时间序列组织数据,形成多个任务的输入输出数据。输入数据首先进入 LSTM 层实现共享特征提取,同时转换为一种隐藏状态。这个隐藏状态包含了时间序列中的趋势、周期性等关键信息,并将相关的特征向量进行融合。然后为每个模拟任务设置独立的输出层,以便隐藏状态映射到对应的模拟空间。此外,多任务学习的 LSTM 模型还可以为每个任务定义损失函数,并采用加权相加的方式将其组合。不同的权重能平衡各子任务的重要性,以实现不同的研究目标^[24]。

在为搭建好的 LSTM 模型选取特征(输入)与目标(输出)时,需要密切考虑二维水动力模型的运作机理。因此,将暴雨洪水过程的强相关数据选为特征,将二维水动力模型模拟得到的水位(Z)、流量(Q)、流速(v)与淹没面积(A_s)时间序列作为目标要素。本文研究编程环境为 Python 3.10.13,采用 TensorFlow 2.10.0 深度学习框架搭建模型。硬件方面配备 NVIDIA GeForce MX250 GPU,内存为 8GB,为模型训练与运算提供支持。

超参数的取值会直接影响 LSTM 洪水预报模型拟合(模拟)与预测的性能。在已有的工程实践中,多采用从具体问题中总结的经验调参。本文选用试算法来确定最优的超参数组合,得到的结果为:隐藏层数量 2,隐藏单元数 63,学习率 0.001,批次大小 32,训练轮数 100,滑动窗口 20,激活函数 Sigmoid,优化器 Adam。其中,隐藏层数量与隐藏单元数决定模型的学习能力,结合研究区域小尺度洪水模拟的特点及试算结果,学习率设为 0.001 恰好使得当前数据条件下的模型稳定收敛;训练轮数取值 100 能够确保模型充分学习数据特征。当验证集损失连续 10 个训练周期未下降时,早停函数被启用,训练提前终止,避免模型过拟合的同时降低计算成本。

1.2.2 考虑物理约束的 LSTM 模型

运用 LSTM 模型实现多目标模拟时,若仅孤立地考量每一项要素的拟合效果往往过于片面。事实上,各模拟要素之间普遍存在物理相关关系,这种内在联系在提升模拟精度和增强模型可解释性方面具有不可忽视的重要意义,将其作为约束条件引入模型中,本质上是为模型提供了关于问题的先验知识,有助于模型更合理地学习和模拟。

本文依据训练集上断面水位、流量、淹没面积的二维模拟结果,绘制水位-流量过程线与水位-淹没面积关系曲线,并拟合得出相应的物理关系 $y_1=f(x)$ 、 $y_2=g(x)$ 。在 LSTM 洪水预报模型训练过程中,通常以最小化损失函数为目标进行优化,直至模型在训练集样本上的输出与对应真实值的偏差最小^[25]。鉴于模拟要素间物理关系对提升模型性能的重要性,将上述拟合关系作为约束条件引入损失函数,即在原有的均方误差(MSE)基础上添加一个惩罚项。由此新的损失函数可以定义为:

$$L = E_{\text{MS}} + \lambda_1 (y_1 - \hat{y}_1)^2 + \lambda_2 (y_2 - \hat{y}_2)^2 \tag{4}$$

式中: L 为损失函数; E_{MS} 为 MSE; y_1 、 y_2 为流量和淹没面积的理论真实值; $\hat{y}_1$ 、 $\hat{y}_2$ 为训练集上的预测值; λ_1 、 λ_2 为表征权重的系数,用于平衡数据拟合损失和物理关系约束的损失。当 λ_1 、 λ_2 较大时,模型会更加注重满足物理关系;当 λ_1 、 λ_2 较小时,模型更侧重于数据拟合。

在参数选择方面,考虑物理约束的 LSTM 模型(以下简称“改进的 LSTM 模型”)沿用约束前 LSTM 模型的超参数组合,以便于更直观地呈现物理约束这一变量对模拟结果的作用。对 λ 的取值,通过量级敏感性分析发现,当 λ_1 、 λ_2 取 10^{-7} 时,物理约束项 $(y_1 - \hat{y}_1)^2$ 、 $(y_2 - \hat{y}_2)^2$ 的梯度贡献量级与原始 MSE 损失项达到动态平衡。具体而言,由于物理关系约束项本身具有强非线性特征(如水位-流量函数的梯度可达 10^4 量级),当 $\lambda > 10^{-5}$ 时,约束项主导梯度更新方向,导致模型陷入局部最优而丧失数据驱动优势;反之,当 $\lambda = 10^{-7}$ 时,约束项在反向传播中的有效梯度权重被控制在 MSE 梯度的 1%~5% 范围内,既能在参数空间中引导物理一

致性,又保留了 LSTM 模型对复杂水文响应的学习能力。这种弱约束机制与自适应正则化思想相契合,其有效性通过决定系数提升超过 20%得以验证,表明在保持数据驱动优势的同时,精微的物理导向能提升模型预测能力。

另外,在现有模型的基础上,增加随机森林(RF)算法^[26]来评价特征的重要性。对于流量边界、水位边界、降水量等输入特征,其对目标变量预测结果的影响主要依据 RF 算法中每棵决策树在节点分裂时对不同特征的利用情况,以及该特征对提升最终模拟结果准确性的实际贡献来综合衡量。

为提升特征评价结果的可信度,降低使用单一评价方法的局限性,进一步引入斯皮尔曼秩相关系数法^[27]与 PCA 主成分分析法^[28],综合评价特征的重要性。

1.3 评价指标

为验证基于 LSTM 模型的城市暴雨洪水模拟结果的准确性,采用平均绝对误差(MAE)、均方根误差(RMSE)和决定系数(R^2)作为统一的评价指标。MAE 与 RMSE 的值越小,说明模型的模拟值与真实值越接近,模型的性能就越好。当 R^2 越接近 1 时,模型对因变量变异的解释程度越高。

在评估模型的整体精度时,主要依据熵权法^[29]将 RMSE 和 R^2 的权重均设为 0.4,MAE 的权重设为 0.3。这一权重分配方案基于数据本身离散程度,同时旨在突出 RMSE 对极端误差的敏感性以及 R^2 对数据拟合的解释能力,兼顾 MAE 所反映的平均误差情况。再对单一指标的精度提升率做加权平均,即可得到能够综合反映模型精度变化的百分比。这种方法能够有效整合不同指标的信息,为评估模型在洪水模拟中的性能改进提供一个全面且量化的依据。

2 实例验证

2.1 研究区域与数据

屯溪区地处皖南山区边缘、位于屯溪流域下游,是安徽省黄山市的中心城区,总面积 191 km²。该区属亚热带季风气候,雨量丰沛,年降水量约 1670 mm。区内河流总长度 126.16 km,分布密度为 0.8 km/km²。河网水系复杂,横江、率水分别由西北、西南入境,受益地地势影响,由四周丘陵向盆谷平原汇集,于镇海桥下汇合为新安江,途中佩琅河汇入,最终在王村出境。

二维模型以占地面积约 20 km² 的屯溪区沿河部分城区(图 1)为建模范围,计算域边界选取基于实际地形高点或密集建筑群等城市不透水边界。此类条件下,边界外降雨形成的地表径流因地形阻隔无法直接进入计算域,地下渗流也因人工构筑物拦截而通量极小,可近似视为“无水量交换”。经 50~100 年一遇的洪水过程粗略模拟,确保拟定边界处未发生水量交换,证实了该方案的可行性。继而将该区域划分成边长为 100 m

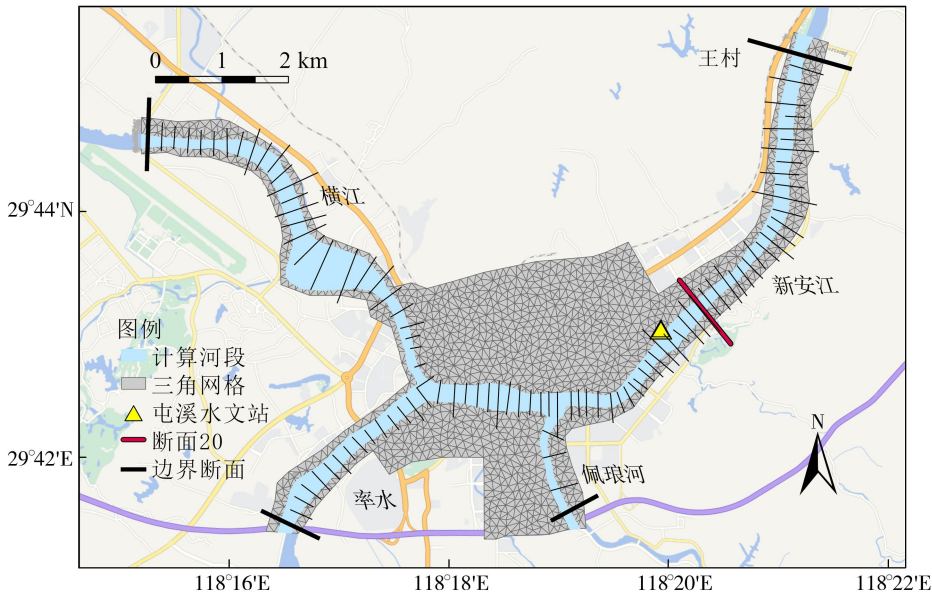


图 1 研究区域示意图

Fig. 1 Schematic diagram of study area

左右的 2 459 个三角网格^[30],鉴于模拟区域面积较小,研究采用屯溪水文站降雨数据作为全区域输入。

为确保所选次洪在洪峰、历时以及峰形分布等方面具备显著代表性,能够涵盖大、中、小不同洪量级,同时囊括陡涨陡落与缓涨缓落、单峰与多峰洪水等多种特性,选择 2008—2020 年共 17 场历史洪水数据开展模拟分析,具体包括横江、率水、佩琅河的上游流量边界、王村水位站的下游水位边界与屯溪水文站的时段降雨过程等。基于屯溪流域站点实测的降雨径流数据,率定栅格新安江模型^[31]参数,再依此确定上边界对应计算网格的流量过程;下边界水位则需在获取流量过程的基础上,根据站点实测的水位-流量(Z - Q)曲线得出。拟选取屯溪城区市政中心处一重要断面(断面 20)作为研究断面,依托二维水动力模型的模拟结果,构建支撑机器学习模型运算的数据集。其中,将 2008—2014 年共 13 场洪水资料作为训练-验证集以训练模型,2015—2020 年的 4 场洪水资料作为测试集以验证模拟结果。

2.2 模型模拟用时比较

对 17 场洪水过程开展水动力模拟,求得其平均耗时为 5 h。利用得到的数据分别训练 LSTM 模型和改进的 LSTM 模型,记录训练阶段与测试阶段的平均运算时长。结果显示,LSTM 模型的平均训练时长为 34.52 s,改进的 LSTM 模型平均训练时长为 38.12 s,运算耗时增加了 3.60 s,归因于考虑物理约束一定程度上增加了模型计算的复杂度。而测试阶段,改进前后的 LSTM 模型平均模拟用时分别为 0.69 s 和 0.73 s,差距微弱,不超过 0.1 s。综上可知,虽然改进的 LSTM 模型较 LSTM 模型在训练集与测试集上的运算耗时均有一定程度的增加,但相较二维水动力模拟以小时为单位的模拟时长,改进的 LSTM 能在 1 s 内完成场次洪水的多要素模拟,结果更全面,也满足了时效性要求。

2.3 模拟效果评价

2.3.1 多场次洪水的整体模拟

图 2 为改进前后 LSTM 模型在训练-验证阶段对水位 Z 、流量 Q 、流速 v 、淹没面积 A 模拟结果的总体误差分布态势(图中 MAE 和 RMSE 采用实测均值进行了无量纲化处理)。LSTM 模型的 MAE 箱体位置较高,中位数约为 0.022 5;而改进的 LSTM 模型 MAE 箱体位置更低,中位数约为 0.016 5,意味着该模型的模拟结果更接近真实值。对 RMSE 指标,LSTM 模型的箱体中位数约为 0.035 5,改进的 LSTM 模型中位数降至 0.027 0,进一步证实了改进的模型具有更高的精度和稳定性。改进的 LSTM 模型 R^2 的中位数约为 0.988,相比 LSTM 模型更接近 1,说明其对数据的拟合效果更佳。综合上述指标来看,改进的 LSTM 模型在性能上优于 LSTM 模型,对 4 个水力要素的综合模拟效果更好。此外,在超参数直接移用的情况下该模型性能仍有提升,这不仅验证了原 LSTM 模型超参数的可行性,还表明考虑物理约束能够有效优化模型性能。

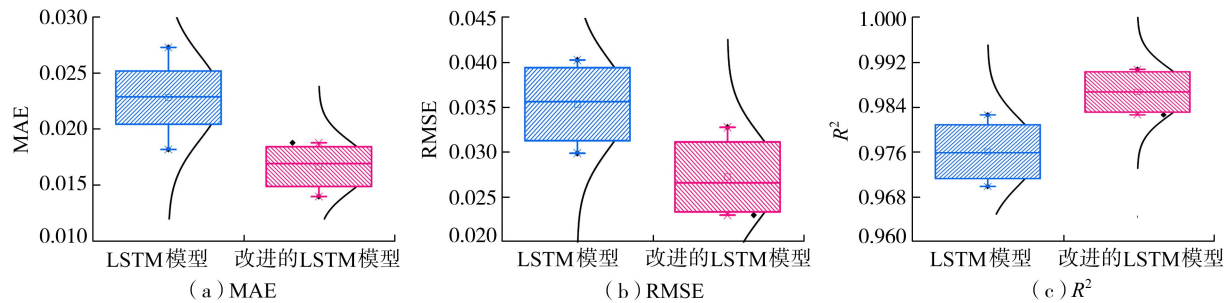


图 2 训练-验证集上两种模型的多要素总体误差分布

Fig. 2 Multi-factor overall error distribution of two models on training and validation sets

在测试集上,两种 LSTM 模型的模拟结果如表 1 所示, R^2 均高于 0.90,最高值达 0.985 3,总体表现良好。具体而言,改进的 LSTM 模型 MAE 均低于 LSTM 模型;纵向来看,对水位、流量和淹没面积的模拟结果,改进的 LSTM 模型具有更低的 RMSE 和更高的 R^2 。由此可得,考虑物理约束后,模型的模拟偏差有所降低,表现明显更优。综合以上指标,易求得水位、流量和淹没面积的模拟精度分别提升了 20.38%、17.03%、14.07%。而对于流速,其模拟精度受模型优化的影响较微弱,仅提升了 4.02%。

2.3.2 典型场次洪水模拟

为探讨模型在场次洪水中的模拟精度,在测试集内选取 3 场典型洪水展开进一步分析。图 3 为二维水动力模型、LSTM 模型与改进的 LSTM 模型对典型场次洪水(2015080908)中各要素的模拟结果。

表 1 两种模型在测试集上的多要素模拟结果评价指标

Table 1 Evaluation indicators of multi-factor simulation results of two models on test set

模拟要素	MAE		RMSE		R^2	
	LSTM 模型	改进的 LSTM 模型	LSTM 模型	改进的 LSTM 模型	LSTM 模型	改进的 LSTM 模型
水位	0.1247	0.0887	0.2585	0.1881	0.9650	0.9849
流量	13.6554	9.3322	182.2208	153.6061	0.9166	0.9453
流速	4.5222	4.0071	0.0527	0.0519	0.9759	0.9759
淹没面积	4.7499	3.6464	56.5735	47.0298	0.9767	0.9853

注:水位、流量、流速、淹没面积的 MAE 和 RMSE 的单位分别为 m、m³/s、m/s、m²。表 2 同。

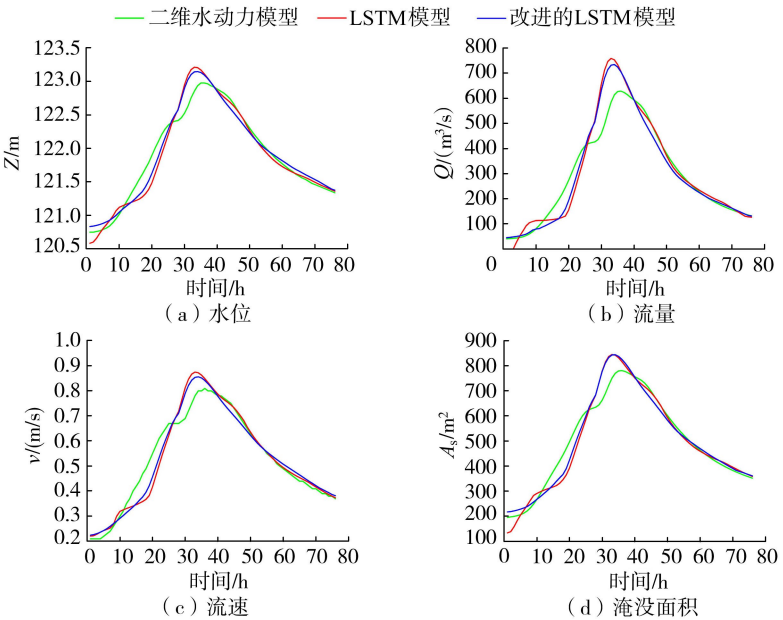


图 3 典型场次洪水要素模拟结果

Fig. 3 Simulation results of factors for typical flood events

由图 3 可见,改进的 LSTM 模型模拟结果与二维水动力模型的模拟值更为接近,特别是在流量变化较大的区域,改进的 LSTM 模型相较 LSTM 模型展现出更优的拟合效果,充分彰显了物理约束在较小量级、较长历时洪水过程模拟中的显著优势。分析表 1 数据可知,在考虑物理约束后,模拟结果的 MAE、RMSE 降低而 R^2 升高,各要素的模拟精度平均提升了 25.29%,与图 3 所示情况吻合。改进的模型在低流量条件下有更高的精度和稳定性。

不难看出,对同一场洪水而言,模型对不同要素的模拟效果往往呈现出十分近似的规律,图 4 给出了另两场典型洪水中更具代表性的水位模拟结果。

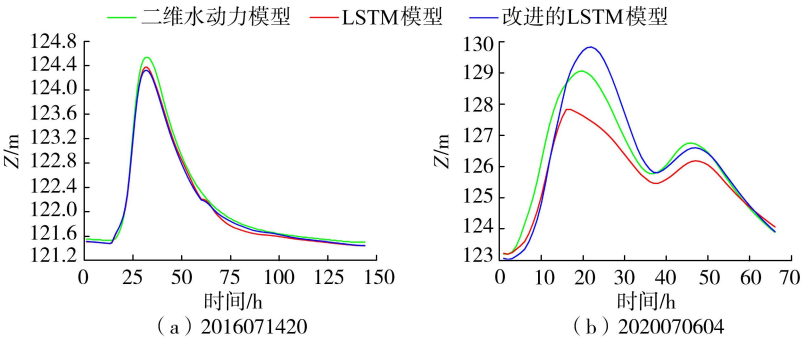


图 4 典型场次洪水的水位模拟结果

Fig. 4 Water level simulation results for typical flood events

2016071420 是陡涨陡落的尖瘦型洪水,具有一定的代表性和发生频率。水位模拟结果(表 2)显示,相较 LSTM 模型,改进的 LSTM 模型的拟合偏差更大。但不可忽视的是,即使改进的 LSTM 模型的模拟精度普

遍低于 LSTM 模型,其整体的拟合情况仍十分理想。结合 4 个要素的模拟结果评价指标发现, R^2 的最小值高于 0.98,最大值更是达到 0.9957,改进前后模型的模拟精度均处于较高水平。这是由于在当前的模型体系与数据条件下,模型自身已具备较强的模拟能力,物理约束的作用虽然存在,但相较于其他影响因素,其对模拟精度提升的边际效应已被削弱。

表 2 典型场次洪水两种模型模拟结果的评价指标

Table 2 Evaluation indicators of simulation results of two models for typical flood events							
洪号	模拟要素	MAE		RMSE		R^2	
		LSTM 模型	改进的 LSTM 模型	LSTM 模型	改进的 LSTM 模型	LSTM 模型	改进的 LSTM 模型
2015080908	水位	0.0962	0.0905	0.1740	0.1425	0.9433	0.9571
	流量	58.4749	13.2766	66.1791	56.7884	0.9061	0.9259
	流速	6.7443	6.5314	0.0515	0.0424	0.9293	0.9481
	淹没面积	7.7682	6.0935	46.5370	41.0116	0.9422	0.9516
2016071420	水位	0.0639	0.0587	0.0898	0.0954	0.9889	0.9867
	流量	5.9100	9.4056	21.7861	32.5906	0.9957	0.9901
	流速	2.5114	3.1429	0.0149	0.0221	0.9953	0.9893
	淹没面积	2.7993	3.8836	19.0180	23.9742	0.9928	0.9885
2020070604	水位	0.4487	0.3329	0.7113	0.5951	0.6820	0.9060
	流量	20.9793	19.0474	626.1127	575.4035	0.4178	0.5930
	流速	5.6620	8.5339	0.1051	0.1694	0.8483	0.8413
	淹没面积	6.9813	5.8038	139.1499	123.3115	0.8574	0.9272

对于 2020070604 号大型洪水,改进的 LSTM 模型较 LSTM 模型的拟合程度在水位变化较大的区域有明显提高。然而,在流量模拟方面,两个模型对峰值大小与峰现时间的模拟均较差。改进的 LSTM 模型模拟偏差较大,对于 A_s 曲线的拟合情况,该模型表现又更优。结合表 2 可知,虽然整体上改进的 LSTM 模型模拟结果的评价指标优于 LSTM 模型,但仍存在特殊情况。如考虑物理约束后,模拟流速的 MAE、RMSE 反而由 5.6620、0.1051 m/s 增大至 8.5339、0.1694 m/s。究其原因可能是双峰洪水的模拟难度高,而对于一些复杂的物理过程,在为模型增加约束条件后,需要匹配更深层次或更复杂的神经网络结构来捕捉物理规律。本文基于控制变量的原则,改进的 LSTM 模型未对除约束外的模型结构做出相应调整,因此造成模拟精度下降。

2.4 特征重要性分析

为提升模型可解释性并探究各输入变量对研究断面水力参数模拟的影响,本文采用 3 种方法求解特征重要性:RF 算法侧重预测贡献,斯皮尔曼秩相关系数法反映统计关联,PCA 主成分分析法体现整体变异贡献。为避免主观偏差,最终通过等权重运算整合 3 种方法求解结果,得到各输入特征的综合得分。具体而言,即系统评估横江流量边界(Q_1)、率水流量边界(Q_2)、佩琅河流量边界(Q_3)、王村水位边界(Z_1)与屯溪水文站的降水量(P)这 5 个因素对研究断面水位、流量、流速与淹没面积模拟结果的贡献程度,旨在通过综合分析,揭示不同边界条件和降雨过程在研究断面水力特性模拟中的相对重要性。

如表 3 所示,对于 RF 算法求得的特征权重与斯皮尔曼秩相关系数的绝对值,每一项输入特征对不同模拟要素的影响差异微弱,最大浮动不超过 0.01。而针对同一要素,不同输入特征的权重与斯皮尔曼秩相关系数却呈现出显著差异:RF 算法评价结果显示,对所有水力要素, Q_2 的权重均接近 0.98,而 Q_1 、 Q_3 、 Z_1 、 P 的权重均不大于 0.008,其中 P 的权重最低,这表明 Q_2 对下游水力要素的预测影响占绝对主导地位。斯皮尔曼秩相关系数的结果也呈现出相似的规律,所有特征与模拟要素的关联均显著($p=0$),但系数绝对值存在明显差异,按从高到低排序依次为 Q_2 、 Q_1 、 Q_3 、 Z_1 、 P ,流量边界 Q_2 与下游水力要素的单调关联性最强。不过,采

表 3 改进的 LSTM 模型输入特征评估

Table 3 Evaluation of input features for improved LSTM model												
输入特征	特征权重				斯皮尔曼秩相关系数绝对值				PCA 主成分分析			综合得分
	水位	流量	流速	淹没面积	水位	流量	流速	淹没面积	特征值	解释率/%	平均载荷绝对值	
Q_1	0.005	0.006	0.007	0.006	0.966	0.967	0.969	0.966	3.609	72.16	0.959	0.644
Q_2	0.983	0.987	0.979	0.983	0.975	0.976	0.976	0.975	0.954	19.07	0.928	0.962
Q_3	0.007	0.005	0.008	0.007	0.947	0.948	0.948	0.947	0.261	5.22	0.957	0.637
Z_1	0.003	0.001	0.004	0.003	0.922	0.922	0.923	0.922	0.108	2.17	0.914	0.613
P	0.001	0.001	0.001	0.001	0.237	0.238	0.240	0.237	0.069	1.38	0.274	0.171

用 PCA 主成分分析法得到的结论却有所不同,仅有 Q_1 的特征值大于 1,因此其作为核心信息主导整体变异。同时, Q_1 和 Q_3 的平均荷载绝对值相近,接近 0.96,二者对特征整体变异的解释力略高于 Q_2 ,而 P 的解释力仍为最弱。

通过等权重整合 3 种方法评价结果发现,率水流量 Q_2 的综合得分显著领先, P 始终为最次要特征。相较 RF 算法单独评估时过度突出 Q_2 、可能忽略其他特征的协同作用,组合评价结果使得 Q_1 、 Q_3 、 Z_1 的重要性被合理识别。结合客观事实剖析可知:屯溪流域的上游地势落差大,下游河道较为顺直且水系连通,为水流下泄创造了便利条件;加之多发的短历时暴雨使得洪水在河道内停留时间较短,下游水位便不会出现大幅上升,难以形成持续显著的顶托;降雨分布相对均匀,周边丰富的植被覆盖也可以减缓暴雨对城市的影响,再经过复杂的流域汇流等过程后,降雨对研究断面处的影响会受到明显削弱。此时,上游入流特别是率水的流量成为影响模拟结果的最主要因素,这与率水的年径流量居新安江各支流之首、对新安江水量补给作用突出的事实相呼应。因此,新安江下游断面的水力要素对率水流量变化更为敏感。上述分析既有助于理解机器学习模型的运算思维,也能为城市洪水响应工作提供参考。

3 结 语

本文构建了一个考虑物理约束的 LSTM 多要素洪水模拟模型,通过引入物理约束,增强了模型的科学性与合理性,提升了洪水模拟效率;同时,针对机器学习缺乏可解释性的问题,从事前解释与事后解释^[32]两个角度进行了剖析。屯溪区算例验证结果表明:①改进的 LSTM 模型能在 1 s 内完成场次洪水的多要素模拟,实现了高效运算。与传统的 LSTM 模型相比,该模型还显著提升了模型的模拟精度、稳定性和对数据的拟合能力,水位、流量、流速和淹没面积的模拟精度分别提升 20.38%、17.03%、4.02%、14.07%。②物理约束对 LSTM 模型在场次洪水各要素模拟中的影响较为复杂。通常考虑物理约束后,模拟结果的 MAE、RMSE 下降而 R^2 上升,各要素的平均模拟精度提升约 25.29%。但在部分场次的流量和流速模拟中,物理约束效果欠佳,这可能是由于不同场次的洪水特性各异,导致现有物理约束难以全面适配所有复杂情形。

探讨模型的可解释性,不仅加深了对算法逻辑的理解,还能指导实践。将物理约束加入 LSTM 模型,赋予了深度学习算法的决策过程以物理内涵;而特征综合评估结果表明,必须高度重视率水上边界入流的测量精度,而其他重要性相对较低的特征如降水量,根据模型复杂度与计算资源许可的要求,允许被适当简化处理。

本文研究在一定程度上为将深度学习模型更好地应用于水文模拟及预报领域提供了新的思考,但仍存在局限性,虽然模型在小洪水与常规洪水模拟中表现良好,但在极端复杂工况下性能仍有待优化,且模型对空间特征的刻画能力有限,未充分反映河道多断面间的水力联系与洪水演进的时空耦合关系。未来研究应从以下几方面开展:①通过数据增强技术合成极端工况数据,结合遥感影像等多源异构数据扩充训练样本,提升模型对复杂场景的适应性;②基于现有成果,搭建融合空间特征的深度学习模型,捕捉河道网络的拓扑结构与洪水传播规律,实现时空协同模拟;③在此技术框架成熟后,再进一步尝试从内部神经元层面解析模型的决策逻辑,探究更深层次的可解释性,最终构建兼具高适应性、强解释性的水动力预报模型体系。

参考文献:

[1] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书(2024)[M]. 北京:科学出版社,2024:2.
[2] 黄一为. 全国政协委员仲志余:加强城市极端暴雨洪水有效精准防控[N]. 中国水利报,2024-03-09(001).
[3] 陈朝晖,李鹏,张煜洲,等. 耦合一二维水动力模型的城市社区暴雨内涝模拟研究[J]. 水利水电技术(中英文),2024,55(7):55-69. (Chen Zhaohui, Li Peng, Zhang Yuzhou, et al. Urban community stormwater inundation simulation research on coupling one-and two-dimensional hydrodynamic models[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(7): 55-69. (in Chinese))
[4] 彭锋,柴福鑫,张红萍,等. 复杂地形的城市地表二维水动力模拟方法[C]//第五届城市水安全与水管理学术研讨会暨第六届城市防洪排涝学术研讨会论文集. 北京:中国水利水电科学研究院,2022:6.
[5] 卢兴超,徐宗学,李永坤,等. 基于 SWMM 与 LISFLOOD-FP 耦合模型的城市街区内部涝模拟研究[J]. 水资源保护,2024,40(3):98-105. (Lu Xingchao, Xu Zongxue, Li Yongkun, et al. Research on urban block waterlogging simulation based on coupling model of SWMM and LISFLOOD-FP [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(3): 98-105. (in Chinese))

[6] 廖如婷,徐宗学,叶陈雷,等. 基于 SWMM 和 InfoWorks ICM 模型的大红门排水区暴雨内涝模拟[J]. 水资源保护,2023,39(3):109-117. (Liao Ruting,Xu Zongxue,Ye Chenlei,et al. Simulation of rainstorm waterlogging in Dahongmen Drainage Area based on SWMM and InfoWorks ICM models[J]. Water Resources Protection,2023,39(3):109-117. (in Chinese))

[7] 李致家. 现代水文模拟与预报技术[M]. 南京:河海大学出版社,2021.

[8] Liao Yaoxing, Wang Zhaoli, Chen Xiaohong, et al. Fast simulation and prediction of urban pluvial floods using a deep convolutional neural network model[J]. Journal of Hydrology,2023,624:129945.

[9] 庄潇然,刘梅,蔡凝昊,等. 基于深度学习的降水临近预报方法及其在 2023 年江苏汛期的应用评估[J]. 暴雨灾害,2025,44(1):1-8. (Zhuang Xiaoran,Liu Mei,Cai Ninghao,et al. Evaluation of deep learning-based precipitation nowcasting methods during the 2023 flood season in Jiangsu Province[J]. Torrential Rain and Disasters,2025,44(1):1-8. (in Chinese))

[10] 纪守领,李进锋,杜天宇,等. 机器学习模型可解释性方法、应用与安全研究综述[J]. 计算机研究与发展,2019,56(10):2071-2096. (Ji Shouling, Li Jinfeng, Du Tianyu, et al. Survey on techniques, applications and security of machine learning interpretability[J]. Journal of Computer Research and Development,2019,56(10):2071-2096. (in Chinese))

[11] 夏弘. 深度学习和水动力学模型结合的中小河流洪水预报研究[D]. 济南:山东大学,2022.

[12] Chen Jian,Li Yaowei,Zhang Shanju. Fast prediction of urban flooding water depth based on CNN-LSTM[J]. Water,2023,15(7):1397.

[13] Yang Fang,Ding Wu,Zhao Lixiang, et al. Rapid urban flood inundation forecasting using a physics-informed deep learning approach[J]. Journal of Hydrology,2024,643:131998.

[14] Sebastian B,Alexander B,Grégoire M,et al. On pixel-wise explanations for non-linear classifier decisions by layer-wise relevance propagation[J]. PloS one,2015,10(7):0130140.

[15] Kratzert F,Klotz D,Brenner C,et al. Rainfall-runoff modelling using long short-term memory (LSTM) networks[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2018,22(11):6005-6022.

[16] Samek W, Montavon G, Vedaldi A, et al. Explainable AI: interpreting, explaining and visualizing deep learning[M]. Cham: Springer, 2019.

[17] Ahmed M A A,Deo R C,Feng Qi,et al. Deep learning hybrid model with Boruta-random forest optimiser algorithm for streamflow forecasting with climate mode indices, rainfall, and periodicity[J]. Journal of Hydrology,2021,599:126350.

[18] 吴剑. 基于长短时记忆网络的山丘区中小河流洪水预报研究[D]. 大连:大连理工大学,2021.

[19] 王雨洁,李致家,姚成,等. 基于分布式水文水动力耦合模型的秦淮河流域洪水模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(2):11-18. (Wang Yujie,Li Zhijia,Yao Cheng,et al. Flood simulation in the Qinhuai River Basin based on a coupled distributed hydrological and hydrodynamic model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025,53(2):11-18. (in Chinese))

[20] 汪昊燃,王容,黄鹏年,等. 水文水力学结合的秦淮河流域洪水模拟与实时校正[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(3):25-304. (Wang Haoran,Wang Rong,Huang Pengnian,et al. Research on flood simulation and real-time correction of Qinhuai River Basin combined with hydrology and hydraulics[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(3):25-30. (in Chinese))

[21] 韩龙喜. 求解守恒形式的二维浅水方程的 SIMPLE 类程式[J]. 水利学报,2000,31(7):91-95. (Han Longxi. Solution for conservative equation of 2-D shallow flow by using revised SIMPLE algorithm[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2000,31(7):91-95. (in Chinese))

[22] 赵棣华,戚晨,庾维德,等. 平面二维水流-水质有限体积法及黎曼近似解模型[J]. 水科学进展,2000,11(4):368-374. (Zhao Dihua,Qi Chen,Yu Weide,et al. Finite volume method and riemann solver for depth-averaged two-dimensional flow-pollutants coupled model[J]. Advances in Water Science, 2000, 11(4): 368-374. (in Chinese))

[23] Calders T,Esposito F,Hüllermeier E,et al. Machine learning and knowledge discovery in databases[M]. Berlin:Springer, ,2014:44848.

[24] 周恒安,成乐,施克权,等. 基于多任务图神经网络的非定常流体预测[J]. 科学技术与工程,2024,24(27):11733-11740. (Zhou Heng'an,Cheng Le,Shi Kequan,et al. Unsteady fluid prediction based on multi-task graph neural network[J]. Science Technology and Engineering,2024,24(27):11733-11740. (in Chinese))

[25] 孟涵,姚成,郑爱民,等. 不同情景下 LSTM 及其变体模型的洪水模拟研究[J]. 中国农村水利水电, 2025(2):114-120. (Meng Han,Yao Cheng,Zheng Aimin,et al. Flood simulation of LSTM and its variant models under different scenarios[J]. China Rural Water and Hydropower,2025(2):114-120. (in Chinese))

[26] 吕红燕,冯倩. 随机森林算法研究综述[J]. 河北省科学院学报,2019,36(3):37-41. (Lyu Hongyan,Feng Qian. A review of

random forests algorithm[J]. Journal of Hebei Academy of Sciences,2019,36(3):37-41. (in Chinese))

[27] 刘娟,彭剑虹,曹伟,等. 县域城市质量效益指数与城市综合竞争力相关性研究:基于斯皮尔曼秩相关系数的实证分析[J]. 质量与认证,2024,(12):63-65. (Liu Juan, Peng Jianhong, Cao Wei, et al. Correlation study between the quality and benefit index of county-level cities and the comprehensive competitiveness of cities[J]. China Quality Certification, 2024, 12(12):63-65. (in Chinese))

[28] 代硕,苏怀智,谷宇,等. 基于 PCA-GO-BP-AdaBoost 的大坝变形监控模型[J]. 人民黄河,2025,47(增刊 1):100-102. (Dai Shuo, Su Huaizhi, Gu Yu, et al. Dam deformation monitoring model based on PCA-GO-BP-AdaBoost[J]. Yellow River, 2025, 47(S1):100-102. (in Chinese))

[29] 胡嘉玮,徐宗学,陈浩,等. 基于精细化 GDP 格局的城市洪涝风险评估:以济南市黄台桥流域为例[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2025,23(6):1480-1490. (Hu Jiawei, Xu Zongxue, Chen Hao, et al. Urban flood risk assessment based on refined GDP spatial distribution: a case study of Huangtaiqiao River Basin, Jinan City[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2025, 23(6):1480-1490. (in Chinese))

[30] 王双涛. 基于非结构化网格的 1D-2D 水动力模型耦合研究及应用[D]. 西安:长安大学,2023.

[31] 李致家,姚成,章玉霞,等. 栅格型新安江模型的研究[J]. 水力发电学报,2009,28(2):25-34. (Li Zhijia, Yao Cheng, Zhang Yuxia, et al. Study on Grid-based Xin' anjiang Model[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(2):25-34. (in Chinese))

[32] 化盈盈,张岱堉,葛仕明. 深度学习模型可解释性的研究进展[J]. 信息安全学报,2020,5(3):1-12. (Hua Yingying, Zhang Daichi, Ge Shiming, et al. Research progress in the interpretability of deep learning models[J]. Journal of Cyber Security, 2020, 5(3):1-12. (in Chinese))

(收稿日期:2025-05-18 编辑:熊水斌)

+++++
(上接第 68 页)

[20] 姚成,李致家,张珂,等. 基于栅格型新安江模型的中小河流精细化洪水预报[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):19-25. (Yao Cheng, Li Zhijia, Zhang Ke, et al. Fine-scale flood forecasting for small and medium-sized rivers based on Grid-Xin' anjiang model[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021, 49(1):19-25. (in Chinese))

[21] 童冰星,李致家,姚成. 基于 SoilGrids 的栅格新安江模型参数空间分布估算[J]. 水科学进展,2022,33(2):219-226. (Tong Bingxing, Li Zhijia, Yao Cheng. Estimation of distributed Grid-Xin' anjiang Model parameters based on SoilGrids[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(2):219-226. (in chinese))

[22] Zhang Xiao, Liu Liangyun, Wu Changshan, et al. Development of a global 30 m impervious surface map using multisource and multitemporal remote sensing datasets with the Google Earth Engine platform[J]. Earth System Science Data, 2020, 12(3):1625-1648.

[23] 林祚顶,李兰涛. 海河“23·7”流域性特大暴雨洪水水文测报成效、存在问题及对策[J]. 中国水利,2023(18):5-8. (Lin Zuoding, Li Lantao. Results, problems and mitigation measures of hydrological monitoring and forecasting of “July 23” rainstorm and severe flood in the Haihe River Basin[J]. China Water Resources, 2023(18):5-8. (in Chinese))

[24] 赵人俊,王佩兰. 新安江模型参数的分析[J]. 水文,1988(6):2-9. (Zhao Renjun, Wang Peilan. Analysis of the parameters of the Xinanjiang model[J]. Journal of China Hydrology, 1988(6):2-9. (in Chinese))

[25] 石朋,丁松,司伟,等. 新安江模型敏感参数动态变化规律研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(3):1-6. (Shi Peng, Ding Song, Si Wei, et al. Study on dynamic variations of sensitive parameters in Xin' anjiang model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(3):1-6. (in Chinese))

[26] 司伟,黄思琦,王培霞,等. 富春江水库流域径流变化及其量化归因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(3):1-7. (Si Wei, Huang Siqi, Wang Peixia, et al. Analysis of runoff evolution in Fuchunjiang Reservoir Basin and its quantitative attribution[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(3):1-7. (in Chinese))

[27] 韩慧敏. 基于集成学习方法的 CLDAS 土壤湿度降尺度及其干旱监测应用:以华北地区为例[D]. 南京:南京信息工程大学,2022.

[28] 孔月,张珂,申晓骥,等. 基于微波遥感和多模型集成的安徽省土壤湿度反演[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(6):75-81. (Kong Yue, Zhang Ke, Shen Xiaoji, et al. Soil moisture inversion in Anhui Province based on microwave remote sensing and multi-model ensemble[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(6):75-81. (in Chinese))

(收稿日期:2025-04-23 编辑:熊水斌)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.04.012

多元型复合灾害系统适应性评估

黄莉¹, 张祎喆², 万旭哲², 王伟², 宋月²

(1. 河海大学公共管理学院; 2. 河海大学港口海岸与近海工程学院)

摘要: 考虑灾害损失的叠加(折减)效应, 推导了多元型复合灾害系统的适应性指数公式, 从防灾能力、应灾能力两大维度构建了多元型复合灾害系统适应性评估指标体系, 并使用熵权-TOPSIS 方法评估了各区域的适应性, 利用 ArcGIS 软件绘制了适应性区划图。粤港澳大湾区的实例应用结果表明: 粤港澳大湾区“暴雨-滑坡、暴雨-崩塌”多元型复合灾害系统适应性高的区域主要集中在南部地区, 较高适应性区域主要为中部少数地区, 中、较低适应性区主要分布在中部大部分地区、西南部和东部地区, 低适应性区域主要分布在西北部和东北部; 在面对多元型复合灾害系统时, 区域的适应性指数显著低于其面对单一灾害的适应性指数。

关键词: 多元型复合灾害; 适应性评估; 风险传递模型; 熵权法; TOPSIS 方法; 粤港澳大湾区

Adaptive evaluation of multivariate compound disaster systems

Huang Li¹, Zhang Yizhe², Wan Xuzhe², Wang Wei², Song Yue²

(1. College of Public Administration, Hohai University; 2. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University)

Abstract: By considering the superposition (reduction) effect of disaster losses, an adaptive index formula for multivariate compound disaster systems was derived, and an adaptive evaluation index system for multivariate compound disaster systems was constructed from the two major dimensions of disaster prevention capacity and disaster response capacity. The entropy weight-TOPSIS method is used to evaluate adaptability of each region, and ArcGIS software is utilized to map the adaptability zoning. The application results of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area case show that for the “rainstorm-landslide” and “rainstorm-collapse” multivariate compound disaster systems in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, the regions with high adaptability are mainly concentrated in the southern area; the regions with relatively high adaptability are mainly a few areas in the central part; the regions with medium and relatively low adaptability are mainly distributed in most areas of the central part and the southwestern and eastern areas; the regions with low adaptability are mainly located in the northwestern and northeastern areas, respectively. When facing multivariate compound disaster systems, the regional adaptive index is significantly lower than that for single disasters.

Key words: multivariate compound disaster; adaptive evaluation; risk propagation model; entropy weight method; TOPSIS method; the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

近年来,随着全球气候变化,产生极端天气的频率和强度显著增加。我国多地频繁遭受暴雨、台风、崩塌等自然灾害的侵袭^[1-2]。这些灾害不仅给当地居民的生命财产安全构成了严重威胁,也给区域经济的可持续发展带来了巨大挑战^[3-4]。多元型复合灾害同时具备串发型和并发型灾害特质^[5],既有线性因果关系,又有并行发生的特征,往往会造成更为严重的损失。通过评估多元型复合灾害系统适应性,有针对性地提出增强区域韧性和减少灾害损失的措施,是维护区域安全和保障经济社会健康发展的有效手段之一^[6]。

现有国内外相关研究多围绕单一灾害开展适应性与应急能力评估^[7-11],针对灾害链的量化评估研究仍显不足。为数不多的灾害链评估主要分为两类:①基于灾前准备、预警响应、灾害暴露等要素搭建指标体系实施评估;②通过累加各单灾种风险值,得到灾害链综合风险结果^[12]。例如:王婷等^[13]从防灾能力、抗灾能力和救灾能力三方面构建评估指标体系,应用多级模糊综合评估模型定量评估台风-洪涝-地质灾害链减灾能力;张柯炜等^[14]梳理了我国华东滨海乡村地区的主要灾害链,从设施应急需求度和功能重要性两个维度评估乡村应急全过程中综合应急设施配置优先度。目前,研究的切入点往往是对复合灾害应急能力评估指

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3001002);国家自然科学基金项目(71974052)

作者简介: 黄莉(1982—),女,副教授,博士,主要从事水灾害应急管理研究。E-mail:lily8214@126.com

通信作者: 王伟(1979—),男,教授,博士,主要从事水灾害应急物流研究。E-mail:13813826667@163.com

标体系进行构建和完善,且缺乏系统性和全面性。尽管王伟等^[15]从灾害链角度提出了以灾害链转移机理为基础的串发型灾害链应急能力评估方法,但针对同时具备串发型和并发型灾害特质的多元型复合灾害的应急能力评估研究仍然缺失,且没有考虑多元型复合灾害的叠加(折减)、传递效应^[16-17],提出的应对策略和措施缺乏针对性。因此,本文以更为复杂的多元型复合灾害为研究对象,考虑灾害损失的叠加(折减)效应构建风险传递模型,推导适应性指数公式,并以粤港澳大湾区“暴雨-滑坡、暴雨-崩塌”多元型复合灾害系统为例,计算了不同区域的多元型复合灾害适应性,以期防灾减灾工作提供参考。

1 理论推导

复合灾害是致灾因子通过相互作用,形成比单一灾害更复杂、更严重的灾害情境^[18]。通常分为串发型灾害和并发型灾害。串发型灾害指的是一种灾害触发另一种灾害的线性序列反应,形成一个因果链条,特点是前一个灾害事件会直接成为下一个灾害发生的导火索。并发型灾害则描述了多个灾害源独立发生,但几乎同时作用在同一地区或系统上,相互之间可能没有直接的因果关系,但彼此间存在间接影响。多元型复合灾害是指同时具备串发型和并发型灾害特质的灾害,表现为多个灾害之间既有线性的因果关系,又有并列的同时区关系。

适应性是指在灾难发生前后,地区对灾害事件的应对能力,以及从灾害损失中恢复的能力。灾害适应性评估与量化分析,是衡量城市自然灾害应对能力的核心手段,也是制定防灾减灾方案、提升城市韧性的重要依据。适应性评估结果不仅可以反映当前防灾机制的有效性,还能为未来的防灾规划提供数据支持^[19-20]。Clark 等^[21]将灾害适应性定义为应对和恢复能力的综合,指在灾害发生时区域或个体能够吸收冲击并继续正常运作的能力,以及在灾害发生后区域或个体能够从损失中恢复并重建的能力。本文从防灾能力和应灾能力两维度着手,分别选取最能反映防灾能力的指标(居民人均可支配收入、地质灾害隐患点消除能力、地质灾害监测预警能力等),以及反映应灾能力的指标(每万人拥有医疗机构床位数、每万人拥有避灾点数量、排水管网密度等)构建适应性评估指标体系,对“暴雨-滑坡、暴雨-崩塌”多元型复合灾害系统适应性进行评估。

多元型复合灾害适应性评估是一个复杂且多维度的过程,它不仅建立在对单灾种的适应性评估基础之上,还应综合考虑多种灾害之间的相互作用、连锁反应等。假定灾害 C 为既有并发型灾害又有串发型灾害的多元型复合灾害,包含了 n 个不同的单灾种 $\{d_i | i=1, 2, \dots, n\}$, 构建有向图 $C=(D, H)$, 有向图中的 n 个顶点分别代表 n 个单灾种, D 代表所有灾种节点组成的集合, H 代表灾害的边(每条边都有方向,代表灾害之间的传递转换关系)。

设多元型复合灾害 C 中的灾害损失叠加(折减)效应系数为 g_c :

$$g_c = L_n / \sum_{i=1}^n L_i \tag{1}$$

式中: L_n 为多元型复合灾害 C 的灾害损失; L_i 为单灾种 d_i 的灾害损失。

区域面对多元型复合灾害 C 的适应性指数 F_c (应对能力和恢复能力)为区域应对多元型复合灾害的能力 P_c 与区域的应急需求 R_c 之间的比值:

$$F_c = P_c / R_c \tag{2}$$

假设区域应对各灾种的能力是一致、通用的,即 $P_c = P_i = P$, 区域的应急需求 R_c 的叠加(折减)效应系数与应急损失的叠加(折减)效应系数一致,则由区域面对多元型复合灾害 C 中各灾种 d_i 的适应性 F_i 推导得到:

$$F_c = \frac{P_c}{R_c} = \frac{1}{g_c} \sum_{i=1}^n \frac{1}{F_i} \tag{3}$$

2 实例应用

2.1 研究区概况

粤港澳大湾区是中国经济发展的重要引擎之一^[22], 涵盖广东省的广州、深圳、珠海、佛山、惠州、东莞、中山、江门、肇庆 9 个市以及香港和澳门两个特别行政区,其不仅在经济上具有重要地位,还因其特殊的地理位

置和气候条件,成为多元型复合灾害系统研究的理想对象。粤港澳大湾区位于中国东南沿海中纬度环球灾害带与环太平洋灾害带的交汇处,地形复杂,三面环山,一面临海,形成了“三江汇流、八口出海”的独特地貌。粤港澳大湾区属南亚热带湿润季风气候,夏季台风、暴雨、洪涝、滑坡等灾害多发^[23],受全球气候变化影响,极端天气事件的发生频次与强度持续上升,灾害风险随之显著加剧^[24]。同时,区域城市化快速推进,地表不透水面积不断扩张,给排水系统带来巨大负荷,强降雨天气下极易诱发城市内涝^[25-26]。此外,山区和丘陵地带的土壤结构较为松散,在强降雨条件下容易发生滑坡和崩塌,增加了灾害的复杂性和危害性^[27]。例如,2023年9月7日傍晚至8日上午,深圳罗湖区局部累计降水量达到469.0 mm,香港24 h降水量超过647 mm。深圳和香港多个地区出现严重内涝,交通中断,部分地区积水深度超过1 m,强降水引发了多起滑坡和泥石流,造成房屋损毁和人员伤亡。

选择粤港澳大湾区作为多元型复合灾害系统适应性研究的原因:①粤港澳大湾区自然灾害种类繁多且频繁发生,为研究提供了丰富的数据和案例;②该地区“暴雨-滑坡、暴雨-崩塌”灾害链频发,具有很强的代表性;③快速的城市化进程和独特的地理环境使其灾害风险具有典型性和代表性;④粤港澳大湾区高度发达的经济水平和先进的科学技术实力为应对各类灾害挑战以及实施有效的适应性策略提供了坚实的基础。

2.2 指标选取

评估指标的选取应基于科学依据确保数据的可靠性和准确性,同时需全面涵盖灾害风险的各个方面并与灾害风险有明显的相关性,能够有效反映区域的灾害适应能力^[28]。本文在指标遴选过程中充分考量数据获取条件,尽可能选用一手基础数据,以此保障指标体系的客观性与真实性。对于虽作用于多元型复合灾害,但数据获取困难,或是与灾害适应性关联度较低的指标,均予以剔除。构建的多元型复合灾害系统适应性评估指标体系见图1。居民人均可支配收入、堤防规模、每万人拥有医疗机构床位数、每万人拥有避灾点数量等指标数据来源于《广东统计年鉴2021》(<http://stats.gd.gov.cn/gdtjnj/index.html>),每10万常住人口中大学程度人口数、15岁以下及65岁以上人口比例、女性比例等指标数据来源于《2020年第七次全国人口普查主要数据》(<https://www.stats.gov.cn/sj/pcsj/rkpc/d7c/>)。

目标层	准则层	指标层	表征
多元型复合灾害系统适应性评估指标体系	防灾能力	居民人均可支配收入 Q_1	正向指标,表征区域经济基础及防灾投入保障能力
		每10万常住人口中大学程度人口数 Q_2	正向指标,表征居民受教育水平与防灾减灾认知能力
		堤防规模 Q_3	正向指标,表征区域防洪与工程防护能力
		地质灾害隐患点消除能力 Q_4	正向指标,表征地质灾害隐患排查与治理能力
		地质灾害防治资金投入 Q_5	正向指标,表征地质灾害防治的资金保障水平
		地质灾害监测预警能力 Q_6	正向指标,表征地质灾害识别、监测与预警水平
	应灾能力	15岁以下及65岁以上人口比例 Q_7	负向指标,表征需重点照顾的脆弱人口负担
		女性比例 Q_8	负向指标,表征灾害情景下脆弱人口的相对规模
		每万人拥有医疗机构床位数 Q_9	正向指标,表征灾后医疗救治与恢复保障能力
		每万人拥有避灾点数量 Q_{10}	正向指标,表征紧急避险与人员安置保障能力
		排水管网密度 Q_{11}	正向指标,表征城市排水与暴雨内涝防御能力
		水库库容比 Q_{12}	正向指标,表征区域蓄洪、调洪与水资源调控能力
		政府应急救援队伍 Q_{13}	正向指标,表征应急救援组织、动员与处置能力
		应急物资储备能力 Q_{14}	正向指标,表征灾害应急物资供应与持续保障能力

图1 多元型复合灾害系统适应性评估指标体系

Fig.1 Adaptive evaluation index system for multivariate compound disaster system

2.3 权重和指标数值计算

熵权法计算的权重能够准确反映各指标在综合评价中的重要性。该方法基于数据本身确定权重,确保了权重分配的客观性和合理性,避免了人为主观因素的干扰,从而使得评价结果更加可靠和科学^[29]。TOPSIS方法能够综合考虑多个评价指标的影响,适用于多准则决策,且对数据分布及样本量没有严格限制,可以适用于本文的小样本资料。通过计算各方案与理想解和负理想解的距离,提供直观的决策结果。不需要目标函数,不用通过检验,能够很好地刻画多个影响指标的综合影响力度^[30]。鉴于此,本文采用熵权法确定各指标的权重(表1),并利用TOPSIS方法评估各区域的适应性。

2.4 “暴雨-滑坡、暴雨-崩塌”多元型复合灾害系统适应性评估

根据暴雨、滑坡、崩塌灾害之间的相互影响和叠加效应,结合参考文献[15],确定“暴雨-滑坡、暴雨-崩塌”多元型复合灾害系统叠加(折减)效应系数 $g_1 = 1.5$,得到粤港澳大湾区“暴雨-滑坡、暴雨-崩塌”多元型复合灾害系统适应性指数范围为 $0.009 \sim 0.040$,然后与 ArcGIS 连接并关联创建矢量图。通过内嵌的自然断点法将适应性指数分为 5 个等级:低适应性 $0.009 \sim <0.012$ 、较低适应性 $0.012 \sim <0.016$ 、中适应性 $0.016 \sim <0.018$ 、较高适应性 $0.018 \sim <0.026$ 、高适应性 $0.026 \sim 0.040$,得到的粤港澳大湾区多元型复合灾害系统适应性区划图,如图 2 所示。

由图 2 可知:适应性高的区域主要是南部地区,较高的是中部部分地区,而中部大部分区域,以及西南部和东部地区多为中、较低适应性区,西北部 and 东北部则多为低适应性区。

表 1 各指标权重

Table 1 Weights of indicators

指标	权重		
	暴雨	滑坡	崩塌
Q_1	0.144 1	0.114 5	0.096 0
Q_2	0.090 9	0.072 3	0.060 6
Q_3	0.242 9		0.161 8
Q_4		0.161 8	0.161 8
Q_5		0.130 8	0.130 8
Q_6		0.153 3	0.153 3
Q_7	0.038 9	0.030 9	0.025 9
Q_8	0.028 8	0.022 9	0.019 2
Q_9	0.107 8	0.085 7	0.071 8
Q_{10}	0.063 2	0.050 2	0.042 1
Q_{11}	0.025 1		
Q_{12}	0.034 9		
Q_{13}	0.146 6	0.116 5	0.097 6
Q_{14}	0.076 9	0.061 1	0.051 2

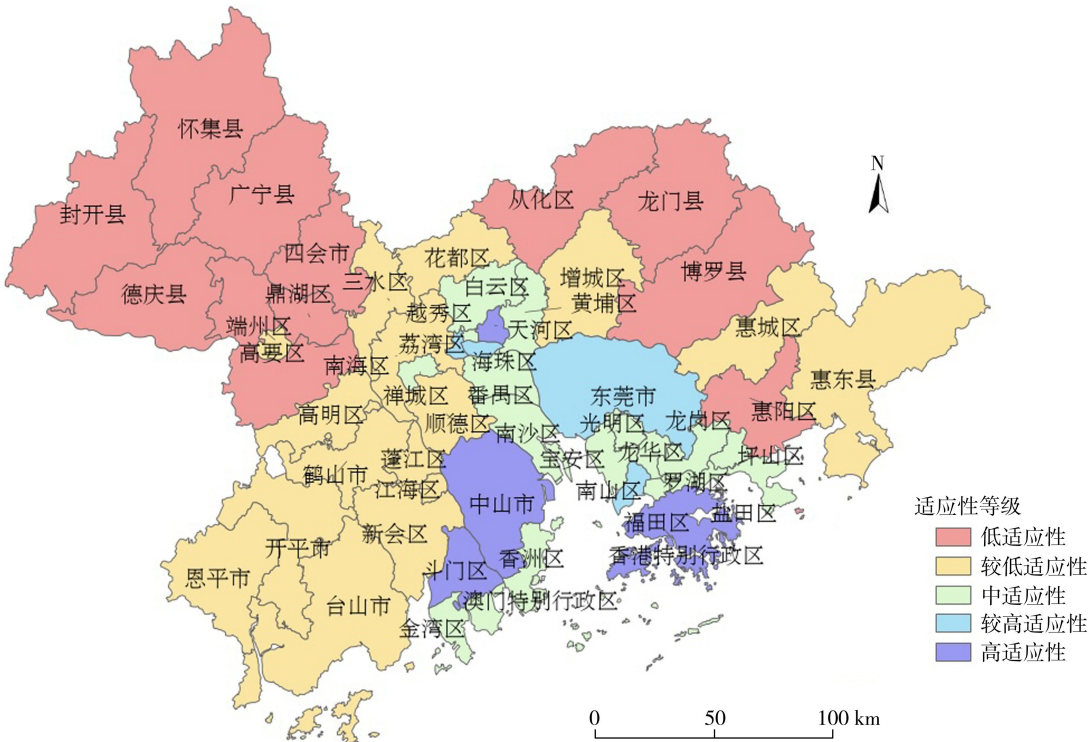


图 2 粤港澳大湾区多元型复合灾害系统适应性区划图

Fig. 2 Adaptive zoning map of multivariate compound disasters system in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

- a. 高适应性区域具体分布在越秀区、福田区、斗门区、香港特别行政区、中山市等南部和少部分中部地区。这些地区经济基础雄厚,居民人均可支配收入高达 114 401 元,约为粤港澳大湾区平均水平 57 757 元的两倍,政府提供了充足的资源用于建设坚固的基础设施、避灾点,拥有高效的灾害监测预警系统和完善的医疗机构,平均每万人拥有医疗机构床位数 120 个。此外,这些地区的政府管理水平较高,能够制定和实施有效的城市规划和应急管理措施并且有大量应急物资储备,平均物资储备 84 万件。同时,这些地区的居民参与程度高,公众防灾教育和灾害防范准备意识较强,非劳动力人口占比低。因此,整体上对灾害的应对能力强。
- b. 较高适应性区域具体分布在海珠区、天河区、南山区、罗湖区、东莞市、澳门特别行政区等少部分中南部地区。这些地区经济繁荣,居民人均可支配收入为 94 482 元,远高于粤港澳大湾区的平均水平,能够支持

高标准的基础设施建设和维护。拥有完善的医疗体系和应急救援条件,政府部门拥有更多的资源和专业知识来制定与执行有效的灾害风险管理策略。此外,这些地区的居民普遍对灾害风险有较高的认识,并积极参与防灾减灾活动,平均每10万常住人口中有27735名大学生,非劳动人口占比22%,确保在灾害发生时能够迅速采取行动,减少损失。因此,区域整体的应对能力也较强。

c. 中适应性区域具体分布在白云区、黄埔区、番禺区、禅城区、宝安区、光明区等部分中部地区。这些地区虽然在经济上有一定的发展,居民人均可支配收入为59852元,略高于粤港澳大湾区的平均水平,但相较于核心城市区域还存在一定的差距,导致可用于提升防灾能力的资源相对有限,应急物资储备59万件,约为高适应性区域的3/4。同时,这些地区每万人平均拥有医疗机构床位数为32个,低于大湾区平均每万人平均拥有的医疗机构床位数(44个),其基础设施建设和更新未能完全跟上快速推进的城市化进程,从而影响了灾害响应和恢复的效率。此外,这些中部地区在应急管理和公众防灾教育方面还有进一步提升的空间。在应急物资储备和应急救援队伍等几项指标与适应性高和较高的地区相比,均存在一定差距,这也是制约其灾害适应性的重要因素。

d. 较低适应性区域具体分布在惠东县、惠城区、增城区、花都区、三水区、南海区、台山市、恩平市等西南部、东部和一部分中部地区。这些地区由于经济欠发达,居民人均可支配收入为42808元,低于粤港澳大湾区的平均水平,缺乏足够的资金和技术用于建设完备的防灾基础设施。此外,这些地区的政府和社区在灾害预防、响应和恢复方面的准备不足,导致整体应对灾害的能力有限。居民受到的公共教育有限,平均每10万常住人口中有14460名大学生,低于大湾区平均水平,对灾害风险认识不足,进一步削弱了区域整体的抗灾能力。

e. 低适应性区域具体分布在封开县、怀集县、德庆县、龙门县、博罗县、惠阳区等西北部 and 东北部地区。这些地区位置较为偏远,远离大湾区的经济中心,导致经济发展水平相对较低,居民人均可支配收入仅为29148元,远低于粤港澳大湾区的平均水平,从而限制了可用于投资基础设施和灾害预防措施的资金,导致应急物资储备仅为23万件,相当于高适应性区域的30%。此外,这些地区的经济和人口密度明显低于大湾区平均水平,非劳动人口占比高达32%。因此,地方政府在应对自然灾害方面缺乏足够的经验和资源,包括灾害预警系统、应急物资储备、应急救援队伍的建设以及居民防灾教育和准备活动等方面均显不足。这使得在面对自然灾害时,这些地区的应对和恢复能力较弱。

2.5 单一灾害与多元型复合灾害评估结果对比

通过分别对比暴雨、滑坡、崩塌单一灾害的适应性评估结果(图3)发现:大湾区面对灾害的适应性最小的是崩塌灾害,其次是滑坡,再次是暴雨灾害。这一现象的主要原因:暴雨灾害在大湾区较为频发,且影响范围广泛,因此当地在应对暴雨灾害方面积累了丰富的经验和资源;相比之下,滑坡和崩塌灾害的发生频率较低,影响范围有限,导致应对这些灾害的经验和资源储备相对欠缺。针对暴雨灾害,大湾区已构建了较为完备的监测预警系统和综合防控工程体系,涵盖城市排水管网、防洪堤坝、调蓄水库等多重防汛基础设施。然而对于滑坡和崩塌灾害,尤其是在地质条件复杂的区域,监测与预防措施仍显不足。大湾区的经济发展水平

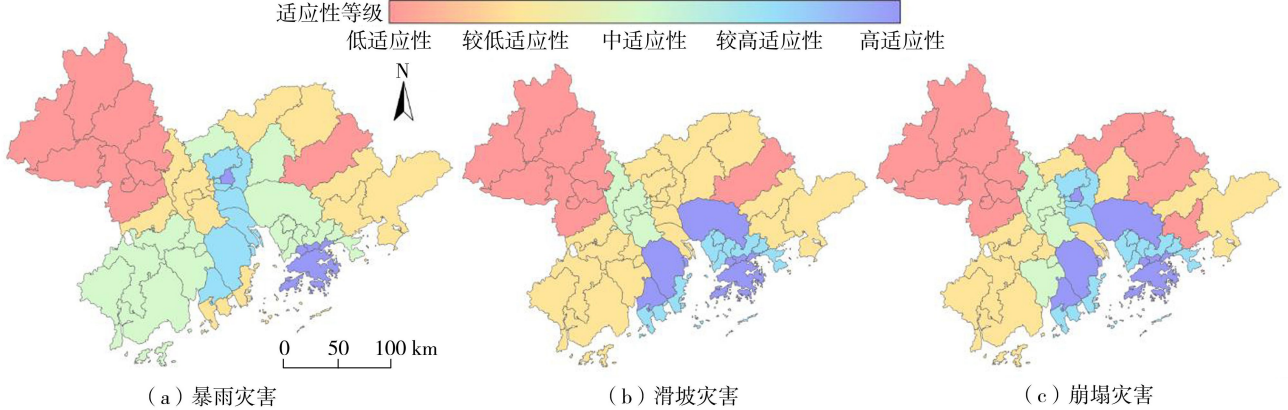


图3 粤港澳大湾区单一灾害适应性区划图

Fig. 3 Adaptive zoning map of single disasters in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

和人口密度较高的地区通常在暴雨灾害的防范和应对上投入更多资源;相反,在滑坡和崩塌灾害多发的山区和边缘地区,由于经济发展相对滞后,防灾减灾的投入也相对较少。

对比图 2 和图 3 可知:区域面对“暴雨-滑坡、暴雨-崩塌”多元型复合灾害的适应性远低于单一灾害的适应性指数。复合灾害涉及多个灾害的相互作用和叠加效应,各灾害相互挤占、损坏应急资源,增加了灾害的复杂性,使得施加应对措施更加困难,导致应对效率低下、灾害损失增加。此外,现有的预警系统通常针对单一灾害设计,对复合灾害的预警和响应能力不足。复合灾害的发生常常超出预警系统的预测范围,导致应急响应滞后。因此,应对复合灾害还需要多部门、多层次的协调、资源优化配置与集成调度。在南部地区,不仅多元型复合灾害的适应性高或较高,暴雨、滑坡、崩塌等单一灾害的适应性也表现为高或较高。在中南部少数地区,多元型复合灾害适应性较高。在这些地区,暴雨灾害通常表现为较高或中等适应性,滑坡灾害则多为高适应性,崩塌灾害大多为高或较高适应性。在中部部分地区,多元型复合灾害的适应性为中等。暴雨灾害多表现为较高或中等适应性,滑坡灾害多为较高适应性,少部分地区为较低适应性,崩塌灾害则多为较高适应性。在西南部、东部和部分中部地区,多元型复合灾害的适应性较低。暴雨和崩塌灾害大多表现为较低或中等适应性,滑坡灾害多为较低适应性。在西北部和东北部地区,多元型复合灾害的适应性低。暴雨和滑坡灾害大多表现为较低或低适应性,崩塌灾害多为低适应性。

大部分地区单一灾害与多元型复合灾害的适应性区划等级较为一致,即在单一灾害呈现高适应性、中适应性、低适应性的地区,多元型复合灾害也对应呈现出相同的适应性特征,在面对单一灾害时具备较高应对能力的区域,相对拥有较强的应急管理和防灾应灾能力,这些区域在面对多元型复合灾害时,也同样表现出较高的适应性。但也有部分地区存在差异,如少部分中部地区虽然在滑坡灾害中呈现较低适应性,但在多元型复合灾害下则表现为较高适应性。这些地区虽然在单一灾害应对上存在不足,但在多元型复合灾害发生时,通过综合应急措施和资源整合,反而能够较好地应对多重灾害叠加的影响。

3 结 语

本文从防灾能力、应灾能力两大维度,构建多元型复合灾害系统适应性评估指标体系,并推导出对应的适应性指数公式。结合熵权法与 TOPSIS 方法,分别测算暴雨、滑坡、崩塌 3 类单一灾害,以及“暴雨-滑坡、暴雨-崩塌”多元型复合灾害的适应性指数;借助 ArcGIS 完成空间可视化并绘制适应性等级区划图,以此分析区域灾害适应性的空间分异特征。

实例应用结果显示,粤港澳大湾区应对“暴雨-滑坡、暴雨-崩塌”等复合灾害的适应性,显著低于单一灾害。究其原因,复合灾害存在灾害耦合与风险叠加效应,各类灾害相互挤占、损毁应急资源,大幅提升防灾减灾工作难度,最终造成应急处置效率下降、灾害损失加剧。空间格局方面,多数区域在单一灾害与多元型复合灾害场景下的适应性等级基本一致:单一灾害适应性较高的区域,面对多元型复合灾害时同样表现良好,反映出这类区域具备扎实的防灾与应急管理水平。另有部分区域单灾适应能力偏弱,但可通过统筹应急举措、整合各类资源,在多元型复合灾害情景下实现较高的适应水平。

后续研究,可进一步探索灾害适应性评估的跨区域协同管理机制,搭建区域信息共享与联动处置体系,全面提升区域综合防灾能力,保障经济社会可持续发展。

参考文献:

[1] 霍祎黎,宋玉祥. 粤港澳大湾区经济协调发展水平测度与影响因素分析[J]. 经济纵横,2023(2):102-110. (Huo Yili,Song Yuxiang. Measurement of the level of coordinated development and analysis of its influencing factors in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Economic Review,2023(2):102-110. (in Chinese))

[2] Ripple W J, Wolf C, Gregg J W, et al. The 2024 state of the climate report: perilous times on planet Earth[J]. BioScience,2024, 74(12):812-824.

[3] 吴勇军,薛禹胜,谢云云,等. 台风及暴雨对电网故障率的时空影响[J]. 电力系统自动化,2016,40(2):20-29. (Wu Yongjun,Xue Yusheng,Xie Yunyun, et al. Space-time impact of typhoon and rainstorm on power grid fault probability[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(2):20-29. (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] Lee R,White C J,Adnan M S G,et al. Reclassifying historical disasters:from single to multi-hazards[J]. Science of the Total Environment,2024,912:169120.

[6] 张海波. 新时代国家应急管理体制机制的创新发展[J]. 人民论坛·学术前沿,2019(5):6-15. (Zhang Haibo. Innovation and development of national emergency management institution and mechanism in the new era[J]. Frontiers,2019(5):6-15. (in Chinese))

[7] 吴新燕,顾建华. 国内外城市灾害应急能力评价的研究进展[J]. 自然灾害学报,2007,16(6):109-114. (Wu Xinyan,Gu Jianhua. Advance in research on urban emergency management capability assessment at home and abroad[J]. Journal of Natural Disasters,2007,16(6):109-114. (in Chinese))

[8] 铁永波,唐川. 城镇地质灾害应急响应能力评价[J]. 自然灾害学报,2009,18(2):139-145. (Tie Yongbo,Tang Chuan. Assessment of cities' and towns' ability in emergency response to geological disasters[J]. Journal of Natural Disasters,2009,18(2):139-145. (in Chinese))

[9] 方佳毅,史培军. 全球气候变化背景下海岸洪水灾害风险评估研究进展与展望[J]. 地理科学进展,2019,38(5):625-636. (Fang Jiayi,Shi Peijun. A review of coastal flood risk research under global climate change[J]. Progress in Geography,2019,38(5):625-636. (in Chinese))

[10] 卢兴超,徐宗学,李永坤,等. 基于多智能体模型的城市洪涝灾害动态风险评估[J]. 水资源保护,2024,40(4):36-47. (Lu Xingchao,Xu Zongxue,Li Yongkun,et al. Assessment on dynamic risk of urban flooding and waterlogging disaster based on multi-agent models[J]. Water Resources Protection,2024,40(4):36-47. (in Chinese))

[11] 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))

[12] 郑德凤,高敏,李钰,等. 基于GIS的大连市暴雨洪涝灾害综合风险评估[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(3):1-8. (Zheng Defeng,Gao Min,Li Yu,et al. Comprehensive risk assessment of rainstorm-flood disaster in Dalian City based on GIS[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(3):1-8. (in Chinese))

[13] 王婷,吴绍洪,高江波,等. 区域台风-洪涝-地质灾害链减灾能力评估[J]. 灾害学,2022,37(4):193-200. (Wang Ting,Wu Shaohong,Gao Jiangbo,et al. Coping capacity assessment of regional typhoon-flood-geological disaster chain[J]. Journal of Catastrophology,2022,37(4):193-200. (in Chinese))

[14] 张柯炜,陈秋晓,章明宇. 灾害链视角下的华东滨海乡村应急设施配置优先级评价研究[J]. 自然灾害学报,2022,31(6):56-66. (Zhang Kewei,Chen Qiuxiao,Zhang Mingyu. Priority evaluation of emergency facilities configuration in coastal rural area of East China from the perspective of disaster chain[J]. Journal of Natural Disasters,2022,31(6):56-66. (in Chinese))

[15] 王伟,石雨欣,宋月,等. 暴雨-滑坡灾害链应急能力评估:以粤港澳大湾区为例[J]. 自然灾害学报,2024,33(4):95-105. (Wang Wei,Shi Yuxin,Song Yue,et al. Emergency capability assessment of the rainstorm-landslide disaster chain:Taking the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area as an example[J]. Journal of Natural Disasters,2024,33(4):95-105. (in Chinese))

[16] 郭雪松,赵宇,王子爻. “情景触发-任务驱动-组织重构”:耦合视角下复合型灾害适应性治理的生成逻辑与实现路径[J]. 中国行政管理,2023,39(12):141-149. (Guo Xuesong,Zhao Yu,Wang Ziyao. “Situation triggered-task driven-organization reconstructed” the generation logic and construction path of adaptive governance mechanism for compound disasters from the perspective of coupling[J]. Chinese Public Administration,2023,39(12):141-149. (in Chinese))

[17] 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))

[18] Zheng Hao,Deng Zhifei,Guo Lanlan,et al. Assessment of building physical vulnerability in earthquake-debris flow disaster chain[J]. International Journal of Disaster Risk Science,2023,14(4):666-679.

[19] 李正兆,傅大放,王君娴,等. 应对内涝灾害的城市韧性评估模型及应用[J]. 清华大学学报(自然科学版),2022,62(2):266-276. (Li Zhengzhao,Fu Dafang,Wang Junxian,et al. Urban resilience assessment model for waterlogging disasters and its application[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology),2022,62(2):266-276. (in Chinese))

[20] 高玉琴,汪键,高见,等. 基于组合赋权-云模型的城市洪涝灾害韧性评价方法[J]. 水利水电科技进展,2024,44(2):22-29. (Gao Yuqin, Wang Jian, Gao Jian, et al. Evaluation method of urban flood disaster resilience based on combined weighting-cloud model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(2):22-29. (in Chinese))

[21] Clark G E,Moser S C,Ratick S J,et al. Assessing the vulnerability of coastal communities to extreme storms;the case of revere, MA. ,USA[J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change,1998,3(1):59-82.

[22] 赵晓斌,强卫,黄伟豪,等. 粤港澳大湾区发展的理论框架与发展战略探究[J]. 地理科学进展,2018,37(12):1597-1608. (Zhao Xiaobin,Qiang Wei,Huang Weihao,et al. Theoretical framework and development strategy of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Progress in Geography,2018,37(12):1597-1608. (in Chinese))

[23] 王钧,宫清华,宇岩,等. 粤港澳大湾区城市群自然灾害综合承灾能力评价[J]. 地理研究,2020,39(9):2189-2199. (Wang Jun,Gong Qinghua,Yu Yan,et al. Evaluation of comprehensive disaster-bearing capacity of urban natural disasters in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Geographical Research,2020,39(9):2189-2199. (in Chinese))

[24] Wang Yujie,Gao Ge,Zhai Jianqing,et al. Evolution characteristics of the rainstorm disaster chains in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area,China[J]. Natural Hazards,2023,119(3):2011-2032.

[25] 陈明发,刘帆,赵耀龙,等. 1987—2017 年粤港澳大湾区城市群的不透水地表扩张与梯度演化[J]. 地球信息科学学报,2021,23(3):443-455. (Chen Mingfa,Liu Fan,Zhao Yaolong,et al. The expansion and gradient evolution of impervious surface within the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 1987 to 2017[J]. Journal of Geo-information Science,2021,23(3):443-455. (in Chinese))

[26] 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))

[27] 石佳佳,李伟峰,刘亚丽,等. 粤港澳大湾区城镇化对海岸线与海岸带的影响[J]. 生态学报,2022,42(1):67-75. (Shi Jiajia,Li Weifeng,Liu Yali,et al. Impacts of urbanization on coastline and coastal zone in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Acta Ecologica Sinica,2022,42(1):67-75. (in Chinese))

[28] 王国萍,闵庆文,丁陆彬,等. 基于 PSR 模型的国家公园综合灾害风险评估指标体系构建[J]. 生态学报,2019,39(22):8232-8244. (Wang Guoping,Min Qingwen,Ding Lubin,et al. Comprehensive disaster risk assessment index system for national parks based on the PSR model[J]. Acta Ecologica Sinica,2019,39(22):8232-8244. (in Chinese))

[29] Qian Bao,Zhu Yuxin,Wang Yuxiao,et al. Can entropy weight method correctly reflect the distinction of water quality indices? [J]. Water Resources Management,2020,34(11):3667-3674.

[30] Jin Chenxia,Mi Jusheng,Li Fachao,et al. An improved TOPSIS method for multi-criteria decision making based on hesitant fuzzy β neighborhood[J]. Artificial Intelligence Review,2023,56(1):793-831.

(收稿日期:2024-10-27 编辑:刘晓艳)

(上接第 35 页)

[10] 赵刚,刘建峰,胡双,等. 在役海底管道后挖沟分析方法和校核标准[J]. 中国海洋平台,2025,40(3):101-108. (Zhao Gang,Liu Jianfeng,Hu Shuang,et al. Analysis methods and verification standards on post-trenching for subsea pipeline in service [J]. China Offshore Platform,2025,40(3):101-108. (in Chinese))

[11] 刘冠良,刘建峰,赵刚,等. 平坦海床海底管道后挖沟安全性计算[J]. 石油和化工设备,2024,27(3):127-132. (Liu Guanliang,Liu Jianfeng,Zhao Gang,et al. Safety calculation of submarine pipeline post-trenching on flat seabed[J]. Petro & Chemical Equipment,2024,27(3):127-132. (in Chinese))

[12] Phillips R,Nobahar A,Zhou J. Trench effects on pipe-soil interaction [C]//2004 International Pipeline Conference. Calgary: IPC,2004:321-327.

[13] Kianian M,Shiri H. Experimental study of trench effect on lateral failure mechanisms around the pipeline buried in clay[J]. Journal of Pipeline Science and Engineering,2021,1(2):198-211.

[14] Yang Ming,Wang Dongyuan,Jia Haidong,et al. Research on the interaction between trench material and pipeline under fault displacement[J]. Scientific Reports,2024,14(1):12439.

[15] 陈景皓,段梦兰,徐崇巍,等. 深水海底管道 J 形铺设参数[J]. 油气储运,2013,32(6):654-658. (Chen Jinghao,Duan Menglan,Xu Chongwei,et al. Parameters of J-lay method for deepwater submarine pipeline [J]. Oil & Gas Storage and Transportation,2013,32(6):654-658. (in Chinese))

[16] 刘秉德. 海底悬空管道二次挖沟治理研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2015.

(收稿日期:2025-07-01 编辑:熊水斌)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.04.013

考虑混蓄电站季调节特性的水风光蓄互补调度研究

苏华英¹,王珍妮²,张 俨¹,王融融¹,王榆榭¹,邓佳莉¹,谭乔凤³

(1. 贵州电网有限责任公司电力调度控制中心; 2. 河海大学水科学研究院; 3. 河海大学水利水电学院)

摘要: 考虑混蓄电站的季调节特性,以发电效益最大为目标建立水风光蓄互补长短期嵌套调度模型,针对模型求解的高维特征,通过将混蓄电站的抽水发电转换模型引入动态规划逐次逼近算法完成算法改进,并定量分析了混蓄电站对水风光蓄互补系统运行效益的影响。实例验证结果表明:对于依托季及以上调节性能水电站修建的混蓄电站,推荐采用混蓄季调节调度方案,该方案相较无混蓄方案,可有效减少新能源弃电(99.37%),提升系统发电效益(4.34%);通过将下游水量提前抽至上水库,可为下游水库提供额外防洪库容,减少梯级水库弃水量(93.35%);相较混蓄日调节调度方案,可提高枯期发电量,提升系统综合能量转换效率(6.88%)。

关键词: 混合式抽水蓄能;季调节;多能互补;效益评估

Study on scheduling of hydro-wind-photovoltaic-storage complementary system considering seasonal regulation characteristics of hybrid pumped storage power stations

Su Huaying¹, Wang Zhenni², Zhang Yan¹, Wang Rongrong¹, Wang Yujian¹, Deng Jiali¹, Tan Qiaofeng³
(1. Power Dispatching Control Center, Guizhou Power Grid Co., Ltd.; 2. Institute of Water Science and Technology, Hohai University;
3. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University)

Abstract: By considering the seasonal regulation characteristics of hybrid pumped storage power stations, a long-and short-term nested scheduling model for hydro-wind-photovoltaic-storage complementary systems was established with the objective of maximizing power generation benefits. In view of the high-dimensional features in solving the model, the dynamic programming successive approximation algorithm was improved by introducing the pumping-generation conversion model of hybrid pumped storage power stations, and the impact of hybrid pumped storage power stations on the operational benefits of the hydro-wind-photovoltaic-storage complementary system was quantitatively analyzed. Case study results indicate that for hybrid pumped storage power stations built relying on hydropower stations with seasonal or higher-level regulation capabilities, a seasonal regulation scheduling scheme of hybrid pumped storage is recommended. Compared with the scheme without hybrid pumped storage, this scheme can effectively reduce the curtailment of renewable energy (99.37%) and increase the power generation benefits of the system (4.34%). By pumping water from the downstream reservoir to the upstream reservoir in advance, additional flood control storage capacity can be provided for the downstream reservoir, reducing the water curtailment of cascade reservoirs (93.35%). Compared with the daily regulation scheme of hybrid pumped storage, this scheme can improve the power generation in dry periods and increase the comprehensive energy conversion efficiency of the system (6.88%).

Key words: hybrid pumped storage; seasonal regulation; multi-energy complementary; benefit evaluation

随着“双碳”目标不断推进,截至 2023 年底,我国风电、光伏新能源累计装机容量达到 10.5 亿 kW,较 2013 年增长了 10 倍,预计 2030 年装机容量将突破 12 亿 kW,这给电力系统安全稳定运行和新能源消纳带来巨大挑战,电网亟须发展大规模灵活调节电源^[1-3]。抽水蓄能电站作为技术经济优势最突出的灵活调节电源,其选址和开发受到地形、水源、建设成本等各类因素限制^[4-5]。混合式抽水蓄能电站(以下简称“混蓄电站”)依托常规梯级水电站修建而成,兼顾抽水蓄能和径流发电功能,可有效提升电力系统灵活调节性能^[6-7],且由于无须新建上、下水库,可节约部分土建、征地等投资成本^[8]。相较于传统抽水蓄能电站普遍只有日调节能力,依托大型水库改造的混蓄电站具备跨日甚至跨季节调节能力,可满足电力系统的长时蓄能要求。

早期针对混蓄电站的研究聚焦于评估梯级水电站蓄能改造对水电自身发电效益^[9-11]和调峰效益^[12]的

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52479013);博士后创新人才支持计划项目(BX20240101)
作者简介: 苏华英(1981—),女,正高级工程师,硕士,主要从事水电调度运行研究。E-mail:lwj2301090443@163.com
通信作者: 谭乔凤(1991—),女,教授,博士,主要从事水利水电工程调度研究。E-mail:qiaofengtan@126.com

影响。随着风光装机规模的持续扩大,混蓄电站在提升水电系统灵活性、促进风光消纳方面的优势日益凸显^[13-15],因此不少学者围绕其开展了水风光蓄互补调度方面的研究。例如:Zhang 等^[16]评估了混蓄电站的建设可行性,研究表明当增建泵站能量转换效率高于 55%时,改造才具有经济价值;明波等^[17]构建了以水定电模式下龙羊峡-拉西瓦混蓄电站的调度模型,验证了混蓄电站在利用新能源弃电抽水、减少弃水方面的显著作用;Ma 等^[18]建立了增建泵站的混蓄电站与风光互补系统,该系统的缺电量和新能源弃电量均维持在较低水平;Ju 等^[19]针对风光能源的不确定性,建立了混蓄电站的两阶段鲁棒机组组合模型,搭建了一种协调运行成本和新能源弃电的互补系统短期调度框架;罗彬等^[20]以系统收益最大为目标,以机组为最小调度单元,建立了混蓄电站与风电联合运行的短期调度模型;Tan 等^[21]结合长距离和跨区域输电要求,提出了水风光蓄互补系统的联合调峰运行规则;郭爱军等^[22]通过建立混蓄电站的短期临界调峰模型与容量计算模型,系统分析了混蓄电站的短期调峰特性及梯级开发增益。目前,相关研究主要关注混蓄电站的日调节能力,即一日之内完成抽水与放空循环的能力。然而,针对依托季及以上调节性能水库修建的混蓄电站,如何建立其与梯级水电站在长短期尺度上的协同调度模型,在提高短期错峰效益和新能源消纳水平的同时,充分发挥其蓄丰补枯的长期蓄水储能作用,相关研究仍不充分。

为此,本文以基于梯级水电站蓄能改造的水风光蓄互补系统为研究对象,建立了考虑混蓄电站季调节特性的水风光蓄互补长短期嵌套调度模型,采用无混蓄、混蓄日调节、混蓄季调节 3 种方案,评估混蓄电站对系统调度过程和运行效益的影响。

1 水风光蓄互补系统调度原则

常规梯级水电站只配备水轮机组,通过调节水电输出功率的大小应对风电和光伏出力变化^[23-25],不具备其他储能设施的能源存储能力。通过在已建的常规梯级水电站之间增建泵站,构建兼顾发电和蓄能作用的混蓄电站,可以消纳风光电量、利用电网低价电量进行抽水,从而将电能转化为水的势能,且水轮机和泵站机组的发电、抽水工况互不干扰。混蓄电站、风电站、光伏电站与梯级水电站组成的水风光蓄互补系统结构如图 1 所示。与无混蓄电站的常规水风光互补系统相比,水风光蓄互补系统将原本从上游到下游的单向流动通路转变为上下游水库之间的双向循环回路,电力联系也由原来的单一发电工况变为抽水、发电多工况,系统水量和电量联系更加复杂。

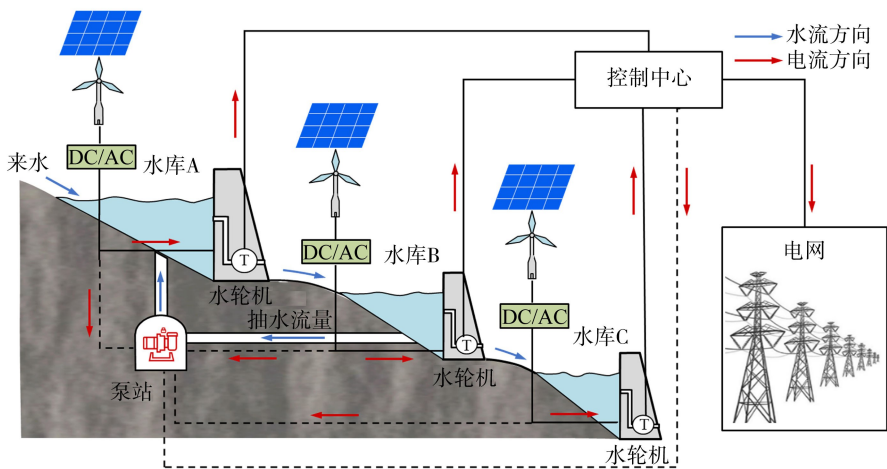


图 1 水风光蓄互补系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of structure of hydro-wind-photovoltaic-storage complementary system

为保证水风光蓄互补系统安全稳定运行,促进新能源有效消纳,设置调度原则如下:①将风电站和光伏电站视为常规水电站的虚拟机组,与混蓄电站打捆组成同一电源组,共同向电网申报发电计划。②在新能源大发引发弃电或电网电价处于低谷时段,混蓄电站可在满足水力和电力约束的前提下进行抽水蓄能,其抽水用电遵循明确的优先级,即优先消纳新能源弃电,其次使用电网低价电量。③在电价高峰时段,尽可能利用原有水电机组发电运行,不同电源电力外送的优先级从高到低排序如下:常规水电站的最小出力、新能源出力、常规水电站的可调节出力。④当混蓄电站的抽水电量主要来自新能源弃电时,混蓄电站和常规水电站

同时运行且功率互不影响;当抽水电量主要来自电网购电时,从系统经济性和能量利用效率角度出发,常规水电站宜以最小出力运行,以减少额外能量损耗。

2 水风光蓄互补长短期嵌套调度模型

混蓄电站通常以调节库容大、调节性能好的水库为上水库,以日调节或季调节水库为下水库,可以进行日、周、月甚至跨季节尺度的蓄能调节,以充分释放梯级水电站蓄能改造带来的增量效益。为此,本文考虑混蓄电站的跨季节调节作用,以发电效益最大为目标建立水风光蓄互补长短期嵌套调度模型。在长期尺度上,通过优化混蓄电站及具备日及以上调节能力的梯级水电站的水量调控过程,影响短期尺度的发电可用水量与混蓄电站的调度方式;在短期尺度上,通过优化混蓄电站和具备日及以上调节能力水电站的日内调度过程,提升新能源消纳水平及互补系统的发电效益。

2.1 目标函数

与常规梯级水电站调度运行不同,混蓄电站抽水与发电产生的水力、电力联系复杂,需综合考虑复杂水量时空转移和能量转化因素,将抽水、发电联合工况耦合到不同时间尺度的优化建模中。针对考虑混蓄电站季调节特性的水风光蓄互补长短期嵌套调度模型,长期尺度以年为调度期,日为调度时段,考虑丰枯分期电价,以年发电效益最大为目标优化混蓄电站与梯级水电站的日间调度决策;短期尺度以日为调度期,时为调度时段,在长期调度给出的水位边界约束下,考虑峰谷分时电价方案,以日发电效益最大为目标优化混蓄电站和梯级水电站日内调度过程。水风光蓄互补长短期嵌套优化调度目标为:

$$\max R_y = \sum_{d=1}^D \max R_d = \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T \left[\sum_{i=1}^I (E_{h,i,t} + E_{w,i,t} + E_{s,i,t}) C_t - E_{pur,t} C_{pur,t} \right] \quad (1)$$

其中

$$E_{h,i,t} = \eta_{h,i,t} Q_{h,i,t} (Z_{up,i,t} - Z_{down,i,t}) \Delta t$$

$$E_{pur,t} = \max \left(\frac{9.81 H_{pump,t} Q_{pump,t} \Delta t}{\eta_{pump}} - E_{pump,sys,t}, 0 \right)$$

式中: R_y 、 R_d 分别为互补系统全年和第 d 天发电效益; D 为长期调度总时段, 取为 365 d; T 为短期调度总时段, 取为 24 h; I 为水电站总数; $E_{h,i,t}$ 为水电站 i 在 t 时段的上网电量; $E_{w,i,t}$ 、 $E_{s,i,t}$ 分别为接入水电站 i 的风电站和光伏电站在 t 时段的上网电量; C_t 为互补系统在 t 时段的综合上网电价; $E_{pur,t}$ 、 $C_{pur,t}$ 为混蓄电站在 t 时段从电网购入的抽水电量和相应抽水电价; $\eta_{h,i,t}$ 、 $Q_{h,i,t}$ 分别为水电站 i 在 t 时段的出力系数和发电流量; $Z_{up,i,t}$ 、 $Z_{down,i,t}$ 分别为水电站 i 在 t 时段的坝前水位和尾水位; Δt 为研究时段时长, 取为 1 h; $H_{pump,t}$ 、 $Q_{pump,t}$ 、 η_{pump} 分别为混蓄电站在 t 时段的抽水扬程、抽水流量、抽水效率; $E_{pump,sys,t}$ 为混蓄电站在 t 时段内消纳来自系统内部的抽水电量。

2.2 约束条件

a. 水量平衡约束:

$$V_{i,t+1} = V_{i,t} + \left[Q_{i,t} - Q_{h,i,t} - Q_{sp,i,t} + \sum_{i_u \in I_u} (Q_{h,i_u,t} + Q_{sp,i_u,t}) + r Q_{pump,t} \right] \Delta t \quad (2)$$

式中: $V_{i,t}$ 、 $V_{i,t+1}$ 分别为水库 i 在 t 时段的初、末库容; $Q_{i,t}$ 为水库 i 在 t 时段内的区间入库流量; $Q_{sp,i,t}$ 为水库 i 在 t 时段的弃水流量; I_u 为与水库 i 有直接水量联系的上游水库集合; r 为状态变量, 当水库 i 为混蓄电站上水库时, $r=1$, 当水库 i 为混蓄电站下水库时, $r=-1$, 当水库 i 不属于混蓄电站的上下水库时, $r=0$ 。

b. 水位、库容约束:

$$Z_{up,i,t} = f_{zv}((V_{i,t} + V_{i,t+1})/2) \quad (3)$$

$$Z_{down,i,t} = f_{qz}(Q_{h,i,t} + Q_{sp,i,t}) \quad (4)$$

$$V_{i,t,\min} \leq V_{i,t} \leq V_{i,t,\max} \quad (5)$$

式中: $f_{zv}(\cdot)$ 为坝前水位与库容之间的函数关系; $f_{qz}(\cdot)$ 为下泄流量与尾水位间的函数关系; $V_{i,t,\min}$ 为水库 i 在 t 时段的库容下限, 本文为死库容; $V_{i,t,\max}$ 为水库 i 在 t 时段的库容上限, 在汛期为防洪限制水位对应的库容, 其他时期为正常蓄水位对应的库容。

c. 发电流量约束:

$$Q_{h,i,t} \leq Q_{h,i,t,\max} \quad (6)$$

式中: $Q_{h,i,t,\max}$ 为水电站 i 在 t 时段的最大允许过机流量。

d. 下泄流量约束:

$$q_{i,t,\min} \leq Q_{h,i,t} + Q_{sp,i,t} \leq q_{i,t,\max} \quad (7)$$

式中: $q_{i,t,\min}$ 、 $q_{i,t,\max}$ 分别为水库 i 在 t 时段的最小下泄流量、最大下泄流量,本文考虑混蓄电站从下水库抽水,不影响两级水库之间的河道流量。

e. 电站出力约束:

$$P_{w,i,t} = P_{w,out,i,t} + P_{w,pump,i,t} + P_{w,curt,i,t} \quad (8)$$

$$P_{s,i,t} = P_{s,out,i,t} + P_{s,pump,i,t} + P_{s,curt,i,t} \quad (9)$$

$$P_{h,i,t,\min} \leq P_{h,out,i,t} \leq P_{h,i,t,\max} \quad (10)$$

$$P_{pump,t} = P_{pump,sys,t} + P_{pur,t} \quad (11)$$

$$P_{pump,\min} \leq P_{pump,t} \leq P_{pump,\max} \quad (12)$$

式中: $P_{w,i,t}$ 、 $P_{w,out,i,t}$ 、 $P_{w,curt,i,t}$ 分别为接入水电站 i 的风电站在 t 时段的总出力、上网电量、弃电量; $P_{w,pump,i,t}$ 、 $P_{s,pump,i,t}$ 分别为泵站消耗的风电和光伏出力; $P_{s,i,t}$ 、 $P_{s,out,i,t}$ 、 $P_{s,curt,i,t}$ 分别为接入水电站 i 的光伏电站在 t 时段的总出力、上网电量、弃电量; $P_{h,out,i,t}$ 、 $P_{h,i,t,\min}$ 、 $P_{h,i,t,\max}$ 分别为水电站 i 在 t 时段的出力、最小出力、最大出力; $P_{pump,t}$ 、 $P_{pump,sys,t}$ 、 $P_{pur,t}$ 分别为混蓄电站在 t 时段消耗的总功率、消纳互补系统内部电力的抽水功率和向电网购买的抽水功率; $P_{pump,\min}$ 、 $P_{pump,\max}$ 分别为为混蓄电站在 t 时段的最小、最大出力。

f. 通道容量约束:

$$P_{h,out,i,t} + P_{w,out,i,t} + P_{s,out,i,t} \leq P_{i,\max} \quad (13)$$

$$P_{w,out,i,t} + P_{s,out,i,t} = \min(P_{w,i,t} + P_{s,i,t}, P_{i,\max} - P_{h,i,t,\min}) \quad (14)$$

式中: $P_{i,\max}$ 为电源组 i 的最大传输容量,本文取水电站的装机容量。

3 调度模型求解

本文水风光蓄互补长短期嵌套调度模型求解是一种多阶段决策问题,为避免决策变量较多导致“维数灾”,采用动态规划逐次逼近 (dynamic programming with successive approximation, DPSA) 算法进行求解^[26]。由于求解过程不仅需要确定发电水量,还需确定混蓄电站的抽水量,增加了模型求解难度。为此,本文将混蓄电站的抽水发电转换模型引入 DPSA 算法中,根据水风光蓄互补系统调度原则计算系统的剩余流量,以简化决策变量,具体方式为:发电工况下,发电流量不小于最小下泄流量;抽水工况下,当出现弃风弃光时,在满足上下游库容约束的前提下优先抽水以储存风光弃电量,并根据相邻时段水库水量平衡公式扣除最小下泄流量后得到剩余流量,当剩余流量为负值时该部分流量用于抽水,否则用于发电。通过将某时刻的抽水、发电流量简化为剩余流量这一单一决策变量,可以提高模型的计算效率。当水库 i 为混蓄电站上水库时,其剩余流量为:

$$Q_{n,i,t} = (V_{i,t} - V_{i,t+1})/\Delta t + I_{i,t} + \sum_{i_u \in I_u} (Q_{h,i_u,t} + Q_{sp,i_u,t}) - q_{i,\min} + Q_{pump,ws,t} \quad (15)$$

式中: $Q_{n,i,t}$ 为水库 i 在 t 时段的剩余流量,当 $Q_{n,i,t} > 0$ 时,该部分流量用于发电,当 $Q_{n,i,t} < 0$ 时,该部分流量用于抽水; $q_{i,\min}$ 是水库 i 的最小下泄流量; $Q_{pump,ws,t}$ 为混蓄电站在 t 时段采用弃风光电量抽水的流量。

将水电站 i 与其下游的混蓄电站视为整体进行计算,以风光出力、入库径流、库容控制边界、分时电价资料为输入,模型决策变量为库容,模型求解流程如图 2 所示,模型求解步骤如下:①设定梯级水库在整个调度期间的初始库容,输入当前优化的水库编号 i ($i=1,2,\dots,I$)、迭代次数 k ($k=1,2,\dots,K$) 和发电效益 R_k ,参数初始输入值分别为 $i=1$ 、 $k=1$ 、 $R_0=0$ 、 ε 为足够小的正数。②当水库 i 为混蓄电站上水库时,执行步骤 ③,否则执行步骤 ⑤。③当 $k=1$ 时,使用动态规划 (dynamic programming, DP) 算法优化水电站 i 及其下游混蓄电站的运行过程,初次迭代过程暂不考虑其他水库的约束和发电量;当 $k \neq 1$ 时,同样固定其余水库的库容过程,基于 DP 算法优化水电站 i 及其下游混蓄电站的运行过程,但优化过程需考虑其他水库的约束和发电量。④设置水库库容过程调整模块,保证梯级水库群和混蓄电站在抽水和发电模式下都满足运行约束条件,得到各水库的可行库容过程。当 $k=1$ 时,执行步骤 ⑦,当 $k \neq 1$ 时,令 $i=i+1$,若 $i \leq I$,执行步骤 ⑤。⑤在保持其他水库库容过程不变的情况下,利用 DP 算法优化水电站 i 的库容过程。⑥如果 $i < I$,令 $i=i+1$ 并返回步骤

②;否则,执行步骤 ⑦。⑦计算互补系统的发电效益 R_k ,并设 $k=k+1$,当 $|R_k-R_{k-1}| \geq \varepsilon$ 或 $k \leq K$,说明迭代计算尚未收敛,令 $i=1$,返回步骤 ②;否则,说明迭代计算已收敛,记录并输出梯级水电站和混蓄电站的调度过程。

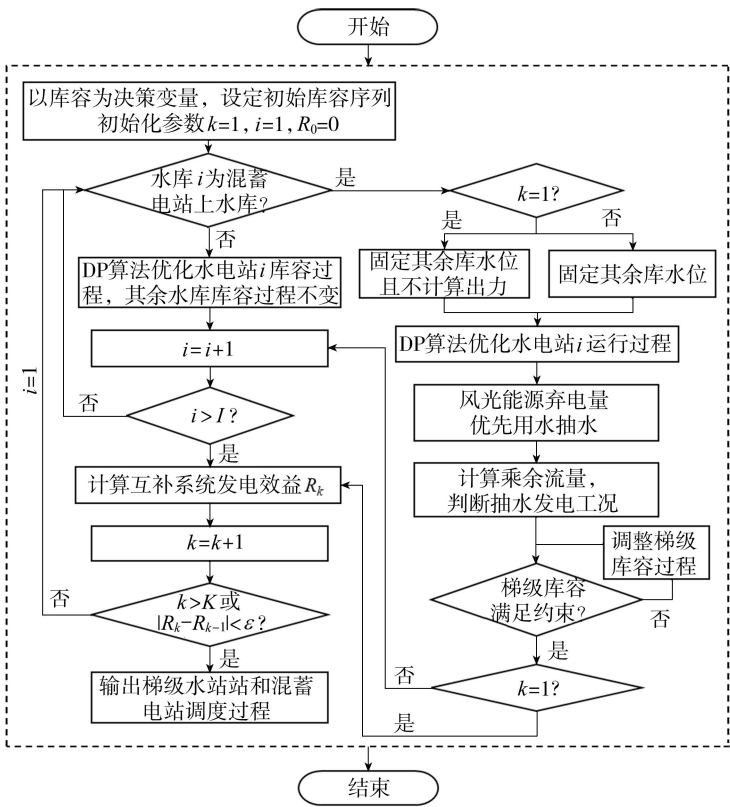


图 2 水风光蓄互补长短期嵌套调度模型求解流程

Fig. 2 Solution flow chart of long- and short-term nested scheduling model for hydro-wind-photovoltaic-storage complementary system

4 实例验证

4.1 工程背景

以贵州某流域梯级水风光互补系统为工程实例,该系统装机容量如下:水电 1 895 MW、风电 929 MW、光伏 1 950 MW,水风光电站的特征参数见表 1。第一级水库具备多年调节能力,下游第二级水库和第三级水库分别具有季调节和日调节能力,拟通过在第一级和第二级水库之间增设 340 MW 的泵站,构建混蓄电站。

表 1 水风光电站特征参数

Table 1 Characteristic parameters of hydro-wind-photovoltaic power stations						
水库	调节性能	正常蓄水位/m	汛期防洪限制水位/m	死水位/m	总库容/亿 m ³	调节库容/亿 m ³
第一级	多年调节	1 140	1 138	1 076	49. 47	33. 61
第二级	季调节	970	970	950	10. 16	4. 91
第三级	日调节	837	837	822	2. 01	0. 67
水电站	装机容量/MW	最小下泄流量/(m ³ /s)	最大下泄流量/(m ³ /s)	最大发电流量/(m ³ /s)	接入风电装机容量/MW	接入光伏装机容量/MW
第一级	600	14. 4	6 234	490. 5	317	770
第二级	695	77	12 456	632. 0	312	500
第三级	600	77	15 956	994. 5	300	680

模型输入数据包括流域多年平均代表年(2017 年)的梯级水电站历史径流数据、水库始末水位、泵站效率等水电站与泵站实际参数,以及风电出力、光伏出力数据、贵州省分时电价数据。其中,梯级水库始末水位为正常蓄水位,泵站效率取 80%,单位容量的风电和光伏出力数据采用美国国家航空航天局的气象数据反演分析数据库提供的逐小时气象数据进行计算。分时电价数据采用贵州省水电电价 294. 9 元/(MW · h)作为互补系统枯期的基准综合上网电价,设置丰水期电价比基准电价下浮 24. 5%。基于当地试行的峰谷电价

划分时段和电价浮动标准,划定日内 9:00—12:00、16:00—21:00 为峰时段,0:00—7:00、23:00—24:00 为谷时段,将长期时段的丰枯电价作为汛枯期的平段电价,峰段/谷段电价分别向上/向下浮动 50%。

4.2 结果与分析

为评估混蓄电站及其调度方式对互补系统调度过程与运行效益的影响,分别设置无混蓄、混蓄日调节、混蓄季调节的互补调度方案。①无混蓄:该方案针对梯级水电站蓄能改造前的常规水风光互补系统,由梯级水电站与风光电站组成,即混蓄电站装机容量为 0。②混蓄日调节:该方案的互补系统由 4.1 节所述的混蓄电站、梯级水电站与风光电站组成,在长期尺度不考虑混蓄电站的调节作用,其一日之内的抽水将于当日放空,因此取无混蓄方案的长期水位过程作为此方案的日水位边界;短期尺度则考虑混蓄电站的日内调节作用,优化混蓄电站和具备日及以上调节能力水电站的调度过程。③混蓄季调节:该方案的互补系统构成与混蓄日调节方案一致,但梯级水库的长期水位边界通过优化混蓄电站和具备日及以上调节能力水电站的水位控制过程求得,短期调度方式与混蓄日调节方案一致。

4.2.1 长期调度过程分析

梯级水库在无混蓄和混蓄季调节调度方案下的长期调度过程如图 3、图 4 所示。本文调度模型设置枯期电价高于汛期,为最大化系统发电效益,水电应尽可能在枯期多放水多发电、汛期多蓄水少发电。相比无混蓄或混蓄日调节调度方案,混蓄季调节调度方案下第一级水库的水位在枯期(1—5 月)加快消落,汛期(6—10 月)快速回升,契合蓄丰补枯最大化发电效益的优化调度原则。枯期时段,无混蓄方案下水库可用水量受到后续上游来水量影响,为保障未来时段用水,不得限制枯期发电量。混蓄季调节调度方案下第一级水库枯期可下泄更多水能用于发电,最低可消落至死水位,此过程中发电量的增大主要来自发电流量的增加。汛期时段,得益于水库自身蓄水能力与混蓄电站抽水蓄能的协同作用,混蓄季调节调度方案的水库较无混蓄方案能更快恢复到正常蓄水位。汛期(7—8 月)期间,受防洪限制水位约束,水位上升趋势减缓。当汛末(10 月)水库达到正常蓄水位附近时,水库停止蓄水并加大下泄流量,相应提高了水电在汛末时期的发电量。在混蓄季调节模式下,混蓄电站的全年抽水耗电量约 80%来自新能源,其余来自电网低价电量,第一级水电站的发电效益提高约 38%,因此增设泵站在满足水库蓄水和下泄流量要求的前提下,加快了混蓄电站上水库的消落和蓄水过程,显著提高了上级水电站的发电效益。

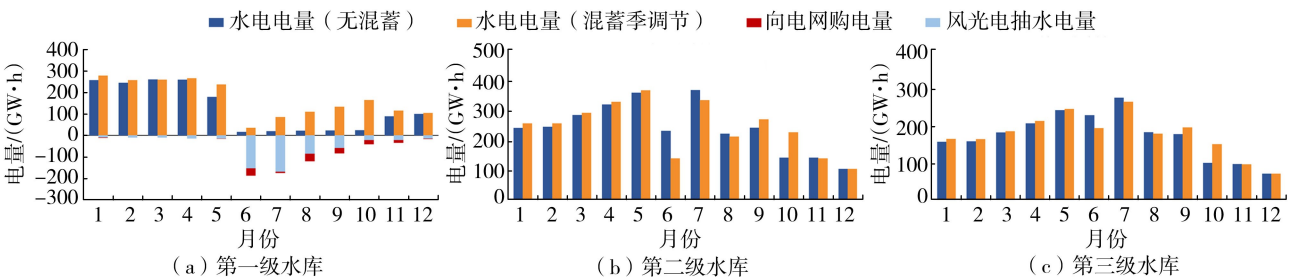


图 3 无混蓄、混蓄季调节调度方案下梯级水库的长期电量过程

Fig. 3 Long-term energy processes of cascade reservoirs under scheduling schemes without hybrid pumped storage and with seasonal regulation of hybrid pumped storage

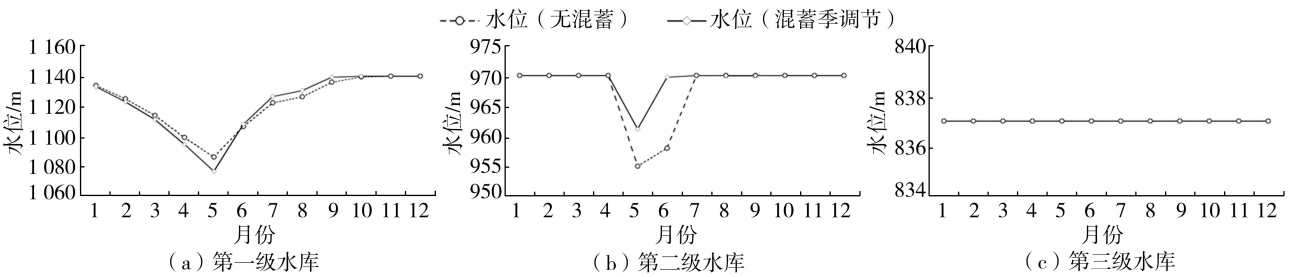


图 4 无混蓄、混蓄季调节调度方案下梯级水库的长期水位过程

Fig. 4 Long-term water level processes of cascade reservoirs under scheduling schemes without hybrid pumped storage and with seasonal regulation of hybrid pumped storage

第二级水库在枯期初(1—4 月)保持在正常蓄水位附近运行,随后在枯期末(5 月)水位消落,汛期(6—

7月)蓄水回升。当第二级水库水位在正常蓄水位附近时,其发电流量直接受到上游水库下泄和混蓄电站抽水工况的影响,因此在上游水库加大出力的枯期,第二级水电站的发电量也得到提升。第三级日调节水库在长期调度模式下保持恒定的水位,其出力过程主要受上游来水影响。总体而言,下级两座水电站的总发电量变化不大,但由于电量更多集中到电价较高的枯期,下级两座水电站的发电效益也有所提高。

综上,混蓄季调节调度方案可改变梯级水库之间的跨季节水量时空分配,相较无混蓄电站的方案,混蓄季调节调度方案在长期尺度加快了上水库的消落速度,并加大了消落深度,显著提高了梯级水电站在枯期的发电可用水量。

4.2.2 短期调度过程分析

在相同的日水位边界条件下分析有、无混蓄电站方案下互补系统的典型日出力过程,结果如图 5 所示。混蓄电站的日内调度模式包括以下几种:①一抽模式,混蓄电站在日内尺度只连续抽水一次,通常发生在午间新能源产生超通道弃电或夜间电价低谷时段,混蓄电站利用这部分电量抽水蓄能,从而提高梯级水电站在电价高峰时段的发电量。该模式通常发生在上下水库库容、水量或通道容量相对受限的情况,当不满足上述运行要求时,混蓄电站停机。②两抽模式,混蓄电站的抽水工况运行两次,分别发生在午间新能源大发弃电或电价平段,以及夜间的部分电价低谷时段。

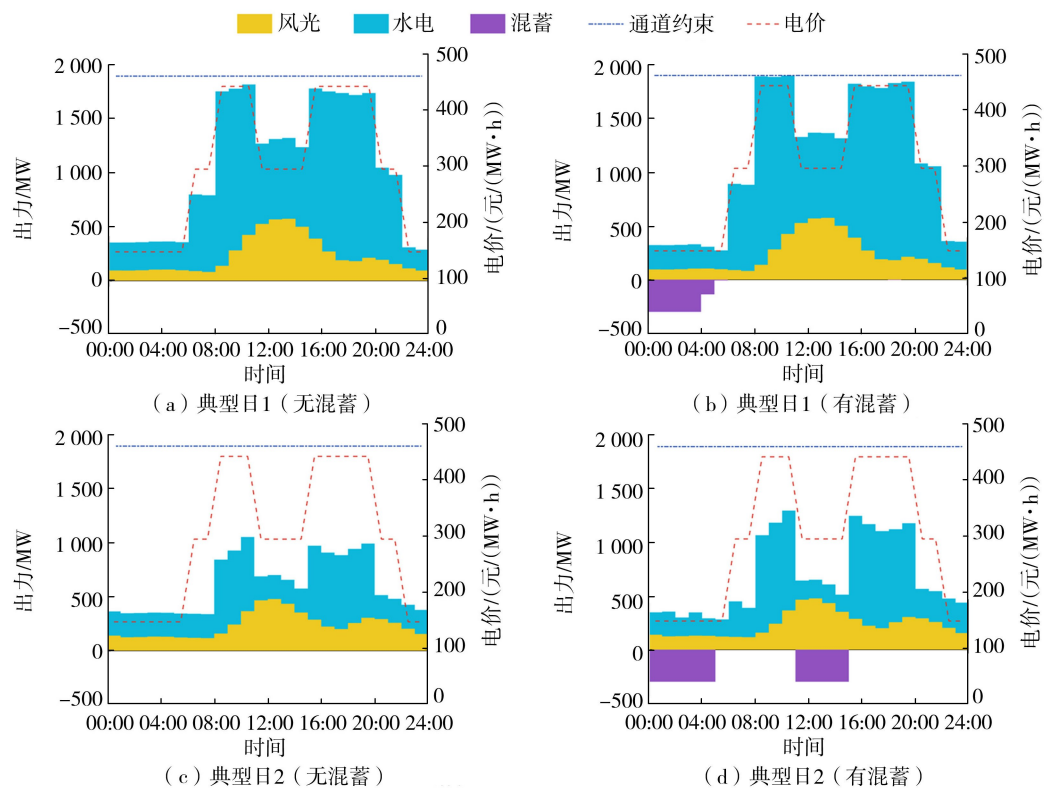


图 5 有、无混蓄电站方案下互补系统的典型日出力过程

Fig. 5 Typical daily output processes of complementary system under schemes with and without hybrid pumped storage power station

不同气象条件下互补系统在有、无混蓄电站时的短期调度过程如图 6 所示。晴天情景下,风光电站在 11:00—15:00 期间出现超通道弃电现象,混蓄电站利用该部分风光出力抽水蓄能,将风光能源转换为水的势能储存起来,在减少风光弃电量的同时提高了水电站的发电量。阴天或雨天情景下,风光出力较小,混蓄电站主要从电网购入低价电能完成抽水蓄能;等到电价高峰时段,由常规水电站并网发电,有效提升了互补系统的整体发电效益。因此在不同气象条件下,混蓄电站可通过灵活调整调度方式,提高新能源利用率和系统发电效益。

4.2.3 运行效益分析

无混蓄、混蓄日调节、混蓄季调节调度方案下互补系统在多年平均代表年内的运行效益指标见表 2。发电效益方面,相比无混蓄方案,混蓄日调节和混蓄季调节调度方案下互补系统的上网电量分别提高了

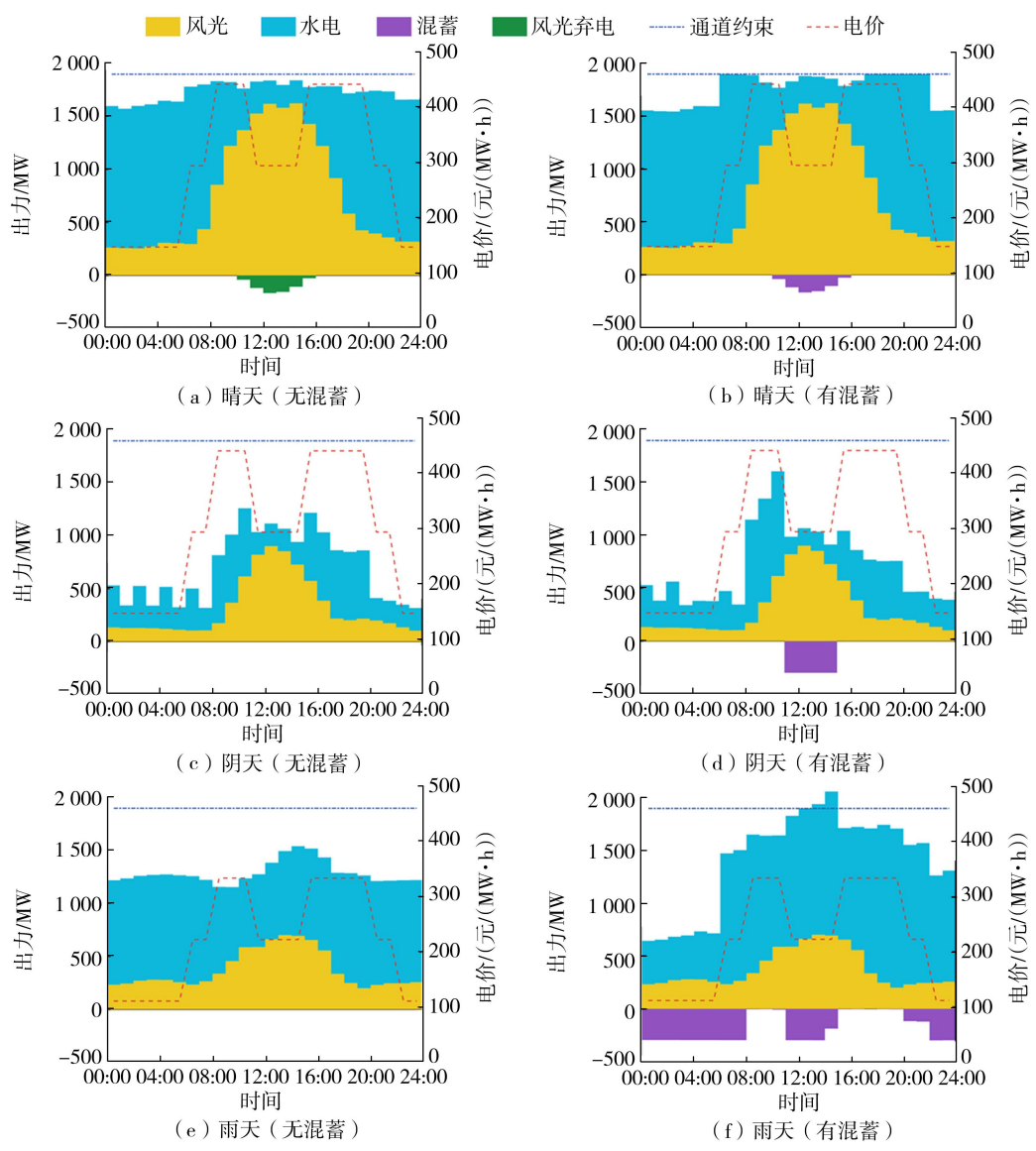


图 6 不同气象条件下有、无混蓄电站方案下互补系统的短期调度过程

Fig. 6 Short-term scheduling processes of complementary system under different meteorological conditions and schemes with and without hybrid pumped storage power station

表 2 互补系统在不同调度方案下的调度结果

Table 2 Scheduling results of complementary system under different scheduling schemes

调度方案	上网电量/ (GW·h)	抽水总耗电 量/(GW·h)	净发电/ (GW·h)	综合能量转换 效率/%	发电效益/ 亿元	风光弃电/ (MW·h)	弃水量/ 亿 m ³
无混蓄	10 547		10 547		30. 39	12 524	4. 06
混蓄日调节	11 070	721	10 537	72. 50	31. 62	78 (−99. 38%)	1. 01 (−75. 12%)
混蓄季调节	11 115	716	10 566	79. 38	31. 71	79 (−99. 37%)	0. 27 (−93. 35%)

注:括号内百分数为混蓄调度方案相对于无混蓄方案的变化率。

4. 96%和 5. 39%,扣除从电网购电的抽水电量后净发电量有所减小,这是由于混蓄电站的抽水发电过程存在能量损耗,但在分时电价的引导下,系统年发电效益同比增长了 4. 05%和 4. 34%。混蓄电站带来的增量效益一方面来自风光能源弃电量的利用,通过风光弃电量抽水蓄能,可减少累计风光弃电量约 99%,在增加上水库可用水量的同时降低了抽水成本;另一方面,混蓄电站通过在低电价时期抽水,增加常规水电站在高电价时期的发电量,实现了峰谷价差套利。同时混蓄季调节调度方案通过蓄丰补枯,将部分电量转移到电价较高的枯期,进一步提高系统发电效益。

在防洪效益方面,相对无混蓄电站方案,混蓄季调节调度方案下梯级水库累计弃水量减少约 93. 35%。

分析汛期第三级水电站在某典型日的出力和弃水过程(图 7)可知,无混蓄方案下,由于下游汛以来水较多,加上大规模风光接入进一步挤占水电外送通道,汛期下游产生大量弃水。增建混蓄电站后,一方面,在上水库有空余的条件下,混蓄电站将水抽至上游水库,减少了第二级水库的下泄流量,从而减少了第三级水库的入库流量,相当于增加了下游梯级水库的库容,降低了弃水概率;另一方面,混蓄电站通过消纳风光能源抽水蓄能,缓解了通道竞争,可有效改善弃水现象。

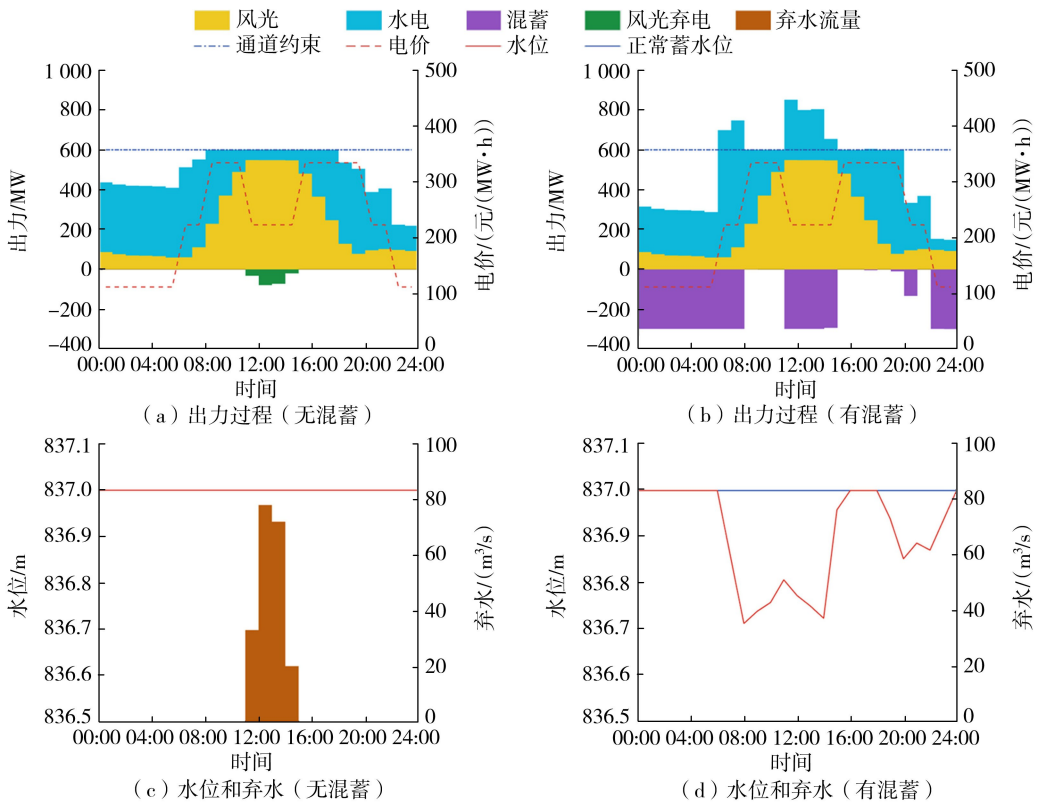


图 7 有、无混蓄电站方案下第三级水电站的出力和弃水过程

Fig. 7 Output and water curtailment processes of third-level hydropower station under schemes with and without hybrid pumped storage power station

在综合能量转换效率(系统上网电量增量/抽水耗电量)方面,相对混蓄日调节方案,季调节方案通过蓄丰补枯增大了梯级水库在枯期的可用水量,使梯级水电站上网电量增加了约 45 GW·h,同时两种方案的抽水耗电量相近,因此该方案下系统的综合能量转换效率更高,提升了约 6.88%。

综上,混蓄电站带来的增量效益主要来自短期尺度的新能源弃电量利用和价差套利作用,采用混蓄季调节调度方案可以优化资源季节性配置,进一步提高互补系统的发电效益、防洪效益和综合能量转换效率。

5 结 论

a. 混蓄电站带来的增量发电效益主要来自短期尺度利用风光弃电量和低价电量实现电量时移和峰谷价差套利,相比无混蓄方案,混蓄日调节方案可提高发电效益 4.05%;混蓄季调节方案通过蓄丰补枯将部分电量转移到电价较高的枯期,可获得更优的发电效益,相比无混蓄方案,其发电效益提升约 4.34%。

b. 混蓄电站通过将下游多余水量提前存储到具有较大库容的上水库,为下游水库提供额外防洪库容,可提高梯级水库的防洪效益,有效改善下游小水库的弃水现象,混蓄季调节方案下水库弃水量相比无混蓄方案减少约 93.35%。

c. 与混蓄日调节方案相比,混蓄季调节方案由于调节周期更长,在汛期能够通过水库蓄水和泵站抽水更快地提高上游水库蓄水量,从而增大了梯级水电站在枯期的可用水量 and 发电量,相应提高了系统的综合能量转换效率。

参考文献:

[1] Gou Haixing, Ma Chao, Liu Lu. Optimal wind and solar sizing in a novel hybrid power system incorporating concentrating solar power and considering ultra-high voltage transmission[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 470: 143361.

[2] 程春田. 碳中和下的水电角色重塑及其关键问题[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(16): 29-36. (Cheng Chuntian. Function remolding of hydropower systems for carbon neutral and its key problems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 29-36. (in Chinese))

[3] 李继清, 龙健, 刘洋. 基于水光电力系统时序生产模拟模型的水光优化配比研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(1): 1-10. (Li Jiqing, Long Jian, Liu Yang. Study on optimal ratio of water and light based on time-series production simulation model of hydro-optical power system[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(1): 1-10. (in Chinese))

[4] Zhang Xinjing, Qin Chao, Loth E, et al. Arbitrage analysis for different energy storage technologies and strategies[J]. Energy Reports, 2021, 7: 8198-8206.

[5] 陈帝伊, 刘公成, 梁潇, 等. 定-变速抽水蓄能机组调相-发电过渡过程动态特性研究[J]. 水利学报, 2023, 54(1): 105-116. (Chen Diyi, Liu Gongcheng, Liang Xiao, et al. Study on dynamic characteristics of phase modulation-generation transition process of fixed-speed and variable-speed pumped-storage units [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(1): 105-116. (in Chinese))

[6] Xu Xiao, Hu Weihao, Cao Di, et al. Optimized sizing of a standalone PV-wind-hydropower station with pumped-storage installation hybrid energy system[J]. Renewable Energy, 2020, 147: 1418-1431.

[7] Wang Zhenni, Fang Guohua, Wen Xin, et al. Coordinated operation of conventional hydropower plants as hybrid pumped storage hydropower with wind and photovoltaic plants[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 277: 116654.

[8] 罗小林, 黄莉, 吴赛男, 等. “双碳”目标存量水电灵活性提升路径与评估框架[J]. 水电与抽水蓄能, 2023, 9(1): 1-8. (Luo Xiaolin, Huang Li, Wu Sainan, et al. Approaches to expanding flexibility of hydropower to achieve the carbon peaking and carbon neutrality target and their assessment framework[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2023, 9(1): 1-8. (in Chinese))

[9] Toufani P, Nadar E, Kocaman A S. Operational benefit of transforming cascade hydropower stations into pumped hydro energy storage systems[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 51: 104444.

[10] 程雄, 李刚, 程春田, 等. 含混合式抽水蓄能电站的梯级水电站群调度规则建模方法[J]. 水利学报, 2013, 44(4): 388-397. (Cheng Xiong, Li Gang, Cheng Chuntian, et al. Modeling method of operation rules on cascade hydroelectric plants with hybrid pumped storage power station[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(4): 388-397. (in Chinese))

[11] 李文武, 黄进, 郭希海. 含混合式抽蓄电站的梯级水库中长期优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(12): 41-48. (Li Wenwu, Huang Jin, Guo Xihai. Mid-long term optimal dispatch for the cascaded reservoirs operation with hybrid pumped storage power station[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(12): 41-48. (in Chinese))

[12] 黄景光, 黄静梅, 吴巍, 等. 含混合式抽水蓄能电站的梯级水电站优化调度[J]. 水电能源科学, 2020, 38(5): 76-80. (Huang Jingguang, Huang Jingmei, Wu Wei, et al. Optimal dispatching of cascade hydropower station with mixed pumping storage power station[J]. Water Resources and Power, 2020, 38(5): 76-80. (in Chinese))

[13] 曹炯玮, 李想, 魏加华, 等. 梯级水能循环模式下多能系统互补运行研究: 以龙羊峡—拉西瓦基地为例[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(13): 5044-5060. (Cao Jiongwei, Li Xiang, Wei Jiahua, et al. Complementary operation of multi-energy system considering cascade hydropower recycling: a case of the Longyangxia-Laxiwa Base[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(13): 5044-5060. (in Chinese))

[14] Wang Zizhao, Li Yang, Wu Feng, et al. Multi-objective day-ahead scheduling of cascade hydropower-photovoltaic complementary system with pumping installation[J]. Energy, 2024, 290: 130258.

[15] 刘方, 刘建行, 唐成鹏, 等. 梯级“水蓄风光”互补系统增益分配调度策略[J]. 水利经济, 2024, 42(6): 64-70. (Liu Fang, Liu Jianhang, Tang Chengpeng, et al. Gain allocation and dispatch strategy of cascade hydropower-pumping-storage-wind-photovoltaic multi-energy complementary system[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42(6): 64-70. (in Chinese))

[16] Zhang Juntao, Cheng Chuntian, Yu Shen, et al. Preliminary feasibility analysis for remaking the function of cascade hydropower stations to enhance hydropower flexibility: a case study in China[J]. Energy, 2022, 260: 125163.

[17] 明波, 成楸语, 黄强, 等. 梯级互补储能对新能源的长期消纳作用分析[J]. 水利学报, 2022, 53(11): 1280-1290. (Ming Bo, Cheng Qiuyu, Huang Qiang, et al. Analysis of long-term consumption effects of cascade complementary energy storage on new energies[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(11): 1280-1290. (in Chinese))

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.04.014

基于云物元分析的水光互补容量配置方案评价

郭晓茜¹, 黄显峰¹, 吴迪², 李旭³, 周文¹, 方国华¹

(1. 河海大学水利水电学院; 2. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司; 3. 华能澜沧江水电股份有限公司)

摘要: 针对水光互补系统容量配置方案的多属性、多等级、不确定性评价问题, 构建了涵盖安全性、环保性、经济性、技术性 & 社会性 5 个因素层的 3 级评价指标体系, 提出了基于组合赋权与云物元分析法的综合评价模型。该模型通过 AHP-云模型修正确定主客观权重, 引入改进熵权法获取客观权重, 基于欧氏距离实现权重融合, 并运用云物元理论计算方案的各评价等级隶属度与综合评分, 将等级边界从刚性阈值拓展为柔性分布, 从而更合理地刻画评价过程中的随机波动与模糊过渡。澜沧江西藏段清洁能源基地实例验证结果表明: 该模型在多种容量配置方案的比选中表现出良好的区分效果, 评价结果与工程运行特征吻合, 能够有效协调多维度指标间的冲突; 综合评价模型兼顾了权重确定的全面性与等级判定的稳健性, 可为清洁能源基地容量配置提供科学、可靠的决策支持。

关键词: 云物元分析法; 水光互补容量配置; 指标体系; 改进熵权法; 综合评价

Evaluation of hydro-photovoltaic complementary capacity allocation schemes based on cloud matter-element analysis

Guo Xiaoxi¹, Huang Xianfeng¹, Wu Di², Li Xu³, Zhou Wen¹, Fang Guohua¹

(1. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University;

2. POWERCHINA Guiyang Engineering Corporation Limited; 3. Huaneng Lancang River Hydropower Inc.)

Abstract: To address the multi-attribute, multi-level, and uncertain evaluation problem of capacity allocation schemes for hydro-photovoltaic complementary systems, a three-level evaluation index system covering five factor layers of security, environmental protection, economy, technicality, and sociality was constructed, and a comprehensive evaluation model based on combined weighting and cloud matter-element analysis method was proposed. In this model, subjective weights were determined through correction by the AHP-cloud model; objective weights were obtained by introducing the improved entropy weight method; weight fusion was realized based on Euclidean distance. Moreover, the cloud matter-element theory was applied to calculate the membership degrees of each scheme to evaluation grades and the comprehensive scores, expanding the grade boundaries from rigid thresholds to flexible distributions, thereby more reasonably depicting the random fluctuations and fuzzy transitions in the evaluation process. The results of the case verification for the clean energy base in the Xizang section of the Lancang River indicate that the model exhibits a good differentiation effect in the comparison and selection of multiple capacity allocation schemes. The evaluation results are consistent with the engineering operation characteristics, and the conflicts among multi-dimensional indicators can be effectively coordinated. The comprehensive evaluation model considers both the comprehensiveness of weight determination and the robustness of grade judgment, and it can provide scientific and reliable decision support for the capacity allocation of clean energy bases.

Key words: cloud matter-element analysis method; hydro-photovoltaic complementary capacity allocation; index system; improved entropy weight method; comprehensive evaluation

在全球能源体系正加速低碳化演进的背景下, 推动电力系统向高比例新能源接入转型已成为我国能源发展的关键路径^[1-2]。截至 2025 年 3 月, 我国可再生能源装机规模达到 19.66 亿 kW, 约占总装机容量的 57.3%, 其中水电、光伏发电装机分别为 4.38 亿、9.45 亿 kW, 光伏与风电装机规模已历史性超越全口径火电^[3]。然而, 风电、光伏出力的随机性与波动性, 对其大规模可靠并网及电力系统的稳定运行提出了更高要求^[4-7]。《2025 年能源工作指导意见》强调, 需“统筹新能源发展和消纳体系建设”“建立健全配电网发展指

基金项目: 国家自然科学基金项目(52179012); 中国华能集团有限公司总部科技项目(HNKJ20-H20); 中核集团科技项目(XJYH-2024-DL-QT011)

作者简介: 郭晓茜(2003—), 女, 硕士研究生, 主要从事多能互补系统容量配置研究。E-mail: stream0403@163.com

通信作者: 黄显峰(1980—), 男, 副教授, 博士, 主要从事多能系统协同与优化调度研究。E-mail: xfhuang@hhu.edu.cn

标评价体系”。在此背景下,推进多能互补系统建设、优化系统结构与容量配置,已成为提升能源消纳能力与电网支撑效能的关键路径。

水电具有技术成熟、调节灵活的突出优势,是支撑多能互补系统运行的关键调节资源^[8-9]。容量配置作为多能互补系统在规划设计阶段的首要问题,直接决定了系统综合效益^[10]。围绕多能互补系统的优化运行与容量配置,现有研究通常是在综合考虑资源、电网与负荷等多重约束的基础上,以特定目标构建容量配置优化模型,采用优化算法求解以获得最优容量配置方案^[11]。常设定的优化目标有系统总成本最小、发电量最大、净收益最大、能源消纳率最高、负荷波动最小、调峰能力最大等^[12-13]。范志勇等^[14]以运行期内发电量最大为目标,构建了水风光蓄优化运行模型,利用混合整数线性规划进行求解,针对雅鲁藏布江中游区域开展了容量配置;He 等^[15]以金沙江下游为例,构建了以弃电量最小为目标的水光互补系统容量配置模型,并以混沌局部搜索求解了不同输送通道容量下的最优比例;Fang 等^[16]以光伏全寿命期内净收益最大为目标,构建了光伏电站并入水电站的容量配置模型,计算得到龙羊峡水光互补系统在 3 种出力情景下的最佳光伏配比;马超等^[17]以系统发电量最大和总出力波动最小为目标,构建了混合抽蓄-风-光多能互补系统短期协同运行优化模型,并通过全生命周期评价优化容量配置。然而,现有研究在评价维度方面仍存在明显局限,多数研究聚焦于优化互补系统的经济运行效率与供电可靠性,主要采用系统总成本^[18]、年净收益^[19]、平均度电成本^[20]等经济性指标,弃能电量^[21]、失负荷概率^[22]等可靠性指标作为核心评价准则。以水光互补为代表形式的多能互补系统涉及资源禀赋、调度运行、经济成本及综合效益等多重属性,其容量配置需统筹解决出力稳定、能源消纳、投资效率与区域发展等多目标协同问题^[23]。但现有研究对环保性、社会影响等外部效益的系统性考量仍显不足,制约了对方案综合效益的准确评估。因此,构建一套能够全面揭示方案表现的多维评价体系与综合评价模型,已成为实现容量配置科学优选的迫切需求。

评价方法上,国内外学者已采用多种决策方法开展了广泛研究。夏翔等^[24]采用层次分析(AHP)与灰色模糊综合评价方法进行多能互补工程项目的综合效益评价;赵凤展等^[25]结合 G1-CV 法与物元可拓法评估了系统的建设与运行成果;Zhang 等^[26]基于云模型对高比例清洁能源电力系统开展了可靠性评价;Yu^[27]等利用 TOPSIS 法对多能互补离网系统的不同运行方案进行了评估。然而,在应对多能互补系统的多属性、多等级、强不确定性评价问题上,现有评价方法仍难以实现科学、全面的综合分析。云物元分析法耦合了云模型处理模糊-随机共生的数学刻画能力与物元理论解决不相容问题的结构建模优势,能够自然实现定性概念与定量等级间的不确定性转换。当前,该方法在系统优化、安全或风险评估、资源环境管理等领域的复杂决策中展现出良好的适用性^[28],为构建多能互补系统容量配置的综合评价模型提供了新的方法视角。

鉴于此,本文面向清洁能源基地的规划需求,构建了 3 级水光互补容量配置评价指标体系,建立了基于组合赋权与云物元分析法的综合评价模型,并以澜沧江西藏段清洁能源基地为例开展实例验证,实现不同容量配置方案的综合评价与量化优选,以期对相关多能互补系统的容量决策提供技术支撑。

1 水光互补容量配置方案评价指标体系

1.1 评价指标体系的构建

评价指标体系的构建需契合能源安全保障要求、顺应绿色发展导向及市场化改革趋势,水能与光能在时空分布上的互补性要求其能够反映出力的稳定性与灵活性,并动态捕捉多时间尺度下的运行特征演变。该体系的构建核心在于回答“如何科学衡量方案实施水平”这一核心问题。本文遵循“科学性、系统性、可操作性”等多能系统评价的通用原则^[23],以“方案实施水平”为总体目标,从安全性、环保性、经济性、技术性和社会性 5 个维度建立因素层,分别对应系统运行稳定、能源利用高效、投资收益合理、技术效率达标及区域发展促进等核心关注点。通过分析各维度内涵和系统运行特征,参照相关规范及既有研究成果^[4,10],构建了涵盖供需平衡、运行弹性、资源利用、投资强度、电价水平和经济社会贡献等方面的候选指标集,在此基础上通过重要性比较与冗余性筛选,选择 15 项关键指标构建了“目标层-因素层-指标层”3 级水光互补容量配置方案评价指标体系,如图 1 所示。

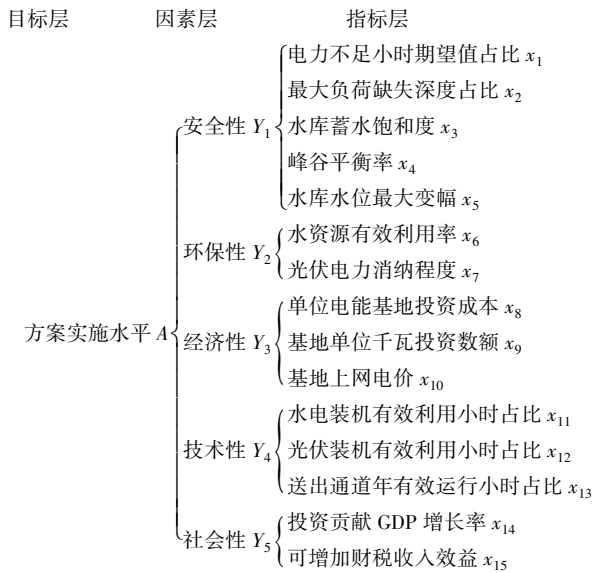


图 1 水光互补容量配置方案评价指标体系

Fig. 1 Evaluation index system for hydro-photovoltaic complementary capacity allocation schemes

1.2 评价指标分级标准

为进行容量配置方案的定量判别与对比,将其实施水平划分为 4 个等级:Ⅰ(优秀)、Ⅱ(良好)、Ⅲ(一般)与Ⅳ(不合格)。基于 NB/T 11554—2024《水风光储可再生能源综合开发项目技术规范》,结合行业数据与相关研究^[20,29],确立了各评价指标分级标准及取值范围(表 1)。

表 1 评价指标分级标准和等级范围划分

Table 1 Grading criteria and grade range classification for evaluation indicators

评价等级	$x_1/\%$	$x_2/\%$	$x_3/\%$	$x_4/\%$	x_5/m	$x_6/\%$	$x_7/\%$	$x_8/(\text{元}/(\text{kW}\cdot\text{h}))$
Ⅰ(优秀)	<20	<70	>45	>55	<3	>95	>95	<3
Ⅱ(良好)	20~<25	70~<80	>35~<45	>45~<55	3~<4	>90~<95	>90~<95	3~<3.3
Ⅲ(一般)	25~<35	80~<90	>25~<35	>35~<45	4~<5	>80~<90	>80~<90	3.3~<3.5
Ⅳ(不合格)	≥35	≥90	≤25	≤35	≥5	≤80	≤80	≥3.5

评价等级	$x_9/\text{元}$	$x_{10}/(\text{元}/(\text{kW}\cdot\text{h}))$	$x_{11}/\%$	$x_{12}/\%$	$x_{13}/\%$	$x_{14}/\%$	$x_{15}/\text{亿元}$
Ⅰ(优秀)	<8 500	>0.4	>55	>20	>75	>55	>50
Ⅱ(良好)	8 500~<9 000	>0.35~<0.4	>50~<55	>15~<20	>65~<75	>50~<55	>45~<50
Ⅲ(一般)	9 000~<9 500	>0.3~<0.35	>40~<50	>10~<15	>60~<65	>45~<50	>40~<45
Ⅳ(不合格)	≥9 500	≤0.3	≤40	≤10	≤60	≤45	≤40

1.3 指标权重

1.3.1 AHP-云模型计算主观权重

为兼顾专家评判蕴含的经验信息,同时表征指标权重存在的不确定性与模糊性,本文先通过 AHP 法求解初始权重,再引入云模型对权重结果优化修正,使其更贴合真实工况。具体计算流程:①基于 AHP 法,通过同层成对比较与一致性检验等计算得到各因素层、指标层权重的初始值,作为云模型的样本输入;②通过逆向云发生器计算云特征参数:期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e ,分别刻画权重的集中趋势、分散程度和稳定性;③基于云特征参数,利用正向云发生器生成大量云滴,求均值得到主观权重。

1.3.2 改进熵权法计算客观权重

熵权法基于信息熵原理量化指标差异程度,属于客观权重赋值法,具体计算步骤如下:

a. 数据标准化。对于各方案的原始评价指标值,采用极值法同向化处理收益型(正向)和损失型(负向)两类指标,得到标准数据矩阵。

b. 根据式(1)计算特征比重。

$$q_{kp} = z_{kp} / \sum_{k=1}^m z_{kp} \quad (k = 1, 2, \cdots, m; p = 1, 2, \cdots, n)$$

(1)

式中: q_{kp} 为方案 k 中指标 p 的特征比重; z_{kp} 为方案 k 中指标 p 的标准取值。

c. 根据式(2)计算各指标熵值 e_p ,由式(3)确定对应熵权 w_{op} 。

$$e_p = - \sum_{k=1}^m q_{kp} \ln q_{kp} / \ln m \tag{2}$$

$$w_{op} = (1 - e_p) / \sum_{p=1}^n (1 - e_p) \tag{3}$$

传统熵权模型存在一定缺陷,当 e_p 接近阈值 1 时,指标间细微的熵值差异将导致熵权产生非线性变化,形成权重坍塌。为此引入线性压缩修正,改进的熵权 w_{ip} 计算公式为:

$$w_{ip} = \frac{\sum_{g=1}^n e_g + 2 - 3e_p}{\sum_{l=1}^n (\sum_{g=1}^n e_g + 2 - 3e_l)} \tag{4}$$

式(4)仍满足 $0 \leq w_{ip} \leq 1$, $\sum_{p=1}^n w_{ip} = 1$ 的权重基本准则,并保持与熵值的负相关关系。改进的熵权公式通过对 e_p 进行线性压缩,将接近 1 区间内的熵值差异“拉平”,抑制了极端熵值对权重的放大效应,能够有效平缓指标间的权重差异,避免极端情况下的权重失真。

1.3.3 欧氏距离法计算组合权重

确定组合权重时,常采用乘法归一化进行处理。然而,在部分指标的主、客观权重差异较大时,该方法常出现偏离原始权重的极端值,导致分配结果产生显著偏差,影响了综合评价的准确性。因此,引入基于欧氏距离的组合权重确定方法,通过其差异度方程计算主客观权重的偏好程度系数,从而确定组合权重:

$$\begin{cases} w_p = uw_{sp} + vw_{ip} \\ u + v = 1 \end{cases} \tag{5}$$

$$\begin{cases} D(w_{sp}, w_{ip}) = \sqrt{(w_{sp} - w_{ip})^2} \\ D(w_{sp}, w_{ip})^2 = (u - v)^2 \end{cases} \tag{6}$$

式中: w_p 为指标 p 的组合权重; w_{sp} 、 w_{ip} 分别为该指标的主观权重和客观权重; u 、 v 分别为主、客观权重的偏好程度系数; $D(w_{sp}, w_{ip})$ 为欧氏距离函数。

2 基于云物元分析的综合评价模型

2.1 云物元模型

容量配置方案的综合评价需在多维指标体系下兼顾结构层次与不确定特性。物元理论以对象主体 N 、属性 C 、量值 V 三大元素构建基础物元 $R=(N, C, V)$,通过设定经典域、节域计算关联度并进行等级判定,具有明确的层次结构和逻辑可追溯性。但在容量配置方案评价场景中,指标取值常受波动与边界模糊影响,单一确定量值难以反映其实际特征。因此,引入云模型参数特征(E_x, E_n, H_e)替代传统量值 V ,使量值由“点”扩展为“分布”,以实现结构层次与不确定性的统一表征。基于此,构建云物元模型如下:

$$R = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N & C_1 & V_1 \\ & C_2 & V_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N & C_1 & (E_{x,1}, E_{n,1}, H_{e,1}) \\ & C_2 & (E_{x,2}, E_{n,2}, H_{e,2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & (E_{x,n}, E_{n,n}, H_{e,n}) \end{bmatrix} \tag{7}$$

期望 E_x 描述 C 在 V 的集中趋势,反映了该指标的典型取值;熵 E_n 度量 C 在 V 上的取值不确定性,体现评价值的分散和边界模糊程度;超熵 H_e 则刻画 E_n 的稳定性, H_e 越大表示评价对象在 C 上的波动性越强。

在水光互补容量配置方案综合评价中,以“方案实施水平”为目标层云物元 $R_0=(Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5)^T$,下设安全性、环保性等 5 个因素层云物元,并映射到指标层,形成“目标层-因素层-指标层”3 级云物元结构。

2.2 关联参数转换

不同等级区间的云参数可由区间上下限转化得到,云模型参数特征可表示为:

$$E_x = (c_{\max} + c_{\min}) / 2 \tag{8}$$

$$E_n = (c_{\max} - c_{\min}) / 6 \tag{9}$$

$$H_e = k' \tag{10}$$

式中: $c_{\max}$ 、 $c_{\min}$ 分别为评价指标在该等级区间的最大值、最小值; k' 为常数,用以控制云层厚度与隶属度扰动程度,可综合评价指标的模糊性与专家评估进行取值调整,一般取 $k'=0.005$ 。

2.3 确定评价等级隶属度

云物元隶属度用于建立评价指标与云物元等级之间的量化对应关系,实现指标值到评价等级的映射,需依次计算评价体系各层级隶属度,逐层汇总后形成方案的等级判定。

a. 计算指标层隶属度。根据各等级区间的云参数特征,将指标量值作为云滴输入,产生正态随机数 $E'_n \sim N(E_x, (H_e)^2)$,进而可得到该指标对各评价等级的隶属度:

$$E'_n = \text{random}(1)H_e + E_n \tag{11}$$

$$\mu_j(I_{ih}) = \exp\left[-\frac{(x_{ih} - E_x)^2}{2E_n'^2}\right] \quad (i = 1, 2, \dots, 5; j = 1, 2, 3, 4; h = 1, 2, \dots, n_i) \tag{12}$$

式中: $\text{random}(1)$ 为服从标准正态分布的随机数; $\mu_j(I_{ih})$ 为因素 Y_i 中指标 h 对评价等级 j 的隶属度; x_{ih} 为该评价指标的量值; n_i 为因素 Y_i 所包含的评价指标总数, $\sum_{i=1}^5 n_i = n = 15$ 。对式(12)多次模拟取均值,作为指标层最终隶属度。

b. 加权合成因素层隶属度。结合第 1.3 节所得权重可得出因素层隶属度为:

$$\mu_j(Y_i) = \sum_{h=1}^{n_i} w_{ih} \mu_j(I_{ih}) \tag{13}$$

式中: $\mu_j(Y_i)$ 为因素 Y_i 对评价等级 j 的隶属度; w_{ih} 为因素 Y_i 中指标 h 的组合权重。

c. 将因素层隶属度加权汇总至目标层,得到目标层云物元的评价等级隶属度为:

$$\mu_j(A) = \sum_{i=1}^5 w_i \mu_j(Y_i) \tag{14}$$

式中: $\mu_j(A)$ 为目标层云物元对评价等级 j 的隶属度; w_i 为因素 Y_i 的权重。

2.4 方案等级判定与评分

基于隶属度最优准则,目标层云物元隶属度最大值 $\max(\mu_j(A))$ 所对应的等级即为容量配置方案实施水平的最终评价等级。

为对方案进行量化排序,引入级别特征值法对方案进行综合评分^[10]。定义等级向量 $g = (g_1, g_2, g_3, g_4)$,取值为(100, 90, 80, 60),待评价方案的综合评分为:

$$T_p = \sum_{j=1}^4 \mu_j(I_p) g_j \tag{15}$$

$$T = \sum_{p=1}^n w_p T_p \tag{16}$$

式中: T_p 为指标 p 在评价等级集下的得分; $\mu_j(I_p)$ 为指标 p 对评价等级 j 的隶属度; g_j 为评价等级 j 所对应的标准分值; T 为待评价方案的综合评分。

综上,基于云物元分析的水光互补容量配置方案综合评价流程如图 2 所示。

3 实例验证

3.1 工程概况

澜沧江上游干流具备典型清洁能源基地特征。流域河道长约 379 km,天然落差 1 080 m,平均比降 2.85‰。水能充沛、径流稳定,适宜布置大中型梯级电站,可提供稳定的调节能力和充足的清洁电力。基地

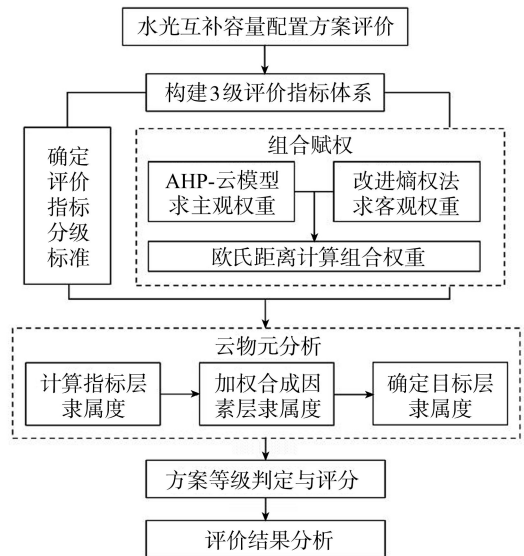


图 2 水光互补容量配置方案评价流程
Fig. 2 Evaluation process for hydro-photovoltaic complementary capacity allocation schemes

光照条件优越,年日照时数约 2 200 h,年总辐射量 5 800~6 700 MJ/m²,稳定度达 0.65,分布均衡,具备建设大规模光伏电站的良好基础。

依托水光资源在时序和空间上表现的明显互补性,该基地适宜建设大型水光互补清洁能源体系。结合水电调节性能、光伏消纳水平、输电通道承载力以及外送需求等多方面约束,最终拟定两档水电配置容量与四档光伏配置容量,记水电容量档集合 $H=\{952.5\text{ 万 kW}, 1\,000\text{ 万 kW}\}$ 、光伏容量档集合 $P=\{1\,000\text{ 万 kW}, 1\,100\text{ 万 kW}, 1\,200\text{ 万 kW}, 1\,400\text{ 万 kW}\}$,通过两集合笛卡尔积共形成 8 种水光互补装机容量配置方案,记为 $H_aP_b(a=1,2;b=1,2,3,4)$,其中 a 、 b 分别为水电、光伏容量档位编号,用于后续综合评价与方案优选。

3.2 水光互补容量配置方案评价

3.2.1 评价指标权重计算

依据所建立的评价指标体系,结合规划资料、相关统计年鉴及仿真计算结果,得到 8 种容量配置方案中各评价指标的初始值。采用第 1.3 节的组合赋权方法获得指标层各类权重。

a. 主观权重计算。采用 AHP-云模型量化专家判断,取云滴权重均值并在同层归一化后得到因素层及指标层权重,结果如图 3 所示。云团越窄、峰值越尖,表明专家判断越一致、权重稳定性越高;云团偏移则反映相对重要性差异。由图 3 可知,各云团整体均呈近似正态,厚度适中,可直观比较不同要素与指标的主观重要性。因素层权重结果为:安全性最高(0.344 0),其次为经济性(0.194 5),环保性与技术性较为接近,分别为 0.167 8、0.162 6,社会性相对较低(0.131 1)。指标层权重依此分配,得到用于评价计算的整体主观权重, H_1P_3 方案的结果见表 2。

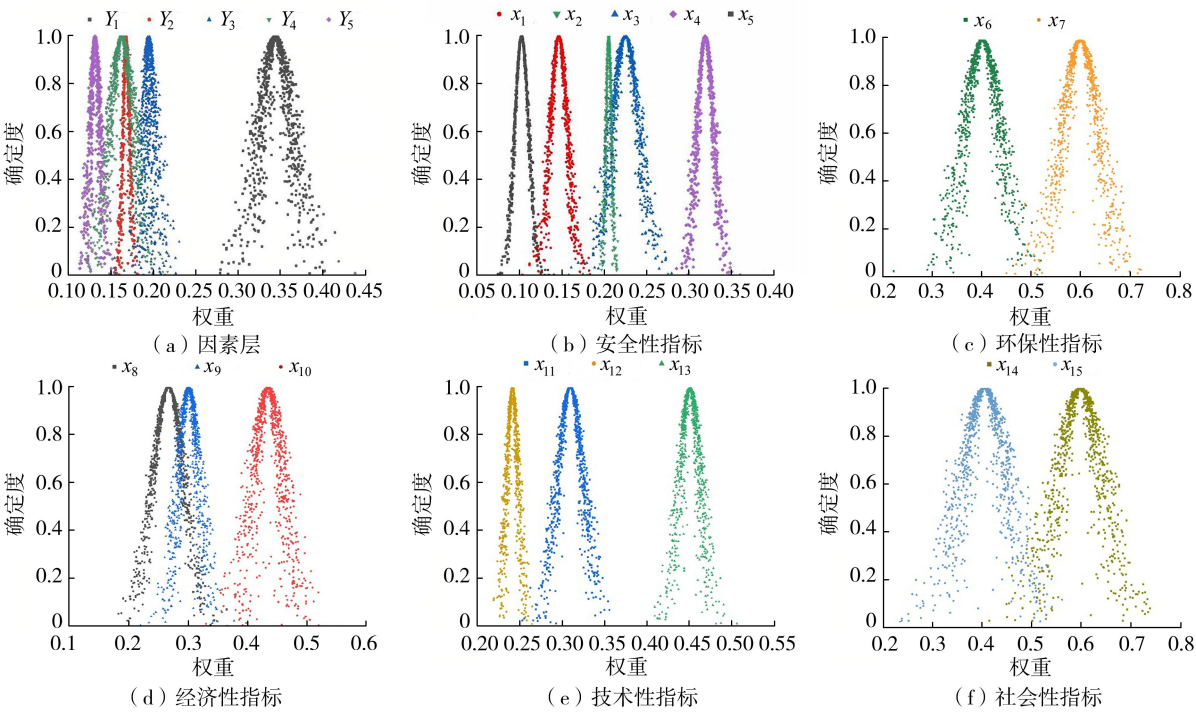


图 3 主客观权重分布

Fig. 3 Distribution of subjective weights

b. 组合权重计算。利用改进熵权法获得指标层客观权重值后,采用欧氏距离进行主、客观权重融合,指标层权重计算结果见表 2。

3.2.2 容量配置方案综合评价结果

采用云物元分析法对水光互补容量配置方案进行评价,计算各方案指标层评价等级隶属度后,依据组合权重逐层汇总,可得到待评价方案在目标层上的隶属度及综合评价等级。以 H_1P_3 方案为例,计算结果见表 2、表 3。依据隶属度最优原则, H_1P_3 方案的安全性因素层评价等级为良好,环保性为优秀,经济性、技术性、社会性因素层评价等级均为良好;该方案在目标层“方案实施水平”的隶属度评价向量为 (0.159 6, 0.765 2, 0.073 5, 0.001 8),判定等级为良好,整体呈现“环保性最优、其余维度稳定良好”的格局。

表 2 H₁P₃ 方案指标层评价等级隶属度

Table 2 Membership degrees of H₁P₃ scheme to evaluation grades at indicator level

因素	指标	主观权重	客观权重	组合权重	指标值	评价等级隶属度				评价等级
						优秀	良好	一般	不合格	
Y ₁	x ₁	0.050 5	0.102 5	0.082 5	23.06%	0.000 6	0.998 9	0.000 2	0.000 3	良好
	x ₂	0.070 7	0.072 2	0.081 3	73.40%	0.007 0	0.993 0	0.000 0	0.000 0	良好
	x ₃	0.077 5	0.053 6	0.066 2	40.02%	0.001 9	0.998 1	0.000 0	0.000 0	良好
	x ₄	0.109 8	0.035 3	0.061 7	55.69%	0.832 1	0.167 9	0.000 0	0.000 0	优秀
	x ₅	0.035 5	0.052 6	0.029 7	3.77 m	0.000 0	0.999 5	0.000 3	0.000 2	良好
Y ₂	x ₆	0.067 3	0.095 2	0.102 1	96.64%	0.999 8	0.000 0	0.000 0	0.000 2	优秀
	x ₇	0.100 5	0.039 8	0.063 7	93.39%	0.000 0	0.999 4	0.000 0	0.000 6	良好
Y ₃	x ₈	0.070 6	0.043 4	0.048 8	3.25 元/(kW·h)	0.015 9	0.979 6	0.002 0	0.002 5	良好
	x ₉	0.048 8	0.039 5	0.030 7	8 921 元	0.000 0	0.996 6	0.003 4	0.000 0	良好
	x ₁₀	0.043 3	0.162 1	0.111 8	0.379 2 元/(kW·h)	0.004 1	0.994 6	0.001 2	0.000 1	良好
Y ₄	x ₁₁	0.060 1	0.064 5	0.061 8	48.46%	0.004 8	0.000 1	0.994 2	0.000 9	一般
	x ₁₂	0.046 7	0.054 0	0.040 2	18.54%	0.017 0	0.983 0	0.000 0	0.000 0	良好
	x ₁₃	0.087 7	0.068 4	0.095 6	69.45%	0.000 1	0.999 5	0.000 0	0.000 4	良好
Y ₅	x ₁₄	0.078 2	0.062 8	0.078 2	51.47%	0.005 2	0.993 6	0.000 0	0.001 2	良好
	x ₁₅	0.052 9	0.054 2	0.045 7	45.13 亿元	0.060 5	0.653 1	0.255 9	0.030 5	良好

表 3 H₁P₃ 方案评价等级结果

Table 3 Evaluation grade results of H₁P₃ scheme

因素	评价向量	评价等级
Y ₁	(0.162 2, 0.837 7, 0.000 1, 0.000 0)	良好
Y ₂	(0.615 5, 0.384 1, 0.000 0, 0.000 4)	优秀
Y ₃	(0.006 5, 0.991 1, 0.001 7, 0.000 7)	良好
Y ₄	(0.005 0, 0.683 6, 0.310 9, 0.000 5)	良好
Y ₅	(0.025 6, 0.868 1, 0.094 3, 0.012 0)	良好

各容量配置方案的目标层评价等级隶属度及综合评分结果见表 4。8 种方案的评价等级主要集中Ⅱ级,部分位于Ⅲ级,方案整体实施水平良好。方案集综合评分位于 86.78~90.81 分区间,其中 H₁P₃ 方案(水电 952.5 万 kW+光伏 1 200 万 kW)评分最高(90.81 分),其次为 H₂P₄(90.05 分)、H₁P₄(89.89 分),P₁ 组评分相对靠后。H₁、H₂ 组内比较,即在水电容量固定情况下,方案由 P₁ 向 P₃、P₄ 演进时,Ⅰ、Ⅱ级隶属度整体上升,综合评分普遍提升约 2~4 分;而在光伏规模固定时,两水电容量档位之间差异较小。与水电容量相比,提高光伏配置规模对等级提升更为明显,主要原因为 在既定来水和通道约束下,水电装机已基本匹配可利用水量,扩容的边际效益有限;而增加光伏规模可显著提升光伏消纳和水资源利用效率,并抬升其他因素层得分。

表 4 各容量配置方案目标层评价等级隶属度

Table 4 Membership degrees of various capacity allocation schemes to evaluation grades at target level

容量配置方案	评价等级隶属度				综合评分
	Ⅰ(优秀)	Ⅱ(良好)	Ⅲ(一般)	Ⅳ(不合格)	
H ₁ P ₁	0.169 1	0.371 3	0.453 3	0.006 3	86.97
H ₁ P ₂	0.082 3	0.673 6	0.238 6	0.005 5	89.07
H ₁ P ₃	0.159 6	0.765 2	0.073 4	0.001 8	90.81
H ₁ P ₄	0.131 9	0.642 4	0.172 1	0.053 6	89.89
H ₂ P ₁	0.168 4	0.351 5	0.475 5	0.004 6	86.78
H ₂ P ₂	0.111 1	0.631 3	0.254 3	0.003 3	89.67
H ₂ P ₃	0.122 2	0.689 2	0.187 1	0.001 5	89.81
H ₂ P ₄	0.131 2	0.608 8	0.257 4	0.002 6	90.05

3.2.3 评价结果分析

H₁P₃ 容量配置方案在容量配置评价体系下的综合评分最高,为 8 个容量配置方案中的最优选择。该容量组合与清洁能源基地“水电以调节为主、光伏规模化消纳”的总体思路相契合,符合基地总体建设规划,体现了评价模型在安全、经济、环保等多维目标权衡中的工程适用性。为识别优势指标与可能的约束环节,围绕 H₁P₃ 方案,结合其指标层评价等级隶属度结果,按因素层逐一开展机理性分析。

a. 方案安全性(Y_1)因素层下,峰谷平衡率(x_4)评价等级为优秀,客观体现了水光互补系统在电力调峰与平抑电网负荷波动方面成效显著,带动了清洁消纳与系统调节能力的同步提升,支撑了系统的安全稳定。电力不足小时期望值占比(x_1)评价等级为良好,表明系统有效降低了短时失供频次,保障了供电稳定。最大负荷缺失深度占比(x_2)为良好,说明系统的优化调控能将负荷缺失控制在较低水平,提高了用电可靠性。水库蓄水饱和度(x_3)评价等级为良好,反映库容利用与发电时序匹配合理,年调节水库能迅速形成可支配水量,为光伏出力提供时移承载并增强互补调节弹性。水库水位最大变幅(x_5)同为良好,显示在水光互补系统协同运行下,库水位过程线较为平缓,增强了系统的稳定性和电力支撑能力。安全性因素层评价结果表明:水电协同调节能够显著抑制光伏波动,改善供应缺口状况,凸显了水光互补对系统安全边界的积极作用。

b. 方案环保性(Y_2)这一因素层的评定等级为优秀,其中,水资源有效利用率(x_6)、光伏电力消纳程度(x_7)评价等级分别为优秀、良好,该结果表明,清洁能源基地在水光协同运行机制下实现了对水能与太阳能的高效利用,该机制在无需额外环境代价的前提下,扩大了清洁电量的就地消纳规模,优化了能源利用结构与环境绩效,进一步巩固了清洁能源基地的低碳属性。

c. 方案经济性(Y_3)因素层下,单位电能基地投资成本(x_8)评价等级为良好,水光资源的联合优化能够提升等效利用小时,减少冗余配置,从而降低了基地的初始投资强度。基地单位千瓦投资数额(x_9)和基地上网电价(x_{10})评价等级为良好,得益于光伏就地消纳率的提高与出力波动显著收敛,提升了基地的发电盈利能力。总体而言,该方案在经济性维度形成了“高利用-低损失-稳收益”的组合优势,经济性作为市场竞争力的关键将有力促进基地的建设和推广。

d. 方案技术性(Y_4)因素层下,水电装机有效利用小时占比(x_{11})评价等级为一般,光伏装机有效利用小时占比(x_{12})和送出通道年有效利用小时占比(x_{13})的评价等级为良好,表明在水光互补优化下,系统整体可用性与送出保障较强,但由于负荷端需求变化及光伏波动性等叠加影响,部分时段内水电机组和光伏机组未得到有效利用。技术性维度是将资源禀赋转化为稳定、可调的供电能力的关键环节,可通过滚动预测与分时联调、机组运行节奏优化、视需要引入储能或需求响应等措施进一步强化。

e. 方案社会性(Y_5)因素层下,投资贡献 GDP 增长率(x_{14})和可增加财税收入效益(x_{15})的评价等级均为良好,表明清洁能源基地不仅有利于提升能源的有效利用,还能间接对区域经济财政形成拉动效应,带动就业与产业配套,为区域经济与公共财政带来积极外溢价值。方案的社会性反映了当地人民及政府对清洁能源基地规划建设的认可度,其优势与其他维度相互支撑,体现出综合公共效益。

综上所述, H_1P_3 方案在各因素层表现均衡且较为突出,充分彰显了水光互补的综合优势,验证了评价模型在工程实践中的合理性和适用性,可为清洁能源基地水光互补容量配置方案的优选及多层次因素评估提供参考。后续可因地制宜挖掘水电与光伏的差异化特性,以进一步巩固提升系统运行成效。

4 结 语

构建了 1 个核心目标、5 个因素层、15 项指标的 3 级综合评价指标体系,突破了传统评价多侧重于经济与技术性能的局限,为全面衡量容量配置方案的综合效益提供了系统的框架基础。提出了结合组合赋权与云物元分析法的综合评价模型,有效融合了决策者的经验判断与指标数据的内在规律。AHP-云模型与改进熵权法的结合,兼顾了权重分配的主观偏好与客观差异性;云物元理论的引入,则科学刻画了评价等级边界的模糊性与随机性,使方案优选更加合理准确。实例验证中,8 种容量配置方案的综合评分范围为 86.78~90.81,整体实施水平较高。横向对比显示,固定水电规模下,适当提高光伏容量配置可提升综合评分 2~4 分,光伏规模的扩大对等级提升的影响更为明显。该模型在澜沧江清洁能源基地的实践中具有良好的适用性与解释力,可作为清洁能源基地容量配置优选、比选与阶段性复核的实用性工具。未来可结合多源数据持续校正分级阈值,进一步扩展至含风电、储能等更为复杂的多能互补系统评价中,并与动态调度运行相结合,以构建全周期的评价与优化机制。

参考文献:

[1] 陈述,陈琼,任康,等. 考虑新能源消纳的黄河上游水电站群生态优化调度研究[J]. 水资源保护,2024,40(3):20-27.
(Chen Shu, Chen Qiong, Ren Kang, et al. Ecological optimal scheduling of hydropower stations on the upper Yellow River

- considering renewable energy accommodation[J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(3): 20-27. (in Chinese))
- [2] 王立平, 马实一, 郭旭, 等. 风电光伏发电抽水蓄能联合优化调度方法[J]. *水利经济*, 2024, 42(6): 58-63. (Wang Liping, Ma Shiyi, Guo Xu, et al. Wind power-photovoltaic power generation-pumped storage joint optimal scheduling method[J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2024, 42(6): 58-63. (in Chinese))
- [3] 李晓峰, 刘玉宏, 王晓, 等. 具备主动支撑能力和灵活调节能力的光储集成同步发电机技术研究[J]. *动力工程学报*, 2025, 45(10): 1557-1572. (Li Xiaofeng, Liu Yuhong, Wang Xiao, et al. Study on photovoltaic-energy storage virtual synchronous generator technology with active grid support and flexible regulation capabilities[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2025, 45(10): 1557-1572. (in Chinese))
- [4] 尹丽君, 许昌, 黄显峰, 等. 水光互补基地水库调度图绘制及应用策略[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(5): 65-69. (Yin Lijun, Xu Chang, Huang Xianfeng, et al. Drawing and application strategy of dispatching diagram for water-light complementary base reservoir[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2023, 51(5): 65-69. (in Chinese))
- [5] 张验科, 罗笙月, 卢垚键, 等. 风光混蓄长周期互补发电优化调度研究[J]. *水利水电科技进展*, 2025, 45(4): 60-66. (Zhang Yanke, Luo Shengyue, Lu Yaojian, et al. Research on optimal operation for long-term complementary power generation of wind-photovoltaic-hybrid storage system[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2025, 45(4): 60-66. (in Chinese))
- [6] 黄显峰, 黄晗, 鲜于虎成, 等. 源-荷匹配机制下的水光互补系统中长期与短期嵌套优化调度模型[J]. *水利水电科技进展*, 2025, 45(2): 38-45. (Huang Xianfeng, Huang Han, Xianyu Hucheng, et al. Mid-long term and short term nested optimal scheduling model of hydro-photovoltaic complementary system considering source-load matching mechanism[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2025, 45(2): 38-45. (in Chinese))
- [7] 张晓会, 王丹彤. 基于《2025 年能源工作指导意见》的思考[J]. *电池*, 2025, 55(3): 561-564. (Zhang Xiaohui, Wang Dantong. Thoughts based on the *Guidance on Energy Work in 2025*[J]. *Battery Bimonthly*, 2025, 55(3): 561-564. (in Chinese))
- [8] 方国华, 王海政, 吴承君, 等. 考虑弃水风险的梯级水库中长期多目标优化调度研究[J]. *水资源保护*, 2024, 40(6): 20-27. (Fang Guohua, Wang Haizheng, Wu Chengjun, et al. Study on mid-and long-term multi-objective optimal operation of cascade reservoirs considering water abandonment risk[J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(6): 20-27. (in Chinese))
- [9] 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))
- [10] 黄显峰, 周引航, 张启凡, 等. 基于云模型的水光互补清洁能源基地容量配置方案优选[J]. *水利水电科技进展*, 2024, 44(1): 44-51. (Huang Xianfeng, Zhou Yinhang, Zhang Qifan, et al. Capacity allocation scheme optimization based on cloud model for a hydro-photovoltaic complementary clean energy base[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2024, 44(1): 44-51. (in Chinese))
- [11] 陈祥鼎, 刘攀, 吴迪, 等. 水风光互补系统装机容量配置解析优化及敏感性分析[J]. *水利学报*, 2023, 54(8): 978-986. (Chen Xiangding, Liu Pan, Wu Di, et al. Analytical optimization and sensitivity analysis of installed capacity configuration of hydro-wind-photovoltaic complementary systems[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2023, 54(8): 978-986. (in Chinese))
- [12] 李继清, 龙健, 刘洋. 基于水光电力系统时序生产模拟模型的水光优化配比研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2024, 52(1): 1-10. (Li Jiqing, Long Jian, Liu Yang. Study on optimal ratio of water and light based on time-series production simulation model of hydro-optical power system[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2024, 52(1): 1-10. (in Chinese))
- [13] 韩晓言, 丁理杰, 陈刚, 等. 梯级水光蓄互补联合发电关键技术与研究展望[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(13): 2709-2722. (Han Xiaoyan, Ding Lijie, Chen Gang, et al. Key technologies and research prospects for cascaded hydro-photovoltaic-pumped storage hybrid power generation system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(13): 2709-2722. (in Chinese))
- [14] 范志勇, 原文哲, 唐莉华, 等. 雅江中游流域水风光蓄布局及容量配置优化研究[J]. *水力发电学报*, 2025, 44(9): 27-37. (Fan Zhiyong, Yuan Wenzhe, Tang Lihua, et al. Optimizing layout and capacity allocation for hydroelectric-wind-photovoltaic-pumped storage system in middle Yarlung Zangbo River basin[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2025, 44(9): 27-37. (in Chinese))
- [15] He Yaoyao, Hong Xiaoyu, Wang Chao, et al. Optimal capacity configuration of the hydro-wind-photovoltaic complementary system considering cascade reservoir connection[J]. *Applied Energy*, 2023, 352: 121927.
- [16] Fang Wei, Huang Qiang, Huang Shengzhi, et al. Optimal sizing of utility-scale photovoltaic power generation complementarily

operating with hydropower;a case study of the world's largest hydro-photovoltaic plant[J]. *Energy Conversion and Management*, 2017,136:161-172.

[17] 马超,刘璐,练继建,等. 基于综合评价的混合抽蓄-风-光多能互补系统容量优化配置研究[J]. *水利学报*,2025,56(6): 726-738. (Ma Chao,Liu Lu,Lian Jijian,et al. Research on capacity design for hybrid pumped storage-wind-PV power system based on comprehensive evaluation[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*,2025,56(6):726-738. (in Chinese))

[18] 王筱,李高青,姬生才,等. 计及风光不确定性的互补发电系统容量优化配置研究[J]. *动力工程学报*,2024,44(11):1750-1759. (Wang Xiao,Li Gaoqing,ji Shengcai,et al. Research on optimal capacity configuration of complementary power generation system considering wind-solar uncertainty[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*,2024,44(11):1750-1759. (in Chinese))

[19] 赵宇洋,赵钰欢,郭英军,等. 离网型风光氢储系统容量配置与控制优化[J]. *太阳能学报*,2024,45(7):50-59. (Zhao Yuyang,Zhao Yuhuan,Guo Yingjun,et al. Capacity configuration and control optimization of off-grid wind solar hydrogen storage system[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*,2024,45(7):50-59. (in Chinese))

[20] 袁文楠,黄显峰,鲜于虎成,等. 基于客观权重赋权-优劣解距离法的水光互补能源基地补偿效益分摊[J]. *电网技术*, 2024,48(5):2003-2011. (Yuan Wennan,Huang Xianfeng,Xianyu Hucheng,et al. Compensation benefit sharing of hydro-photovoltaic complementary energy based on critic-topsis method[J]. *Power System Technology*,2024,48(5):2003-2011. (in Chinese))

[21] 李宁,齐尚敏,刘海洋,等. 基于机组出力特征解析的风光储联合规划[J]. *热力发电*,2022,51(8):91-98. (Li Ning,Qi Shangmin,Liu Haiyang,et al. Wind power-photovoltaic-energy storage joint planning based on unit output characteristic analysis [J]. *Thermal Power Generation*,2022,51(8):91-98. (in Chinese))

[22] 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))

[23] 屈小云,吴鸣,李奇,等. 多能互补综合能源系统综合评价研究进展综述[J]. *中国电力*,2021,54(11):153-163. (Qu Xiaoyun,Wu Ming,Li Qi,et al. Review on comprehensive evaluation of multi-energy complementary integrated energy systems [J]. *Electric Power*,2021,54(11):153-163. (in Chinese))

[24] 夏翔,方建亮,谢颖捷,等. 基于层次分析与灰色模糊综合评价的多能互补工程项目综合效益评估[J]. *济南大学学报(自然科学版)*,2020,34(1):76-84. (Xia Xiang,Fang Jianliang,Xie Yingjie,et al. Comprehensive benefit evaluation of multi-energy complementary engineering project based on analytic hierarchy process and gray fuzzy comprehensive evaluation[J]. *Journal of University of Jinan (Science and Technology)*,2020,34(1):76-84. (in Chinese))

[25] 赵凤展,李奇,张启承,等. 多能互补能源系统多维度综合评价方法[J]. *农业工程学报*,2021,37(17):204-210. (Zhao Fengzhan,Li Qi,Zhang Qicheng,et al. Multi-dimensional comprehensive evaluation of multi-energy complementary energy system [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*,2021,37(17):204-210. (in Chinese))

[26] Zhang Bin,Xu Longxun,Shu Hongchun,et al. A cloud model-based optimal combined weighting framework for the comprehensive reliability evaluation of power systems with high penetration of renewable energies[J]. *Sustainability*,2025,17(5):2273.

[27] Yu Lei,Yan Xiaobin,Yang Shenhao,et al. Comprehensive benefit evaluation analysis of multi-energy complementary off-grid system operation[J]. *Energies*,2025,18(9):2159.

[28] 魏盛宇,梁文彪,翟越,等. 基于博弈论组合赋权云物元模型的城市道路交通系统风险评价[J]. *科学技术与工程*,2024,24(10):4359-4367. (Wei Shengyu,Liang Wenbiao,Zhai Yue,et al. Risk evaluation of urban road transportation system based on cloud matter element model of game theory combination[J]. *Science Technology and Engineering*,2024,24(10):4359-4367. (in Chinese))

[29] 顾建伟,高洁,刘一兵,等. “双碳”目标下我国风光水火储多能互补标准体系研究[J]. *中国标准化*,2025(6):77-86. (Gu Jianwei,Gao Jie,Liu Yibing,et al. Research on standards system of wind/solar/hydro/thermal/storage multi-energy complementary project under carbon peaking and carbon neutrality goals in China[J]. *China Standardization*,2025(6):77-86. (in Chinese))

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.04.015

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

郭金鹏, 邹 苹, 潘学萍, 张海燕, 孙晓荣

(河海大学电气与动力工程学院)

摘要: 针对新能源电力系统无功补偿配置多基于单一运行场景,且常基于单目标优化算法进行求解的问题,提出同时考虑多运行场景和多优化目标的无功补偿配置方法。该方法考虑风电出力的随机性,采用蒙特卡罗采样法和 K -means 聚类法生成典型风电出力场景,以系统电压偏差、有功网损和无功补偿设备配置成本为优化目标,以无功补偿设备安装位置和补偿容量为优化变量,以功率潮流、节点电压、电源出力为约束,建立多个典型风电出力场景下无功补偿设备的优化配置模型,同时利用多目标粒子群算法求解优化配置模型,得到无功补偿设备最优安装位置及补偿容量。含风电 IEEE39 节点系统的仿真分析结果表明:在系统多运行场景下,本文无功补偿配置方法可以有效降低系统电压偏差和有功网损,且配置方案更具多样性。

关键词: 无功补偿装置;多运行场景;多目标优化;有功网损;配置成本

Research on siting and sizing of reactive power compensation devices considering multiple operating scenarios and multiple optimization objectives in new energy power systems

Guo Jinpeng, Zou Luo, Pan Xueping, Zhang Haiyan, Sun Xiaorong

(School of Electrical and Power Engineering, Hohai University)

Abstract: To address the problem that the reactive power compensation configuration of new energy power systems is mostly based on a single operating scenario and is often solved by single-objective optimization algorithms, a reactive power compensation configuration scheme considering multiple operating scenarios and multiple optimization objectives simultaneously was proposed. Considering the randomness of wind power output, typical wind power output scenarios were generated by the Monte Carlo sampling method and K -means clustering method. An optimal configuration model of reactive power compensation devices under multiple typical wind power output scenarios was established by taking system voltage deviation, active power loss, and configuration cost of reactive power compensation devices as optimization objectives, taking installation locations and compensation capacities of reactive power compensation devices as optimization variables, and setting power flow, node voltages, and power source outputs as constraints. At the same time, a multi-objective particle swarm optimization algorithm was used to solve the optimal configuration model to obtain the optimal installation locations and compensation capacities of reactive power compensation devices. The simulation analysis on the IEEE 39-node system with wind power shows that under multiple operating scenarios of the system, the proposed reactive power compensation configuration method can effectively reduce system voltage deviation and active power loss, and the configuration schemes are more diverse.

Key words: reactive power compensation devices; multiple operating scenarios; multi-objective optimization; active power loss; configuration cost

随着绿色能源的快速发展,新型电力系统呈现“多源互补、源网协同”的特点^[1-4]。大规模风机并网与直流输电规模持续扩张,使得电网无功需求显著攀升,系统电压稳定运行也面临严峻挑战。目前电力系统中常用的无功补偿装置有并联电容器、调相机、静止无功补偿器(static var compensator, SVC)和静止同步发生器(static synchronous compensator, STATCOM)等电力电子设备。相比于 SVC, STATCOM 能够在系统电压宽幅波动区间内维持恒定无功出力,无功功率可在感性至容性区间实现连续平滑调节,同时具备响应速度快、设

基金项目: 国家自然科学基金项目(52477089);国家自然科学基金青年科学基金项目(52407094)

作者简介: 郭金鹏(1992—),男,副教授,博士,主要从事新型电力系统稳定分析和控制研究。E-mail:jinpeng.guo@hhu.edu.cn

通信作者: 潘学萍(1972—),女,教授,博士,主要从事新能源电力系统建模与分析研究。E-mail:xueping_pan@163.com

备占地少等突出优势^[5];与调相机相比,STATCOM 无励磁低励限制约束,动态无功支撑性能更优,对稳态过电压的抑制效果更佳^[6],因此针对含新能源出力的电力系统,开展 STATCOM 优化配置研究十分必要。

针对无功补偿装置的选址定容问题,现有研究大多通过构建数学优化模型进行求解。赵天骐等^[7]采用权重法将电压偏差和系统有功网损转化为单一目标,用鱼群算法对系统稳态无功进行优化;陈春萌等^[8]用加权法将系统无功损耗和电压稳定度两个目标转化为单一目标进行优化,利用改进的粒子群算法求解优化模型以确定无功补偿容量;于佰建等^[9]以系统有功网损最小为基本优化目标,同时引入饱和函数将 PQ 节点的电压偏差和 PV 型火电机组的无功偏差作为优化子目标,用权重法将两者相加形成单个目标函数,最后用萤火虫算法对地区电网无功电压进行优化;Hadavi 等^[10]以晶闸管控制串联电容器的补偿费用为优化目标,将母线的电压约束及线路的传输极限转化为惩罚函数,利用权重法将两者结合建立单一目标优化模型,然后采用遗传算法对晶闸管控制串联电容器的配置问题进行了优化。上述文献虽然都考虑了多个优化目标,但在求解过程中均通过加权或简单相加的方式将多目标优化转化为单一目标优化问题,存在权重赋值主观性强、单个目标及其关系信息易丢失等问题。此外,在现有的无功补偿装置优化配置研究中考虑新能源出力不确定性的研究也较少。

针对新能源出力不确定性的研究,多采用场景采样方法和场景缩减技术对新能源出力进行建模^[11]。常用的场景采样方法有蒙特卡罗采样法^[12]、拉丁超立方采样方法^[13]等,常用的场景缩减技术有快速前向选择法、后向削减法和聚类法等。其中蒙特卡罗采样法和 K-means 聚类法具有适用性广泛、计算效率高等优点^[14]。Sannigrahi 等^[15]采用蒙特卡罗采样法和 K-means 聚类法对系统负荷和新能源出力的不确定性进行场景分析,并以此为基础建立主动配电系统的规划模型;孙汝羿等^[16]采用蒙特卡罗采样法和 K-means 聚类法生成分布式电源日出力场景,并在多场景下对有源配电网的参数进行优化;陈建华等^[17]用蒙特卡罗采样法生成分布式电源出力场景和负荷需求场景,并运用到配电网的孤岛划分中。但在无功补偿装置优化配置方面,基于蒙特卡罗采样法和 K-means 聚类法考虑多运行场景的研究还有所欠缺。

本文采用场景分析法对含风电电力系统 STATCOM 的选址定容问题进行研究,首先采用蒙特卡罗采样法和 K-means 聚类法生成典型风电出力场景;然后以系统电压偏差、有功网损和无功补偿设备配置成本为优化目标,以无功补偿设备安装位置和补偿容量为优化变量,以功率潮流、节点电压、电源出力为约束,建立多个典型风电出力场景下无功补偿设备的优化配置模型。采用多目标粒子群算法对优化配置模型进行求解,并通过风电场接入的 IEEE39 节点系统算例分析验证所提配置方法的有效性和合理性。

1 风电机组不同场景下的出力分析

风电机的出力取决于风速,对于双馈风电机而言,其有功功率输出与风速的关系为:

$$P = \begin{cases} 0 & v < v_{in} \text{ 或 } v > v_{out} \\ 0.5C_p\rho\pi R^2v^3 & v_{in} \leq v \leq v_N \\ P_N & v_N < v \leq v_{out} \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$C_p(\lambda, \theta) = c_1(c_2/\beta - c_3\theta - c_4)e^{-c_5/\beta} + c_6\lambda$$
$$\lambda = R\omega_r/v \quad 1/\beta = 1/(\lambda + 0.08\theta) - 0.035/(\theta^3 + 1)$$

式中: P 、 P_N 分别为风电机的有功功率输出和额定功率; C_p 为风电机的功率系数,为桨距角 θ 和叶尖速比 λ 的非线性函数; ρ 为空气密度; v 、 v_{in} 、 v_{out} 、 v_N 分别为实际风速、切入风速、切出风速和额定风速; R 为风电机叶片半径; c_1 、 c_2 、 c_3 、 c_4 、 c_5 、 c_6 为系数; β 为计算 λ 的中间变量; ω_r 为风轮的角速度。

双馈风电机正常运行在最大功率跟踪(maximum power point tracking, MPPT)模式下,将 $\lambda = R\omega_r/v$ 代入式(1)得到运行在 MPPT 模式下风电机的有功功率输出:

$$P = \begin{cases} 0 & v < v_{in} \text{ 或 } v > v_{out} \\ 0.5\rho\pi R^5C_{pmax}\omega_r^3/\lambda^3 & v_{in} \leq v \leq v_N \\ P_N & v_N < v \leq v_{out} \end{cases} \quad (2)$$

风速的波动和随机性较大,研究表明风速的分布呈正偏态,可以用威布尔分布函数(Weibull distribution)描述特定地区风速的概率特性:

$$f(v) = (K/C)(v/C)^{K-1}e^{-(v/C)^K} \tag{3}$$

式中: C 、 K 分别为 Weibull 分布的尺度参数和形状参数,可通过风速的实际数据统计近似计算得出。

Weibull 分布的累积分布函数为:

$$F(v) = 1 - e^{-(v/C)^K} \tag{4}$$

结合式(2)~(4)可以得到风电机组有功功率输出的概率分布函数。为了准确反映风电机组有功功率输出的概率分布,采用蒙特卡罗采样法生成 N 个符合 Weibull 分布的随机数;为了提高计算效率且最大限度保持样本的拟合精度,利用 K -means 聚类法对 N 个风速进行聚类生成 N_c 个典型风速,从而得到 S 个风电机组出力的典型场景。

2 STATCOM 的多目标优化配置方案

2.1 目标函数

为使配置方案在改善系统运行特性的同时考虑配置成本的合理性,本文以系统电压偏差最小、总有功网损最小、STATCOM 配置成本最小为目标函数,建立多目标优化模型。

系统电压偏差 f_V 为:

$$f_V = \sum_{c=1}^S w_c \left(\sum_{i=1}^N w_i |U_i - 1| \right) \tag{5}$$

式中: S 为场景总数; w_c 为场景 c 的权重; N 为节点总数; w_i 为系统节点 i 的权重; U_i 为节点 i 的电压幅值。

系统总有功网损 f_{loss} 为:

$$f_{\text{loss}} = \sum_{c=1}^S w_c \sum_{i,j \in N_L} G_{ij} (U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos \theta_{ij}) \tag{6}$$

式中: N_L 为系统支路总数; G_{ij} 、 θ_{ij} 分别为节点 i 和 j 之间的电导和节点电压相角差。

STATCOM 的配置费 C_0 由一次性投资费用和运行维护费用两部分组成^[18],公式为:

$$C_0 = C_T + C_Y = \sum_{c=1}^S w_c \left[\sum_{s=1}^M Q_s C_{\text{ST}} / (1 + \tau)^k + H C_T \right] \tag{7}$$

式中: C_T 为 STATCOM 一次性投资费用; C_Y 为运行维护费用; M 为安装 STATCOM 的总台数; Q_s 为第 s 台 STATCOM 的无功补偿容量; C_{ST} 为 STATCOM 每 kvar 单位容量的价格; τ 为折现率; k 为使用年限; H 为运行费用占投资费用的比例系数。

2.2 约束条件

2.2.1 等式约束条件

各场景下,每个节点需满足有功和无功平衡约束:

$$P_{G,ic} - P_{L,ic} = U_{ic} \sum_{j=1}^N U_{jc} (G_{ij} \cos \theta_{ijc} + B_{ij} \sin \theta_{ijc}) \tag{8}$$

$$Q_{G,ic} + Q_{C,ic} - Q_{L,ic} = U_{ic} \sum_{j=1}^N U_{jc} (G_{ij} \sin \theta_{ijc} - B_{ij} \cos \theta_{ijc}) \tag{9}$$

式中: $P_{G,ic}$ 、 $P_{L,ic}$ 分别为场景 c 下节点 i 的发电机功率输出、有功负荷; $Q_{G,ic}$ 、 $Q_{L,ic}$ 、 $Q_{C,ic}$ 分别为场景 c 下节点 i 的发电机无功出力、无功负荷和 STATCOM 的无功补偿容量; B_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间的电纳; U_{ic} 为场景 c 下节点 i 的电压幅值。

2.2.2 不等式约束条件

各场景下,各节点电压、发电机视在功率、风电机组有功功率输出、STATCOM 的补偿地点、STATCOM 的补偿容量应满足不等式约束条件:

$$\begin{cases} U_{ic,\min} \leq U_{ic} \leq U_{ic,\max} \\ S_{G,ic,\min} \leq S_{G,ic} \leq S_{G,ic,\max} \\ P_{W,ic,\min} \leq P_{W,ic} \leq P_{W,ic,\max} \\ 1 \leq D_{sc} \leq D_{sc,\max} \\ Q_{S,sc,\min} \leq Q_{S,sc} \leq Q_{S,sc,\max} \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, N; s = 1, 2, \dots, M_s) \tag{10}$$

式中: $U_{ic,min}$ 、 $U_{ic,max}$ 分别为场景 c 下节点 i 电压下限值、上限值; $S_{G,ic,min}$ 、 $S_{G,ic,max}$ 、 $S_{G,ic}$ 分别为节点 i 的发电机在场景 c 下视在功率下限值、上限值和该发电机的视在功率; $P_{W,ic,min}$ 、 $P_{W,ic,max}$ 、 $P_{W,ic}$ 分别为节点 i 的风电机在场景 c 下有功功率输出下限值、上限值和该风电机出力; D_{sc} 、 $D_{sc,max}$ 为第 s 台 STATCOM 在场景 c 下的补偿节点编号和补偿节点编号的上限值; $Q_{S,sc,min}$ 、 $Q_{S,sc,max}$ 、 $Q_{S,sc}$ 分别表示第 s 台 STATCOM 在场景 c 下无功补偿下限值、上限值和 STATCOM 的无功补偿。

2.3 优化配置流程

式(5)~(10)构成了计及新能源多出力场景的 STATCOM 的优化配置模型,其本质是一个多元非线性优化问题,待优化的变量为 STATCOM 补偿位置和容量,本文采用多目标粒子群算法(multi-objective particle swarm optimization, MOPSO)对模型进行求解。多目标粒子群算法是一种基于群体智能的优化算法^[19-20],它通过模拟鸟群觅食行为,使粒子在解空间中不断迭代更新,同时考虑多个目标函数,以寻找多个目标之间的 Pareto 前沿解集。优化配置流程如图 1 所示。

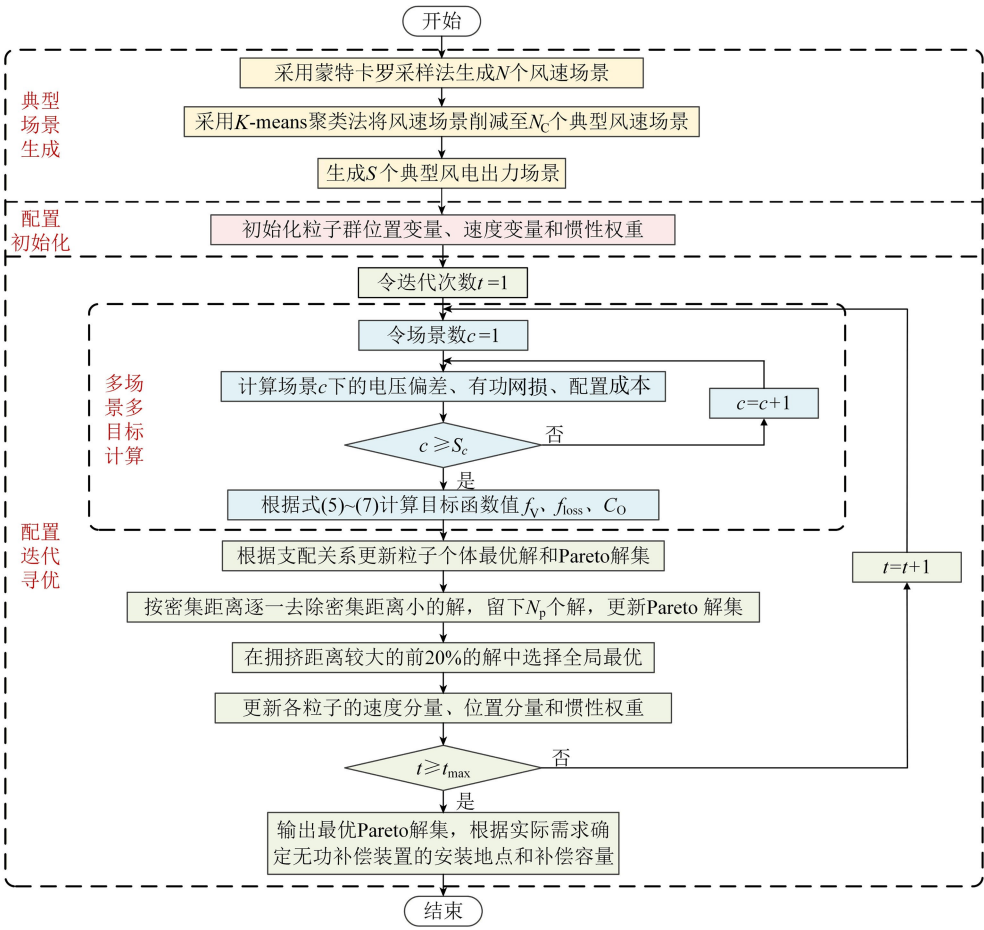


图 1 优化配置流程

Fig. 1 Optimal configuration flowchart

3 算例验证

3.1 系统介绍

本文采用 IEEE39 节点系统对所提 STATCOM 优化配置方法进行验证,图 2 为系统整体接线图。其中 30、31、32 节点用风电场代替,风电场经 35 kV/220 kV 的升压变压器接入电网中,每个风电场中包含 8 台风电机。风电机均采用双馈式感应异步风力发电机模型(doubly fed induction generator, DFIG),额定有功功率为 1.5 MW,额定视在功率为 1.5/0.9 MV·A,初始风电机有功功率输出为 15 MW,不发无功。切入风速为 3 m/s,额定风速为 11.8 m/s,切出风速为 25 m/s,叶片半径为 35.2 m,空气密度为 1.39 kg/m³。STATCOM 的补偿位置为 PQ 节点和与风电场相连的公共连接点(point of common coupling, PCC),配置的单台 STATCOM

参数如下:补偿容量范围为-200~200 Mvar,单位补偿价格为 20 万元/Mvar,规划使用年限为 20 年,折现率为 2%,运行费用占投资费用的 5%。

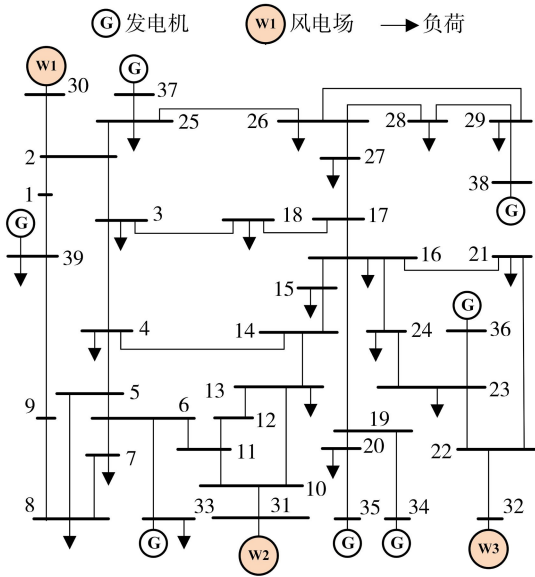


图 2 IEEE39 节点系统结构
Fig. 2 Structure of IEEE 39-node system

3.2 风电出力典型场景的生成

取 Weibull 形状参数 $K=2$, 尺度参数 $C=8.5^{[21]}$, 通过蒙特卡罗洛采样法, 获得 2000 个风速场景, 对场景进行 K -means 聚类得到 S 个典型风电出力场景。不同典型风电出力场景数对应的风速累积概率曲线如图 3 所示。

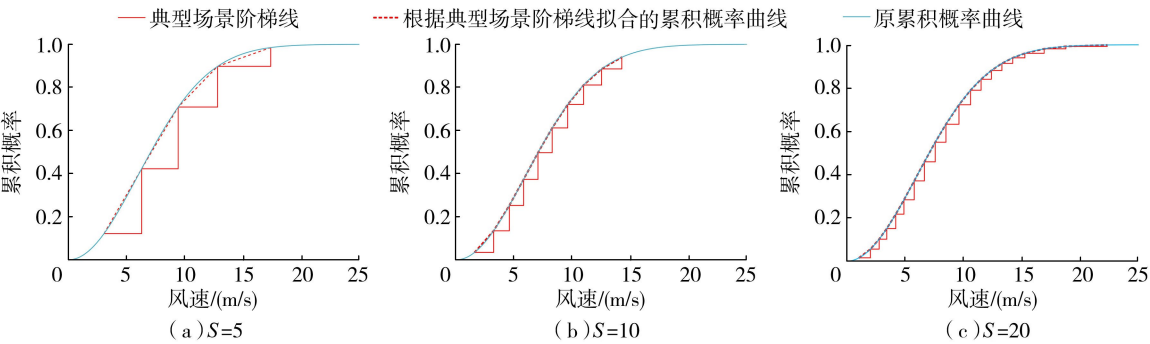


图 3 典型风电出力场景风速累积概率曲线对比

Fig. 3 Comparison of cumulative probability curves of wind speed under typical wind power output scenarios

由图 3 可知,当 $S=5$ 时,拟合所得累积概率曲线与原累积概率曲线误差较大,当 $S=20$ 时,拟合所得累积概率曲线与原概率累积曲线更贴合。典型风速场景数越多,概率累积曲线拟合精度越高,但随着典型风电出力场景数的增加,计算时间会有所增加,计算效率变低。因此在提高拟合精度的同时,为保证计算效率,本文仿真计算均基于 10 个典型场景验证。10 个典型场景的风速、风电机出力、概率见表 1。

表 1 典型风电机出力场景

Table 1 Typical wind turbine output scenarios

场景	风速/(m/s)	风电机出力/p. u.	概率	场景	风速/(m/s)	风电机出力/p. u.	概率
1	1.593 300	0	0.037 202	6	8.272 100	0.104 915	0.137 673
2	3.234 120	0.005 266	0.112 241	7	9.604 656	0.155 021	0.105 613
3	4.581 708	0.017 780	0.149 784	8	10.973 520	0.180 000	0.072 416
4	5.811 464	0.036 623	0.161 609	9	12.523 047	0.180 000	0.043 854
5	7.049 178	0.065 313	0.152 550	10	14.261 721	0.180 000	0.023 167

3.3 多目标粒子群算法最大迭代次数选择

在多目标粒子群算法中,合理设置最大迭代次数可以确保算法在合理的运行时间内收敛且得到较好的寻优结果。为此,本文通过比较不同迭代次数下算法所得 Pareto 解集的外部解以及空间指标 (spacing metric, SP),量化评估迭代次数对求解性能的影响。多目标粒子群算法的粒子群和 Pareto 解集规模分别设置为 500 个和 100 个,各场景的权重 w_i 取该场景对应的概率值,与风电场相连的 3 个 PCC 点权重为 10,其余节点权重均为 1。在求解所得的 Pareto 解集中,具有最小电压偏差或最小有功网损或最小配置成本的解可称为外部解。对于每个目标,每次迭代都可得到一个外部解,统计每次迭代后的外部解,并绘制图 4 所示的收敛曲线。由图 4 可知,电压偏差和有功网损的外部解在迭代 10 次左右曲线逐渐开始收敛,收敛较快。配置成本的外部解在迭代 130 次左右达到收敛阈值。为了保证所有目标充分、稳定收敛,应以最慢收敛目标为基准并适当增加迭代次数。

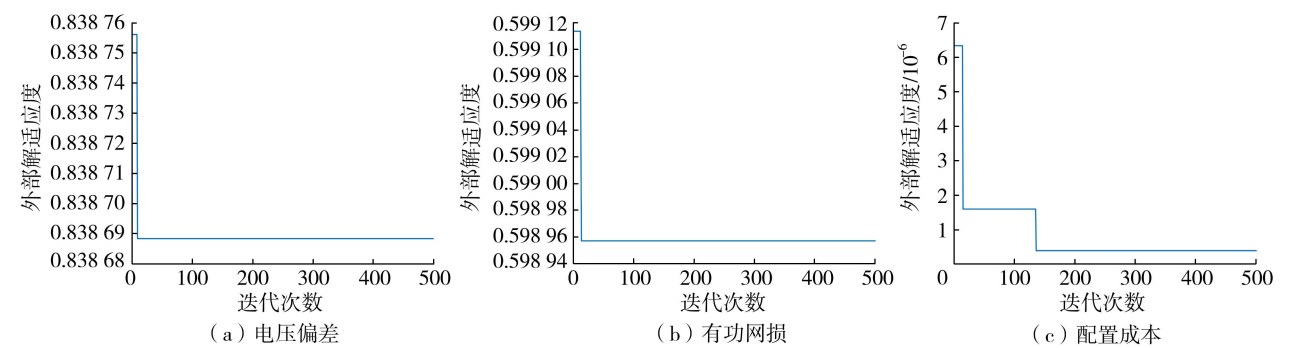


图 4 外部解收敛曲线
Fig. 4 Convergence curves of external solutions

SP 用于衡量 Pareto 解集在目标空间内的分布均匀程度。SP 越小,各非支配解之间的间隔分布越均衡,解集均匀性越优;反之则说明解集存在局部聚集或分布稀疏等不均匀问题。迭代次数为 50、100、150、200、250 对应的 SP 分别为 0.0035、0.0036、0.0030、0.0028、0.0032。随着迭代次数的增加,解集的 SP 先减小后增大。当迭代次数为 200 时 SP 最小,解集中解之间的间距最均匀,分布性最好。因此,在综合考虑各目标外部解的收敛曲线和不同迭代次数下的 SP 后,本文将多目标粒子群算法中的最大迭代次数设置为 200 次。

3.4 STATCOM 优化配置结果

为了说明考虑风电机组多出力场景的必要性,应用多目标粒子群算法求解得到考虑所有场景与只考虑最大概率场景 4 的 Pareto 解集 (图 5)。由图 5 可知,考虑场景因素后的 Pareto 解集多样性更好,解的分布也更均匀,所以考虑场景因素后得到的配置方案集可以为调度运行工作人员提供更多选择。

智能优化算法存在固有随机性,为此本文分别对引入场景因素、未引入场景因素两类程序各独立运行 30 次;针对各项评价指标,对两类工况下每次运行所得 Pareto 解集的指标计算结果分别汇总统计,并进行对比分析,结果如图 6 所示。考虑多场景后的电压偏差和、有功网损和、配置成本等的分布都较为集中,说明考虑场景因素后的系统电压水平、有功网损、配置成本不会随着配置方案的不同而产生大幅波动,而不考虑场景因素时,系统的指标可能随着配置方案的不同产生较大的波动。此外多场景下的电压偏差和、有功网损和的均值都小于单场景,配置成本则大于单场景下,说明考虑场景因素后虽然优化效果更佳,但是成本也会随之增加。

基于上述分析,考虑风电多出力场景下 STATCOM 的配置数量对优化效果的影响,取配置数量分别为 0~3 得到 4 个配置方案,分别将各配置方案在多场景下的指标和进行比较,结果见表 2。图 7 为配置不同台数的 STATCOM 后系统各节点的电压偏差和、系统支路累加有功网损和的变化。

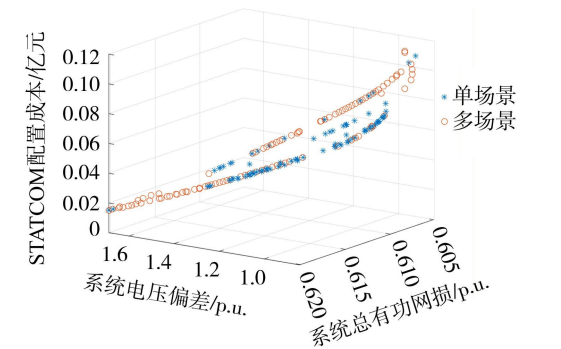


图 5 考虑场景因素前后 Pareto 解集的分布情况
Fig. 5 Distribution of Pareto solution sets before and after considering scenario factors

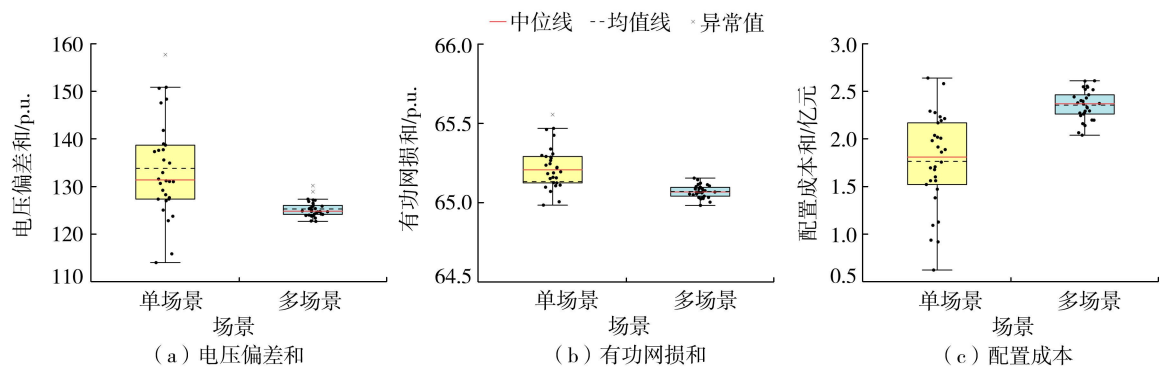


图6 考虑场景因素前后系统性能指标对比

Fig. 6 Comparison of system performance indicators before and after considering different scenario factors

表2 STATCOM 配置台数的指标结果

Table 2 Indicator results of different numbers of configured STATCOMs			
配置数量/台	电压偏差和/p. u.	有功网损和/p. u.	配置成本/亿元
0	166.0312	61.4477	0
1	140.5435	61.1329	1.0985
2	92.2267	60.3207	4.1235
3	94.3476	59.8454	6.6167

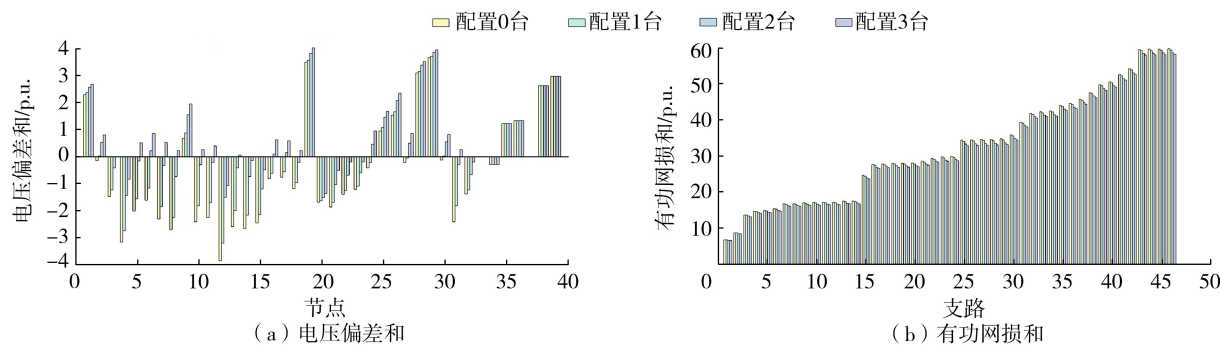


图7 考虑场景因素后不同配置系统性能分析

Fig. 7 System performance analysis before and after configuration considering scenario factors

由表2和图7可知,随着配置数量的增加,系统的电压情况和损耗情况均得到不同程度的改善,但配置成本逐渐增大。与不配置 STATCOM 相比,配置1台 STATCOM 后,电压偏差和下降率为15.35%,有功网损和下降率为0.51%;与配置1台 STATCOM 相比,配置2台 STATCOM 后,电压偏差和下降率为34.38%,有功网损和下降率为1.33%。与配置2台 STATCOM 相比,配置3台 STATCOM 后,部分电压节点范围由0.9~1.0 p.u. 上升至1.0~1.1 p.u.,电压偏差和增长率为2.3%,有功网损和下降率仅为0.79%,优化效果微弱。且此时配置成本和较配置2台时大幅上升,升高了2.4932亿元。综上,配置2台 STATCOM 是较优的选择。

Pareto 解集中每一个点的数值都代表了无功补偿设备对应的安装位置和补偿容量,且解集中不同的解反映了多个目标间的不同关系。若需要从解集中选取一个特定解,可以采用熵权法或加权法将此多目标优化问题转换为单目标优化问题。熵权法通过判断 Pareto 解集中各目标值的内部差异性确定各自的权重,目标值内部差异越大,目标提供的信息越多,该目标权重越大。熵权法能避免决策者自身主观性对最终决策的影响。加权法通过调整权重的大小,根据实际需求灵活地控制各个目标在优化过程中的重要性。以配置2台 STATCOM 为例,用熵权法和加权法从 Pareto 解集中选取一个特定解,系统电压偏差的权重分别为0.5和0.05,系统有功网损的权重分别为0.4和0.05,配置成本的权重分别为0.1和0.9。用熵权法得到的配置方案1,在节点22和节点13配置 STATCOM,补偿容量分别为30.42 Mvar 和117.63 Mvar。用加权法得到的配置方案2,在节点22和节点10配置 STATCOM,补偿容量为71.84 Mvar 和29.92 Mvar。两种方案下,系统的各项性能指标对比如图8所示,配置方案1在系统电压偏差和有功网损上均优于配置方案2,但配置成本较高。这也验证了 Pareto 解集中的解都是互相非支配的,且没有一个解在所有目标上都优于其他解,需

要根据具体需求来选择特定解。

4 结 语

针对风电机出力的随机性和波动性,生成了风电机出力的典型场景,提出了多运行场景和多优化目标下 STATCOM 的选址定容配置方案。与只考虑单一场景相比,考虑多运行场景后所得的配置方案多样性更好,且优化后各指标分布较为集中,优化效果相对稳定。含风电的 IEEE39 节点的算例结果表明,所提优化配置方案能在保证一次性投资费用和运行维护费用合理性的同时有效降低系统的电压偏差和有功网损。

参考文献:

[1] 李建林,郭兆东,马速良,等. 新型电力系统下“源网荷储”架构与评估体系综述[J]. 高电压技术,2022,48(11):4330-4341. (Li Jianlin, Guo Zhaodong, Ma Suliang, et al. Overview of the “source-grid-load-storage” architecture and evaluation system under the new power system[J]. High Voltage Engineering,2022,48(11):4330-4341. (in Chinese))

[2] 李继清,龙健,刘洋. 基于水光电力系统时序生产模拟模型的水光优化配比研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(1):1-10. (Li Jiqing, Long Jian, Liu Yang. Study on optimal ratio of water and light based on time-series production simulation model of hydro-optical power system[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2024,52(1):1-10. (in Chinese))

[3] 黄显峰,周引航,张启凡,等. 基于云模型的水光互补清洁能源基地容量配置方案优选[J]. 水利水电科技进展,2024,44(1):44-51. (Huang Xianfeng, Zhou Yinhang, Zhang Qifan, et al. Capacity allocation scheme optimization based on cloud model for a hydro-photovoltaic complementary clean energy base[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(1):44-51. (in Chinese))

[4] 黄显峰,黄晗,鲜于虎成,等. 源-荷匹配机制下的水光互补系统中长期与短期嵌套优化调度模型[J]. 水利水电科技进展,2025,45(2):38-45. (Huang Xianfeng, Huang Han, Xianyu Hucheng, et al. Mid-long term and short term nested optimal scheduling model of hydro-photovoltaic complementary system considering source-load matching mechanism[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2025,45(2):38-45. (in Chinese))

[5] 金一丁,于钊,李明节,等. 新一代调相机与电力电子无功补偿装置在特高压交直流电网中应用的比较[J]. 电网技术,2018,42(7):2095-2102. (Jin Yiding, Yu Zhao, Li Mingjie, et al. Comparison of new generation synchronous condenser and power electronic reactive-power compensation devices in application in UHV DC/AC grid[J]. Power System Technology,2018,42(7):2095-2102. (in Chinese))

[6] 姚骏,周特,陈知前. 电网对称故障下定速异步风电场 STATCOM 容量配置研究[J]. 电工技术学报,2016,31(1):45-54. (Yao Jun, Zhou Te, Chen Zhiqian. Studies on STATCOM capacity configuration for FSIG-based wind farm under symmetrical grid fault[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2016,31(1):45-54. (in Chinese))

[7] 赵天骐,郭金鹏,张海燕,等. 考虑调相机的风电场稳态-暂态无功协同优化控制[J]. 电力系统自动化,2024,48(24):54-65. (Zhao Tianqi, Guo Jinpeng, Zhang Haiyan, et al. Steady state-transient state reactive power cooperative optimization control of wind farm considering synchronous condensers[J]. Automation of Electric Power Systems,2024,48(24):54-65. (in Chinese))

[8] 陈春萌,梁英,张舒捷. 基于多策略自适应粒子群算法的电网无功优化[J]. 电力电容器与无功补偿,2020,41(4):102-108. (Chen Chunmeng, Liang Ying, Zhang Shujie. Reactive power optimization of power grid based on multi-strategy adaptive particle swarm optimization algorithm[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2020,41(4):102-108. (in Chinese))

[9] 于伯建,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))

[10] Hadavi S, Mansour M Z, Bahrani B. Optimal allocation and sizing of synchronous condensers in weak grids with increased penetration of wind and solar farms[J]. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems,2021,11(1):199-209.

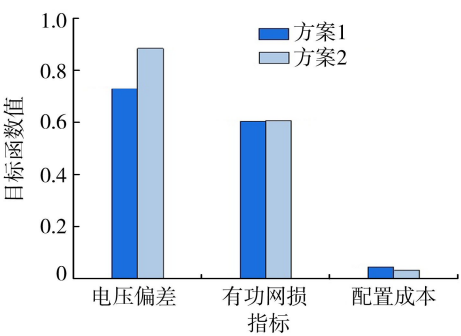


图 8 不同配置方案的指标比较

Fig.8 Comparison of indicators for different configuration schemes

[11] 戴宇欣,张俊,乔骥,等. 基于改进去噪扩散概率模型和模型迁移的新能源场站超短期出力场景生成[J]. 电网技术,2025,49(2):511-521. (Dai Yuxin,Zhang Jun,Qiao Ji,et al. Ultra-short-term output scenario generation for renewable energy plants based on improved denoising diffusion probabilistic models and model-based transfer learning[J]. Power System Technology, 2025,49(2):511-521. (in Chinese))

[12] Sun Yingyun,Zhong Jianliang,Li Zuyi,et al. Stochastic scheduling of battery-based energy storage transportation system with the penetration of wind power[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2017,8(1):135-144.

[13] 胡喜梅. 通信基站群风光储供电系统容量优化配置模型研究[D]. 北京:华北电力大学(北京),2024.

[14] 董晓翀,张姝,李烨,等. 电力系统中时序场景生成和约简方法研究综述[J]. 电网技术,2023,47(2):709-721. (Dong Xiaochong,Zhang Shu,Li Ye,et al. Review of power system temporal scenario generation and reduction methods[J]. Power System Technology,2023,47(2):709-721. (in Chinese))

[15] Sannigrahi S,Ghatak S R,Acharjee P. Multi-scenario based bi-level coordinated planning of active distribution system under uncertain environment[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2020,56(1):850-863.

[16] 孙汝羿,袁至,王维庆,等. 含固态变压器新型配电网动态无功多目标优化[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(16):104-114. (Sun Ruyi,Yuan Zhi,Wang Weiqing,et al. Multi-objective optimization of dynamic reactive power in a new distribution network with a solid state transformer[J]. Power System Protection and Control,2023,51(16):104-114. (in Chinese))

[17] 陈建华,周冬冬,陈魏. 基于马尔科夫-蒙特卡罗法的配电网分段孤岛划分[J]. 电力电容器与无功补偿,2023,44(1):113-118. (Chen Jianhua,Zhou Dongdong,Chen Wei. Segmentation island partition of distribution network based on markov? monte Carlo method[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2023,44(1):113-118. (in Chinese))

[18] 王玲玲,王昕,郑益慧,等. 计及多个风电机组出力相关性的配电网无功优化[J]. 电网技术,2017,41(11):3463-3469. (Wang Lingling,Wang Xin,Zheng Yihui,et al. Reactive power optimization of distribution network considering output correlation of multiple wind turbines[J]. Power System Technology,2017,41(11):3463-3469. (in Chinese))

[19] 徐卫亚,陈世壮,张贵科,等. 基于 PSO-LSSVM-BP 模型的高边坡力学参数反分析及稳定性评价[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(5):52-59. (Xu Weiya,Chen Shizhuang,Zhang Guike,et al. Inverse analysis of mechanical parameters of high slope based on PSO-LSSVM-BP model and stability evaluation[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2024,52(5):52-59. (in Chinese))

[20] 高攀,秦川,武思远,等. 机理-数据混合驱动的气象敏感负荷需求响应潜力评估[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(5):85-92. (Gao Pan,Qin Chuan,Wu Siyuan,et al. Mechanism-data hybrid driven assessment method for demand response potential of meteorologically sensitive load[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(5):85-92. (in Chinese))

[21] Liu Yang,Xiao Xianyong,Zhang Xiaoping,et al. Multi-objective optimal STATCOM allocation for voltage Sag mitigation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2020,35(3):1410-1422.

(收稿日期:2025-01-20 编辑:刘晓艳)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.04.016

基于模型降阶方法的大坝静态响应快速计算方法

程 井¹, 胡乔桦¹, 余 雷², 牛志伟¹

(1. 河海大学水利水电学院; 2. 贵州省大坝安全监测中心)

摘要:为解决孪生模型监测数据量大与高保真实时响应之间的矛盾,以拱坝为例提出了一种基于 POD-RBFNN 降阶模型的大坝变形快速计算方法。该方法基于有限元仿真得到的不同水位工况下的静态响应数据,通过本征正交分解(POD)法提取主导模态及模态系数,结合径向基函数神经网络(RBFNN)建立水位参数与模态系数之间的高精度代理映射,实现拱坝静态位移场的快速精准预测。算例结果表明:在仅考虑静水压力和结构自重作用条件下,POD-RBFNN 降阶模型的预测结果与有限元(FEM)仿真结果吻合良好,平均相对误差为 0.35%,平均绝对误差仅为 0.003 2 mm,同时计算效率相较于有限元仿真提升了 3 004 倍。

关键词:拱坝变形;数字孪生;本征正交分解;降阶模型;径向基神经网络;快速计算

Rapid calculation method for static response of dams based on model order reduction

Cheng Jing¹, Hu Qiaohua¹, Yu Lei², Niu Zhiwei¹

(1. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University;
2. Dam Safety Monitoring Center of Guizhou Province)

Abstract: To resolve the contradiction between massive monitoring data of twin models and high-fidelity rapid response, a rapid calculation method for dam deformation based on a POD-RBFNN reduced-order model was proposed taking an arch dam as an example. Based on static response data under different water level conditions obtained through finite element simulations, dominant modes and modal coefficients were extracted using the proper orthogonal decomposition (POD) method. Combined with a radial basis function neural network (RBFNN), a high-accuracy surrogate mapping between water level parameters and modal coefficients was established, achieving rapid and accurate prediction of the static displacement field of the arch dam. Calculation results show that under the condition of considering only hydrostatic pressure and structural self-weight, the prediction results of the POD-RBFNN reduced-order model agree well with finite element (FEM) simulation results, with an average relative error of 0.35% and an average absolute error of only 0.003 2 mm. Meanwhile, the calculation efficiency is improved by 3 004 times compared with the finite element simulation.

Key words: arch dam deformation; digital twin; proper orthogonal decomposition; reduced-order model; radial basis function neural network; rapid calculation

水库大坝作为国家关键基础设施,其安全稳定运行直接关系到公共安全,因此对其风险进行实时动态评估与管控已成为迫切需求^[1]。随着数字化、智能化技术的快速发展,数字孪生作为构建智慧水利体系的关键手段日益受到关注^[2]。目前数字孪生在水利工程领域尚未形成统一定义,但其核心思想已获广泛认可,即通过构建能够高保真映射物理大坝实时状态的数字仿真模型,实现对实体结构的动态模拟与状态映射^[3]。这一过程需要对不同状态下的水库大坝进行大规模的数值模拟,但确定性分析方法(有限体积法、有限差分法、有限元法等^[4])在对水库大坝此类大型且复杂的系统进行求解时,往往会因高自由度而耗费大量时间和资源,难以满足数字孪生对数据实时性的要求。因此,如何在确保数值仿真精度的同时实现计算效率的显著提升,已成为国内外亟待解决的问题^[5]。

针对复杂系统的快速求解,目前主流方法包括模型降阶法(ROM)和代理模型法。其中,模型降阶法通过构造低维基函数,将全阶模型(FOM)的高维方程投影至降阶空间,从而减少计算量,提升求解速度。根据子空间构建原理不同,主流 ROM 法分为本征正交分解(proper orthogonal decomposition, POD)法、模态综合

基金项目:水利部黄河流域水治理与水安全重点实验室研究基金项目(2024-SYSJJ-02);国家重点研发计划项目(2022YFC3005501);水利部重大科技项目(SKS-2022153);贵州省水利科技项目(KT202537)

作者简介:程井(1982—),男,副教授,博士,主要从事智能温控及库坝工程风险研究。E-mail:cj042@126.com

法、Krylov 子空间法等^[6-8]。这类基于物理方程投影的 ROM 法,通常高度依赖精确的物理控制方程进行降阶基的构建或投影运算,对机理不明的复杂系统适应性不足,因此限制了其工程实用价值。代理模型依靠数据驱动,通过构建输入参数与输出响应间的映射关系实现对高保真模型的近似表征,无需显式解析系统内部作用机理;但该方法对训练样本量高度敏感,同时其黑箱特性致使模型输出结果缺乏清晰的物理解释。目前主流的代理模型构建方法包括多项式响应面(response surface methodology, RSM)^[9]、径向基函数(radial basis function, RBF)^[10]、人工神经网络(artificial neural network, ANN)等^[11]。当前水利工程领域的代理模型研究主要聚焦于参数智能识别方面^[12-13],而在结构响应方面的研究较少。

综上,降阶模型与代理模型均具有一定局限性。本文提出一种适用于拱坝静态响应快速计算的数据驱动模型降阶方法,在 POD 降阶模型中内嵌代理模型,通过构建工况参数与模态系数之间的代理映射,实现拱坝静态物理场的快速精准预测,为构建其数字孪生模型提供高效核心算法。

1 数据驱动的拱坝结构位移模型降阶方法

1.1 POD 降阶模型原理

POD 降阶模型依托特征值分解手段,从高维系统样本数据中提取最优正交基向量及其对应的特征值,以此构造最小二乘投影误差最优的低维子空间。构建 POD 降阶模型,需先构建快照矩阵,其数据可源于实验、运行历史或数值仿真等,前两种获取方式普遍存在成本高、难以采集充足训练样本等问题,为此本文采用数值仿真生成所需样本数据集。通过在参数空间采样,获取各样本点数值解,并依式(1)组装快照矩阵 $\mathbf{X} \in \mathbf{R}^{M \times N}$ 。参数空间可涵盖边界条件、材料属性及时变参数等多类设计变量^[14]。

$$\mathbf{X} = [\mathbf{X}_1 \quad \mathbf{X}_2 \quad \cdots \quad \mathbf{X}_N] = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1N} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{M1} & \cdots & x_{MN} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{X}$ 为由 N 个快照构成的快照矩阵; $\mathbf{X}_j$ 为第 j 个实验或工况的样本向量; M 为网格节点数。针对拱坝结构孪生模型, $\mathbf{X}$ 可以为温度、渗压、应力应变等场变量,但因为位移相对稳定可靠,目前大坝安全监测一般以位移为主,其他为辅,本文以位移响应量为例开展研究。

求解 POD 模态需先获得协方差矩阵 $\mathbf{C} = \mathbf{X}\mathbf{X}^T$ 的特征向量和特征值。数值模型中网格节点数 M 通常远大于选取的快照样本数 N ,因此对矩阵 $\mathbf{C}$ 进行直接求解需要花费大量时间。鉴于协方差矩阵 $\mathbf{C}$ 与矩阵 $\mathbf{D} = \mathbf{X}^T\mathbf{X}$ 拥有相同的非零特征值,且矩阵 $\mathbf{D}$ 阶数显著低于矩阵 $\mathbf{C}$ 。因此,可以通过式(2)求解矩阵 $\mathbf{D}$ 的特征值 λ_j 及其特征向量 $\boldsymbol{\varphi}_j$,再由式(3)间接求得 $\mathbf{C}$ 对应的特征向量 $\boldsymbol{\Phi}$ 。

$$\mathbf{D}\boldsymbol{\psi} = \mathbf{A}\boldsymbol{\psi} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & & \\ & \lambda_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \lambda_N \end{bmatrix} [\boldsymbol{\varphi}_1 \quad \boldsymbol{\varphi}_2 \quad \cdots \quad \boldsymbol{\varphi}_N] \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\Phi} = \mathbf{X}\boldsymbol{\psi}\mathbf{A}^{-1/2} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{N \times N}$ 为特征值对角矩阵,其主对角线元素 λ_i 即第 i 阶模态的特征值,且特征值按降序排列($\lambda_1 > \lambda_2 > \cdots > \lambda_N$); $\boldsymbol{\psi}$ 为矩阵 $\mathbf{D}$ 的特征向量矩阵;其列向量 $\boldsymbol{\varphi}_i$ 为对应于特征值 λ_i 的特征向量; $\boldsymbol{\Phi}$ 为协方差矩阵 $\mathbf{C}$ 的特征向量矩阵,即 POD 模态。

一般前几阶 POD 模态携带了大部分原系统的物理信息,因此截断前 r 阶特征向量即可近似全阶模型。为量化截断误差,定义模态能量占比 $I(r)$:

$$I(r) = \frac{\sum_{i=1}^r \lambda_i}{\sum_{i=1}^N \lambda_i} \quad (4)$$

至此,全阶模型的 POD 降阶处理已完成,所得降阶子空间可表示为 $\boldsymbol{\Phi}_r$ 。在该子空间中,快照矩阵所含各快照均可由前 r 阶主导模态的线性组合近似表达:

$$\mathbf{X}_j \approx \boldsymbol{\Phi}_r \mathbf{A}_j = \sum_{i=1}^r a_{ij} \boldsymbol{\varphi}_i \quad (5)$$

式中: Φ_r 为前 r 阶模态组成的 POD 模态矩阵; $\mathbf{A}_j$ 为第 j 个快照的模态系数矩阵; a_{ij} 为第 i 阶模态的模态系数。

1.2 径向基神经网络(RBFNN)

根据 POD 基本原理,由快照矩阵分解得到的 POD 模态具备唯一解特性,但其对应的模态系数会随工况参数呈现非线性演化规律。鉴于代理模型擅长拟合复杂非线性映射关系,本文借助该优势构建工况输入参数与 POD 模态系数间的非线性映射模型,实现任意样本点处模态系数矩阵的快速预估。目前常用代理模型构建方法包括克里金模型、径向基函数模型、多项式响应面模型等,其中 RBFNN 能依托高斯核函数实现非线性映射,在兼顾模型结构简洁性的基础上,能够有效缓解高维建模过程中的维度灾难,适用于本文研究场景^[15-18]。

RBFNN 采用典型的 3 层前馈架构,由输入层、隐藏层和输出层构成,其中 $\mathbf{x}$ 为神经网络输入层; $\mathbf{h}$ 为隐藏层, y 为输出层,其基本结构如图 1 所示。RBFNN 基本形式如下:

$$y = \sum_{z=1}^m w_z h_z$$

(6)

其中 $h_z = \exp[-\|(x - c_z)\|^2/2b_z^2]$ ($z = 1, 2, \dots, m$)
式中: c_z 、 w_z 、 b_z 分别为隐含层节点 z 中心点、权重和核宽度; h_z 为节点 z 的径向基函数。

中心点的选取需综合考虑样本规模与分布特征。对于小样本,如本文的 80 个样本,可直接采用样本点作为中心点;而对于大样本,则需通过聚类分析等方法获得少的中心点以提高优化效率。参数 b_z 的取值显著影响模型精度,因此采用优化算法对其进行自适应寻优,确保模型在不同目标函数下均能获得最优性能。权重可通过求解最小化问题确定^[19]。

1.3 基于 POD-RBFNN 的拱坝模型降阶计算方法

基于数据驱动的降阶模型可分为离线与在线两个阶段。离线阶段通过模型降阶方法构建 POD-RBF 降阶模型,在线阶段则在该降阶空间内快速求解新参数对应的解,实现对系统响应的高效预测^[20]。拱坝静态响应计算主要流程如下:①模型降阶。基于拱坝的实际运行特征,选取关键工况参数并确定采样区间,采用有限元全阶模型计算节点位移并构建位移快照矩阵,通过 POD 法提取模态与模态系数,并根据能量占比截取前 r 阶模态建立 POD 降阶模型。②代理模型训练。基于步骤①生成的样本点及其对应的前 r 阶模态系数,构建训练数据集,并采用径向基神经网络进行训练,以建立工况参数与模态系数之间的非线性映射关系。③物理场重构。将任意新工况参数输入已训练的径向基神经网络预测模态系数;再按式(5)将其与 POD 模态进行线性组合,即可获得拱坝完整结构位移响应。

2 算例验证

实验的计算平台配置如下:Windows11 操作系统,CPU 为 AMD Ryzen 9 7940H(4.00 GHz),GPU 为 NVIDIA GeForce RTX 4060,内存 16 GB。降阶模型构建与训练在 MATLAB 环境下完成。

2.1 快照矩阵构建与模型降阶

2.1.1 拱坝静态响应全阶模型

以贵州 BianY 水库拱坝为例对降阶模型进行验证。水库位于黔南州罗甸县,所在三岔河属珠江流域红水河水系。大坝为砌石混凝土拱坝,最大坝高 38.42 m,坝顶宽 3.0 m,坝顶弧长 166.8 m,坝顶高程 879.636 m,坝底厚 15.2 m,厚高比 0.396。大坝及库区周边山体的有限元模型如图 2 所示,其中坝体和坝基共离散成 55 016 个单元,60 698 个节点。坝基及坝肩四周采用法向位移约束,计算工况为正常运行状态,只考虑静水压力和自重,正常蓄水位为 878.216 m,坝前水头 37 m。坝体和坝基均采用线弹性本构模型。坝体混凝土容重为 24 kN/m³,弹性模量为 22 GPa,泊松比为 0.21。右坝肩容重为 26 kN/m³,综合变形模量为 9 GPa,泊松比为 0.25;左坝肩容重 26 kN/m³,综合变形模量为 8 GPa,泊松比为 0.25。坝基容重 27 kN/m³,综合变形模量为 52 GPa,泊松比 0.26。

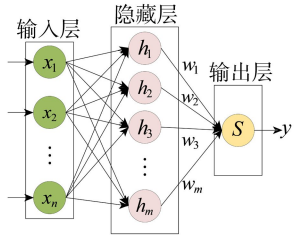


图 1 径向基神经网络结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of radial basis function neural network structure

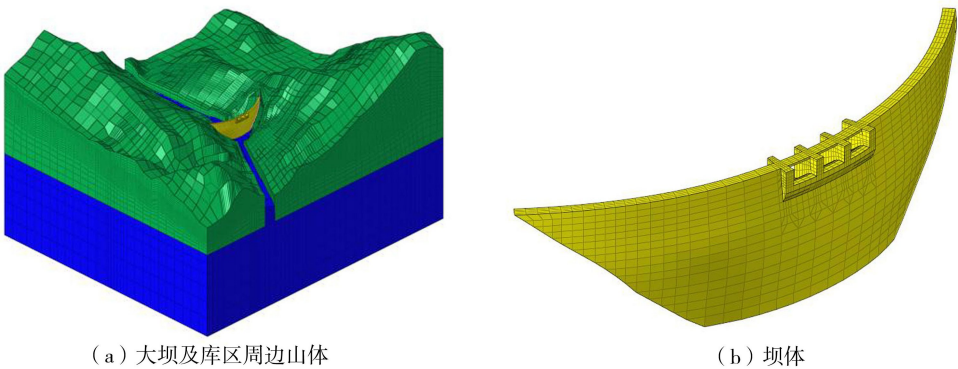


图2 BianY 拱坝有限元模型
Fig.2 Finite element model of BianY arch dam

2.1.2 POD 模态分解

为突出 POD-RBFNN 降阶模型在拱坝静态响应快速预测中的有效性,仅考虑静水压力和结构自重作用下的坝体响应。选取坝前水位 H 作为关键输入参数,并结合拱坝的实测运行数据确定其参数采样区间。基于第 1.3 节降阶方法的技术框架,通过构建有限元样本集,建立代理模型。本文采用拉丁超立方采样法(LHS)生成 80 组工况样本用于构建坝体位移场快照矩阵 X 。

应用 POD 法对快照矩阵进行分解,并计算该矩阵的 POD 模态 Φ_i 及其对应特征值 λ_i 。图 3 为前 4 阶位移模态分布特征,其中 1 阶模态捕捉了拱坝整体位移的主要特征,反映了拱坝整体变形规律;随着阶数升高,模态对整体位移的贡献逐渐降低,但更能表征局部细节特征。前 20 阶特征值降序分布曲线的指数衰减趋势(图 4)表明低阶模态占据系统的主要能量;前 8 阶累计能量占比已经大于 99.99%,满足截断准则,故可将原 80 阶系统投影至 8 阶降阶子空间。进一步,依式(5)求得各阶模态对应的投影系数矩阵 A 用于构建神经网络数据集。

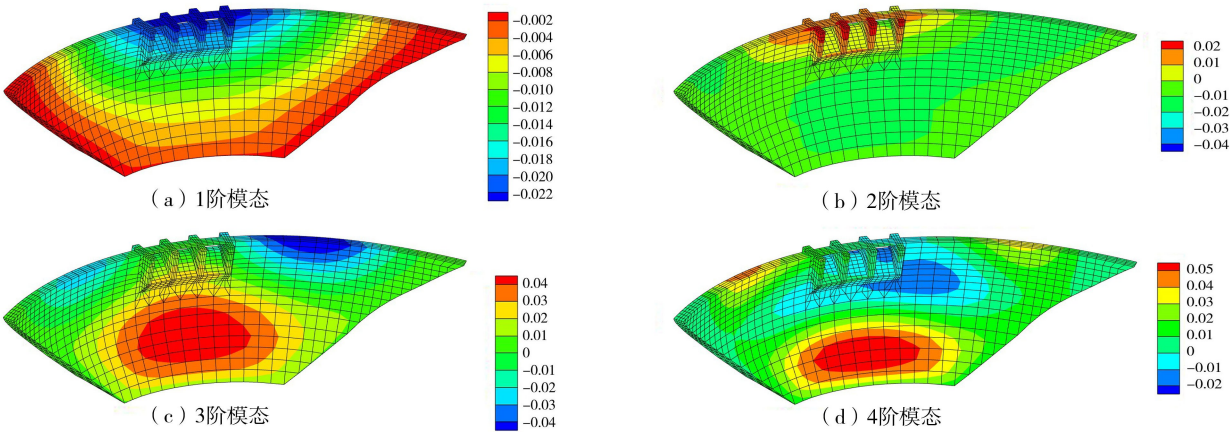


图3 前4阶位移模态
Fig.3 First 4 displacement modes

2.2 代理模型训练及分析

以水位为输入变量,模态系数为输出变量训练 RBFNN。将获得的 80 组模态系数作为训练集和测试集,用于确定形状参数和训练模型;额外设计 20 组独立于训练集和测试集的模态系数作为验证集,用于测试代理模型的整体效果。为评估模型质量,使用 k 折交叉验证法计算模型的均方误差。该法将样本集划分为 k 个大小相同的互斥子集,然后随机选择 $k-1$ 个子集作为训练集,其余 1 个子集作为测试集用于验证模型的预测性能。当 k 等于样本总数时,这种交叉验证称为留一法交叉验证(LOOCV)。

由图 5 可知,验证集中第 1、8、15、16 组预测相对误差较大,对其进行初步分析可知上述样本所代表的工况区域训练样本空间分布相对稀疏,致使神经网络训练过程中可获取的有效梯度信息较少,无法充分指导神经网络学习。此外神经网络算法内在的数据驱动特性,使其天然关注样本密集的核心区域,而相对忽

视样本稀疏分布的边缘地带,最终导致这些区域的预测精度有所下降。

2.3 POD-RBFNN 降阶模型效率评估

为量化评估模型全域计算精度,采用平均绝对误差 (MAE) 与平均相对误差 (MRE) 作为核心性能指标进行量化分析。为验证 POD-RBFNN 降阶模型预测结果的可靠性,基于验证集,分别采用所构建的 POD-RBFNN 降阶模型与有限元方法对拱坝进行位移场求解。通过对比两种方法获得的位移结果,系统计算了全域网格节点的平均绝对误差与相对误差,结果如图 6 所示。拱坝位移场预测的最大绝对误差为 0.003 2 mm,出现在第 8 组,对应坝前水头 $H=8.69\text{ m}$;最大相对误差为 0.35%,出现在第 15 组,对应坝前水头 $H=23.84\text{ m}$ 。

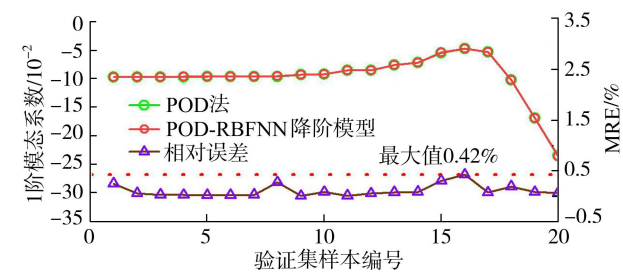


图 5 1 阶模态系数的相对误差
Fig. 5 Relative error of 1st-order modal coefficient

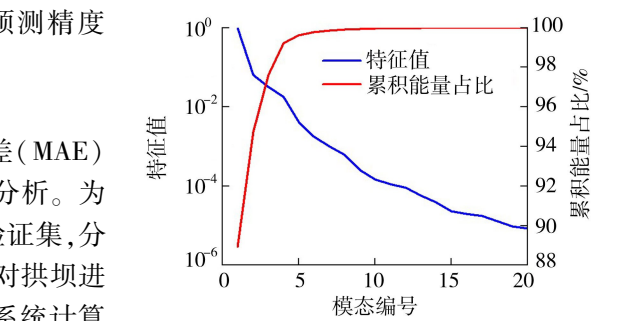


图 4 前 20 阶模态的特征值和累积能量占比
Fig. 4 Eigenvalues and cumulative energy ratio of first 20 modes

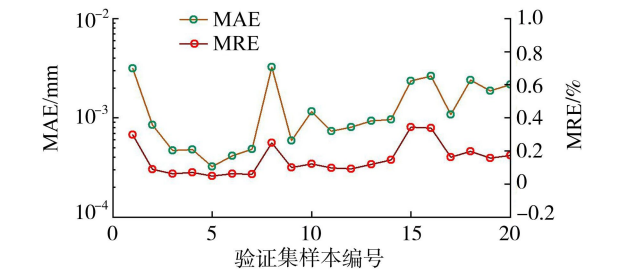


图 6 POD-RBFNN 降阶模型预测位移场的 MRE 和 MAE
Fig. 6 MRE and MAE of displacement field predicted by POD-RBFNN reduced-order model

图 7 为验证集第 8 组和第 15 组样本的 POD-RBFNN 降阶模型与有限元方法对比云图,第 8 组最大绝对误差为 0.006 2 mm;第 15 组最大相对误差仅为 1.14%。可见,POD-RBFNN 降阶模型能够较好地反映验证样

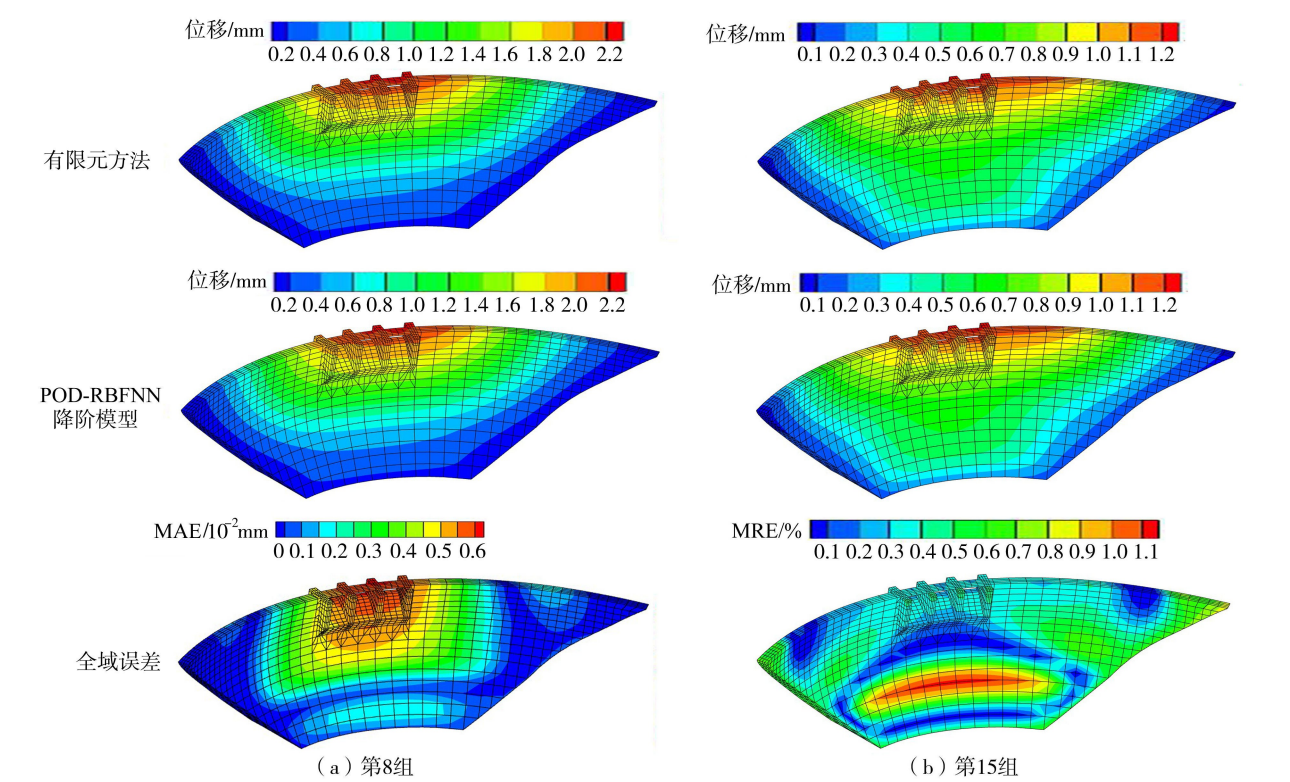


图 7 POD-RBFNN 降阶模型与有限元方法预测位移场对比

Fig. 7 Comparison of displacement fields predicted by POD-RBFNN reduced-order model and finite element method

本的拱坝位移场。拱坝坝顶位移是评估拱坝结构安全性的重要指标。为此,计算了验证集坝顶位移值的 MAE 与 MRE,结果如图 8 所示 POD-RBFNN 降阶模型预测的坝顶位移与有限元方法结果近乎一致,最大平均绝对误差仅有 0.0049 mm,最大平均相对误差仅有 0.64%。

在计算效率方面,系统比较了有限元方法与 POD-RBFNN 降阶模型在验证集的计算耗时。POD-RBFNN 降阶模型的离线阶段时间包括 80 组训练样本有限元计算形成快照矩阵以及 RBFNN 代理模型训练时间两个部分。在本文计算环境下,有限元方法求解验证集 20 组样本的总耗时为 2320 s;POD-RBFNN 降阶模型在线阶段求解 20 组样本的总耗时为 0.77 s,单次求解平均耗时 0.039 s,计算效率相较于有限元方法提升了约 3 004 倍。当计入离线阶段耗时 9284.9 s 后,POD-RBFNN 降阶模型总耗时约为有限元方法的 4 倍。

由于 POD-RBFNN 降阶模型的离线阶段耗时是固定不变的,不会随求解工况数量增加而变化。因此随着计算工况逐渐增加,POD-RBFNN 降阶模型的计算效率优势将逐渐显露。此外,在实际工程中,往往需要计算百万级单元的问题,这时有限元方法的在线计算耗时将呈指数级增长,而 POD-RBFNN 降阶模型由于仅涉及 POD 模态与系数的线性组合,其在线计算时间几乎不变。

3 结 论

- a. 应用 POD 法提取位移场的主导模态与系数,其中 1 阶模态体现了结构的整体变形行为与主要位移特征;随着模态阶数增加,各模态对系统总位移的贡献逐步递减,但其空间分布趋于复杂,能够体现拱坝局部变形细节。
- b. POD-RBFNN 降阶模型对拱坝整体位移场的预测精度与有限元方法仿真结果高度吻合,最大平均相对误差和绝对误差分别为 0.35%和 0.003 2 mm,表明该降阶模型具有良好的泛化能力。相较于有限元方法,POD-RBFNN 降阶模型单次工况求解时间仅需 0.039 s,计算效率提升了约 3 004 倍。

参考文献:

[1] 苏怀智,高建新,傅志敏,等. 梯级坝群系统服役风险评估与调控研究现状与展望[J]. 水利水电科技进展,2025,45(5):1-12. (Su Huaizhi, Gao Jianxin, Fu Zhimin, et al. Research status and prospects of service risk assessment and regulation for cascade dam systems[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(5):1-12. (in Chinese))

[2] 陈晓楠,靳燕国,许新勇,等. 南水北调中线干线智慧输水调度的思考[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):46-55. (Chen Xiaonan, Jin Yanguo, Xu Xinyong, et al. Thinking on smart water dispatching in the South-to-North Water Diversion Middle Route Project[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(5):46-55. (in Chinese))

[3] Priyanka E B, Thangavel S, Gao Xiaozhi, et al. Digital twin for oil pipeline risk estimation using prognostic and machine learning techniques[J]. Journal of Industrial Information Integration, 2022, 26:100272.

[4] Fu Rong, Liu Fang. A class of two-scale mixed finite element discretizations for the Stokes problem [J]. Bit Numerical Mathematics, 2026, 66(1):9.

[5] 钟登华,张天鸿,余红玲,等. 智能时代与大坝工程建设智能化研究进展[J]. 水利学报, 2025, 56(1):1-19. (Zhong Denghua, Zhang Tianhong, Yu Hongling, et al. Advancements in intelligent dam engineering construction in the intelligence era [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2025, 56(1):1-19. (in Chinese))

[6] Karaduman G. Data-driven optimization of the Gamma parameter in rational Krylov subspace methods for efficient transient simulation of power delivery networks[J]. Ieee Access, 2025, 13: 194032-194047.

[7] Saletti G, Pourkiaee M, Zucca S. Mass mistuning reduced order models for bladed disks with shroud friction joints[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power-Transactions of the Asme, 2026, 148(5):051023.

[8] 申正精,马登学,李仁年,等. 基于 POD/DMD 降阶模型的离心泵蜗壳内非稳态流动分析[J]. 哈尔滨工程大学学报,2024, 45(10):1974-1982. (Shen Zhengjing, Ma Dengxue, Li Rennian, et al. Analysis of unsteady flows in the volute casing of a

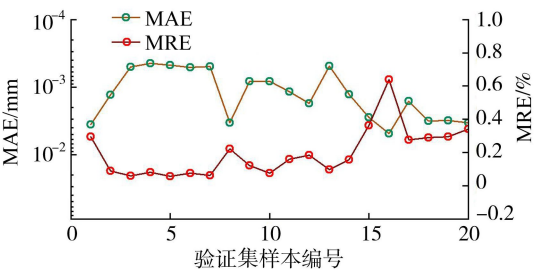


图 8 POD-RBFNN 降阶模型预测坝顶位移的 MRE 和 MAE

Fig. 8 MRE and MAE of dam crest displacement predicted by POD-RBFNN reduced-order model

centrifugal pump based on POD/DMD reduced order models[J]. Journal of Harbin Engineering University,2024,45(10):1974-1982. (in Chinese))

[9] 何梦佳,陈波,刘庭赫,等. 基于有限元分析的特高拱坝实时风险率模型[J]. 水利水电科技进展,2024,44(6):113-122. (He Mengjia,Chen Bo,Liu Tinghe,et al. Real-time risk rate model for extra-high arch dams based on finite element analysis[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(6):113-122. (in Chinese))

[10] Tabatabaei S M,Dastourani M,Eslamian S,et al. Comparison of kriging methods in rainfall estimation based on entropy-copula (case study: Simineh river,lake Urmia Basin,Iran)[J]. Earth Science Informatics,2025,18(1):75.

[11] 李江波,罗五洲,夏旦,等. 基于自适应采样多保真度神经网络的土石坝邓肯—张 E-B 模型参数反演[J]. 水电能源科学,2025,43(4):143-146. (Li Jiangbo,Luo Wuzhou,Xia Dan,et al. Deformation prediction model of super high arch dam based on ACNN-VAR deep learning[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2025,43(4):143-146. (in Chinese))

[12] Lin Chaoning,Li Tongchun,Chen Siyu,et al. Long-term viscoelastic deformation monitoring of a concrete dam; A multi-output surrogate model approach for parameter identification[J]. Engineering Structures,2022,266:114553.

[13] Dou Siqi,Li Junjie,Kang Fei. Health diagnosis of concrete dams using hybrid FWA with RBF-based surrogate model[J]. Water Science and Engineering,2019,12(3):188-195.

[14] 赵庆贤,刘云鹏,刘刚,等. 基于 POD-DNN 降阶模型的油浸式变压器绕组稳态温升快速计算方法[J]. 中国电机工程学报,2025,45(6):2423-2436. (Zhao Qingxian,Liu Yunpeng,Liu Gang,et al. Fast calculation of steady temperature rise of oil-immersed transformer windings based on POD-DNN reduced order model[J]. Proceedings of the CSEE,2025,45(6):2423-2436. (in Chinese))

[15] 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))

[16] Liang Jiaming,Li Zhanchao,Khailah E Y. Research on the modified surrogate model based on local RBF for concrete dam static and dynamic response analysis[J]. Frontiers in Earth Science,2023,11:1125691.

[17] 刘文博,杨喜娟,王力,等. 基于 SSA-RBFNN 的钢管混凝土界面粘结强度研究[J]. 中国安全生产科学技术,2025,21(3):148-155. (Liu Wenbo,Yang Xijuan,Wang Li,et al. Study on interfacial bond strength of concrete-filled steel tube based on SSA-RBFNN[J]. Journal of Safety Science and Technology,2025,21(3):148-155. (in Chinese))

[18] Zhou Lanting,Long Guanlin,Hu Cancan,et al. Reservoir water level prediction using combined CEEMDAN-FE and RUN-SVM-RBFNN machine learning algorithms[J]. Water Science and Engineering,2025,18(2):177-186.

[19] 崔凯,杨靖,常思源,等. 基于 POD 和代理模型的高压捕获翼表面流场快速预测方法[J]. 力学学报,2025,57(4):883-894. (Cui Kai,Yang Jing,Chang Siyuan,et al. Rapid prediction method for high-pressure capturing wing surface flow field based on proper orthogonal decomposition and surrogate model[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics,2025,57(4):883-894. (in Chinese))

[20] Padula G,Girfoglio M,Rozza G. A brief review of reduced order models using intrusive and non-intrusive techniques[J]. PAMM,2024,24(4):e202400210.

(收稿日期:2025 - 07 - 29 编辑:刘晓艳)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.04.017

超深厚复杂多层地基中防渗墙最优深度研究

刘雨婷,王照杰,王睿齐,罗玉龙

(河海大学水利水电学院)

摘要: 针对现有研究缺少含隔水层超深厚多层地基防渗墙最优深度分析、高外水压力下的渗流规律尚不明确的问题,以某水电工程为依托,建立了垂直防渗概化模型,通过分析不同防渗墙深度的坝基渗流场,探讨了超深厚复杂多层地基中防渗墙深度变化对坝基渗流场的影响规律,并在此基础上,提出了同时满足土体渗透稳定和渗流量控制标准的防渗墙最优深度。研究表明,超深厚复杂多层地基中是否有隔水层对防渗墙端部最大坡降的演变规律影响显著:当坝基不含隔水层时,防渗墙端部最大坡降随贯入比的增大呈 U 形变化趋势,其中当贯入比小于 0.2 或大于 0.7 时变化显著;当坝基含隔水层时,在隔水层以上,防渗墙端部最大坡降随贯入比的增大呈 U 形变化趋势,当贯入比小于 0.2 或大于 0.7 时变化显著;在隔水层中,防渗墙端部最大坡降随贯入比的增大快速减小;在隔水层以下时,防渗墙端部最大坡降随着贯入比的增大缓慢增大,当贯入比大于 0.7 时,端部最大坡降快速增加。考虑超深厚覆盖层地基深部可能存在的不均匀性和不确定性,结合已有工程案例,最终建议防渗墙深度为 200 m。

关键词: 深厚覆盖层;多层地基;悬挂式防渗墙;最优深度;渗透稳定

Research on optimal depth of cutoff walls in ultra-deep complex multilayer foundations

Liu Yuting, Wang Zhaojie, Wang Ruiqi, Luo Yulong

(College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University)

Abstract: In view of the problems that existing research lacks an analysis on the optimal depth of cutoff walls in ultra-deep multilayer foundations containing an impermeable layer, and the influence laws of seepage under high external water pressure remain unclear, a generalized vertical anti-seepage model was established based on a hydropower project. By analyzing the seepage fields of the dam foundation under different cutoff wall depths, the influence laws of cutoff wall depth variations on the seepage field of the dam foundation in ultra-deep complex multilayer foundations were discussed, and on this basis, an optimal cutoff wall depth satisfying the standards of both soil seepage stability and seepage discharge control was proposed. The results indicate that the presence or absence of an impermeable layer in ultra-deep complex multilayer foundations significantly influences the evolution laws of the maximum hydraulic gradient at the cutoff wall tip. When the dam foundation does not contain an impermeable layer, the maximum hydraulic gradient at the cutoff wall tip shows a U-shaped trend with an increase in the penetration ratio and changes significantly when the penetration ratio is less than 0.2 or greater than 0.7. When the dam foundation contains an impermeable layer, above the impermeable layer, the maximum hydraulic gradient at the cutoff wall tip shows a U-shaped trend with an increase in the penetration ratio and changes significantly when the penetration ratio is less than 0.2 or greater than 0.7; within the impermeable layer, the maximum hydraulic gradient at the cutoff wall tip decreases rapidly with an increase in the penetration ratio; below the impermeable layer, the maximum hydraulic gradient at the cutoff wall tip increases slowly with an increase in the penetration ratio and increases rapidly when the penetration ratio is greater than 0.7. Considering the possible inhomogeneity and uncertainty in the deep parts of the ultra-deep overburden foundation, combined with existing engineering cases, a final cutoff wall depth of 200 m is recommended.

Key words: deep overburden foundation; multilayer foundation; suspended cutoff wall; optimal depth; seepage stability

深厚覆盖层的地基结构特征是决定悬挂式防渗墙最优深度的关键因素。目前,针对防渗墙埋深对渗流场分布规律的影响有不同的认识,主要存在两种观点^[1]:一种观点侧重于防渗墙对整体渗流的阻截,认为增大防渗墙深度可有效延长渗流路径,降低覆盖层内部水力坡降,提升整体渗透稳定性;另一种观点则关注防

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1502603);国家自然科学基金项目(51679070);中国科学院青海盐湖研究所基础研究青年创新交叉团队项目(isIJCTD-2022-2);湖南省水利科技项目(XSKJ2022068-37,XSKJ2024064-41)

作者简介: 刘雨婷(2002—),女,博士研究生,主要从事岩土体渗流研究。E-mail:240802010010@hhu.edu.cn

通信作者: 罗玉龙(1980—),男,教授,博士,主要从事岩土体渗流及渗透稳定性研究。E-mail:lyl8766@hhu.edu.cn

渗墙端部与局部地层的相互作用,指出防渗墙深度存在临界值,超过该值后墙端位置水力坡降将显著抬升,若继续加深墙体,极易在墙端区域引发潜蚀等渗透破坏^[1-3]。这种最优深度的分歧,在很大程度上源于不同研究对地基结构复杂程度的考量差异。

现有多数研究是针对单层地基工况开展防渗墙最优深度分析,并给出最优贯入比(防渗墙深度与覆盖层厚度的比值)推荐取值,相关研究结论趋于统一,普遍认为最优贯入比约为 0.7;毛昶熙等^[4]的研究表明,悬挂式防渗墙对减小渗流量作用有限,直到墙深达透水地基的 0.8 时才开始显著;谢兴华等^[1]研究了防渗墙深度变化对防渗墙端部水头、坡降的影响规律,认为防渗墙的深度并非越深越好,而是存在一个最优贯入比,约为 0.7;温立峰等^[5]的研究表明,防渗墙端部最大坡降随防渗墙深度增大呈先减小后增大的规律,贯入比为 0.7 时端部坡降最小,从防渗墙端部渗透稳定的角度看最优贯入比约为 0.7;罗玉龙等^[6]对中等透水地基中防渗墙深度变化对防渗墙端部和下游坝脚坡降的影响进行了研究,发现防渗墙最优贯入比为 0.7;Salmasi 等^[7]系统探讨了不同防渗墙深度对坝基渗流控制的影响,发现防渗墙深度取为地基厚度的 0.7 是最优选择;岑威钧等^[8]发现当覆盖层渗透系数大于或等于 10^{-2} cm/s 时,防渗墙贯入比应大于 0.9;而当覆盖层渗透系数小于 1×10^{-4} cm/s 时,防渗墙贯入比只需大于 0.4 即可;金伟等^[9]通过对均匀砂土地基和内部不稳定的砂砾石地基的研究,发现防渗墙的最优贯入比也为 0.7。部分研究探讨了双层地基中悬挂式防渗墙最优贯入比:王晓燕等^[10]基于大渡河某水电站围堰工程,探讨了防渗墙深度对施工工期、下游出逸坡降和堰体渗流量的影响,提出了防渗墙的最优贯入比为 0.79;黄梅琼等^[11]的研究表明,只有当悬挂式防渗墙贯入比大于 0.75 时,才能取得较好的防渗效果;Chen 等^[12]发现悬挂式防渗墙贯入比达到 0.79 时,覆盖层最大水力坡降和闸基渗流量得到显著降低。

此外,还有少量研究探讨了防渗墙在含隔水层的多层地基中的最优深度:罗谷怀等^[13]研究认为当防渗墙进入隔水层,会与之形成联合防渗体系,渗流控制效果明显优于悬挂式防渗墙,防渗墙在相对隔水层中存在最优贯入比,约为 0.3,同时发现防渗墙端部附近的隔水层承受了较大坡降,在墙土接触面存在接触冲刷破坏的可能,应予以重视;吴梦喜等^[14]研究认为防渗墙端部区域弱透水土层内的渗透坡降数倍于允许坡降,然而这些部位在防渗墙完整的前提下渗透破坏的风险不大;王正成等^[15]研究认为防渗墙刚穿过隔水层的深度即为最优深度,此后再增加防渗墙深度已无意义。上述研究均是针对水头差小于 10 m 的低水头挡水建筑物,相关研究结论能否适用于百米以上的高坝有待深入研究。从实际工程应用来看,国内外已有多项在深厚覆盖层上采用悬挂式防渗墙的工程案例,例如瑞士卡斯提勒托心墙坝(最大覆盖层厚度大于 100.0 m,防渗墙最大深度 52.0 m)、中国冶勒沥青混凝土心墙坝(最大覆盖层厚度 420.0 m,防渗墙最大深度 140.0 m)以及中国旁多沥青混凝土心墙坝(最大覆盖层厚度 420.0 m,防渗墙最大深度 158.0 m)等。这些工程的防渗墙深度多基于地质条件、渗流控制要求和当时的施工技术水平综合确定,但其地层结构相对简单,且均未系统考虑含薄隔水层、高外水压力下的渗流演化机理。

综上,目前单层地基中悬挂式防渗墙贯入深度对渗流场影响规律的研究成果相对比较一致,但对含薄隔水层的超深厚复杂多层地基中防渗墙深度的变化对渗流场,尤其是在高外水压力条件下的影响规律还不清楚。为此,本文以某工程为背景,建立垂直防渗概化模型,通过开展大量敏感性分析,探讨超深厚复杂多层地基中防渗墙贯入深度对坝基渗流场的影响规律,并在此基础上,提出同时满足土体渗透稳定和渗流量控制标准的防渗墙最优深度,以期为工程设计提供参考。

1 工程概况

某水电工程为混凝土面板堆石坝,坝址区河床覆盖层深厚,层次结构复杂,是一种含相对隔水层的多层中等透水地基^[16]。自下而上依次为:①层、②层、③层、④层,如图 1 所示。①层和②层均为粗粒土;③层为河湖相沉积砂土层,从下到上又可细分为③-1 层、③-2 层和③-3 层,③-1 层和③-3 层均为含砾中粗砂层,为中等~弱透水性;③-2 层为弱~微透水性,具有隔水层特性,该层上下部分略有差异,上部为砂质粉土③-2-2 层,下部为粉质黏土③-2-1 层。④层由灰黄色粉土、砂及砂卵砾石组成,为强~中等透水性。坝基覆盖层的渗漏及渗透稳定问题突出,设计安全可靠的坝基防渗体系,是保障工程安全的关键^[17-19]。目前已确定采用悬挂式防渗墙作为坝基渗流控制措施,其深度的科学选取直接关系到坝基渗流安全和工程投资^[20]。

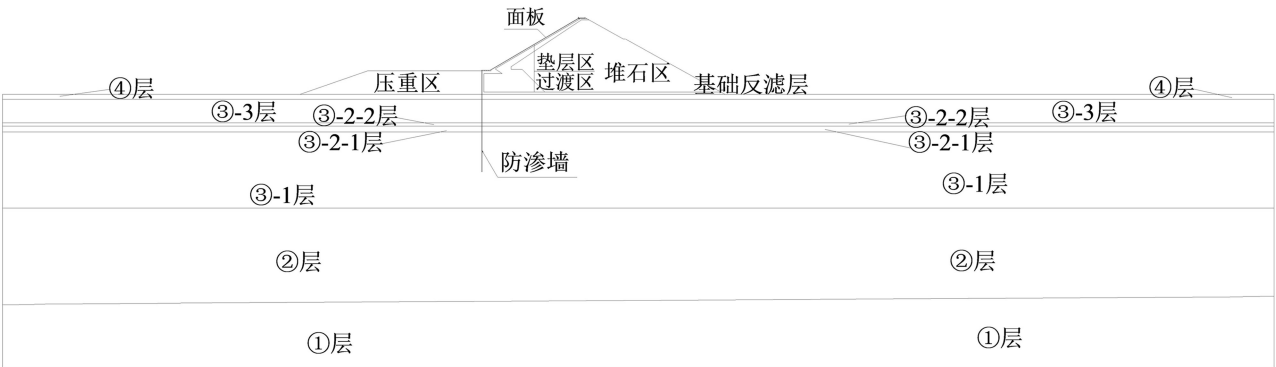


图 1 某工程概化地质剖面

Fig. 1 Generalized geological profile of a project

2 研究方法

2.1 垂直防渗模型概化

本文采用渗流有限元分析软件 Geostudio 进行建模与计算^[21-22]。基于图 1 建立了垂直防渗概化模型,概化模型范围:上游边界取至坝轴线上游约 3 000 m,下游边界取至坝轴线下游约 4 500 m。模型模拟的主要地层包括河床覆盖层①~④层,模拟的主要水工建筑物包括混凝土面板、趾板、连接板、防渗墙、垫层区、过渡区、堆石区、压重区、基础反滤层等。防渗墙端部是坝基渗透稳定评价的关键区域,亦是渗流场梯度发生急剧变化的核心位置。为精准捕捉防渗墙端部水力坡降,数值模型中采用高精度高阶单元对防渗墙进行模拟,并对防渗墙本体及其端部周边土体实施网格加密处理。

2.2 渗流计算参数及边界条件

渗流计算的相关参数见表 1,边界条件如下:上游库水位 3 070. 15 m,下游水位 2 932. 65 m,上游低于库水位的库内、两岸地表边界为已知水头边界,水头为 3 070. 15 m;下游水位以下河床、两岸地表边界为已知水头边界,水头为 2 932. 65 m;高程介于 2 932. 65~3 070. 15 m 的下游坝坡为可能出逸边界。

2.3 坝基渗流控制标准

坝基渗流控制标准是合理确定坝基防渗墙最优深度的“尺子”,传统渗流控制标准包括两方面:坝基覆盖层土体的坡降应小于各自允许坡降,同时渗流量应小于允许渗流量^[23]。本文允许渗流量采用刘杰^[23]提出的控制标准,即坝址处河道多年平均流量的 1%~3%,缺水地区采用 1%,一般地区用 3%。根据坝址区河流水文资料,本文工程的总渗流量应小于 13. 95 m³/s,单宽渗流量应小于 6. 34×10⁻³ m²/s。

表 1 坝体、坝基覆盖层渗流计算参数

Table 1 Seepage calculation parameters of dam body and overburden layers of dam foundation

区域	渗透系数 (cm/s)	允许坡降
混凝土	1. 0×10 ⁻⁷	
垫层区	1. 0×10 ⁻³	
过渡区	1. 0×10 ⁻²	
压重区、堆石区	1. 0×10 ⁻¹	
基础反滤层	1. 0×10 ⁻³	
④层	2. 0×10 ⁻²	0. 17
③-3 层	5. 0×10 ⁻³	0. 48
③-2-2 层	2. 0×10 ⁻⁵	2. 50
③-2-1 层	3. 5×10 ⁻⁶	3. 40
③-1 层	5. 0×10 ⁻³	0. 63
②层	2. 0×10 ⁻³	0. 55
①层	1. 0×10 ⁻⁴	1. 10

3 结果与分析

3.1 含隔水层的超深厚复杂多层地基中防渗墙最优深度

为系统厘清含隔水层超深厚多层坝基内防渗墙深度对坝基渗流安全的影响规律,突破现有防渗墙 200 m 施工极限^[24],增设超深防渗墙计算工况,防渗墙最大深度达到 480 m,接近完全封闭②层。共设置了 30 个防渗墙深度工况进行敏感性分析,具体而言,在③-3 层(深度范围:60~105 m)、③-2 层(111. 2~124 m)、③-1 层(130~242 m)以及②层(260~480 m)中,分别设置了 6、7、9、8 个特征深度。

由图 2 可知,防渗墙端部最大坡降随防渗墙深度演化过程大致分 3 个阶段:第 1 阶段,在隔水层③-2 层以上的地层中,随着防渗墙深度增大,防渗墙端部最大坡降呈现 U 形变化趋势,即先减小后增大,与单层地基中的变化趋势类似^[1,5-6],但在防渗墙即将进入隔水层时,坡降增大幅度比单层地基更为显著;第 2 阶段,

在隔水层③-2 层中,随着防渗墙深度的增大,端部最大坡降快速减小;第 3 阶段,在隔水层③-2 层以下的地层中,如③-1 层和②层,随着防渗墙深度的增大,端部最大坡降呈现逐渐增大的趋势。

a. 第 1 阶段,防渗墙进入③-3 层后,当防渗墙深度介于 60~70 m (贯入比 0~0.2) 时,随着深度增大,防渗墙端部最大坡降快速减小。防渗墙深度为 60、70 m 时,端部最大坡降分别为 5.45 和 4.63,均远超过③-3 层允许坡降 0.48;当防渗墙深度介于 70~90 m (贯入比 0.2~0.6) 时,随着深度增大,防渗墙端部最大坡降缓慢变化,端部最大坡降范围为 4.39~4.63;当防渗墙深度介于 90~111.2 m (贯入比 0.6~1.0) 时,防渗墙端部最大坡降随着深度增大开始快速增大,当防渗墙刚刚封闭③-3 层时,防渗墙端部最大坡降突然增大到 57.07,防渗墙端部所处的地层也由③-3 层变为③-2-1 层,同时③-3 层最大坡降也迅速增至 17.68。

b. 第 2 阶段,防渗墙进入③-2 层后,随着防渗墙深度的增大,防渗墙端部最大坡降快速减小,防渗墙深度为 111.2、114、116 m 时,防渗墙端部最大坡降分别为 57.07、20.7、15.01。

c. 第 3 阶段,防渗墙进入③-1 层后,当防渗墙深度介于 130~210 m (在③-1 层中的贯入比小于 0.7) 时,随着防渗墙深度的增大,防渗墙端部最大坡降线性增大,由 130 m 时的 0.11 增大到 210 m 时的 0.4,均低于③-1 层允许坡降 0.63,满足防渗墙端部渗透稳定要求;当防渗墙深度介于 210~242 m (贯入比大于 0.7) 时,防渗墙端部最大坡降随着防渗墙深度的增大而显著增大,防渗墙深度 242 m 时,端部最大坡降为 0.76,已超过允许坡降,不再满足防渗墙端部的渗透稳定要求。防渗墙进入②层后,变化规律与③-1 层类似。当防渗墙深度介于 260~420 m (在②层中的贯入比小于 0.7) 时,防渗墙端部最大坡降随着防渗墙深度的增大缓慢增大;当防渗墙深度介于 420~480 m (贯入比大于 0.7) 时,防渗墙端部最大坡降随着防渗墙深度的增大快速增大。此外,防渗墙进入②层后,防渗墙端部最大坡降均超过②层允许坡降。

综上,基于防渗墙端部土体渗透稳定的角度评价,可以得到关于防渗墙最优深度的初步结论:防渗墙端部不能位于③-3 层,防渗墙端部附近③-3 层最大坡降介于 4.39~17.68,均远超其允许坡降 0.48,坝基渗流安全无法保障,会因渗径过短存在较大渗透破坏风险。防渗墙端部也不能位于③-2 层,防渗墙端部附近③-2 层的最大坡降多在 10 以上,最大达到 57.07,远超过③-2-2 层、③-2-1 层的允许坡降,且超限范围大,③-2-2 层坡降超过允许坡降的区域介于防渗墙上游侧 1415 m 至下游侧 1025 m;③-2-1 层坡降超过允许坡降的区域介于防渗墙上游侧 1593 m 至下游侧 1127 m,坝基渗透稳定性难以满足要求。防渗墙端部应该位于③-1 层,防渗墙进入③-1 层后,在当前防渗墙施工水平(深度 200 m 左右)下,③-1 层的最大坡降均低于其允许坡降,满足渗透稳定要求。

为了进一步评价可行性,整理了防渗墙深度介于 130~200 m 时,其他坝基覆盖层土体的最大坡降和单宽渗流量,结果如表 2、图 3 所示。由表 2 可知,在防渗墙深度介于 130~200 m 时,④层、③-3 层、③-1 层、②层的最大坡降均小于各自允许坡降,满足渗透稳定要求。由图 3 可知,单宽渗流量低于允许渗流量,③-2 层起到了很好的坝基防渗作用,坝基渗流量主要从③-2 层以上的③-3 层经过,随着防渗墙逐渐封闭③-3 层,单宽渗流量快速减小,尤其当防渗墙深度介于 105~111.2 m 时,单宽渗流量骤然减小,由 $5.1\times10^{-4}\text{ m}^2/\text{s}$ 减

表 2 ③-2 层完好时防渗墙位于③-1 层对坝基渗流控制效果影响统计

Table 2 Statistics of effects of cutoff wall located in layer ③-1 on seepage control of dam foundation under intact layer ③-2

防渗墙深度/m	坝基覆盖层最大坡降					
	防渗墙端部(③-1 层)	③-2-1 层	③-2-2 层	③-3 层	下游出溢点④层	②层
130	0.11	7.94	5.17	0.01	0.03	0.04
150	0.22	7.89	5.16	0.01	0.03	0.04
170	0.28	7.84	5.14	0.01	0.03	0.05
190	0.35	7.78	5.11	0.01	0.03	0.05
200	0.37	7.75	5.09	0.01	0.03	0.06

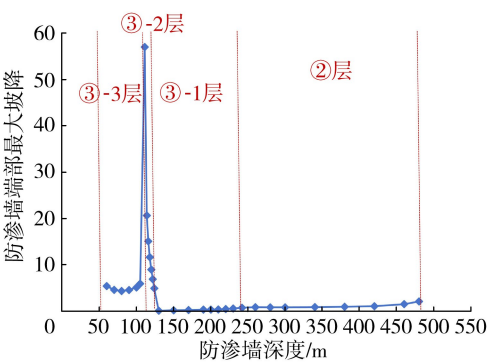


图 2 防渗墙端部最大坡降随防渗墙深度演化规律
Fig. 2 Evolution laws of maximum hydraulic gradient at cutoff wall tip with cutoff wall depth

小至 $1.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 。之后,随着防渗墙深度的增大,单宽渗流量缓慢减小,防渗墙深度达到 480 m 时,减小至 $1.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

这里需要特别说明的是,以上关于防渗墙最优深度的论证基于一个前提,即③-2-2 层、③-2-1 层均能起到很好的防渗作用,然而实际上③-2-2 层、③-2-1 层的最大坡降均远超允许坡降且超限范围很大。以防渗墙深度 200 m 为例,如图 4 所示,此时③-2-2 层最大坡降 5.09,超限范围介于防渗墙上游侧 1 455 m 至下游侧 1 016 m;③-2-1 层最大坡降 7.7,超限范围介于防渗墙上游侧 858 m 至下游侧 633 m。因此,③-2-2 层、③-2-1 层可能存在大面积失效风险。综上,当坝基隔水层③-2 层完好的条件下,防渗墙的最优深度要求为防渗墙穿过③-2 层进入③-1 层即可,如 130 m。

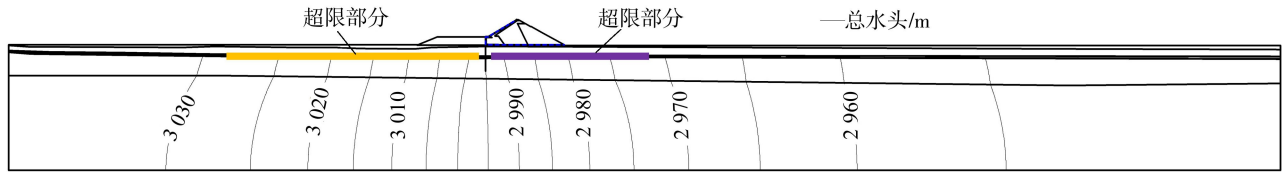


图 4 防渗墙深度 200 m 时渗流场及③-2 层坡降超限范围

Fig. 4 Seepage field and exceedance range of hydraulic gradient in layer ③-2 under cutoff wall depth of 200 m

3.2 隔水层失效情况下超深厚复杂多层地基中防渗墙最优深度

假设③-2 层因承担坡降过大,且因超限范围大而彻底失效,考虑到③-2 层是夹在③-1 层和③-3 层之间的一个薄层,即使发生渗透破坏,其渗透性也会小于或等于③-1 层、③-3 层,因此这里取最不利情况,假设③-2 层完全失效,其渗透系数等于③-1 层和③-3 层,同时③-2 层允许坡降也将降低,假设与③-1 层相同,为 0.63。需要说明的是,由于③-3 层与③-1 层渗透系数相同,同时③-2 层又完全失效变为③-1 层,因此防渗墙深度介于 60~242 m 时,防渗墙端部均在同一地层中。与第 2.1 节一致,本节共计开展了 30 个防渗墙深度的分析。

由图 5 可知,防渗墙位于③层或②层中时,防渗墙端部最大坡降的变化趋势类似,均呈 U 形,即当防渗墙在③层或②层中的贯入比小于 0.2 时,防渗墙端部最大坡降随着贯入比的增大快速减小;当贯入比介于 0.2~0.7 时,防渗墙端部最大坡降缓慢减小;而当贯入比大于 0.7(②层)或 0.8(③层)时,端部最大坡降又快速增大,总趋势与单层地基中的变化趋势类似^[1,5-6]。

防渗墙进入③层后,当防渗墙深度介于 60~90 m (在③层中的贯入比小于 0.2)时,防渗墙端部最大坡降随着深度增大而快速减小,防渗墙深度为 60、90 m 时,端部最大坡降分别为 4.58 和 3.21,均远超过③-3 层允许坡降 0.48;当防渗墙深度介于 90~210 m(贯入比 0.2~0.8)时,防渗墙端部最大坡降随着深度增大而缓慢减小,防渗墙深度 210 m 时,端部最大坡降 2.6,远超过③-1 层允许坡降 0.63;当防渗墙深度超过 210 m(贯入比 0.8~1.0)时,防渗墙端部最大坡降随着深度增大又快速增大,如防渗墙深度 230 m 时,防渗墙端部最大坡降迅速增至 3.36。

防渗墙穿过③层进入②层后,当防渗墙深度介于 260~300 m (在②层中的贯入比小于 0.2)时,防渗墙端部最大坡降随着深度增加快速减小,防渗墙深度为 260、300 m 时,端部最大坡降分别为 3.97 和 3.17,均远超过②层允许坡降 0.55;当防渗墙深度介于 300~420 m(贯入比介于 0.2~0.7)时,防渗墙端部最大坡降随着

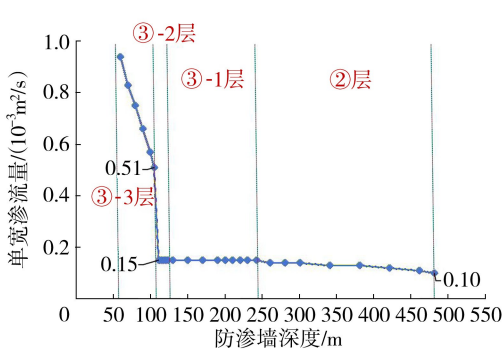


图 3 单宽渗流量随防渗墙深度演化规律

Fig. 3 Evolution laws of unit-width seepage discharge with cutoff wall depth

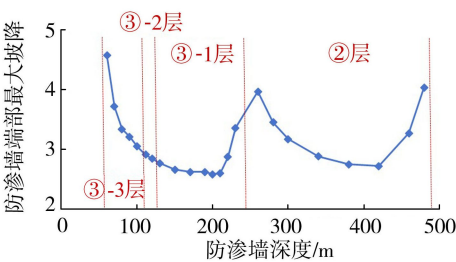


图 5 隔水层失效时防渗墙端部最大坡降随防渗墙深度演化规律

Fig. 5 Evolution laws of maximum hydraulic gradient at cutoff wall tip with cutoff wall depth under impermeable layer failure

深度增大缓慢减小,防渗墙深度 420 m 时,端部最大坡降为 2.72,仍然远超过②层允许坡降;当防渗墙深度大于 420 m(贯入比介于 0.7~1.0)时,防渗墙端部最大坡降随着防渗墙深度的增大再次快速增大,如防渗墙深度 480 m 时,防渗墙端部最大坡降迅速增至 4.04。

由图 2、图 5 可知,超深厚复杂多层地基中是否存在隔水层对防渗墙端部最大坡降的演变规律影响显著。当坝基中不存在隔水层时,在各地层中,随着防渗墙贯入比的增大,防渗墙端部最大坡降均呈现 U 形趋势。当坝基中存在隔水层时,在隔水层以上的地层中,随着防渗墙贯入比的增大,防渗墙端部最大坡降均呈 U 形趋势;在隔水层中,随着防渗墙贯入比的增大,端部最大坡降快速减小;在隔水层以下的地层中,随着防渗墙贯入比的增大,端部最大坡降逐渐缓慢增大,当贯入比大于 0.7 时,端部最大坡降快速增大。

由图 5 可知,当隔水层③-2 层失效变为③-1 层时,防渗墙端部最大坡降均超过③层允许坡降,但相对来说,防渗墙深度介于 130~200 m 时渗透坡降较小,因此在防渗墙深度介于 130~200 m 的范围内寻找最优深度。由图 6 可知,从防渗墙端部最大坡降角度评价,防渗墙最优深度为 170 m;随着防渗墙深度增大,端部最大坡降呈分级线性减小的趋势,130~170 m 区间下降速度更快,当防渗墙深度超过 170 m 时,端部最大坡降减小不明显,仅从 170 m 时的 2.62 减小为 200 m 时的 2.58。尽管防渗墙端部最大坡降远大于③-1 层的允许坡降 0.63,但超限范围有限,仅集中在防渗墙端部附近 19 m 的范围,考虑到③-1 层土体为颗粒组成较为均匀的内部稳定土体^[2],在防渗墙端部附近无明显渗流出口的条件下,③-1 层内部的细颗粒没有向下游移动的空间,因此综合评价认为防渗墙端部附近③-1 层土体能够满足渗透稳定要求。

由图 7 可知,从坝基覆盖层最大坡降角度评价,防渗墙最优深度为 170 m;随着防渗墙深度的增大,③-2-1 层、③-3 层最大坡降均呈现分级线性减小趋势,130~170 m 区间下降速度更快,当防渗墙深度超过 170 m 时,③-2-1 层、③-3 层最大坡降减小不明显,且均小于各自允许坡降,满足渗透稳定要求。下游出溢点附近④层土体的最大坡降呈线性减小趋势,当防渗墙深度 170 m 时,最大坡降 0.19,大于④层允许坡降 0.17,在下游出口做好反滤保护后,④层土体也能满足渗透稳定要求。此外,③-2-2 层的坡降介于 0.07~0.08,②层坡降介于 0.21~0.36,均小于其允许坡降,也都满足渗透稳定要求。从单宽渗流量角度评价,防渗墙最优深度为 130 m。随着防渗墙深度的增大,单宽渗流量呈线性减小趋势,防渗墙深度分别为 130 m 和 200 m 时,单宽渗流量分别为 9.3×10^{-4} m²/s 和 7.3×10^{-4} m²/s,均小于允许渗流量 6.34×10^{-3} m²/s。综上,当坝基隔水层③-2 层失效的情况下,防渗墙最优深度应为 170 m。

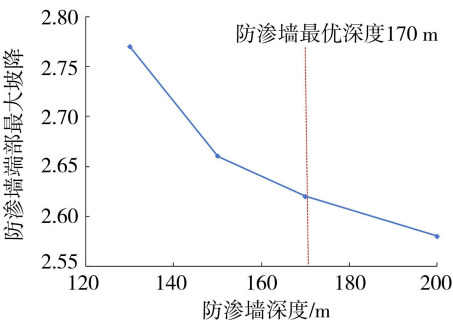


图 6 防渗墙端部最大坡降与防渗墙深度的关系
Fig. 6 Relationship between maximum hydraulic gradient at cutoff wall tip and cutoff wall depth

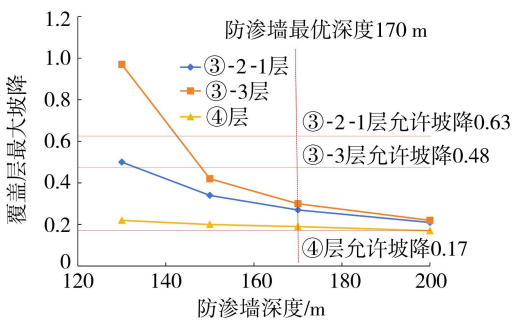


图 7 坝基主要覆盖层最大坡降与防渗墙深度的关系
Fig. 7 Relationship between maximum hydraulic gradient in main overburden layers of dam foundation and cutoff wall depth

3.3 最优深度建议值

假设隔水层③-2 层完好,防渗墙最优深度为穿过③-2 层进入③-1 层即可;假设坝基隔水层③-2 层因大范围超过允许坡降而发生完全失效变为③-1 层,防渗墙最优深度为 170 m。前者为理想状态,后者对应坝基渗流的最不利状态,而实际情况应该是介于两者之间,即大坝蓄水后,坝基隔水层③-2 层局部可能出现失效破坏,但是一旦局部失效后,渗透压力就会得到释放,不会导致③-2 层完全失效变为③-1 层,因此从优化分析的角度确定,防渗墙的最优深度应为 170 m,该深度可以确保坝基的渗流安全。

此外,由于本工程坝基覆盖层超深厚,地基深部的地质条件可能无法通过有限地质勘察完全掌握,且深厚覆盖层本身的不均匀性比较显著,加大防渗墙深度可以最大限度地减小这种不确定性因素对坝基渗流安全的不利影响,同时结合已有工程案例,西藏旁多水电站,坝高仅 73 m,覆盖层厚度超过 420 m,防渗墙深度

158 m^[24];新疆大河沿水库,坝高仅 75 m,覆盖层厚度 180 m,防渗墙深度 186 m^[25]。因此,从工程不确定性、已有工程经验角度,建议坝基防渗墙深度应达到 200 m。

4 结 论

a. 当超深厚复杂多层地基中存在隔水层时,在隔水层以上的地层中,随着防渗墙深度增大,防渗墙端部最大坡降均呈 U 形变化趋势,即当防渗墙在该地层中的贯入比介于 0~0.2 时,防渗墙端部最大坡降随着贯入比增大快速减小;当贯入比介于 0.2~0.6 时,端部最大坡降随着贯入比增大缓慢变化;当贯入比介于 0.6~1.0 时,端部最大坡降随着贯入比增大又开始快速增大;在隔水层中,随着防渗墙贯入比的增大,端部最大坡降快速减小;在隔水层以下的地层中,随着贯入比的增大,端部最大坡降先缓慢增大,当贯入比大于 0.7 时,端部最大坡降开始快速增加。

b. 当超深厚复杂多层地基中不存在隔水层时,在各地层中,防渗墙端部最大坡降随着防渗墙贯入比的增大均呈现 U 形变化趋势,即当防渗墙在该地层中的贯入比小于 0.2 时,防渗墙端部最大坡降随着贯入比的增大快速减小;当贯入比介于 0.2~0.7 时,防渗墙端部最大坡降缓慢减小;而当贯入比大于 0.7(②层)或 0.8(③层)时,端部最大坡降又会随着贯入比的增大开始快速增大。

c. 考虑坝基隔水层③-2 层可能因承担坡降过大而局部失效的不利影响,确定了防渗墙的最优深度为 170 m,在此基础上,同时考虑本工程超深厚覆盖层地基深部可能存在的不均匀性和不确定性,结合已有工程案例,最终建议本工程防渗墙的深度为 200 m。

参考文献:

[1] 谢兴华,王国庆. 深厚覆盖层坝基防渗墙深度研究[J]. 岩土力学,2009,30(9):2708-2712. (Xie Xinghua,Wang Guoqing. A study of anti-seepage wall depth in thick overburden dam base[J]. Rock and Soil Mechanics,2009,30(9):2708-2712. (in Chinese))

[2] 罗玉龙,张兴杰,张海彬,等. 深厚覆盖层地基潜蚀研究综述[J]. 岩土力学,2022,43(11):3094-3106. (Luo Yulong,Zhang Xingjie,Zhang Haibin,et al. Review of suffusion in deep alluvium foundation[J]. Rock and Soil Mechanics,2022,43(11):3094-3106. (in Chinese))

[3] 金伟,邱子源,张丹,等. 泸定水电站坝基覆盖层深部潜蚀对土骨架变形影响评价试验研究[J]. 岩土工程学报,2024,46(4):705-715. (Jin Wei,Qiu Ziyuan,Zhang Dan,et al. Experimental study and evaluation on influence of deep alluvium foundation suffusion on deformation of soil skeleton in foundation of Luding Hydropower Station[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2024,46(4):705-715. (in Chinese))

[4] 毛昶熙,段祥宝,毛佩郁. 堤基悬挂式截墙的防渗作用[C]//长江护岸工程(第六届)及堤防防渗工程技术经验交流会. 武汉:中国水利水电出版社,2001:313-317.

[5] 温立峰,范亦农,柴军瑞,等. 深厚覆盖层地基渗流控制措施效果数值分析[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(1):127-132. (Wen Lifeng,Fan Yinong,Chai Junrui,et al. Numerical analysis on effect of seepage control measure for deep overburden foundation[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering,2014,25(1):127-132. (in Chinese))

[6] 罗玉龙,孔祥峰,罗斌,等. 深厚覆盖层中新型扩底防渗墙对防渗效果的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(2):140-145. (Luo Yulong,Kong Xiangfeng,Luo Bin,et al. Influence of a new cutoff wall of expanded base type on the seepage controlling in deep overburden foundation[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46 (2) : 140-145. (in Chinese))

[7] Salmasi F,Nouri M,Abraham J. Upstream cutoff and downstream filters to control of seepage in dams[J]. Water Resources Management,2020,34(13):4271-4288.

[8] 岑威钧,赵昱豪,李邓军,等. 深厚覆盖层土工膜防渗堆石坝渗流场影响因素分析[J]. 长江科学院院报,2023,40(4):95-99. (Cen Weijun,Zhao Yuhao,Li Dengjun,et al. Factors influencing seepage field of geomembrane faced rockfill dams on deep overburden[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute,2023,40(4):95-99. (in Chinese))

[9] 金伟,张子豪,陈秋怡,等. 悬挂式防渗墙地基渗透破坏特征研究[J]. 人民长江,2025,56(4):169-175. (Jin Wei,Zhang Zihao,Chen Qiuyi,et al. Seepage failure characteristics of foundations with suspended cut-off walls[J]. Yangtze River,2025,56(4):169-175. (in Chinese))

[10] 王晓燕,党发宁,田威,等. 大渡河某水电站围堰工程中悬挂式防渗墙深度的确定[J]. 岩土工程学报,2008,30(10):1564-

1568. (Wang Xiaoyan, Dang Fanning, Tian Wei, et al. Determination of depth of suspended cut-off walls in cofferdam of a hydraulic power station in Dadu River [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30 (10) : 1564-1568. (in Chinese))

[11] 黄梅琼,柴军瑞,白勇,等. 深覆盖层地基防渗措施对渗流场影响数值分析[J]. 长江科学院院报,2009,26(10) : 126-128. (Huang Meiqiong, Chai Junrui, Bai Yong, et al. Numerical analysis for influence of anti-seepage measure of deep overburden foundation on seepage field[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(10) : 126-128. (in Chinese))

[12] Chen Kaikun, Chen Yifeng, Yu Hao, et al. Optimized control of seepage and deformation in a dam foundation on thick overburden deposits considering coupled hydromechanical effects[J]. International Journal of Geomechanics, 2025, 25(8) : 04025158.

[13] 罗谷怀,罗玉龙,彭华. 洞庭湖区堤防垂直防渗模型研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(8) : 2287-2291. (Luo Guhuai, Luo Yulong, Peng Hua, et al. Study of vertical cutoff wall model for levees in Dongting Lake region[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29 (8) : 2287-2291. (in Chinese))

[14] 吴梦喜,杨连枝,王锋. 强弱透水相间深厚覆盖层坝基的渗流分析[J]. 水利学报, 2013, 44(12) : 1439-1447. (Wu Mengxi, Yang Lianzhi, Wang Feng. Seepage analysis of a dam foundation with deep deposit composed of strong and weak permeable layers alternately[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(12) : 1439-1447. (in Chinese))

[15] 王正成,毛海涛,姜海波,等. 弱透水层深度对深厚覆盖层坝基渗控的影响研究[J]. 人民长江, 2016, 47(7) : 54-58. (Wang Zhengcheng, Mao Haitao, Jiang Haibo, et al. Effect of weak aquifer depth to seepage prevention of dam foundation on thick overburden layer[J]. Yangtze River, 2016, 47(7) : 54-58. (in Chinese))

[16] GB 50287—2016 水利发电工程地质勘察规范[S].

[17] 朱瑞恒,岑威钧,薛阳,等. 坝基廊道开裂对心墙坝渗流特性的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(4) : 22-28. (Zhu Ruiheng, Cen Weijun, Xue Yang, et al. Influence analysis of dam foundation gallery cracks on seepage characteristics of core dam[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(4) : 22-28. (in Chinese))

[18] Xi Niannian, Tong Fuguo, Liu Gang, et al. Finite element analysis of dam foundation seepage effect on cutoff wall depth of Guxue Concrete Gravity Dam[J]. Advanced Materials Research, 2014, 1073-1076 : 1729-1732.

[19] 柴军瑞,曹靖,丁卫华,等. 黄河流域库坝系统渗透破坏孕灾机理与安全防控研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45 (5) : 26-35. (Chai Junrui, Cao Jing, Ding Weihua, et al. Review of disaster-causing mechanism and safety prevention and control of seepage failure in reservoir-dam systems of the Yellow River Basin[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(5) : 26-35. (in Chinese))

[20] 沈振中,邱莉婷,周华雷. 深厚覆盖层上土石坝防渗技术研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(5) : 27-35. (Shen Zhenzhong, Qiu Liting, Zhou Hualei. Review of seepage control of earth-rockfill dams on thick overburden layer[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(5) : 27-35. (in Chinese))

[21] Shakouri B, Mohammadi M. Evaluation of penetration depth for cutoff walls in the core of earth dams[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2020, 38(1) : 151-167.

[22] 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))

[23] 刘杰. 砂砾石地基上闸坝渗流控制原理与方法[J]. 水电站设计, 1997, 13(4) : 12-19. (Liu Jie. Sluice seepage control principle and method on sand-gravel foundation[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 1997, 13(4) : 12-19. (in Chinese))

[24] 宗敦峰,刘建发,肖恩尚,等. 水工建筑物防渗墙技术 60 年 II : 创新技术和工程应用[J]. 水利学报, 2016, 47(4) : 483-492. (Zong Dunfeng, Liu Jianfa, Xiao Enshang, et al. 60 years' perspective of the diaphragm wall technology for seepage control, Part II. Innovation and applications[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(4) : 483-492. (in Chinese))

[25] 李江,柳莹,贾洪全,等. 新疆深厚覆盖层坝基超深防渗墙建设关键技术[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2022, 20(1) : 47-56. (Li Jiang, Liu Ying, Jia Hongquan, et al. Key technology for construction of super deep cut-off wall of dam foundation with deep overburden layer in Xinjiang[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2022, 20(1) : 47-56. (in Chinese))

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.04.018

水沙调控作用下植被对黄河三角洲河口坝地形演变的影响

于子奇¹, 武国相^{1,2}, 王柯萌¹, 梁丙臣^{1,2}

(1. 中国海洋大学工程学院; 2. 山东省海洋工程重点实验室)

摘要:以黄河三角洲为原型,基于 Delft3D 构建具有典型河口坝地形特征的理想模型,模拟分析了黄河调水调沙作用下有、无植被对黄河三角洲河口坝地形演变的影响。结果表明:有植被时调水调沙后河口坝淤积量比无植被时减少 63.7%,这与植被可以捕沙促淤的一般认知相反;河口坝植被的阻力效应改变了分汊河道与河口坝的分流比,使过坝流量减少 70%~85%,促使挟沙水流更多通过河道入海,导致河口坝的局部泥沙供给和捕集量降低;调水期与调沙期的植被地貌效应也有显著差异,无植被时河口坝的垂向淤积和平面扩展主要发生在径流量低、含沙量高的调沙期,调水期几乎没有淤积,而有植被时调水期河口坝垂向淤积显著,但其平面扩展主要发生在调沙期,且仅限于来沙方向。

关键词:河口坝;调水调沙;植被;地貌演化;黄河三角洲

Effect of vegetation on topographic evolution of river mouth bars in the Yellow River Delta under water and sediment regulation

Yu Ziqi¹, Wu Guoxiang^{1,2}, Wang Kemeng¹, Liang Bingchen^{1,2}

(1. College of Engineering, Ocean University of China; 2. Key Laboratory of Ocean Engineering of Shandong Province)

Abstract: By taking the Yellow River Delta as a prototype, an idealized model featuring typical river mouth bar topography was constructed using Delft3D. The model was used to simulate and analyze the influence of vegetation on the topographic evolution of the river mouth bar in the Yellow River Delta under water and sediment regulation. The results show that with vegetation, the sediment deposition volume of the river mouth bar after the water and sediment regulation is reduced by 63.7% compared to the scenario without vegetation, which contrasts with the general understanding that vegetation promotes sediment trapping and accumulation. The flow resistance effect of the vegetation on the river mouth bar alters the flow partitioning ratio between the bifurcated channels and the river mouth bar, reducing the flow discharge over the bar by 70%-85%. This redirects sediment-laden flows primarily through the river channel to the sea, leading to a decrease in local sediment supply and trapping on the river mouth bar. Furthermore, the geomorphic effects of vegetation differ significantly between the water-regulation period and the sediment-regulation period. In the absence of vegetation, vertical accretion and lateral expansion of the river mouth bar mainly occur during the sediment-regulation period, characterized by low discharge and high sediment concentration, with almost no deposition during the water-regulation period. In contrast, when vegetation is present, significant vertical accretion of the river mouth bar occurs during the water-regulation period, while its lateral expansion mainly takes place during the sediment-regulation period and is confined to the direction of sediment supply.

Key words: river mouth bar; water and sediment regulation; vegetation; geomorphic evolution; the Yellow River Delta

河口三角洲是河流与海洋过渡区域重要的地貌单元和生态系统^[1]。径流入海后,在水体密度差、水流展宽及水面比降减小的共同影响下,所携带的泥沙沉积于入海口附近,形成拦门沙或河口坝地貌^[2-5]。河口坝是受径流和海洋动力影响最剧烈的区域之一,其形成和演变是三角洲动力地貌过程的重要组成部分。在我国黄河口、长江口均发育有典型的河口坝地貌特征^[6-7]。黄河现行流路口门处还因为自然改道形成了河口岛屿^[8]。

河口坝、河口岛屿高程较低,常发育有芦苇、盐地碱蓬和互花米草等湿地植被^[9-13]。这些植被具备良好

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3204301);国家自然科学基金项目(52071305)

作者简介:于子奇(2000—),男,硕士研究生,主要从事三角洲地貌-植被耦合研究。E-mail:yuziqinet@163.com

通信作者:武国相(1986—),男,副教授,博士,主要从事海洋灾害与生态减灾研究。E-mail:guoxiang@ouc.edu.cn

的消浪缓流、固滩促淤功能,在三角洲地貌发育过程中发挥着重要的作用^[14-20]。已有研究^[21-22]表明,植被对沉积过程的强化不仅加速了河口坝的形成过程,也在一定程度上推动了三角洲岛屿的演化。此外,植被对土壤的稳定作用还显著改变了河口的水力几何形态,进而影响了河口射流的水动力特征。Zolezzi 等^[23]研究表明,植被的黏聚性能够有效削弱水流对岸滩的侵蚀能力,有助于形成更为稳定的三角洲地貌以及更窄、更深的河道。尽管上述研究较为系统地揭示了植被在长时间尺度下对河口坝地貌演化的塑造作用,但在不同来水来沙条件下,尤其是短历时剧烈变化的水沙过程背景下,植被对河口区域水动力结构与冲淤格局的具体响应机制仍有待深入探讨^[24-26]。

人类活动对河口地貌格局及植被分布产生了深远影响,尤其在水沙调控、土地利用和生态修复等方面的干预更为显著^[27-31]。为改善黄河下游水沙平衡、缓解河道淤积,自 2002 年起,黄河开始实施调水调沙工程措施^[32-35]。该举措显著改变了黄河三角洲的水沙输移过程,提高了泥沙入海后的沉积效率^[36-38]。在每轮调水调沙过程中,河口坝植被常暴露于高流量洪峰之下,直接影响河口区域的水动力特征与泥沙输移路径^[39-40]。与无植被的河口坝相比,受植被作用影响的河口坝能否在调水调沙的过程中获得更大的沉积速率,其坝体沉积形态与无植被河口坝有何差异,是本文研究探讨的核心问题。

本文以黄河三角洲河口坝为原型,基于 Delft3D 构建理想河口坝的地形演变数值模型,模拟分析调水调沙背景下植被对黄河三角洲河口坝地貌演变过程的具体影响,以期为黄河三角洲地貌演变和保护管理提供参考。

1 研究方法

1.1 模型设置

参考黄河三角洲地貌特征及河口来水来沙模式,本文基于 Delft3D 构建包含河口坝地形的理想河口模型,并以黄河三角洲典型盐沼植被特征参数为原型,建立植被模型与 Delft3D 水动力-地貌耦合模型,模拟调水调沙期间有、无植被影响下河口坝的短期形态演变。设置两种模拟工况:工况一模拟无植被条件下河口口水沙格局的动态变化对河口坝形态的影响;工况二保持河口动力条件不变,于河口坝坝顶引入植被变量,以探究植被在调水调沙过程中对河口区域地貌沉积过程的影响。

Delft3D 是一款基于纳维-斯托克斯方程(N-S 方程)的数值模拟软件,采用耦合求解方法对水动力、泥沙输运及形态动力学进行模拟,在河口与三角洲等复杂环境中得到了广泛应用和验证^[41]。参考 Zheng 等^[6]的建模方法,设计模型计算域为边长 7 500 m 的正方形(图 1),网格宽 b 为 25 m,分辨率为 25 m×25 m。河道的有效宽度为 1 500 m,初始河道深 2 m,河道两侧设置宽 750 m、高程为 3 m 的海岸,以防止水流通过陆地流动。为了收束径流、保持河口射流强度,初始河道的横截面设置为高斯曲线(图 2)。近岸水深为 2.75 m,并随着海床坡度 0.000 1 逐渐增加(图 3)。

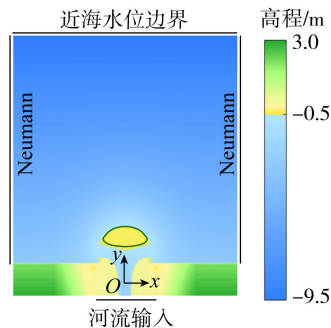


图 1 模型计算域与边界设置

Fig.1 Model computational domain and boundary setup

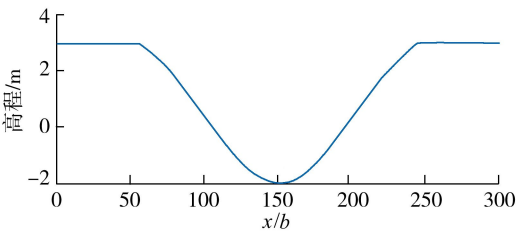


图 2 河道横截面

Fig.2 Cross-section of river channel

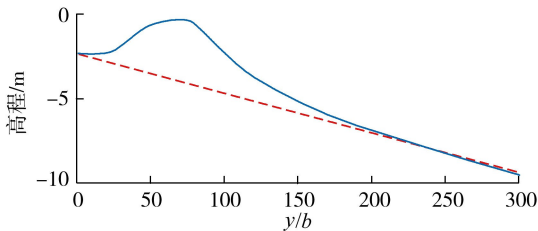


图 3 河道纵截面

Fig.3 Longitudinal section of river channel

模型的开放边界包括 1 个上游的河流边界和 3 个向海的边界(图 1):河流边界设定了流量和含沙量,是计算域内唯一的淡水输入及泥沙来源;平行于海岸线的向海边界水位固定为 0 m;两个向海侧边界采用零梯

度的 Neumann 边界条件。这一边界设置保证了模型在模拟过程中,计算域内外水体和泥沙能够自由交换。模型时间步长通过一系列敏感性测试确定为 12 s,以确保在足够计算精度下尽量缩短计算时长。

在黄河口地区,泥沙主要由粉砂和细砂组成,其粒径分布存在明显的区域性差异^[42]。根据 Wang 等^[43]的长期观测,高流量对下游河道的冲刷导致泥沙中值粒径从小浪底水库出口处的 6 μm 提高至利津站的 20 μm。Qiao 等^[44]对河口悬浮泥沙的采样进一步验证了泥沙粒径的时空差异。根据调水调沙期间黄河口地区的泥沙参数,本文模型选择 20 μm 作为泥沙的中值粒径,设定泥沙密度为 2 650 kg/m³、干床密度为 1 600 kg/m³,以反映调水调沙期间河口的来沙特征。

1.2 径流条件概化

为了准确反映调水调沙过程中河口的水沙输入模式,统计了 2008—2022 年调水调沙期间河口水沙特征值(表 1)。由表 1 可见:①调水调沙期间进入河口的流量和含沙量显著增加,最大流量可达到年平均流量的 4~6 倍,水体最大含沙量甚至达到年平均含沙量的 6~10 倍;②最大流量与水体最大含沙量的出现日期不匹配,河口水沙不同步的特征明显。

表 1 2008—2022 年黄河调水调沙期间河口水沙特征值

Table 1 Water and sediment characteristics during water and sediment regulation period of the Yellow River from 2008 to 2022

年份	平均流量/(m ³ /s)	最大流量/(m ³ /s)	最大流量出现日期	平均含沙量/(kg/m ³)	最大含沙量/(kg/m ³)	最大含沙量出现日期
2008	462	4 050	06-29	5.30	56.0	07-05
2009	421	3 730	07-01	4.22	15.9	06-25
2010	612	3 900	07-08	8.66	69.7	07-10
2011	584	3 230	09-23	5.03	40.1	07-11
2012	895	3 530	07-04	6.48	36.7	07-11
2013	751	4 360	07-30	7.30	29.5	07-25
2014	362	3 150	07-07	2.63	19.6	07-12
2015	423	2 720	07-09	2.35	10.4	07-05
2016	260	1 480	07-28	1.29	4.4	07-26
2017	284	813	12-08	0.860	3.1	04-28
2018	1 058	3 670	07-11	8.89	48.1	07-20
2019	989	4 060	08-12	8.68	26.3	07-21
2020	1 140	4 580	07-03	8.73	24.1	07-30
2021	1 399	5 240	10-08	5.51	37.9	07-10
2022	827	4 030	07-02	4.79	39.2	07-24
平均	698	3 465		5.38	30.0	

调水调沙期间河口的水沙动态变化如图 4 所示。通过将每次调水调沙期间最大含沙量出现的时间节点在时间轴上重合,可以观察到调水调沙期间黄河入海口流量和含沙量的分布呈现出一定的规律。每次调水调沙通常持续 20 d 左右,在此期间可以按照河口水沙特征的差异将整个调水调沙过程划分为调水期和调

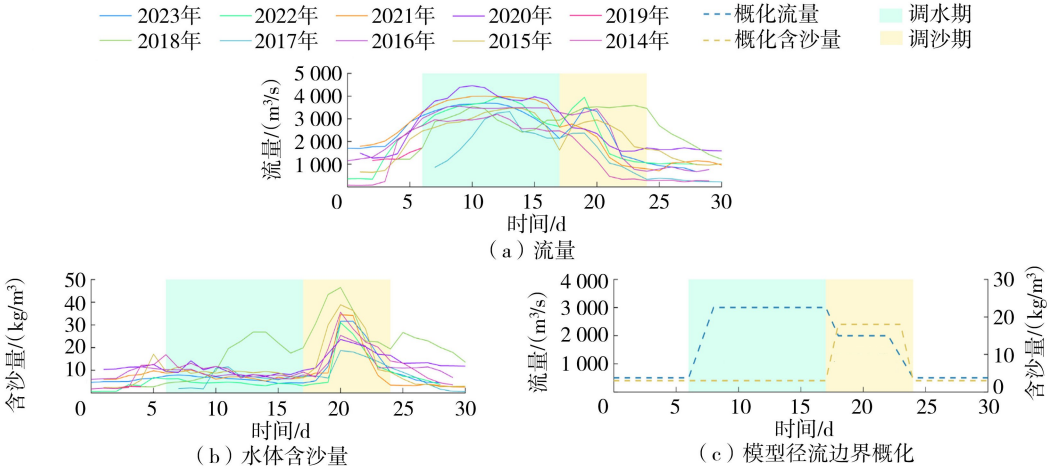


图 4 2014—2023 年黄河利津站水沙动态与径流边界概化

Fig. 4 Water and sediment regime at Yellow River Lijin Station (2014-2023) and schematization of runoff boundary

沙期。调水期河口入海流量快速升高,通常可以保持在 3 000 m³/s 以上,而含沙量较之前并无明显提升;调沙期入海含沙量达到年内最高值,此阶段的主要目的是通过增加流量来携带和冲刷河道及水库底部的泥沙,以防止河道淤积。

模型径流边界条件的设定是区分调水期与调沙期水沙输入差异的关键环节,本文基于水利部黄河水利委员会提供的水文资料(<http://www.yrcc.gov.cn/gzfw/szygb/>),对黄河调水调沙期间的水沙输入过程进行了系统性概化(图 4(c)),据此设定模型的径流边界条件。该概化处理在保留调水调沙不同阶段水沙特征的基础上,简化了径流边界,提高了模型运行的稳定性与计算效率。概化后的调水调沙过程总计 18 d,调水期持续 11 d,期间流量从 500 m³/s 逐步提高至 3 000 m³/s,含沙量 3 kg/m³;调沙期持续 7 d,流量下降至 2 000 m³/s,含沙量从 3 kg/m³ 迅速升高至 18 kg/m³。模型在开始和结束阶段各设置 2 d 缓冲期,旨在实现流量向调水调沙主阶段的平稳过渡,减少水动力突变对河道和河口坝地形的冲击。

1.3 植被模拟方法

植被对水流的影响通常表示为水力粗糙度和流动阻力的影响,本文模型采用 Baptist 公式^[45]来模拟植被阻力。将植被表示为刚性圆柱体,其特征参数包括茎直径 D 、植被高度 H 、植被密度 m 和阻力系数 C_D 。植被影响下的总阻力 τ_t 由床面阻力 τ_b 和植被阻力 τ_v 组成:

$$\tau_t = \rho g h i = \tau_b + \tau_v$$

1

其中

$$\tau_b = \frac{\rho g}{C_b^2} u_v^2 \qquad \tau_v = \frac{1}{2} \rho C_D m H u_v^2$$

式中: ρ 为水体密度,kg/m³; g 为重力加速度,m/s²; h 为水深,m; i 为水面坡度; C_b 为 Chezy 系数; u_v 为深度平均流速,m/s。这种模拟方法利用水力粗糙度将流动阻力参数化,已在多种自然环境(如河口湿地)中通过现场试验和数值模拟验证,具有较强的适用性。

课题组于 2021 年 4—10 月在黄河三角洲清水沟叶瓣北岸开展了多次野外测量,重点采集互花米草(*Spartina alterniflora*)、碱蓬(*Suaeda salsa*)和芦苇(*Phragmites australis*)3 种典型湿地植被的物理参数,基于实测数据及文献数据^[46-47]对比,3 种植被的茎直径、高度和密度范围如表 2 所示。

为反映植被整体阻力效应,本文采用面积加权平均法设置等效植被建模参数(互花米草、碱蓬、芦苇的密度比值为 5 : 3 : 2),茎直径 $D=0.003$ m,植被高度 $H=0.8$ m(匹配低潮滩淹水深度限制),植被密度 $m=180$ 株/m²。

芦苇的水深适应范围通常为 0~1.0 m^[48],互花米草的最适宜生长水深为 0~0.3 m^[49],而碱蓬则集中分布在潮间带的高位区域,水深通常小于 0.2 m^[50],基于上述植被的生长习性,本文模型将植被的生长范围限定在高程-0.5 m 以上的区域(图 1 实线范围内)。

2 结果与分析

2.1 流速场与底部切应力分布

选取模型运行的第 8 天(调水期)和第 14 天(调沙期)作为代表性时段,对比分析了植被影响下河口区域深度平均流速场与无植被影响的差异。如图 5 所示,河口坝顶部的流速分布在有、无植被条件下均呈现不同程度的衰减,其中调沙期坝顶流速的衰减尤为显著,射流中心方向的纵向流速从 1.43 m/s 快速衰减至 0.55 m/s。这一差异主要源于调水期与调沙期流场深度的动态变化:随着模型运行进入调沙期,水体内含沙量显著升高,河口坝的持续淤积增强了坝顶水流的流动阻力,从而显著削弱了水流的流速与动能。

由图 5 可见,植被对河口区域水动力调控作用显著,调水期坝顶平均流速由无植被条件下的 1.05 m/s 降至 0.36 m/s(降幅约 66%),调沙期坝顶平均流速则由 0.55 m/s 锐降至 0.07 m/s(降幅约 87%)。在相同径流条件下,植被显著降低了过坝流量(70%~85%),导致区域内流量分配发生了改变,高流速区域向河口坝两侧的分汊河道集中。相比之下,在无植被条件下分汊河道与河口坝的水流分配更加均匀,尤其在调水期,坝顶流速并未出现显著衰减,河口射流能够更轻易地越过坝体。

表 2 黄河三角洲典型盐沼植被物理参数

Table 2 Physical parameters of typical salt marsh vegetation in the Yellow River Delta

植被	茎直径/mm	植株高度/m	植被密度/(株/m ²)
互花米草	3~5	0.6~1.5	200~400
碱蓬	2~3	0.2~0.3	80~150
芦苇	3~4	0.8~1.2	100~150

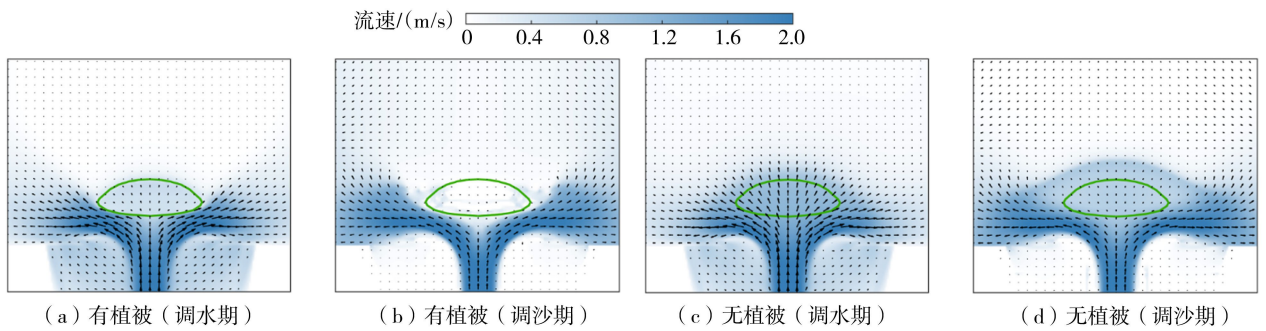


图5 有、无植被条件下河口坝流速分布

Fig. 5 Velocity distribution at river mouth bars with and without vegetation conditions

在调水期,尽管植被对流速具有一定的削弱作用,但由于径流量高,河口区域水动力作用整体较强,水流仍保持较高的动能;而在调沙期,随着径流量降低,植被阻力的相对作用被放大,植被区内的流动近乎停滞。流速衰减幅度的差异反映出植被效应对不同径流条件下水动力过程的差异化响应,尤其在径流量低、含沙量高的调沙期,流场对植被阻力的响应更加敏感。

流场的动态变化影响了河口坝周边区域的底部切应力分布格局。如图6所示,当河口射流进入海洋水体后,底部切应力随横向距离 y/b 的增加而逐渐衰减。然而,植被的存在显著改变了切应力的空间分布特征。在调水期(图6(a)),无植被条件下底部切应力整体维持较高水平(5.8~6.7 Pa),尤其在河口坝末端(约 $y/b=78$)出现明显的局部峰值。相比之下,植被阻力使底部切应力显著降低,最大切应力降低4.9 Pa,特别是在植被边界附近(虚线之前),切应力削弱幅度高达4.6 Pa。

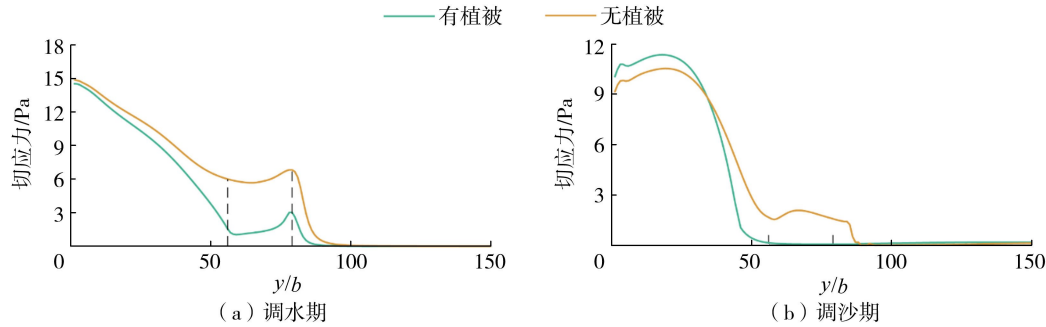


图6 沿射流中心线的切应力

Fig. 6 Shear stress along jet centerline

在调沙期(图6(b)),研究区域底部切应力普遍低于调水期。在河道内($y/b<30$),由于流量减小、含沙量大幅升高,河道内淤积严重,底部切应力低于调水期。随着调水调沙进程的推进,河口坝区域水动力强度呈现明显的衰减特征。在无植被条件下,切应力空间分布相对均匀,但在坝顶区域仍存在局部高切应力区,但其数值仅为调水期的1/3。相比之下,植被缓流作用进一步抑制了局部水动力强度,导致整个河口坝区域的切应力接近零。

底部切应力的空间分布特征及其动态变化是调控河口区域泥沙沉积与再悬浮效应的关键因素。结合河口坝地貌形态的演变特征,本文发现植被不仅有效削弱了水流对河口坝的侵蚀,还通过诱导泥沙沉积进一步弱化了坝顶区域的水动力强度。通过对比调水期与调沙期可以发现,植被对切应力的削弱效应在调沙期表现得尤为显著,这一现象与流场的分析结果相吻合,进一步证实了植被对河口水动力作用的重要调控作用。

2.2 泥沙输移路径与泥沙通量

河口坝地貌演变受河口区域泥沙的输移路径、沉积分布和再悬浮过程的共同影响,图7为调水调沙过程中有、无植被条件下河口区域的泥沙通量分布情况。泥沙通量计算公式为:

$$F_s = c_s u_v h$$

(2)

式中: F_s 为单一网格泥沙通量, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$; c_s 为含沙量, kg/m^3 。考虑到模型中的泥沙均为黏性泥沙,且主要通过悬移质输沙的方式进行输移,因此可以忽略推移质输沙。

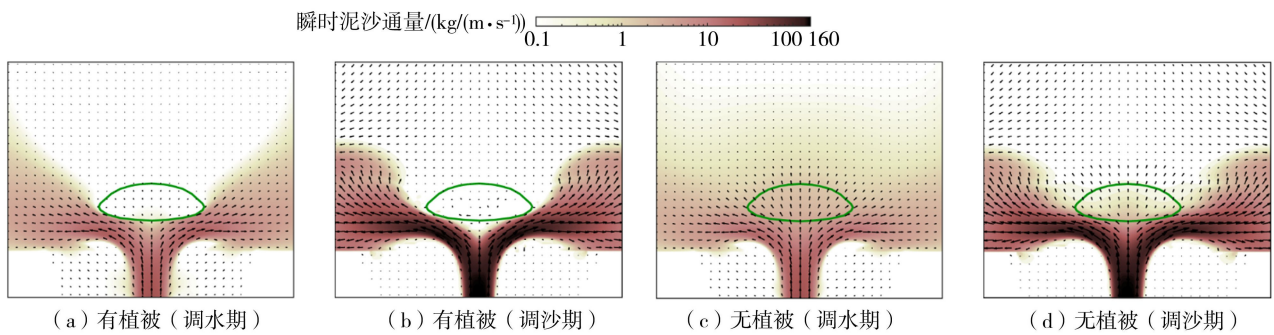


图 7 河口区域泥沙通量分布

Fig. 7 Sediment flux distribution at estuary

从整个河口区域的泥沙通量分布特征来看,植被的存在显著改变了河口区域的泥沙输移路径,进而塑造了河口坝的沉积格局。在无植被条件下,泥沙通过河口射流高效输运至坝顶区域,其输移路径呈现明显的连续性;而有植被的河口坝,在植被阻滞作用和河口坝分流效应的共同作用下,河口区域的泥沙输移路径发生显著改变,主要表现为:①主输移通道向两侧偏移;②坝顶区域的泥沙通量显著降低;③河口坝向海一侧泥沙供应大幅衰减。这一现象在调沙期表现得尤为显著。

图 8 为泥沙在河口坝不同方向上的泥沙通量和坝顶净泥沙沉积量,其中坝顶净泥沙沉积量通过输入总量与输出总量的差值量化得到。在 4 个边界中,南边界作为径流输入主导边界,承担着主要的泥沙输入功能;北、东、西边界则作为泥沙输出边界。结合研究区域内流速场和切应力的空间分布特征分析发现,调水期植被通过促进泥沙沉积和抑制再悬浮,显著增强了河口坝的泥沙留存能力(可维持在 20%~30%);相比之下,无植被河口坝由于缺乏有效的泥沙滞留能力,其净沉积量趋近于零,河口坝处于冲淤平衡状态。

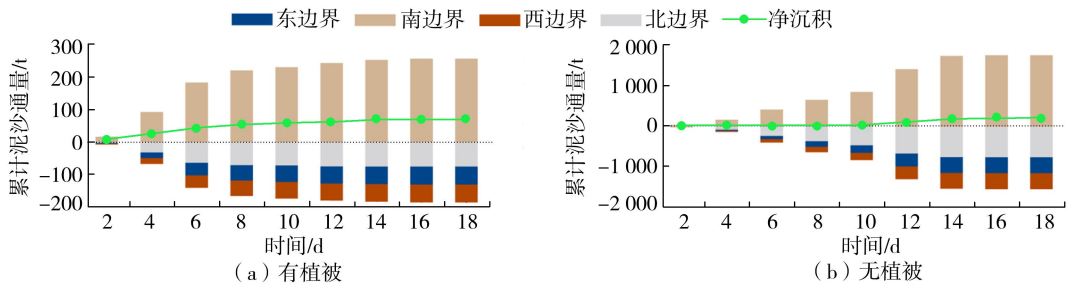


图 8 河口坝边界泥沙通量与净沉积量

Fig. 8 Sediment flux and net deposition at river mouth bar boundaries

进入调沙期后,河口区域含沙量剧增,无植被河口坝迅速从冲淤平衡状态转变为淤积状态。随着河口口水沙条件的改变,植被对泥沙输移的阻碍作用得到充分体现,调沙期植被区内的泥沙输入总量与净沉积量增长幅度极低。调水调沙过程结束后,植被区内的净泥沙沉积量为 70.3 t,仅为无植被对应区域的 36.3%。

在调水调沙期间,植被对河口坝地貌沉积的作用可以总结为两种效应:①通过削弱植被作用区域内的水动力强度、减小切应力,提高泥沙滞留能力,促进河口坝的垂向沉积过程;②通过改变泥沙输移路径,减少植被区内泥沙供应量,对河口坝的横向扩展和纵向延伸产生抑制作用。对河口坝地貌演化而言,其最终的沉积形态取决于这两种效应间的竞争。

2.3 河口坝地貌演化

图 9 为调水期和调沙期结束后河口坝地貌高程的分布特征。调水期结束后(图 9(a)(c))植被覆盖的河口坝表现出显著的沉积优势,高程增幅 7~13 cm/d,整体表现为稳定且持续的淤积趋势。这一阶段,植被对河口坝的影响以促进地貌垂向沉积为主,但同时也表现出一定的横向扩展;相较之下,无植被河口坝向远离河口方向逐步推移。由于缺乏植被对水动力的削弱作用,河口射流在坝顶仍保持较高动能,泥沙被水流输送至坝体外缘甚至更远的区域,呈现出扩散性强而垂向发育不足的特点。进入调沙期后(图 9(b)(d)),无植被河口坝在高含沙量射流的持续作用下迅速淤积,河口坝平面尺度快速扩张,泥沙垂向沉积作用明显,高程抬升速度最大可达 60 cm/d;相较之下,植被覆盖的河口坝由于缺乏泥沙来源,导致坝顶泥沙沉积速率下降。

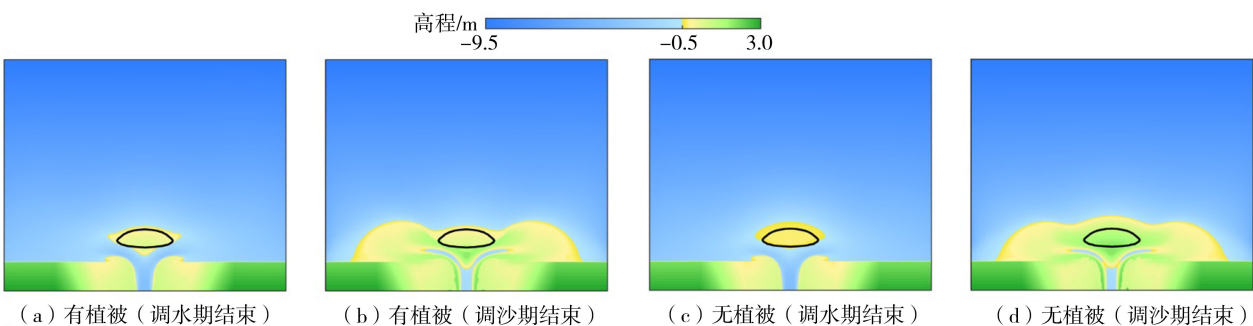


图9 河口坝地貌高程分布

Fig.9 Geomorphic elevation distribution at river mouth bar

图10为有、无植被条件下河口坝剖面高程的变化特征,其中蓝色系曲线代表调水期内的地貌演变结果,黄色系曲线代表调沙期内的结果。这些剖面图清晰揭示了调水调沙结束后有、无植被条件下河口坝形态的显著差异。

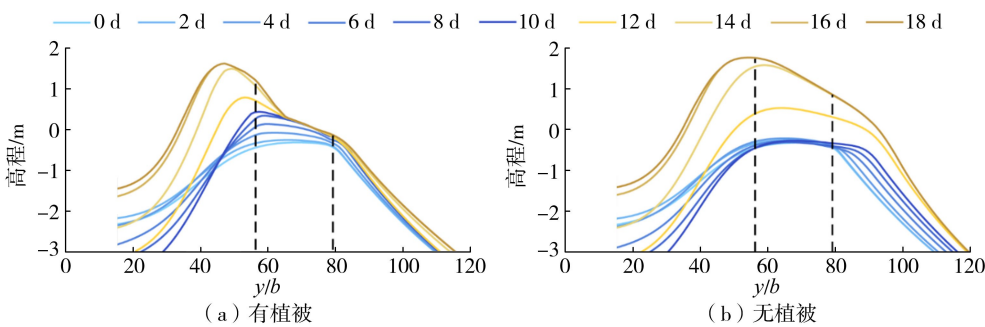


图10 河口坝剖面高程

Fig.10 River mouth bar profile elevation

在高径流、低含沙量的调水期,河道在强烈的水动力作用下发生剧烈冲刷。此阶段植被主要发挥缓流消能、固沙促淤的作用。在植被影响下,河口坝平面形态变化较小,主要表现为垂向高程的逐渐升高。这一现象表明,植被在调水期主要通过增强泥沙滞留能力和削弱水动力强度,促进了河口坝的垂向沉积。相比之下,低径流、高含沙量的调沙期是河口坝平面扩展和垂直沉积的主要时期。然而,植被通过缩减坝顶泥沙供应,成为限制河口坝发育的主导因素。泥沙的不均匀沉积导致坝顶呈现前高后低的地貌特征,这种形态变化进一步限制了河口坝向海扩张。由于河口坝后方缺少泥沙供应,其平面扩展仅限于来沙方向,向海端的发育受到显著抑制。

3 讨论

本文选择调水调沙背景下的植被效应作为核心关注点,原因在于植被作为三角洲地貌演变的重要调控因子,在强化泥沙滞留、稳定地貌形态和优化生态系统功能方面具有不可替代的作用。尽管河口三角洲演变研究已取得丰硕成果,特别是黄河三角洲对水沙响应的研究较为深入,但对植被作用的关注相对较少,尤其是在调水调沙这种特殊水沙条件下的植被效应研究。本文基于动态水沙条件,揭示了植被在调水期和调沙期的作用转变及其内在机制。研究发现,植被在调水期主要表现为缓流促淤作用,通过降低水流速度促进泥沙沉积;而在调沙期则转变为限制泥沙输移,通过改变水动力场结构和切应力分布,显著调控泥沙输移路径。植被作用的差异主要源于水沙条件的动态变化:调水期以水流为主导,植被主要通过生物阻力和根系固结作用影响沉积过程;调沙期则以泥沙输移为特征,植被通过改变局部水动力条件,在植被前缘形成集中沉积区,从而抑制坝顶发育。

从现实意义来看,研究结果为调水调沙工程的优化设计和三角洲生态保护管理提供了新的视角。在黄河口区域,通过合理配置植被类型和分布范围,既可以在调水期强化河口坝的垂向沉积,又能够在调沙期优化泥沙输移路径,平衡坝体的横向扩展与高程发育。这对三角洲保护管理具有重要意义:①在调水调沙工程

实施过程中,应充分考虑植被的空间布局和功能分区,建立基于植被生态功能的动态管理策略;②针对不同水沙条件,制定差异化的植被恢复方案,以最大化植被的生态效益;③将研究成果推广至其他动态水沙环境下的河口治理,可为全球三角洲地区的生态保护和可持续发展提供科学依据。

本文主要聚焦于调水调沙约 20 d 时间尺度上黄河三角洲河口坝植被的地貌效应,中长期的季节、年际演变则更为复杂,是下一步的研究重点。此外,不同的植被特性(如植被类型、密度和分布)对河流泥沙沉积的调控效应也可能有所不同,本文研究结论的泛化需要更系统、更广泛的植被参数敏感性分析来支撑。未来的研究应进一步探索植被-水沙-地貌的长期耦合机制,为三角洲生态系统的可持续管理提供更全面的理论支撑。

4 结 论

a. 植被通过调节流场结构及泥沙输移路径,显著影响了黄河三角洲河口坝的淤积格局。植被的阻滞效应减少了 70%~85%的过坝流量,导致河口坝整体淤积量下降 63.7%,这一结果与植被促淤的传统认知相反,体现了植被效应对不同水沙输入模式的差异化响应。

b. 植被对黄河三角洲河口坝的地貌效应在调水期与调沙期表现出明显分化:调水期流量高、含沙量低,植被使坝顶流速降低约 66%,河口坝以 7~13 cm/d 的速度持续淤积,有效抵御洪峰侵蚀;调沙期流量低、含沙量高,植被显著拦截了河口坝的泥沙供给,抑制了其高程发育。

参考文献:

[1] 李薇,朱乐红,胡鹏. 三角洲河道发育演变特征与影响机制研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2025,33(1):158-68. (Li Wei,Zhu Lehong, Hu Peng. Study on the characteristics and mechanisms of deltaic channel evolution[J]. Journal of Basic Science and Engineering,2025,33(1):158-168. (in Chinese))

[2] Edmonds D A,Slingerland R L. Significant effect of sediment cohesion on delta morphology[J]. Nature Geoscience,2010,3(2): 105-109.

[3] Fagherazzi S,Edmonds D A,Nardin W,et al. Dynamics of river mouth deposits[J]. Reviews of Geophysics,2015,53(3):642-672.

[4] 王长金,胡鹏,李薇,等. 河流分汊成因与演变机制研究综述[J]. 水利水电科技进展,2022,42(3):112-120. (Wang Changjin,Hu Peng,Li Wei,et al. A review on formation and evolution mechanism of river bifurcation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(3):112-120. (in Chinese))

[5] 林中源,胡晓张,邹华志,等. 磨刀门咸潮上溯对河口拦门沙地形变化的响应研究[J]. 水资源保护,2024,40(5):104-111. (Lin Zhongyuan,Hu Xiaozhang,Zou Huazhi,et al. Study on response of saltwater intrusion to topographic changes of mouth bar in Modaomen Estuary[J]. Water Resources Protection,2024,40(5):104-111. (in Chinese))

[6] Zhang Shaoyan,Gao Weilun,Shao Dongdong,et al. The effects of intra-annual variability of river discharge on the spatio-temporal dynamics of saltmarsh vegetation at river mouth bar:insights from an ecogeomorphological model[J]. Journal of Environmental Informatics,2023,42(2):108-122.

[7] 何青,朱春燕,郭磊城,等. 变化条件下长江口沉积地貌系统转型与应对[J]. 中国水利,2024(16):12-19. (He Qing,Zhu Chunyan,Guo Leicheng,et al. Regime shift in morphology of the Yangtze Estuary under changing environment and its management[J]. China Water Resources,2024(16):12-19. (in Chinese))

[8] 徐丛亮,谷硕,刘喆,等. 黄河调水调沙 14 a 来河口拦门沙形态变化特征[J]. 人民黄河,2016,38(10):69-73. (Xu Congliang,Gu Shuo,Liu Zhe,et al. Characteristics of the river mouth bar in the past 14 years of the Yellow River water-sediment regulation[J]. Yellow River,2016,38(10):69-73. (in Chinese))

[9] 陈柯欣,丛丕福,曲丽梅,等. 黄河三角洲湿地水文连通及驱动力分析[J]. 水文,2023,43(3):112-117. (Chen Kexin,Cong Pifu,Qu Limei,et al. Hydrological connectivity and driving force of Yellow River delta wetland[J]. Journal of China Hydrology, 2023,43(3):112-117. (in Chinese))

[10] 高云芳,李秀启,董贯仓,等. 黄河口几种盐沼植物对滨海湿地净化作用的研究[J]. 安徽农业科学,2010,38(34):19499-19501. (Gao Yunfang,Li Xiuqi,Dong Guancang,et al. Purification of several salt marsh plants to the coastal wetlands in the estuary of Yellow River[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2010,38(34):19499-19501. (in Chinese))

[11] 任令祺,任广波,王建步,等. 面向滨海湿地修复治理的生态系统服务净价值遥感评估研究:以黄河口湿地为例[J]. 海洋开发与管理,2024,41(3):28-44. (Ren Lingqi,Ren Guangbo,Wang Jianbu,et al. Remote sensing assessment of the net value of ecosystem services for coastal wetland restoration and management:a case study of Yellow River Estuary wetland[J]. Ocean

Development and Management,2024,41(3):28-44. (in Chinese))

[12] 罗锋,代建成,陈治澎,等. 基于改进机会窗口理论的盐城湿地互花米草前缘时空变化研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(3):56-64. (Luo Feng,Dai Jiancheng,Chen Zhipeng,et al. Spatial-temporal variation of *Spartina alterniflora* edge in Yancheng wetland based on improved windows of opportunity theory[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2023,51(3):56-64. (in Chinese))

[13] 陆永军,赵雅慧,左利钦,等. 弱混合陆相河口三角洲水文连通性研究进展[J]. 水利水电科技进展,2025,45(5):129-140. (Lu Yongjun,Zhao Yahui,Zuo Liqin,et al. Research progress on hydrological connectivity in weakly mixed land-dominated estuarine deltas[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2025,45(5):129-140. (in Chinese))

[14] Liu Guilin,Zhang Luochen,Zhang Qian,et al. Spatio-temporal dynamics of wetland landscape patterns based on remote sensing in Yellow River Delta,China[J]. Wetlands,2014,34:787-801.

[15] 杨薇,靳宇弯,孙立鑫,等. 基于生产可能性边界的黄河三角洲湿地生态系统服务权衡强度[J]. 自然资源学报,2019,34(12):2516-2528. (Yang Wei,Jin Yuwan,Sun Lixin,et al. Determining the intensity of the trade-offs among ecosystem services based on production-possibility frontiers:model development and a case study[J]. Journal of Natural Resources,2019,34(12):2516-2528. (in Chinese))

[16] 葛昭佩,唐军,赵楚嫣. 植被对波浪作用下床面切应力影响的数值模拟分析[J]. 海洋学报,2022,44(11):111-120. (Ge Zhaopei,Tang Jun,Zhao Chuyan. Numerical study on influence of vegetation on bed shear stress under coastal waves[J]. Haiyang Xuebao,2022,44(11):111-120. (in Chinese))

[17] 赵铜铁钢,吴迪熠,杨振华,等. 粤港澳大湾区滨海自然与人工湿地演变及驱动因素分析[J]. 水资源保护,2024,40(6):38-47. (Zhao Tongtiegang,Wu Diyi,Yang Zhenhua,et al. Evolution of coastal natural and constructed wetlands and its driving factor analysis in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Water Resources Protection,2024,40(6):38-47. (in Chinese))

[18] 何晓冬,詹泸成,郑权. 江苏沿海典型盐沼潮沟系统地表水与地下水交换规律[J]. 河海大学学报(自然科学版),2026,54(2):63-71. (He Xiaodong,Zhan Lucheng,Zheng Quan. Surface water and groundwater exchange pattern in a typical coastal salt marsh-tidal creek system of Jiangsu Province[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2026,54(2):63-71. (in Chinese))

[19] 姜博,张仟龙,宋志坤,等. 波流和植物作用下辽河口潮滩湿地水沙运动过程数值模拟[J]. 水利水电科技进展,2025,45(1):47-54. (Jiang Bo,Zhang Qianlong,Song Zhikun,et al. Numerical simulation of water and sediment movement processes in the Liaohe Estuary tidal flat wetland under influence of wave flow and vegetation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2025,45(1):47-4. (in Chinese))

[20] Suresh D B,Wood D,Jin Yaqing. Sedimentary bed morphology in the wake of flexible aquatic vegetation[J]. Water Science and Engineering,2025,18(3):354-368.

[21] Mudd S M,Howell S M,Morris J T. Impact of dynamic feedbacks between sedimentation,sea-level rise,and biomass production on near-surface marsh stratigraphy and carbon accumulation[J]. Estuarine,Coastal and Shelf Science,2009,82(3):377-389.

[22] 罗锋,代建成,陈治澎,等. 盐城自然保护区盐沼植被分布动态监测及驱动力分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(3):88-95. (Luo Feng,Dai Jiancheng,Chen Zhipeng,et al. Dynamic monitoring and driving force analysis of salt marsh vegetation distribution in Yancheng Nature Reserve[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2024,52(3):88-95. (in Chinese))

[23] Zolezzi G,Luchi R,Tubino M. Modeling morphodynamic processes in meandering rivers with spatial width variations[J]. Reviews of Geophysics,2012,50(4):RG4005.

[24] 巴旗,吴振,张诗然,等. 黄河口湿地植被时空变化及其影响因素[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2022,52(12):81-94. (Ba Qi,Wu Zhen,Zhang Shiran,et al. Temporal and spatial variation of wetland vegetation in the Yellow River(Huanghe) mouth and its influencing factors[J]. Periodical of Ocean University of China,2022,52(12):81-94. (in Chinese))

[25] 龚政,陈欣迪,周曾,等. 生物作用对海岸带泥沙运动的影响[J]. 科学通报,2021,66(1):53-62. (Gong Zheng,Chen Xindi,Zhou Zeng,et al. The roles of biological factors in coastal sediment transport:a review[J]. Chinese Science Bulletin,2021,66(1):53-62. (in Chinese))

[26] 周曾,陈雷,林伟波,等. 盐沼滩生物动力地貌演变研究进展[J]. 水科学进展,2021,32(3):470-484. (Zhou Zeng,Chen Lei,Lin Weibo,et al. Advances in biogeomorphology of tidal flat-saltmarsh systems[J]. Advances in Water Science,2021,32(3):470-484. (in Chinese))

[27] 何振芳,牟婷婷,郭庆春,等. 1979—2019 年大汶河流域湿地时空演变与分异研究[J]. 水资源保护,2024,40(2):134-40. (He Zhenfang,Mou Tingting,Guo Qingchun,et al. Spatial-temporal evolution and differentiation study of wetlands in the Dawen

River Basin from 1979 to 2019[J]. *Water Resources Protection*,2024,40(2):134-140. (in Chinese))

[28] 王海云,匡耀求,郑少兰,等. 粤港澳大湾区 2010—2020 年湿地时空变化及驱动因素分析[J]. *水资源保护*,2023,39(4):126-134. (Wang Haiyun, Kuang Yaoqiu, Zheng Shaolan, et al. Spatial-temporal changes of wetlands and its driving factors in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 2010 to 2020[J]. *Water Resources Protection*,2023,39(4):126-134. (in Chinese))

[29] 李发文,刘慧婉,仇昊雨,等. 流域水系地貌定律的适应性与异质性研究[J]. *水资源保护*,2025,41(2):19-29. (Li Fawen, Liu Huiwan, Qiu Haoyu, et al. Study on adaptability and heterogeneity of water system geomorphic laws in watersheds[J]. *Water Resources Protection*,2025,41(2):19-29. (in Chinese))

[30] 谢亚军,顾浩,苏宇宸,等. 考虑植被力学-水力作用的洪泽湖堤防加固效果分析[J]. *河海大学学报(自然科学版)*,2024,52(2):61-68. (Xie Yajun, Gu Hao, Su Yuchen, et al. Reinforcement effects of Hongze Lake embankment considering hydro-mechanical effects of vegetation[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*,2024,52(2):61-68. (in Chinese))

[31] 谢灵枫,杨肖丽,吴凡,等. 黄河流域未来气象水文干旱传播的气候变化响应[J]. *河海大学学报(自然科学版)*,2025,53(1):10-17. (Xie Lingfeng, Yang Xiaoli, Wu Fan, et al. Response of future meteorological and hydrological drought propagation to climate change in the Yellow River Basin[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*,2025,53(1):10-17. (in Chinese))

[32] 毕乃双,时义睿,葛春海,等. 地形地貌变化对调水调沙期间黄河口沉积格局的影响[J]. *海洋地质与第四纪地质*,2024,44(5):1-14. (Bi Naishuang, Shi Yirui, Ge Chunhai, et al. Impacts of morphological evolution of the Huanghe River mouth by artificial regulation on deltaic sedimentation[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*,2024,44(5):1-14. (in Chinese))

[33] 胡刚,张勇,孔祥淮,等. 全新世中国大河三角洲沉积演化模式转化及其对人类活动的响应[J]. *海洋地质与第四纪地质*,2021,41(5):77-89. (Hu Gang, Zhang Yong, Kong Xianghuai, et al. Changes of evolution models of China's large river deltas since Holocene and their responses to anthropogenic activities[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*,2021,41(5):77-89. (in Chinese))

[34] 王开荣. 黄河调水调沙对河口及其三角洲的影响和评价[J]. *泥沙研究*,2005(6):29-33. (Wang Kairong. Impact and evaluation of water and sediment regulation in the Yellow River on the estuary and its delta[J]. *Journal of Sediment Research*,2005(6):29-33. (in Chinese))

[35] 李洁,夏军强,邓珊珊,等. 近 30 年黄河下游河道深泓线摆动特点[J]. *水科学进展*,2017,28(5):652-661. (Li Jie, Xia Junqiang, Deng Shanshan, et al. Characteristics of channel thalweg migration in the lower Yellow River over the past 30 years[J]. *Advances in Water Science*,2017,28(5):652-661. (in Chinese))

[36] 曹玉芹,夏军强,周美蓉,等. 汛期与非汛期水沙条件对黄河下游不同河段过流能力的影响[J]. *水科学进展*,2024,35(4):617-628. (Cao Yuqin, Xia Junqiang, Zhou Meirong, et al. Effects of flood and non-flood flow and sediment regimes on the flood discharge capacity of different reaches in the Lower Yellow River[J]. *Advances in Water Science*,2024,35(4):617-628. (in Chinese))

[37] 夏军强,张晓雷,邓珊珊,等. 黄河下游高含沙洪水过程一维水沙耦合数学模型[J]. *水科学进展*,2015,26(5):686-697. (Xia Junqiang, Zhang Xiaolei, Deng Shanshan, et al. Modelling of hyperconcentrated floods in the lower Yellow River using a coupled approach[J]. *Advances in Water Science*,2015,26(5):686-697. (in Chinese))

[38] 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))

[39] 刘胜琪,夏军强,石希,等. 长江中游洲滩植被生长动态及其对水流阻力的影响[J]. *水资源保护*,2025,41(2):233-241. (Liu Shengqi, Xia Junqiang, Shi Xi, et al. Growth dynamics of vegetation on floodplains in middle reaches of the Yangtze River and its impact on flow resistance[J]. *Water Resources Protection*,2025,41(2):233-241. (in Chinese))

[40] 李彬权,任泽凌,王国庆,等. 考虑地形地貌特征与土地利用变化的小流域设计洪水计算方法[J]. *河海大学学报(自然科学版)*:2025,53(6):33-40. (Li Binqun, Ren Zeling, Wang Guoqing, et al. A method for design flood calculation in small watershed considering geomorphological feature and land use change[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*:2025,53(6):33-40. (in Chinese))

[41] 徐嘉毅,刘丽,葛家旺,等. 不同潮差影响的陆架三角洲沉积模式:基于 Delft 3D 数值模拟的启示[J/OL]. *沉积学报*,2025-01-16. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550>. 2024. 123. (Xu Jiayi, Liu Li, Ge Jiawang, et al. Shelf delta depositional model influenced by different tidal ranges:inspiration from Delft 3D numerical simulation[J/OL]. *Acta Sedimentologica Sinica*,2025-01-16. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550>. 2024. 123. (in Chinese))

[42] Meng Liwei, Wang Longsheng, Zhao iawen, et al. End-member characteristics of sediment grain size in modern Yellow River delta

sediments and its environmental significance[J]. *Frontiers in Marine Science*,2023,10:1141187.

[43] Wang Houjie,Bi Naishuang,Saito Y ,et al. Recent changes in sediment delivery by the Huanghe(Yellow River) to the sea:causes and environmental implications in its estuary[J]. *Journal of Hydrology*,2010,391(3/4):302-313.

[44] Qiao Shuqing,Shi Xuefa,Zhu Aimei ,et al. Distribution and transport of suspended sediments off the Yellow River(Huanghe) mouth and the nearby Bohai Sea[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*,2010,86(3):337-344.

[45] Baptist M J. A flume experiment on sediment transport with flexible, submerged vegetation [C/OL]//*Proceedings of the International Workshop on RIParian FORest Vegetated Channels: Hydraulic, Morphological and Ecological Aspects*, 2003. <https://www.researchgate.net/publication/279853441>

[46] 高翔,王柯萌,武国相,等. 黄河三角洲互花米草整治对潮滩湿地防灾功效和沉积动力的影响[J]. *海洋与湖沼*,2023,54(6):1586-1596. (Gao Xiang, Wang Kemeng, Wu Guoxiang, et al. Effects of *Spartina alterniflora* removal on storm surge attenuation and sediment trapping in the intertidal zone of the Yellow River Delta[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*,2023,54(6):1586-1596. (in Chinese))

[47] Wu Guoxiang, Wang Kemeng, Liang Bingchen, et al. Modeling the morphological responses of the Yellow River Delta to the water-sediment regulation scheme:the role of impulsive river floods and density-driven flows[J]. *Water Resources Research*,2023,59(7):e2022WR033003.

[48] 孙文广,孙志高,孙景宽,等. 黄河口芦苇湿地不同恢复阶段种群生态特征[J]. *生态学报*,2015,35(17):5804-5812. (Sun Wenguang, Sun Zhigao, Sun Jingkuan, et al. Ecological traits of *Phragmites australis* community in different restoration phases of the Yellow River estuary, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2015,35(17):5804-5812. (in Chinese))

[49] Zhi Yingbiao, Li Hongli, An Shuqing, , et al. Inter-specific competition: spartina alterniflora is replacing *Spartina anglica* in coastal China[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*,2007,74(3):437-48.

[50] Alhdad G M, Seal C E, Al-Azzawi M J, et al. The effect of combined salinity and waterlogging on the halophyte *Suaeda maritima*: the role of antioxidants[J]. *Environmental and Experimental Botany*,2013,87:120-125.

(收稿日期:2025 - 03 - 12 编辑:熊水斌)

(上接第 105 页)

[18] Ma Chao,Zhang Pengfei, Chen Diyi, et al. Medium-and long-term optimal operation of a hybrid energy system enhanced by cascade hydropower energy storage system[J]. *Energy Conversion and Management*,2024,301:118017.

[19] Ju Chang,Ding Tao,Jia Wenhao, et al. Two-stage robust unit commitment with the cascade hydropower stations retrofitted with pump stations[J]. *Applied Energy*,2023,334:120675.

[20] 罗彬,陈永灿,苗树敏,等. 融合改造的混合式抽水蓄能与风电联合运行短期调度模型[J]. *水利学报*,2023,54(8):955-966. (Luo Bin, Chen Yongcan, Miao Shumin, et al. A joint short-term operation model for wind power and hybrid pumped-storage hydropower plant[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*,2023,54(8):955-966. (in Chinese))

[21] Tan Qiaofeng,Nie Zhuang, Wen Xin, et al. Complementary scheduling rules for hybrid pumped storage hydropower-photovoltaic power system reconstructing from conventional cascade hydropower stations[J]. *Applied Energy*,2024,355:122250.

[22] 郭爱军,畅建霞,王义民,等. 混合式抽水蓄能电站群容量计算研究 I :短期调峰特征与梯级开发增益[J]. *水利学报*,2024,55(7):768-779. (Guo Aijun, Chang Jianxia, Wang Yimin, et al. Research on capacity computation of cascade on-stream integral pumped storage hydropower plants I :short-term peak shaving and gain of cascade development[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*,2024,55(7):768-779. (in Chinese))

[23] 尹丽君,许昌,黄显峰,等. 水光互补基地水库调度图绘制及应用策略[J]. *河海大学学报(自然科学版)*,2023,51(5):65-69. (Yin Lijun, Xu Chang, Huang Xianfeng, et al. Drawing and application strategy of dispatching diagram for water-light complementary base reservoir[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*,2023,51(5):65-69. (in Chinese))

[24] 闻昕,秦济森,谭乔凤,等. 基于余留期效益函数的水光互补随机优化调度方法[J]. *水资源保护*,2023,39(6):23-31. (Wen Xin, Qin Jisen, Tan Qiaofeng, et al. Research on stochastic optimal operation of hydro-photovoltaic complementary based on utility function of carryover stage[J]. *Water Resources Protection*,2023,39(6):23-31. (in Chinese))

[25] 高英,苏华英,于洁,等. 乌江流域水光互补梯级蓄能调度图绘制[J]. *河海大学学报(自然科学版)*,2023,51(5):56-64. (Gao Ying, Su Huaying, Yu Jie, et al. Drawing of Hydro-PV complementary cascade energy storage dispatching diagram in Wujiang River Basin[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*,2023,51(5):56-64. (in Chinese))

[26] Wen Xin, Sun Yuanliang, Tan Qiaofeng, et al. Optimizing the sizes of wind and photovoltaic plants complementarily operating with cascade hydropower stations:balancing risk and benefit[J]. *Applied Energy*,2022,306:117968.

(收稿日期:2025 - 01 - 15 编辑:刘晓艳)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.04.019

基于物理信息与符号回归耦合约束的桥墩局部冲刷深度预测模型

耿兴乐¹, 陈红^{1,2}, 王金权³, 肖龙³, 夏晓亮³, 魏荣灏⁴, 张汇明¹

(1. 河海大学水利水电学院; 2. 河海大学苏州高等研究院; 3. 宁波市杭州湾大桥发展有限公司;
4. 浙江省水利河口研究院(浙江省海洋规划设计研究院))

摘要: 针对桥墩局部冲刷深度预测经验公式结果偏保守、纯数据驱动模型缺乏物理机制引导的问题, 通过在标准多层感知机框架中引入 HEC-18 式与 Melville 冲刷公式作为物理约束, 以符号回归算法从数据中提取的显式方程作为附加约束, 同时在损失函数中集成数据损失、物理损失与符号回归损失, 构建了物理信息与符号回归耦合约束的多层感知机(PSI-MLP)模型。以极限梯度提升、支持向量机和纯数据驱动的多层感知机模型为基准对比模型, 从预测精度、模型可解释性、物理一致性多个维度, 对比分析了 PSI-MLP 模型与各基准对比模型的性能差异, 同时基于 56 组工程实测数据分析了 PSI-MLP 模型在实际工程场景中跨尺度的外推和泛化能力。结果表明: PSI-MLP 模型在测试集上的均方根误差、决定系数和克林-古普塔效率系数分别为 0.234、0.88 和 0.928, 相较各基准对比模型, 均方根误差最大减小了 34.8%, 决定系数、克林-古普塔效率系数最大提高了 16.4% 和 25.9%; PSI-MLP 模型决策逻辑与水动力学理论吻合; PSI-MLP 模型在 71.4% 的工况下相对误差小于 25%, 优于传统经验公式与基准对比模型; 物理信息与符号回归的耦合约束机制能提升模型在复杂工程尺度外推条件下的适应性与预测稳定性。

关键词: 桥墩局部冲刷; 冲刷深度预测; 局部冲刷公式; 物理信息神经网络; 符号回归; 可解释性分析

Prediction model for local scour depth around bridge piers based on coupled physics-informed and symbolic regression constraints

Geng Xingle¹, Chen Hong^{1,2}, Wang Jinquan³, Xiao Long³, Xia Xiaoliang³, Wei Ronghao⁴, Zhang Huiming¹

(1. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University;
2. Suzhou Institute for Advanced Research of Hohai University; 3. Ningbo Hangzhou Bay Bridge Development Co., Ltd.;
4. Zhejiang Institute of Hydraulics & Estuary (Zhejiang Institute of Marine Planning and Design))

Abstract: To address the overly conservative predictions of empirical formulas and the lack of physical mechanism guidance in purely data-driven models for predicting the local scour depth around bridge piers, a multilayer perceptron (PSI-MLP) model based on coupled physics-informed and symbolic regression constraints was developed. In the PSI-MLP model, the HEC-18 equation and the Melville scour formula were introduced into the standard multilayer perceptron framework as physical constraints, explicit equations extracted from data by the symbolic regression algorithm were combined as additional constraints, and the loss function integrates data loss, physical loss, and symbolic regression. With extreme gradient boosting, support vector machine, and purely data-driven multilayer perceptron models as benchmark models, the performance differences between the PSI-MLP model and each benchmark model were comparatively analyzed from multiple dimensions of prediction accuracy, model interpretability, and physical consistency. Meanwhile, based on 56 groups of field-measured engineering data, the cross-scale extrapolation and generalization abilities of the PSI-MLP model in practical engineering scenarios were analyzed. The results show that the root mean square error, coefficient of determination, and Kling-Gupta efficiency coefficient of the PSI-MLP model on the test set are 0.234, 0.88, and 0.928, respectively. Compared with the benchmark models, the root mean square error decreases by up to 34.8%, and the coefficient of determination and Kling-Gupta efficiency coefficient increase by up to 16.4% and 25.9%, respectively. The decision logic of the PSI-MLP model is consistent with hydrodynamic theories. The relative error of the PSI-MLP model is less than 25% under 71.4% of the working conditions, which is superior to the traditional empirical formulas and benchmark models. The coupled constraint mechanism of physical information and symbolic regression can improve the adaptability and prediction stability of the model under complex

作者简介: 耿兴乐(2002—), 男, 硕士研究生, 主要从事水沙冲刷智能化建模研究。E-mail: gxl123993121@outlook.com

通信作者: 陈红(1981—), 男, 正高级实验师, 博士, 主要从事现代流体测试与河流模拟研究。E-mail: chh_hhu@hhu.edu.cn

engineering-scale extrapolation conditions.

Key words: local scour at bridge piers; prediction of scour depth; local scour formula; physics-informed neural network; symbolic regression; interpretability analysis

桥墩局部冲刷是桥梁水毁的主要原因^[1],准确预测桥墩冲刷深度对保障桥梁安全至关重要。目前主要采用经验公式及物理试验预测局部冲刷深度^[2-5],但由于室内模拟工况与实际河道在水沙条件等方面具有显著差异,导致冲刷深度预测值与实际值偏差较大。随着计算机技术的快速发展,学者们开始将机器学习应用于预测桥墩局部冲刷深度;Kaya^[6]基于现场冲刷数据建立了人工神经网络(ANN)模型,发现在多变量输入条件下 ANN 模型预测精度优于经验公式;Choi 等^[7]构建了支持向量机(SVM)模型预测黏性沙的桥墩局部冲刷深度,通过与多种经验公式及模型进行对比分析,发现 SVM 模型预测精度更高,较冲刷经验公式平均绝对百分比误差降低 50%以上。在单一机器学习模型已被证明能够有效预测冲刷深度的基础上,有学者进一步开展了模型算法优化与集成建模方面的研究;Chou 等^[8]将堆叠系统(MOSS)与多种机器学习方法集成,在多个数据集上均取得了超越单一模型和传统集成方法的预测精度,相较其他方法平均绝对百分比误差降低 19%以上;Eini 等^[9]将粒子群优化(PSO)、红狐优化(RFO)、相对粒子群优化(RPSO)算法与极限梯度提升(XGBoost)结合,利用 35 项研究的 841 组试验和实际桥梁数据进行训练和验证,发现 RPSO-XGBoost 对圆形桥墩冲刷深度的预测精度最高。

机器学习技术在桥墩局部冲刷深度预测中的应用相较传统经验公式展现出显著优势。然而,相关研究大多以纯数据驱动范式为主,模型内部决策过程不透明,呈现出典型的“黑箱”特征,当模型出现预测偏差时难以定位问题根源,无法及时调试和改进。针对“黑箱”问题许多研究采用可解释性分析方法对模型进行解释^[10-11],但此类方法主要作用于结果分析阶段,并未实质介入模型训练过程。同时,纯数据驱动模型普遍缺乏明确的物理机制引导,在数据稀疏或外推工况下,预测结果可能偏离实际物理规律。在此背景下,基于物理信息神经网络(physics-informed neural networks,PINN)的研究逐渐兴起;Raissi^[12]提出 PINN 框架,通过将控制方程残差、初边值条件等物理量统一写入损失函数,使神经网络在拟合数据时受物理定律约束^[13];Chen 等^[14]针对海上风电单桩基础,根据“天然频率-冲刷深度”的半经验关系式构建了 PINN 模型,在数据有限情况下比原物理方程和纯数据驱动模型误差更低;Yousefpour 等^[15]构建了冲刷物理启发神经网络(scour physics-inspired neural networks,SPINNs),在长短期记忆网络(LSTM)和卷积神经网络(CNN)中引入冲刷公式及其时间演化形式,将部分公式经验系数作为学习变量,结果表明 PINN 模型在多数工况下优于纯数据驱动模型,其预测均方误差最大降低约 50%。上述研究表明,将物理信息显式嵌入模型训练过程可提升预测精度^[16],但现有方法大多基于单一物理公式构建约束,尚未系统融合多种经典桥墩冲刷理论表达式,物理信息利用程度有限,在复杂工况场景下预测精度难以提升;且经验公式多作为固定先验直接施加,缺乏从数据中自动提取显式冲刷方程并与既有物理模型协同约束网络训练的机制,模型对残差的可修正空间受限,在多元数据增加时误差仍会偏大,导致整体预测精度下降。

针对上述问题,引入 HEC-18 式和 Melville 理论冲刷公式作为物理约束,并采用符号回归算法从数据中拟合显式方程,将其作为附加约束,以更充分刻画试验数据中的高阶非线性与交互效应。基于标准多层感知机(MLP)框架,在损失函数中同时集成数据损失、物理损失和符号回归损失,构建物理信息与符号回归耦合约束的多层感知机(physics- and symbolic-constraint informed multi-layer perceptron,PSI-MLP)模型。通过对复合损失函数的联合优化,实现数据驱动学习与冲刷机理约束的融合,在提高模型预测精度的同时保持了对水动力学机制的一致性。

1 研究方法

1.1 PSI-MLP 模型

1.1.1 模型架构

影响桥墩局部冲刷的主要因素有墩柱结构形式、水流特性和床沙性质^[17-19]。本文以圆柱形桥墩局部冲刷所涉及的主要参量为对象展开分析,冲刷深度为:

$$d_{se} = f(v, y, d, d_{50}, v_c) \tag{1}$$

式中: d_{se} 为平衡冲刷深度; v 为上游平均流速; y 为水流深度; d 为桥墩直径; d_{50} 为泥沙中值粒径; v_c 为泥沙临

界起动流速。

为消除量纲差异对数值稳定性的影响,并增强模型在几何与动力相似条件下的泛化能力,通过量纲分析将式(1)化为无量纲参数表达式:

$$d_{se}/d = f(y/d, v/v_c, d/d_{50}, v/\sqrt{gy})$$

(2)

PSI-MLP 模型基本结构如图 1 所示,输入量为相对水深 y/d 、相对流速 v/v_c 、弗劳德数 $Fr(v/\sqrt{gy})$ 和相对粒径 d/d_{50} ,输出量为相对冲刷深度 d_{se}/d 。在 MLP 框架基础上构建了一个集成数据损失、物理损失和符号回归损失的三元复合损失函。模型采用 5 折交叉验证和基于 Optuna 的贝叶斯优化算法进行超参数搜索与调优。输入层为 4 个神经元,输出层为 1 个神经元,隐藏层共 4 层,神经元个数分别为 468、379、189 和 184,隐藏层激活函数均采用 ReLU。训练优化过程中选用 AdamW 优化器作为主要学习算法,结合 Dropout 随机失活机制与权重衰减正则化,以提升模型在复杂约束优化中的稳定性,增强模型的泛化能力并防止过拟合。

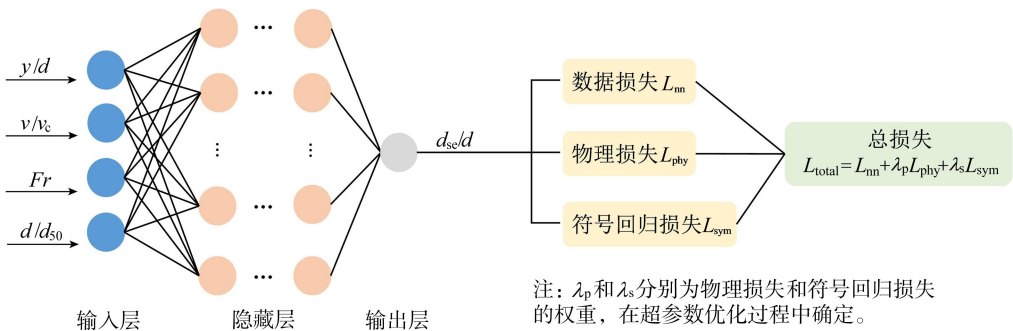


图 1 PSI-MLP 模型结构

Fig. 1 Structure of PSI-MLP model

1.1.2 约束方程

在 MLP 框架中引入两类约束方程:基于冲刷公式的物理方程和由符号回归算法拟合所得的符号回归方程。前者体现桥墩局部冲刷过程的理论与半经验规律,后者刻画试验数据中蕴含的潜在非线性关系。

1.1.2.1 物理方程

HEC-18 式^[20]广泛应用于工程领域桥墩冲刷深度计算,Melville 冲刷公式^[21]结构清晰且物理意义明确,二者均由大量试验和工程实践归纳总结形成,能够较为科学地刻画冲刷深度随相对水深、相对流速、弗劳德数等参数变化的单调性和分段演化特征,可为神经网络提供符合水动力学理论的趋势引导和尺度控制。因此,选取 HEC-18 式(式(3))与 Melville 冲刷公式(式(4))作为物理约束方程。

$$d_{se}/d = 2.0K_1K_2K_3(y/d)^{0.35}Fr^{0.43}$$

(3)

$$d_{se}/d = K_{yd}K_1K_dK_sK_\theta K_C/d$$

(4)

式中: K_1 为桥墩形状修正系数; K_2 为水流攻角修正系数; K_3 为河床条件修正系数; K_{yd} 为水深系数; K_1 为水流强度系数; K_d 为床沙粒径系数; K_s 为桥墩形状系数; K_θ 为迎流夹角系数; K_C 为渠道形态系数。

1.1.2.2 符号回归方程

为挖掘试验数据中潜在的、未被参数化经验公式描述的规律,采用符号回归算法拟合冲刷深度与无量纲参数间关系的显式数学表达式。符号回归作为一种基于遗传编程的机器学习方法,不预设模型具体形式,而是在预定义数学运算符空间中搜索最优结构,获得兼具预测精度与可解释性的解析方程。

本文采用 PySR(python for symbolic regression)算法库实现符号回归过程。关键计算参数种群规模设置为 100,迭代次数为 200,适应度函数采用均方误差(MSE),通过帕累托优化平衡表达式复杂度与拟合精度。经 PySR 算法库训练获得的最优符号回归方程为:

$$\frac{d_{se}}{d} = \frac{d^{-0.4206}}{\exp[(d + 0.7245)/\exp(9.3425v^4)]}$$

(5)

该符号回归方程作为显式知识约束,与物理方程形成互补,物理方程提供冲刷理论知识,而符号回归方程则表征数据中隐含的复杂非线性模式与交互效应。通过将符号回归方程纳入损失函数作为约束项,PSI-MLP 模型在训练过程中同时受到理论先验与数据规律的双重引导,从而提升对复杂物理现象的解释能力,

增强预测精度与泛化性能。

1.1.3 损失函数

PSI-MLP 模型损失函数为:

$$L_{\text{total}} = L_{\text{nn}} + \lambda_{\text{p}} L_{\text{phy}} + \lambda_{\text{s}} L_{\text{sym}} \tag{6}$$

为确保特征分布在统一数值尺度上并提升优化过程的稳定性,对各无量纲输入参数及输出相对冲刷深度进行标准化处理。以任一参数为例,其标准化形式为:

$$X = (x - \mu) / \sigma \tag{7}$$

式中: x 为原始无量纲参数值; X 为标准化后的参数值; μ 为该参数的均值; σ 为该参数的标准差。

1.1.3.1 数据损失

L_{nn} 在标准化尺度下为:

$$L_{\text{nn}} = \sum_{i=1}^N (Y_{\text{pred},i} - Y_i)^2 / N \tag{8}$$

式中: N 为样本总数; $Y_{\text{pred},i}$ 为模型对样本 i 的预测值的标准化值; Y_i 为样本 i 的实测值的标准化值。

1.1.3.2 物理损失

局部冲刷通常根据 v/v_c 的大小划分为清水冲刷和动床冲刷。然而,临界起动条件本身具有不确定性,易受粒径级配、床面形态、紊动结构及测量手段等因素影响,相对误差可达 10% 以上^[22]。为应对临界流速附近划分的模糊性并增强模型的数值稳定性,在计算物理损失时,通过两个超参数 α 与 β 将工况划分为清水冲刷、过渡区与动床冲刷 3 类。在不同分区内,模型选用相应物理公式(HEC-18 式或 Melville 冲刷公式)计算冲刷深度,并在过渡区对两类物理公式进行加权衔接,从而在数值上保证损失函数梯度信息的平滑性与稳定性:

$$y_{\text{phy}} = \begin{cases} 2.0 K_1 K_2 K_3 (y/d)^{0.35} Fr^{0.43} & v/v_c \leq \alpha \\ \left(1 - \frac{v/v_c - 0.9}{1.1 - 0.9}\right) y_{\text{phy1}} + \frac{v/v_c - 0.9}{1.1 - 0.9} y_{\text{phy2}} & \alpha < v/v_c < \beta \\ K_{\text{yd}} K_1 K_d K_s K_0 K_c / d & v/v_c \geq \beta \end{cases} \tag{9}$$

式中: y_{phy} 为物理方程计算值; y_{phy1} 为参数代入式(3)所得的计算值; y_{phy2} 为参数代入式(4)所得的计算值;本文在 $v/v_c = 1$ 两侧设置 $\pm 10\%$ 过渡带, α 取 0.9, β 取 1.1。

L_{phy} 在未标准化尺度下计算,用于约束模型输出与物理公式结果的一致性:

$$L_{\text{phy}} = \sum_{i=1}^N (y_{\text{pred},i} - y_{\text{phy},i})^2 / N \tag{10}$$

式中: $y_{\text{pred},i}$ 为模型对样本 i 的预测值; $y_{\text{phy},i}$ 为样本 i 由式(9)所得的计算值。

1.1.3.3 符号回归损失

L_{sym} 同样在未标准化尺度下计算:

$$L_{\text{sym}} = \sum_{i=1}^N (y_{\text{pred},i} - y_{\text{sym},i})^2 / N \tag{11}$$

式中: $y_{\text{sym},i}$ 为样本 i 由式(5)所得的计算值。

1.2 训练数据

搜集已发表文献中的试验数据^[23-26],去除异常值后共包含 423 组圆柱形桥墩的局部冲刷数据,该数据集涵盖了不同的水流条件、泥沙特性及桥墩几何尺寸(表 1)。为缓解样本规模偏小对复杂非线性模型训练的影响并提升模型鲁棒性,借鉴图像处理与卷积神经网络中的常用技术^[27-28],采用基于高斯随机扰动的数据增强策略对数据集进行扩充。在 6 个特征上叠加幅度约为原值 5%、服从高斯分布的微小随机扰动,以模拟试验条件下的测量波动与环境差异,将数据规模扩充 5 倍,共 2115 组。扩充后的数据用于模型训练、验证与测试全过程。此外对叠加的随机扰动幅度进行约束,确保扩充数据中不出现极端值和明显异常值。将扩充后的数据按 7 : 1.5 : 1.5 的比例随机划分为训练集、验证集和测试集。其中,训练集用于模型参数学习,验证集用于超参数优化,测试集用于评估模型性能。

表 1 试验数据统计

Table 1 Statistics of experimental data

统计特征值	$v/(m/s)$	$v_c/(m/s)$	y/m	d/m	d_{50}/mm	d_{se}/m
最大值	1.50	1.27	1.80	1.00	7.80	1.15
最小值	0.17	0.19	0.05	0.01	0.22	0.01
平均值	0.39	0.43	0.22	0.15	1.46	0.14

1.3 基准对比模型

选取 XGBoost^[29]、SVM^[30-31] 和 MLP 作为基准对比模型。前两种模型是当前机器学习领域解决回归问题性能稳定^[32] 且常用于桥墩局部冲刷深度预测的代表性模型,而将纯数据驱动的 MLP 作为基准模型,旨在直接对比验证物理约束与符号回归约束的引入对基础神经网络架构带来的性能提升。

1.4 模型评估与验证

采用均方根误差(RMSE)、决定系数(R^2)、克林-古普塔效率系数(KGE)3 个评价指标评估 PSI-MLP 模型及基准对比模型的性能。RMSE 用于衡量预测值与真实值间的偏差,其值越小,模型预测精度越高。 R^2 用于量化模型对目标变量变异性的解释程度,反映预测趋势与实测变化的匹配程度,其值越接近 1,模型拟合效果越好。KGE 综合考虑预测值与实测值在相关性、系统偏差和离散程度 3 个方面的一致性,从统计分布角度评估模型的可靠性,其值越接近 1,模型的综合性能越好。

为验证 PSI-MLP 模型物理决策逻辑的合理性,引入基于博弈论思想的沙普利可加解释(SHapley additive explanations, SHAP)方法对模型进行可解释性分析^[33]。SHAP 方法通过在所有特征组合上计算预测增量,将复杂模型的输出分解为各输入变量的可加性贡献,从而在保持模型结构不变的前提下量化单个特征对预测结果的重要性及作用方向。平均绝对 SHAP 值条形图用于刻画特征整体重要性排序;SHAP 蜂群图以样本点的横坐标表示该特征的 SHAP 值、以颜色表示特征取值高低,用于分析特征取值变化对冲刷深度预测的增减效应。

2 结果与分析

2.1 预测精度分析

经训练与优化后,各模型的最优超参数见表 2。在此基础上,各模型在不同数据集上的预测性能对比见表 3。由表 3 可知,PSI-MLP 模型在所有数据集上均表现出最优的预测性能。从测试集上看,PSI-MLP 模型的 RMSE 为 0.234,较 MLP(0.318)、XGBoost(0.359)和 SVM(0.322)分别降低约 26.4%、34.8%和 27.3%,表明物理信息与符号回归的耦合约束能提升模型预测精度,与纯数据驱动的基准模型相比实现了最大 34.8%的误差降幅;PSI-MLP 模型的 R^2 提升至 0.880,较 MLP(0.783)、XGBoost(0.756)和 SVM(0.804)分别提高 0.097、0.124 和 0.076;PSI-MLP 模型的 KGE 为 0.928,在各模型中最高,反映出其预测值与实测值在相关性、系统偏差和变异性三者之间具有更优的整体一致性。与结构相近但未引入物理约束和符号回归方程约束的 MLP 相比,PSI-MLP 模型在测试集上实现了约 12.4%的 R^2 提升和约 26.4%的 RMSE 降幅,证明了将物理方程与符号回归方程作为复合约束嵌入损失函数的有效性,该机制不仅提升了基础神经网络架构的预测精度,更增强了其泛化能力。同时,PSI-MLP 模型在训练集上能保持较高拟合度($R^2=0.943$),且在验证集和测试集上性能保持稳定(R^2 分别为 0.876 和 0.880),未出现明显过拟合。

表 2 各模型超参数优化结果

Table 2 Hyperparameter optimization results for different models

模型	超参数	超参数数值	模型	超参数	超参数数值
PSI-MLP	learning_rate	0.00245	XGBoost	learning_rate	0.01885
	physics_weight	0.00169		max_depth	7
	sym_weight	0.00217		n_estimators	285
	dropout_rate	0.11894		subsample	0.68742
	number of layers	4		C	7.25722
MLP	learning_rate	0.00262	SVM	kernel	rbf
	dropout_rate	0.10315		epsilon	0.04834
	number of layers	4		gamma	2.83443

表3 各模型在不同数据集上的预测性能对比

Table 3 Comparison of prediction performance of different models on different datasets

模型	RMSE			R^2			KGE		
	训练集	验证集	测试集	训练集	验证集	测试集	训练集	验证集	测试集
PSI-MLP	0.163	0.249	0.234	0.943	0.876	0.880	0.949	0.915	0.928
MLP	0.316	0.346	0.318	0.784	0.761	0.783	0.807	0.779	0.787
XGBoost	0.293	0.365	0.359	0.810	0.718	0.756	0.782	0.750	0.737
SVM	0.259	0.347	0.322	0.852	0.744	0.804	0.897	0.858	0.851

2.2 可解释性分析与物理一致性检验

2.2.1 可解释性分析

输入变量 y/d 、 v/v_c 、 Fr 和 d/d_{50} 的平均绝对 SHAP 值分别为 0.265 2、0.205 0、0.197 6、0.179 5,即在预测 d_{se}/d 时,输入量的重要性由高到低依次为 y/d 、 v/v_c 、 Fr 、 d/d_{50} 。其中 y/d 的贡献值最高(0.265 2),表明模型对 y/d 的变化高度敏感,将该参数视为影响冲刷深度的主导因素。此结论与 Sheppard 等^[34]的研究一致;水深与墩宽比是决定冲刷深度的关键因素。其他采用可解释性机器学习的研究亦发现,预测 d_{se}/d 时 y/d 通常具有最高的重要性权重占比^[9,35]。上述结果进一步证实了 y/d 在预测冲刷深度时的主导地位,表明 PSI-MLP 模型成功学习并内化了具有物理意义的规律性特征。

图2为SHAP值分布蜂群图,可揭示各输入变量对模型输出的具体影响方向和强度。 y/d 高值样本普遍分布于SHAP轴正侧,低值样本多集中于负侧,表明随 y/d 增大,模型倾向于预测更大的冲刷深度。相比之下, v/v_c 对冲刷深度的影响呈现非线性特征:低 v/v_c 样本在SHAP轴正、负侧均有分布且较为离散,随着 v/v_c 变大,中高值样本整体向SHAP轴正侧偏移,但仍存在部分高值样本落在SHAP轴负侧,体现了动床冲刷回落机制的复杂性。低 Fr 样本同样在SHAP轴两侧均有分布,而中等 Fr 区间样本更偏向负侧,在更高的 Fr 范围内,高值样本在正、负SHAP区域也出现离散分布的现象。 d/d_{50} 与 d_{se}/d 基本呈负相关,高值样本集中于SHAP轴负侧区域,表明随着 d/d_{50} 的增大,模型倾向于减小预测的冲刷深度。

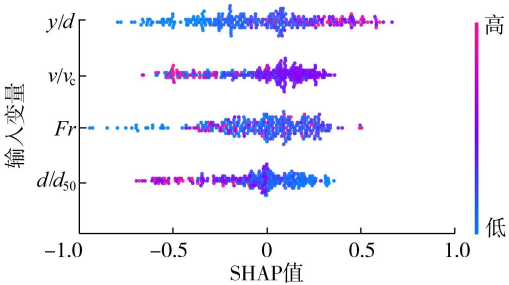


图2 SHAP值分布蜂群图
Fig.2 SHAP value beeswarm plot

2.2.2 物理一致性检验

可解释性分析表明, v/v_c 与 d_{se}/d 间存在显著的非线性关系。考虑到物理方程同样以 v/v_c 作为分段依据,为定量考察 v/v_c 对 d_{se}/d 的具体影响,选取测试集中 v/v_c 值最接近1的实测样本,固定 y/d 与 d/d_{50} 不变,通过改变流速构造一系列不同水平的 v/v_c ,并同步更新 Fr ,获得模型输出量 d_{se}/d 的响应曲线(图3)。在 $v/v_c < 1$ 的区域, d_{se}/d 随着 v/v_c 的增大而快速增大,并在 $v/v_c \approx 1.0$ 附近出现第1个局部峰值;随着 v/v_c 的增大, d_{se}/d 开始下降并进入低谷;当 v/v_c 增大至约2.0后, d_{se}/d 再次缓慢上升,最终趋于第2个冲刷峰值。理论上,清水冲刷条件下的 d_{se}/d 通常随 v/v_c 的增大而线性增加,并在 $v/v_c = 1$ 处达到第1个阈值峰值;当流速超过临界流速后,局部冲刷深度因活床泥沙补给先减小,再缓慢增加达到第2个峰值,即活床峰。PSI-MLP模型的预测结果与这一经典规律总体一致,在 $v/v_c \approx 1.0$ 附近捕捉到了清水冲刷向动床冲刷的转变,能够识别相对流速跨越临界值时冲刷机理的突变性。然而,受限于训练数据的选择与分布特性,模型在局部区间的响应与理论仍存在些许差异。例如,动床冲刷阶段的样本数量相对较少导致 PSI-MLP 模型在该高流速区的学习泛化性偏弱,以及泥沙颗粒级配的不均匀性引起的冲刷峰位置偏移。总体上,PSI-MLP 模型在复合约束引导下,能准确再现冲刷深度随相对流速的三阶段演化趋势和主要峰值结构,具有良好的物理一致性。

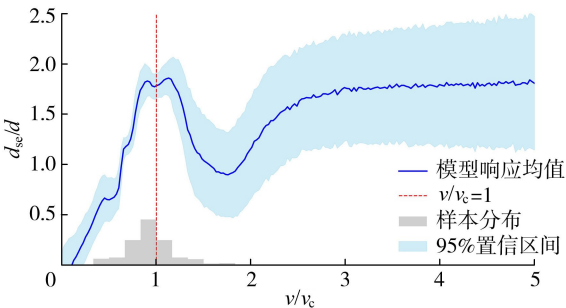


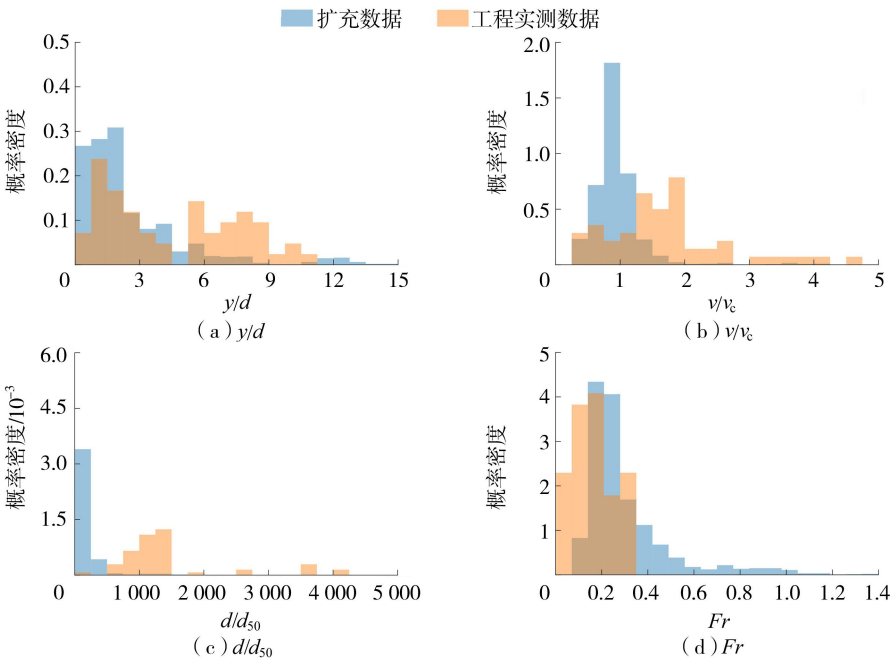
图3 冲刷深度对相对流速的响应曲线
Fig.3 Response curve of scour depth to relative flow velocity

2.3 实例验证

为检验 PSI-MLP 模型在实际工程场景中跨尺度的外推和泛化能力,收集了 56 组实际桥墩局部冲刷实测数据进行验证^[36]。工程实测数据统计见表 4,图 4 对比了扩充数据与工程实测数据在输入量(y/d 、 v/v_c 、 d/d_{50} 和 Fr)上的分布差异。扩充数据在较小 y/d 、 v/v_c 接近临界值的区间样本分布密集,并一定程度上覆盖了较高 Fr 的工况;而工程实测数据在较大 y/d 、高 v/v_c 以及大 d/d_{50} 区域占比更高,更能反映大水深、高流速及大尺度桥墩条件下的实际工况。对比表明,工程实测数据相较扩充数据在输入量分布上存在一定外推,可用于检验 PSI-MLP 模型的跨工况与跨尺度泛化性能。

表 4 工程实测数据统计
Table 4 Statistics of field-measured data

统计特征值	$v/(m/s)$	$v_c/(m/s)$	y/m	d/m	d_{50}/mm	d_{se}/m
最大值	1.90	2.59	9.40	1.50	6.80	2.50
最小值	0.20	0.35	0.60	0.60	0.12	0.25
平均值	0.94	0.60	4.14	0.99	1.01	1.05



注:棕色部分为颜色重叠区域,仅表示分布重合。

图 4 扩充数据与工程实测数据工况特征对比

Fig. 4 Comparison of working condition characteristics between augmented and field-measured data

由表 5 可知,PSI-MLP 模型在相对误差小于或等于 25% 的区间内共有 40 组样本,占比 71.4%,高于 MLP(51.7%)、XGBoost(41.1%) 和 SVM(44.6%),且低误差样本数量多于符号回归方程及各经验公式;在相对误差大于 100% 的区间内,PSI-MLP 模型样本占比仅为 1.8%,而 MLP、XGBoost 和 SVM 的占比分别达到 5.4%、10.7% 和 12.5%,经验公式的占比甚至高达 25% 以上。在工程实测与室内试验存在尺度及水沙条件差异的情况下,PSI-MLP 模型得益于物理信息与符号回归耦合约束的正则化效应,表现出较好的泛化性,多数工况中保持了较高的预测精度并抑制了极端偏差。

表 5 各相对误差区间样本组数统计

相对误差/%	PSI-MLP	MLP	XGBoost	SVM	符号回归方程	HEC-18 式	Melville 冲刷公式
0~25	40	29	23	25	9	23	3
>25~50	14	16	23	22	21	11	11
>50~75	0	4	3	1	12	6	2
>75~100	1	4	1	1	6	2	13
>100	1	3	6	7	8	14	27

由表 6 可知,在 $0 < y/d < 1.0$ 时,XGBoost、SVM 与经验公式的平均相对误差整体偏大,相比之下神经网络模型在预测精度上具有一定优势;而在 $1.0 \leq y/d \leq 2.0$ 和 $y/d > 2.0$ 两类工况下,PSI-MLP 模型展现出优于纯数据驱动模型的预测稳定性,平均相对误差均控制在 20% 以下。因此,工程中较为常见的中等及较大相对水深范围内,引入耦合约束能够有效减小系统偏差、提升冲刷深度预测能力。

表 6 不同相对水深工况下预测误差对比

Table 6 Comparison of prediction errors under different relative water depth conditions

工况分组	样本组数	平均相对误差/%						
		PSI-MLP	MLP	XGBoost	SVM	符号回归方程	HEC-18 式	Melville 冲刷公式
$0 < y/d < 1.0$	6	32.05	15.45	65.70	100.86	117.32	76.55	98.28
$1.0 \leq y/d \leq 2.0$	14	18.96	50.06	73.92	67.75	89.99	87.46	95.65
$y/d > 2.0$	36	19.95	33.49	26.25	31.91	43.94	67.06	100.58

由表 7 可知,清水冲刷($0 < v/v_c < 0.9$)时,PSI-MLP 模型与其他纯数据驱动模型的平均相对误差均在 30% 以下,优于各经验公式计算结果;过渡区($0.9 \leq v/v_c \leq 1.1$)中,PSI-MLP 模型和 MLP 的平均相对误差分别为 17.06% 和 12.27%,处于各类方法中的较低水平;在动床冲刷区($v/v_c > 1.1$),纯数据驱动模型表现出明显的适应性退化,MLP、XGBoost 与 SVM 的平均相对误差分别增至 40.50%、49.8% 与 56.62%,这表明在缺乏明确物理机制引导的情况下,传统机器学习算法难以从有限数据中解构动床条件下泥沙补给与冲刷回落之间复杂的非线性交互机制,导致在外推高流速工况时产生较大偏差。相比之下,PSI-MLP 模型的平均相对误差为 20.40%,较 MLP 降幅接近 50%,且远低于 XGBoost 与 SVM。这一结果证明,在非线性更强的动床冲刷区,物理信息与符号回归的耦合约束发挥了关键的正则化作用,有效抑制了纯数据驱动模型的偏差,赋予模型更强的外推稳定性;而在清水冲刷区和过渡区,当 MLP 这类纯数据驱动模型已具备较强拟合能力或样本数量偏少时,PSI-MLP 模型由于需要满足物理一致性和外推鲁棒性的要求,表现出的均值误差边际改善相对有限。进一步纵向对比可以观察到,与冲刷经验公式的预测结果不同,PSI-MLP 模型在机理更为复杂的动床冲刷区预测精度优于清水冲刷区。这一方面是由于 HEC-18 式和 Melville 冲刷公式是采用有限控制变量对冲刷过程进行参数化设计,易导致动床工况下产生系统偏差,而 PSI-MLP 模型以数据为主导进行学习,在动床冲刷区可通过耦合约束对这些未显式参数化的高阶非线性与交互效应进行补偿,从而在动床冲刷区实现精度提升;另一方面,不同于清水冲刷区,PSI-MLP 模型在动床冲刷区的物理约束更多体现为提供关于冲刷回落的结构化趋势引导,这种对“物理形态”的约束比对“数值阈值”的依赖更为鲁棒,使模型能更有效地利用数据信息优化参数,因此在动床区表现出更佳的收敛效果与预测精度。

表 7 不同相对流速工况下预测误差对比

Table 7 Comparison of prediction errors under different relative flow velocity conditions

工况分组	样本组数	平均相对误差/%						
		PSI-MLP	MLP	XGBoost	SVM	符号回归方程	HEC-18 式	Melville 冲刷公式
$0 < v/v_c < 0.9$	10	25.11	24.89	28.97	26.03	65.34	50.77	65.63
$0.9 \leq v/v_c \leq 1.1$	4	17.06	12.27	19.65	18.07	53.71	65.98	94.67
$v/v_c > 1.1$	42	20.40	40.50	49.80	56.62	63.75	93.96	87.16

综上所述,PSI-MLP 模型融合物理机制与数据规律,在实际工程场景中表现出更强的适用性与可靠性,能在大水深、高流速等复杂工况下保持较低且稳定的预测误差,缓解了纯数据驱动模型在外推时易出现的失真问题,具有良好的跨尺度适应能力与工程鲁棒性,可为桥墩冲刷风险评估与设计校核提供预测手段和技术支撑。当前模型的输入变量主要聚焦于基础水力几何参数,未来在更完备的含沙试验与现场监测数据支撑下,可进一步构建多维输入特征体系,探究悬沙浓度、冲刷历时等变量的影响;同时,可逐步拓展模型在非圆形桥墩、群桩及非恒定流下的适用边界,以持续提升模型的预测精度与泛化能力。

3 结 论

a. 物理信息与符号回归的耦合约束能够提升纯数据驱动 MLP 模型的预测精度与泛化能力。PSI-MLP 模型在测试集上的 RMSE、 R^2 和 KGE 分别为 0.234、0.880 和 0.928,相较无物理、符号约束的 MLP,RMSE 降低 0.084, R^2 提高 0.097,KGE 提高 0.141;且 PSI-MLP 模型相较于回归任务中的常用模型 XGBoost 与 SVM,在测试集上的 RMSE 分别降低约 34.8% 和 27.3%, R^2 、KGE 亦均有所提升。表明将冲刷公式以及符号回归

方程嵌入损失函数后,模型具有较高预测精度与泛化能力。

b. 可解释性分析与物理一致性检验表明,PSI-MLP 模型内部决策逻辑与局部冲刷机理基本一致。SHAP 分析显示,PSI-MLP 模型在预测相对冲刷深度时,各输入因子重要性由高到低依次为相对水深、相对流速、弗劳德数与相对粒径,其中相对水深的平均绝对 SHAP 贡献值达 0.265 2,证明相对水深为控制冲刷深度的主导参数。物理一致性检验表明,PSI-MLP 模型预测的相对冲刷深度随相对流速的变化能够再现“清水冲刷区随流速增大而冲刷加深、近临界区间出现最大冲刷深度以及动床区冲刷深度缓慢回升”的典型三阶段演化特征。

c. 工程实测数据对比验证表明,PSI-MLP 模型在实际工程尺度下具有良好的预测性能和泛化性能。在 56 组桥墩冲刷实测工况中,PSI-MLP 模型相对误差小于 25% 的样本占比为 71.4%,显著优于纯数据驱动的 MLP(51.7%)以及 XGBoost(41.1%)和 SVM(44.6%);在相对误差大于 100% 的区间,PSI-MLP 模型样本占比仅为 1.8%,低于上述数据驱动模型及传统经验公式。在大水深、高流速和大尺度桥墩等与实验室试验存在明显尺度差异的复杂工况条件下,PSI-MLP 模型仍能有效抑制极端偏差预测,具备向工程设计与安全校核等实际环节推广应用的可行性与实用价值。

参考文献:

[1] 熊文,蔡春声,张嵘钊. 桥梁水毁研究综述[J]. 中国公路学报,2021,34(11):10-28. (Xiong Wen,Cai Chunsheng,Zhang Rongzhao. Review of hydraulic bridge failures[J]. China Journal of Highway and Transport,2021,34(11):10-28. (in Chinese))

[2] 陈秉如,冀鸿兰,高鹏程,等. 冰盖下组合桥墩的局部冲刷特性及水力特性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(2):53-60. (Chen Bingru,Ji Honglan,Gao Pengcheng,et al. Local scour and hydraulic characteristics of composite piers under ice sheet[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2024,52(2):53-60. (in Chinese))

[3] Shahriar A R,Ortiz A C,Montoya B M,et al. Bridge pier scour: an overview of factors affecting the phenomenon and comparative evaluation of selected models[J]. Transportation Geotechnics,2021,28:100549.

[4] 高鹏程,牟献友,常蕾,等. 冰盖下串联组合桥墩周围绕流特性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(1):71-79. (Gao Pengcheng,Mou Xianyou,Chang Lei,et al. Study on the flow characteristics around the tandem composite piers under the ice cover[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2025,53(1):71-79. (in Chinese))

[5] 雷婷,任建民,陶虎,等. 桥墩基础局部冲刷计算方法的对比研究[J]. 泥沙研究,2020,45(5):61-68. (Lei Ting,Ren Jianmin,Tao Hu,et al. Review on calculation methods for local scour of pier foundations[J]. Journal of Sediment Research,2020,45(5):61-68. (in Chinese))

[6] Kaya A. Artificial neural network study of observed pattern of scour depth around bridge piers[J]. Computers and Geotechnics,2010,37(3):413-418.

[7] Choi S U,Choi S. Prediction of local scour around bridge piers in the cohesive bed using support vector machines[J]. KSCE Journal of Civil Engineering,2022,26(5):2174-2182.

[8] Chou J S,Nguyen N M. Scour depth prediction at bridge piers using metaheuristics-optimized stacking system[J]. Automation in Construction,2022,140:104297.

[9] Eini N,Bateni S M,Jun C,et al. Estimation and interpretation of equilibrium scour depth around circular bridge piers by using optimized XGBoost and SHAP[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics,2023,17(1):2244558.

[10] Kim T, Shahriar A R,Lee W D,et al. Interpretable machine learning scheme for predicting bridge pier scour depth [J]. Computers and Geotechnics,2024,170:106302.

[11] Eini N,Janizadeh S,Bateni S M,et al. Predicting equilibrium scour depth around non-circular bridge piers with shallow foundations using hybrid explainable machine learning methods[J]. Results in Engineering,2024,24:103492.

[12] Raissi M. Deep hidden physics models: deep learning of nonlinear partial differential equations[J]. Journal of Machine Learning Research,2018,19:1-24.

[13] 肖洋,陆钰涵,刘佳明,等. 基于内嵌物理信息神经网络的复式河道非恒定水动力过程求解方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(5):90-99. (Xiao Yang,Lu Yuhan,Liu Jiaming,et al. A method for solving unsteady hydrodynamic processes in compound river channels based on embedded physical information neural networks[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2025,53(5):90-99. (in Chinese))

[14] Chen X W,Yu Y,Liu L. Physics-informed neural network for prediction of scour depth using natural frequency of monopiles[J]. Ocean Engineering,2025,339:122054.

[15] Yousefpour N, Wang B. Physics-inspired deep learning for bridge scour prediction: site-specific and transferable models[J]. *Georisk*, 2025, 19(4): 966-989.

[16] 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))

[17] 王玲玲,俞佳亮,朱海,等. 桥墩局部冲刷研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(3): 223-229. (Wang Lingling, Yu Jialiang, Zhu Hai, et al. A review of the process, influencing factors and numerical modelling of local scour[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2019, 47(3): 223-229. (in Chinese))

[18] 杜升涛,王超琳,杨博,等. 水流强度对淹没式方桩局部冲刷特性的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(2): 92-100. (Du Shengtao, Wang Chaolin, Yang Bo, et al. Influence of flow intensity on local scour characteristics of a submerged square pile[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2024, 52(2): 92-100. (in Chinese))

[19] 黄君宝,肖厅厅,孙志林,等. 涌潮水流引发的桥墩局部冲刷试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(5): 441-446. (Huang Junbao, Xiao Tingting, Sun Zhilin, et al. Experimental study on local scour of piers caused by tidal bore [J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2021, 49(5): 441-446. (in Chinese))

[20] Richardson E V, Davis S R. Evaluating scour at bridges, fourth edition[R]. Washington, DC: Federal Highway Administration, U. S. Department of Transportation, 2001.

[21] Melville B W. Pier and abutment scour: integrated approach[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1997, 123(2): 59-65.

[22] Cheng N S, Lu C, Lu Y, et al. Quantitative definition of Shields criterion for incipient sediment motion [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2024, 39(1): 61-69.

[23] Lee T L, Jeng D S, Zhang G H, et al. Neural network modeling for estimation of scour depth around bridge piers[J]. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 2007, 19(3): 378-386.

[24] Melville B W, Chiew Y M. Time scale for local scour at bridge piers[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999, 125(1): 793-795.

[25] Lança R M, Fael C S, Maia R J, et al. Clear-water scour at comparatively large cylindrical piers [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 139(11): 1117-1125.

[26] Fael C, Lança R, Cardoso A. Effect of pier shape and pier alignment on the equilibrium scour depth at single piers [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2016, 31(3): 244-250.

[27] Shorten C, Khoshgoftaar T M. A survey on image data augmentation for deep learning[J]. *Journal of Big Data*, 2019, 6(1): 60.

[28] el Gana E M, Ouallali A, Taleb A. Scour depth prediction around bridge piers of various geometries using advanced machine learning and data augmentation techniques[J]. *Transportation Geotechnics*, 2025, 51: 101537.

[29] Chen T, Guestrin C. XGBoost: a scalable tree boosting system[C]//Krishnapuram B, Shah M, Smola A J, et al. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. San Francisco: ACM, 2016: 785-794.

[30] Vapnik V N. The nature of statistical learning theory[M]. New York: Springer, 2000: 1-314.

[31] 潘志刚,林祥峰,张继生. 基于支持向量机的桥墩局部冲刷深度预测模型[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(6): 78-81. (Pan Zhigang, Lin Xiangfeng, Zhang Jisheng. Prediction model for bridge pier local scour depth based on support vector machine [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2021, 41(6): 78-81. (in Chinese))

[32] 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))

[33] Lundberg S M, Lee S I. A unified approach to interpreting model predictions [C]//Guyon I, von Luxburg U, Bengio S, et al. *Advances in Neural Information Processing Systems 30*. NY: Curran Associates, 2017: 4765-4774.

[34] Sheppard D M, Demir H, Melville B W. Scour at wide piers and long skewed piers; NCHRP report 682[R]. Washington, DC: Transportation Research Board, 2011.

[35] Kim T, Shahriaar A R, Lee W D, et al. Field data-based prediction of local scour depth around bridge piers using interpretable machine learning[J]. *Transportation Geotechnics*, 2025, 52: 101567.

[36] Mueller D S, Wagner C R. Field observations and evaluations of streambed scour at bridges[R]. McLean: Federal Highway Administration, 2005.

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.04.020

真空影响下铁尾矿-土工织物滤层渗透特性试验研究

吴海民¹,汪万升¹,杨 龙²,张祖刚²,欧张文²

(1. 河海大学水利水电学院; 2. 南京宝地梅山产城发展有限公司矿业分公司)

摘要: 为提高铁尾矿坝排渗效果,对铁尾矿坝中土工织物滤层进行了不同真空负压作用下的渗透试验,分析了滤层颗粒运移规律和土工织物孔隙结构的变化规律,探析了真空负压对铁尾矿-土工织物滤层渗透特性的影响。结果表明:真空负压可显著提高铁尾矿-土工织物滤层的渗透性能,对于短纤、长丝、滤布 3 种土工织物,渗透稳定时,长丝土工织物滤层的渗透系数最大,滤布土工织物滤层次之,短纤土工织物滤层最小;短纤土工织物滤层渗透系数从真空负压为 70 kPa 开始显著增大,后随着真空负压值增大而增大;长丝和滤布土工织物滤层在真空负压为 70 kPa 时渗透系数最大,相较于无真空作用下的稳定渗透系数分别增大了 94.6 倍和 14.2 倍;真空作用对土工织物滤层渗透特性的改善效果受织物自身纤维的粗细和织物厚度的影响,对于由较粗纤维组成的土工织物或较厚土工织物,真空作用对其滤层渗透特性的改善效果较为明显。

关键词: 铁尾矿;土工织物滤层;常水头渗透试验;真空作用;渗透系数

Experimental study on permeability characteristics of iron tailings-geotextile filter under vacuum conditions

Wu Haimin¹, Wang Wansheng¹, Yang Long², Zhang Zugang², Ou Zhangwen²
(1. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University;
2. Mining Branch of Nanjing Baodi Meishan Industrial City Development Co., Ltd.)

Abstract: To improve the drainage performance of iron tailings dams, permeability tests were conducted on geotextile filters in iron tailings dams under different vacuum negative pressures. The particle migration laws within the filter and the variation laws of the pore structure of the geotextiles were analyzed, and the influence of vacuum negative pressure on the permeability characteristics of the iron tailings-geotextile filter was investigated. The results indicate that vacuum negative pressure can significantly improve the permeability of the iron tailings-geotextile filter. Under stable seepage conditions, among the three types of geotextiles, staple fiber, namely filament and filter cloth geotextiles, the permeability coefficient of the filament geotextile filter is the highest, followed by that of the filter cloth geotextile filter, and the staple fiber geotextile filter exhibits the lowest permeability coefficient. The permeability coefficient of the staple fiber geotextile filter increases significantly starting from a vacuum negative pressure of 70 kPa and then increases with the increase of vacuum negative pressure. For the filament and filter cloth geotextile filters, the maximum permeability coefficients are obtained at a vacuum negative pressure of 70 kPa, increasing by 94.6 and 14.2 times, respectively, compared with the stable permeability coefficients without vacuum action. The improvement effect of vacuum action on the permeability characteristics of the geotextile filter is influenced by the fiber thickness and fabric thickness of the geotextiles. For geotextiles composed of coarser fibers or those with greater thickness, the improvement effect of vacuum action on the permeability characteristics of the filter is more pronounced.

Key words: iron tailings; geotextile filter; constant head permeability test; vacuum action; permeability coefficient

尾矿坝作为尾矿工程中重要的组成部分,其安全稳定对整个尾矿工程和周围基础设施及环境极为重要。尾矿坝排渗设施的淤堵是威胁尾矿坝安全的重要因素之一^[1],因为尾矿坝内局部淤堵将造成浸润线抬升,而浸润线是尾矿库安全运行的“生命线”^[2]。一旦浸润线埋深不足,甚至出现渗流溢出,便会严重危及坝体稳定^[3]。此外,水流通过土体时引起的土颗粒迁移易诱发渗流侵蚀^[4],尾矿坝上部尾矿土层的自重效应较为薄弱,浸润线过高可能会诱发坝内渗流侵蚀。因此,如何有效降低尾矿坝内部因淤堵而抬升的浸润线是保障尾矿坝安全稳定的关键问题。

目前,我国尾矿库多采用铺设土工织物作为排渗设施的滤层^[5],而土工织物与尾矿泥浆组成的滤层一旦发生淤堵,将严重影响尾矿坝的排渗效果^[6]。尾矿坝中土工织物滤层的渗透性能作为排渗效果的重要参

作者简介: 吴海民(1982—),男,副教授,博士,主要从事土工合成材料防渗排水研究。E-mail:wuhaimin@hhu.edu.cn

考指标,已成为众多学者研究的重点课题。例如:Veylon 等^[7]认为尾矿坝中土工织物渗透系数的降低主要是细颗粒尾矿在排渗管中、土工织物内部及上游表面的沉积所导致;杨春和等^[8]也得出相似的结论,并发现垂直载荷可导致土工织物和尾矿砂渗透性能降低,尾矿砂和土工织物的渗透系数与垂直压力呈负相关关系;基于杨春和等^[8]的研究,李国栋等^[9]对不同水压作用下的尾矿库中土工织物滤层反滤特性进行了试验研究,发现与逐级施加外水压力相比,外水压力直接升高条件下系统的梯度比值更大,流量更小,直接升压会增大土工织物发生淤堵的风险。在对尾矿坝土工织物滤层渗透特性形成系统认识的前提下,如何优化滤层排渗能力,已成为现阶段面临的主要技术难题。崔旋等^[10]在细粒尾矿库土工织物反滤设计的研究中提出,设计中需重点考虑其淤堵影响因子,尽可能延长排渗系统的服役年限,认为薄层大孔径材料应成为今后尾矿库排渗系统首选的反滤材料。然而,对于已建成的尾矿坝,其排渗设施已埋设于坝体内部,直接开挖更换不仅实施难度大,而且可能扰动坝体结构并增加施工成本和安全风险。因此,在不进行大规模开挖的条件下恢复或提升既有排渗系统的效能更具工程意义。针对已建成尾矿坝排渗设施出现淤堵的问题,汪泉等^[11]提出利用气驱排渗的方法进行尾矿排渗降水,该方法通过气驱系统在排渗井内营造负压,进而在周边土体形成真空渗流场,加快孔隙水的渗流速率,且其对细颗粒、高压缩性、低渗透性的尾矿泥浆,具备优异的降水排渗效果。

目前关于真空负压抽滤技术在尾矿坝排渗中的应用相对较少,要将真空抽滤技术更好地应用到已建尾矿坝的排渗工作中,首先应探明真空负压作用下的尾矿-土工织物滤层的渗透特性规律。为此,本文对真空作用下的铁尾矿-土工织物滤层的渗透特性进行了系列试验研究,同时鉴于不同尾矿工程中所采用的土工织物类型不同,对工程中可选的 3 种不同类型土工织物依次进行试验,以期应用真空抽滤技术进行已建尾矿坝排渗降水提供参考。

1 渗透试验

1.1 试验装置及方法

渗透试验装置如图 1 所示,装置主要包括上游水箱、下游水箱和渗透室 3 个部分。渗透室高度为 335 mm,内径为 150 mm。先针对某种类型铁尾矿-土工织物滤层进行常水头渗透试验,试验过程中记录不同时刻泥浆高度以及渗透水体积,待渗透系数稳定或产生淤堵后,在下游水箱出水口安装真空室和真空泵进行后续的 5 种不同真空负压下的真空渗透试验。试验结束后对滤层的渗透系数以及试样不同位置处的泥浆颗粒粒径变化规律进行分析。

1.2 试验材料和方案

试验采用的尾矿土取自南京某铁尾矿库现场,其基本物理特征参数如下:干密度为 1.850 g/cm³,比重为 2.712,pH 为 6.8~6.9,特征粒径 d_{10} 、 d_{50} 、 d_{90} 分别为 1.377、8.173、61.85 μm,黏粒含量(质量分数,下同)为 39.37%,粉粒含量为 53.29%。为了模拟现场尾矿堆存实际情况,将尾矿土配置成含固率为 30%的泥浆,铁尾矿泥浆下部垫有用于反滤的土工织物。为了探究不同土工织物渗透特性效果,分别采用 3 种不同类型的土工织物(图 2)进行试验研究,其基本物理特征参数见表 1。

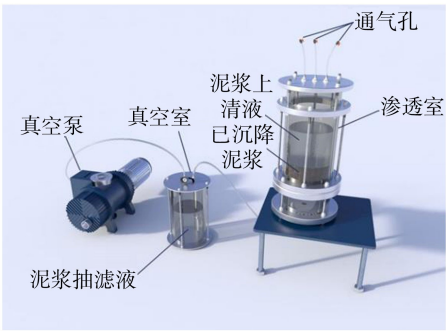


图 1 渗透试验装置

Fig. 1 Permeability test device



(a) 短纤土工织物 (b) 长丝土工织物 (c) 滤布土工织物

图 2 试验采用的土工织物样品

Fig. 2 Geotextile samples used in test

表 1 土工织物基本物理特性参数

Table 1 Basic physical property parameters of geotextiles

织物类型	厚度/mm	单位面积质量/(g/m ²)	等效孔径/mm
短纤	1.684	208.9	0.09
长丝	2.031	210.6	0.095
滤布	0.591	126.9	0.2

渗透试验分为常水头渗透试验和真空渗透试验,其中常水头渗透试验的水头高度为 120cm,真空渗透试验设置 40、50、60、70、80 kPa 共 5 级真空负压工况(为避免产生歧义,本文真空负压值均指相对于大气压的负表压绝对值)。

2 试验结果与分析

2.1 铁尾矿-短纤土工织物滤层

由图 3 可知,在常水头作用下,铁尾矿-短纤土工织物滤层的渗透系数在试验前期有微弱增大趋势,并在 3.5 h 时达到最高值 3.67×10^{-6} cm/s,随后逐渐下降,并最终于 7 h 时发生淤堵。随着真空负压的施加,在 40 kPa 真空负压作用下滤层的渗透系数增加到了 10^{-5} 数量级。当真空负压达到 50 kPa 和 60 kPa 时,滤层的渗透系数随试验时间的持续均呈现先减后增再减的变化趋势,并在第 2 次减小至最小值后分别稳定在 1.1×10^{-5} cm/s 和 5.5×10^{-6} cm/s。当真空负压达到 70 kPa 和 80 kPa 时,滤层的渗透系数大幅度增大,并随着试验时间的持续,两种真空负压下该滤层的渗透系数均呈先增再减又增的变化趋势,且在 1.5 h 左右达到稳定,其中 70 kPa 和 80 kPa 真空作用下滤层的渗透系数分别稳定在 7.70×10^{-5} cm/s 和 1.20×10^{-4} cm/s 左右。对于铁尾矿-短纤土工织物滤层,真空负压为 70 kPa 为其渗透系数的转折点,当真空负压小于 70 kPa 时,渗透系数随着真空负压的变化不明显,均处于一个较小范围,而当真空负压大于 70 kPa 后,该滤层渗透系数出现明显提高。

2.2 铁尾矿-长丝土工织物滤层

由图 4 可知,常水头作用下铁尾矿-长丝土工织物滤层的渗透系数随试验时间的持续呈逐渐减小的变化趋势,并最终在 3.5 h 后稳定在 2.03×10^{-4} cm/s 左右。后续在不同真空负压的作用下,滤层的渗透系数均有较为明显的增大。其中,40、50、80 kPa 真空负压作用下该滤层渗透系数在试验前期呈现波动式下降,并最终依次稳定在 3.69×10^{-4} 、 3.59×10^{-4} 、 3.02×10^{-4} cm/s,而 60 kPa 和 70 kPa 真空负压作用下滤层渗透系数在试验前期呈波动式增大的趋势,并最终分别稳定在 4.0×10^{-4} 、 4.86×10^{-4} cm/s。铁尾矿-长丝土工织物滤层的渗透系数在 40~70 kPa 范围内总体呈上升趋势,直到 80 kPa 真空作用时显著降低,发生该现象的原因是当真空负压提高到 80 kPa 时更多细颗粒被带动向下移动,造成土工织物内部原本打开的渗流通道被淤堵,同时部分细颗粒嵌入土工织物的孔隙中,导致渗透系数降低。综上,对于铁尾矿-长丝土工织物滤层,真空负压可有

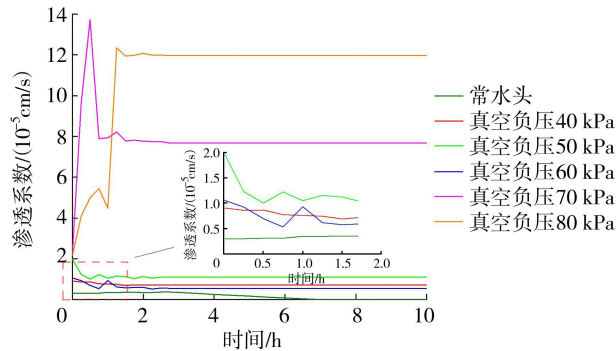


图 3 铁尾矿-短纤土工织物滤层渗透系数随时间变化曲线

Fig. 3 Variation curves of permeability coefficient of iron tailings-staple fiber geotextile filter with time

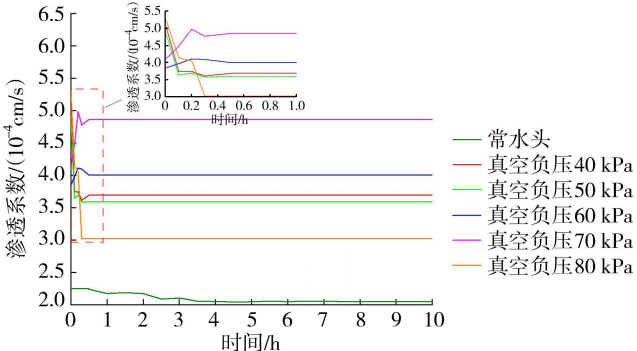


图 4 铁尾矿-长丝土工织物滤层渗透系数随时间变化曲线

Fig. 4 Variation curves of permeability coefficient of iron tailings-filament geotextile filter with time

效改善其渗透性能,且最优抽滤真空负压约为 70 kPa。

2.3 铁尾矿-滤布土工织物滤层

由图 5 可知,常水头作用下铁尾矿-滤布土工织物滤层的渗透系数在试验过程中一直稳定在 5.14×10^{-6} cm/s 左右。后续在不同真空负压的作用下,滤层的渗透系数均有较为明显的提升。在 40~70 kPa 真空负压作用下,滤层渗透系数随试验时间的持续呈波动式增大并最终分别稳定在 2.74×10^{-5} 、 3.07×10^{-5} 、 4.87×10^{-5} 、 7.48×10^{-5} cm/s 左右。在 80 kPa 真空负压作用下,滤层渗透系数随试验时间的持续呈现波动式减小的变化趋势,并最终稳定在 3.07×10^{-5} cm/s 左右。与真空负压对铁尾矿-短纤土工织物滤层和铁尾矿-长丝土工织物滤层渗透性能的作用效果相似,真空负压对于提升铁尾矿-滤布土工织物滤层的渗透性能同样具有良好的效果,且其最优真空负压也为 70 kPa 左右。

2.4 真空负压对不同土工织物滤层渗透系数的影响

由图 6(图中真空负压为 0 对应常水头)可知,铁尾矿-长丝土工织物滤层在真空负压作用下的渗透系数达到 10^{-4} cm/s 的数量级,远大于短纤和滤布土工织物滤层。铁尾矿-短纤土工织物滤层的渗透系数在较低真空负压下没有明显的变化,当真空负压达到 70 kPa 时渗透系数开始增大,从无真空时的 0 cm/s 增大到 7.67×10^{-5} cm/s 左右。滤布和长丝土工织物滤层渗透系数均先随真空负压的升高而增大,于 70 kPa 真空负压时达到最大值,随后下降,相较于常水头作用下,真空作用下最大渗透系数分别增大了 14.2 倍和 94.6 倍。发生该现象的原因:随着真空负压的增大,细颗粒通过土工织物孔隙流失,使得渗流通道被打开,渗透系数增大;而随着真空负压越来越大,达到 80 kPa 时更大粒径的土颗粒被带动向下迁移,将已打开的渗流通道和部分土工织物孔道堵塞导致渗透系数减小。因此,对于此种铁尾矿泥浆而言,滤布和长丝土工织物的最佳抽滤负压为 70 kPa 左右。而短纤土工织物由于其有效孔径较小,其渗透系数在较高的真空负压下才得以增大。铁尾矿-长丝土工织物滤层总体表现出更大的渗透系数,可能与该试验过程中颗粒运移情况有关。

2.5 铁尾矿-土工织物滤层渗透特性变化机理探讨

土工织物滤层的渗透性能,在很大程度上受反滤过程中的颗粒堵塞作用影响^[12-13],而细颗粒在迁移过程中大量聚集会引起堵塞^[14],因此试验过程中装置内部土颗粒的运移情况是影响铁尾矿-土工织物滤层渗透系数变化的原因之一。为进一步揭示铁尾矿-土工织物滤层在不同真空负压下的渗透系数变化机理,分别在试验结束后的泥柱高度(从上到下)的 0%、25%、50%、75%、100% 截面中心处取铁尾矿土样,并使用 BT 9300 智能激光分析仪器对试验后的尾矿土样品进行颗粒粒径分布测试,结果如图 7 所示。此外,对图 7 中的颗粒级配数据进行分析,得到不同深度测点处黏粒、粉粒和砂粒的含量(图 8)。

由图 8 可知,铁尾矿-短纤土工织物滤层上方的泥柱从上至下其黏粒含量基本一致,但是粉粒含量逐渐减小,而砂粒含量则逐渐增大。铁尾矿-长丝土工织物滤层上方的泥柱从上至下其黏粒和粉粒含量总体上呈现逐渐减小的变化趋势,而砂粒含量呈现出逐渐增大的变化趋势,并且增大程度相较于短纤土工织物滤层渗透试验中表现得更显著。铁尾矿-滤布土工织物滤层上方的泥柱从上至下其黏粒含量逐渐增大,粉粒含量基

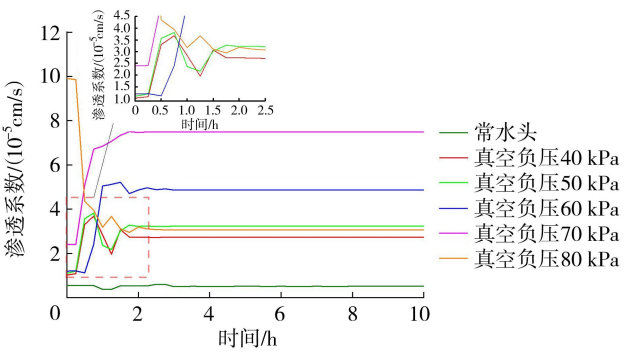


图 5 铁尾矿-滤布土工织物层渗透系数随时间变化曲线
Fig. 5 Variation curves of permeability coefficient of iron tailings-filter cloth geotextile filter with time

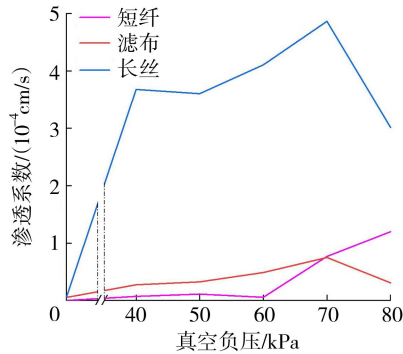


图 6 不同织物滤层稳定渗透系数随真空负压变化关系
Fig. 6 Variation of stable permeability coefficients of different fabric filters with vacuum negative pressure

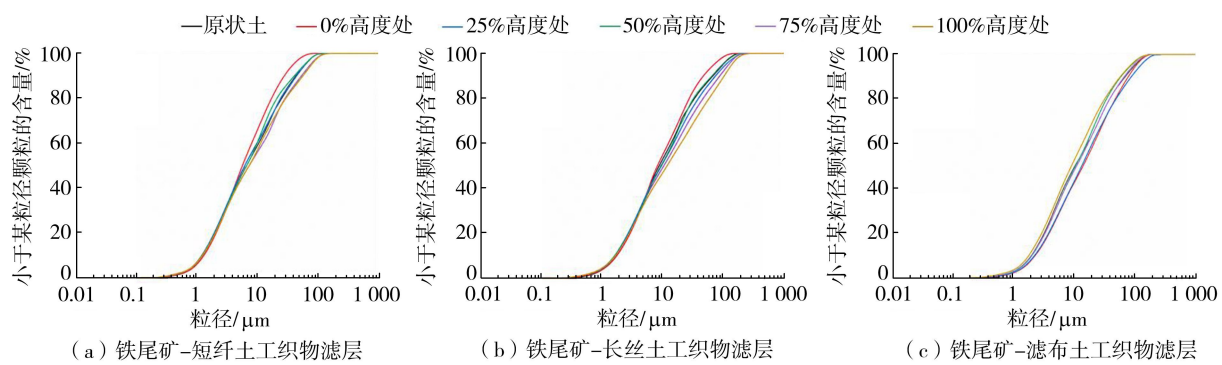


图 7 泥浆柱各测点处颗粒级配分布曲线

Fig. 7 Particle size distribution curves at different measurement points in slurry column

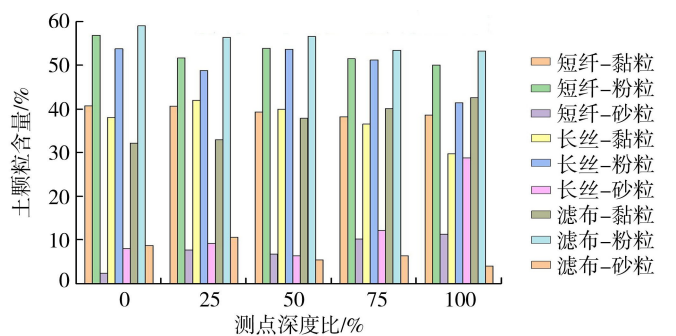


图 8 不同深度测点处黏、粉、砂粒的含量

Fig. 8 Contents of clay, silt, and sand particles at measurement points of different depths

本一致,而砂粒含量表现出逐渐减小的变化趋势。由此可知,铁尾矿-长丝土工织物滤层的渗透系数较大主要是因为是在真空负压作用下仪器底部砂粒含量较大,且黏粒、粉粒、砂粒的含量较为接近,因此土工织物附近黏粒、粉粒和砂粒含量较为接近时不易造成土工织物淤堵,并有助于土工织物层形成良好的反滤结构。

坝内细尾矿砂较多是造成尾矿坝中土工织物滤层渗透性能降低的一个重要原因,其在渗流力的作用下会沉积在土工织物表面,甚至渗透进土工织物内部,进而堵塞土工织物孔径^[7,15]。为进一步分析铁尾矿-土工织物滤层的渗透特性变化的机理,试验结束后对土工织物的淤堵情况进行了微观结构观察分析。利用 Nikon LV150 型显微镜拍摄得到了 3 种土工织物试验前后不同放大倍数下的微观图像,结果如图 9 所示。

由图 9 可知,在真空负压作用下,3 种土工织物均出现了不同程度的土颗粒附着情况。其中,短纤土工织物内部土颗粒附着最严重,在 40 倍放大倍数下大部分区域已被尾矿泥浆堵塞,在 100 倍放大倍数下则几乎没有可见区域。长丝土工织物中附着的土颗粒量最少,且附着程度较为均匀和松散。滤布土工织物中的土颗粒集中附着在滤布本身纤维较为密集的区域,造成这些区域淤堵严重,但其余纤维稀疏区域可见空隙较为清晰。此外由 3 种土工织物的微观结构可知,相较于短纤和长丝,滤布织物的纤维较粗。

在整个真空负压作用过程中长丝土工织物滤层的渗透系数最大,且试验后泥柱测点深度 100% 层处的黏粒和粉粒含量大幅度减少,因此可以认为长丝土工织物滤层的渗透系数较大的原因可能是大量的黏粒、粉粒尾矿透过了织物的孔隙,因此该滤层虽然渗透系数较大,但该滤层的保土性较差。在较低真空负压下短纤土工织物滤层的渗透系数极小,说明较低真空负压无法打开短纤土工织物滤层的渗透通道。而在真空负压达到 70 kPa 后渗透系数骤增,这主要是因为短纤织物的纤维较细,无法承受较高的真空负压,从而破坏了短纤土工织物的局部反滤结构,形成了图 9 中所示的局部通道。滤布织物由于纤维较粗,在随着真空负压逐渐加大的过程中织物与铁尾矿泥浆组成的反滤结构较为稳固,并且滤布的有效孔径较大,不易发生整体淤堵,因此表现出较为稳定的渗透系数。

3 结 论

a. 真空负压可不同程度提高铁尾矿-土工织物滤层的渗透性能,改善效果从大到小依次为长丝、滤布、短纤,因此在尾矿坝真空排渗的工程设计中应优先考虑长丝和滤布土工织物。

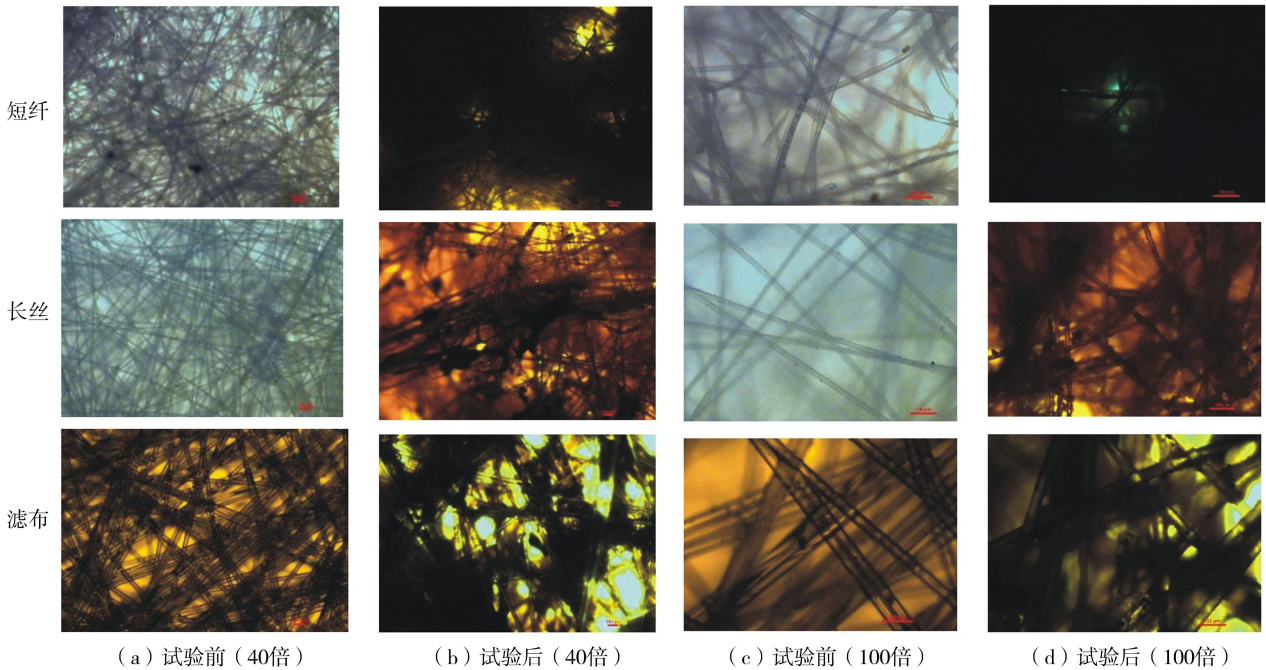


图 9 试验前后 3 种土工织物微观结构对比

Fig. 9 Comparison of microscopic structures of three types of geotextiles before and after test

b. 在 40~80 kPa 的真空负压作用下,随着真空负压值的增大,长丝和滤布土工织物滤层的渗透系数表现出先增再减的变化趋势,在 70 kPa 真空负压作用下渗透系数达到最大值,最大渗透系数相较于无真空作用下分别增大了 94.6 倍和 14.2 倍。而短纤土工织物滤层的渗透系数则先保持平稳后从 70 kPa 开始明显增大,此时短纤土工织物滤层渗透系数相较于无真空作用时增加了 7.67×10^{-5} cm/s。

c. 在本文真空范围内,短纤土工织物滤层所对应的最优真空负压值应是越高越好,而长丝和滤布土工织物滤层的最优真空负压值为 70 kPa 左右。

d. 由于真空作用所产生的压差力会对土工织物自身结构有一定的影响,因此真空负压对铁尾矿-土工织物滤层渗透特性的改善效果受土工织物纤维的粗细以及织物厚度的影响,对由较粗纤维组成的土工织物或较厚土工织物滤层的渗透特性具有很好的改善效果。

e. 本文仅进行了 40~80 kPa 的真空渗透试验,对于真空负压大于 80 kPa 时,铁尾矿-土工织物滤层渗透系数的变化情况以及其渗透系数是否会在真空负压增大到某值后趋于稳定等问题未能在本文中得以解决。因此,在后续的研究中应进一步增大真空负压范围,探究更大真空压力下土工织物滤层渗透规律。

参考文献:

[1] 王凤江. 国外尾矿坝事故调查分析[J]. 金属矿山,2004(增刊 1):49-52. (Wang Fengjiang. Investigation and analysis of tailings dams accidents abroad[J]. Metal Mine,2004(S1):49-52. (in Chinese))

[2] 张力霆. 尾矿库溃坝研究综述[J]. 水利学报,2013,44(5):594-600. (Zhang Liting. Summary on the dam-break of tailing pond [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2013,44(5):594-600. (in Chinese))

[3] 姜清辉,胡利民,林海. 尾矿库溃坝研究进展[J]. 水利水电科技进展,2017,37(4):77-86. (Jiang Qinghui, Hu Limin, Lin Hai. Advances in research of tailings dam failures[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2017,37(4):77-86. (in Chinese))

[4] 梁越,何慧汝,许彬,等. 基于透明土的水力梯度对渗流侵蚀影响试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(5):60-66. (Liang Yue, He Huiru, Xu Bin, et al. Experimental study on the influence of hydraulic gradient on seepage erosion based on transparent soil[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024,52(5):60-66. (in Chinese))

[5] 杨春波,王树和,王媛,等. 尾矿库槽孔管外包土工布径向渗流试验模型及其渗透特性分析[J]. 中国矿业,2019,28(11):175-180. (Yang Chunbo, Wang Shuhe, Wang Yuan, et al. Radial seepage test model and analysis of seepage characteristics of geotextile wrapped in slotted tube of tailings reservoir[J]. China Mining Magazine,2019,28(11):175-180. (in Chinese))

[6] 李国栋,王媛,刘胜,等. 尾矿坝中土工织物滤层反滤试验研究[J]. 水电能源科学,2021,39(3):45-49. (Li Guodong, Wang Yuan,Liu Sheng,et al. Experimental study on filtration properties of geotextile filter in tailings dams[J]. Water Resources and Power,2021,39(3):45-49. (in Chinese))

[7] Veylon G,Stoltz G,Mériaux P,et al. Performance of geotextile filters after 18 years’ service in drainage trenches[J]. Geotextiles and Geomembranes,2016,44(4):515-533.

[8] 杨春和,李泽华,冒海军,等. 尾矿坝排渗系统淤堵机理试验研究[J]. 广西大学学报(自然科学版),2019,44(3):845-854. (Yang Chunhe,Li Zehua,Mao Haijun,et al. Experimental study on the clogging mechanism of drainage system in tailings dam [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition),2019,44(3): 845-854. (in Chinese))

[9] 李国栋,王媛,刘胜,等. 不同水压下尾矿库中土工织物滤层反滤特性试验研究[J]. 水电能源科学,2022,40(11):98-102. (Li Guodong, Wang Yuan, Liu Sheng, et al. Experimental study on reverse filtration characteristics of geotextile filter in tailings pond under different water pressures[J]. Water Resources and Power,2022,40(11):98-102. (in Chinese))

[10] 崔旋,李亚. 细粒尾矿库中土工织物反滤设计初探[J]. 有色金属工程,2021,11(9):107-112. (Cui Xuan,Li Ya. Preliminary study on geotextile filter design in fine tailings reservoir [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021, 11 (9) : 107-112. (in Chinese))

[11] 汪泉,付文堂,邢爱国,等. 赤泥尾矿库气驱排渗降水试验研究[J]. 金属矿山,2021(10):186-191. (Wang Quan, Fu Wentang, Xing Aiguo, et al. Experimental study on dewatering of red mud tailings pond by gas-driven drainage [J]. Metal Mine, 2021(10):186-191. (in Chinese))

[12] 吴纲,雷国辉,姜红. 有纺土工织物覆土条件下的渗透特性试验研究[J]. 岩土工程学报,2017,39(增刊 1):161-165. (Wu Gang,Lei Guohui,Jiang Hong. Experimental study on permeability of woven geotextile covered with soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2017,39(S1):161-165. (in Chinese))

[13] 吕从聪,刘名广,卢晓春,等. 不同因素作用下的土-土工织物反滤体系渗透淤堵机理研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2022,53(12):47-55. (Lyu Congcong, Liu Mingguang, Lu Xiaochun, et al. Study on infiltration clogging mechanism of soil-geotextile filtration system under different factors[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2022,53(12):47-55. (in Chinese))

[14] 陈亮,滕耀宗,蔡国栋,等. 变水头下管涌细颗粒迁移试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(5):82-88. (Chen Liang,Teng Yaozong,Cai Guodong,et al. Experimental study on the migration of fine particles in piping under variable water head [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(5):82-88. (in Chinese))

[15] Watson P D J,John N W M. Geotextile filter design and simulated bridge formation at the soil-geotextile interface[J]. Geotextiles and Geomembranes,1999,17(5/6):265-280.

(收稿日期:2024 - 10 - 27 编辑:刘晓艳)

DOI:10. 3876/j. issn. 1000 - 1980. 2026. 04. 021

未胶结钙质砂强度-剪胀特性试验研究

王晓丽^{1,2},裴会敏²,王振豪^{2,3}

(1. 中国人民解放军 92844 部队; 2. 中国海洋大学环境科学与工程学院; 3. 自然资源部第一海洋研究所)

摘要: 为了实现紧急情况下对钙质砂抗剪强度指标的快速准确估算,采用三轴排水试验研究了未胶结钙质砂的强度-剪胀特性,通过改变试样相对密实度与有效围压,分析了影响未胶结钙质砂内摩擦角的因素,并提出了能够准确预测未胶结钙质砂峰值内摩擦角与剪胀角的经验公式。试验结果表明:钙质砂峰值内摩擦角、剪胀角受相对密实度影响显著,基于试验数据修正的公式参数,能提高未胶结钙质砂峰值内摩擦角与剪胀角预测的可靠性,峰值内摩擦角预测误差基本小于 25%,经验公式可用于固结后相对密实度范围在 31%~83%之间、应力峰值处的平均有效正应力范围在 100~1 600 kPa 之间的未胶结钙质砂试样抗剪指标快速估算。

关键词: 未胶结钙质砂;强度-剪胀特性;内摩擦角;应力-应变响应;三轴试验;经验公式

Experimental study on strength and dilatancy characteristics of uncemented calcareous sand

Wang Xiaoli^{1,2}, Pei Huimin², Wang Zhenhao^{2,3}

(1. The 92844th Unit of the People's Liberation Army of China;

2. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China; 3. First Institute of Oceanography, MNR)

Abstract: To achieve rapid and accurate estimation of the shear strength indicators of calcareous sand under emergency conditions, drained triaxial tests were conducted to investigate the strength and dilatancy characteristics of uncemented calcareous sand. By varying the relative density and effective confining pressure of specimens, the factors influencing the internal friction angle of uncemented calcareous sand were analyzed, and empirical formulas were proposed to accurately predict the peak internal friction angle and dilatancy angle of uncemented calcareous sand. The test results show that the peak internal friction angle and dilatancy angle of calcareous sand are significantly affected by relative density. The formula parameters modified based on the test data can improve the prediction reliability for the peak internal friction angle and dilatancy angle of uncemented calcareous sand. The prediction errors of the peak internal friction angle are mostly less than 25%. The empirical formulas can be used for rapid estimation of the shear strength indicators of uncemented calcareous sand specimens with a post-consolidation relative density ranging from 31% to 83% and a mean effective normal stress at the stress peak ranging from 100 kPa to 1 600 kPa.

Key words: uncemented calcareous sand; strength and dilatancy characteristic; internal friction angle; stress and strain response; triaxial test; empirical formula

钙质砂,又称珊瑚砂,是珊瑚等海洋生物残骸经过原地沉积或短途搬运堆积形成的海洋沉积物,南海、东南亚、中东、南太平洋岛国等地区广泛分布着钙质砂。近年来,我国承建的马尔代夫机场大桥、苏丹港码头等海外工程也多次遇到钙质砂^[1-4]。由于钙质砂在沉积过程中大多未经长途搬运,且碳酸盐含量高达 80% 以上,致使钙质砂具有颗粒形状不规则、多孔隙、易破碎、易胶结等特点,其力学性质与普通石英砂相比存在很大的不同,已有的针对石英砂的工程经验和理论分析不能完全适用于钙质砂^[5-11]。作为工程设施的地基材料,钙质砂力学特性的研究具有重要意义^[12-14]。

钙质砂内摩擦角是反映钙质砂内部颗粒间摩擦特性和抗剪强度的重要力学参数,设计过程中内摩擦角选取合理与否,直接关系到工程的安全和经济性。受颗粒矿物组成和颗粒形状的影响,钙质砂的临界内摩擦角和峰值内摩擦角都普遍高于石英砂,Coop 等^[15-16]发现澳大利亚 Dogs Bay 钙质砂的临界内摩擦角为 40°,且与应力水平无关,而 Jamilowski 等^[17]测得钙质砂的临界内摩擦角在 36°~42°之间。以上研究给出了内摩擦角的取值,但没有分析影响钙质砂内摩擦角变化的因素。对于中国南海的钙质砂,内摩擦角随粒径的增

基金项目: 国家自然科学基金项目(42107207)

作者简介: 王晓丽(1993—),女,助理工程师,硕士,主要从事海洋岩土工程设计管理研究。E-mail:847838431@qq.com

通信作者: 王振豪(1990—),男,高级工程师,博士,主要从事海洋工程地质与地质灾害防护研究。E-mail:wzh-ouc@foxmail.com

大而增大,设计时内摩擦角取值为 $30^{\circ} \sim 35^{\circ}$ ^[18-19]。现有对钙质砂内摩擦角影响因素的研究多为定性分析,且取值偏于保守。

本文通过三轴排水试验分析了某海域潟湖内未胶结钙质砂的强度-剪胀特性,并建立了一套能够准确预测钙质砂峰值内摩擦角的经验公式,可实现紧急情况下对钙质砂地基材料抗剪强度指标的快速估算,对于深入了解钙质砂力学特性、优化工程设计与施工有重要的参考意义。

1 试验方案

本文通过开展三轴排水试验研究钙质砂静力条件下的强度-剪胀特性,讨论相对密实度和应力水平对钙质砂静力强度的影响。试验采用的钙质砂从珊瑚礁潟湖中获得,为无胶结、完全扰动的生物成因钙质砂,主要由珊瑚及其他生物碎屑组成,颗粒粒径不均匀,如图 1 所示。

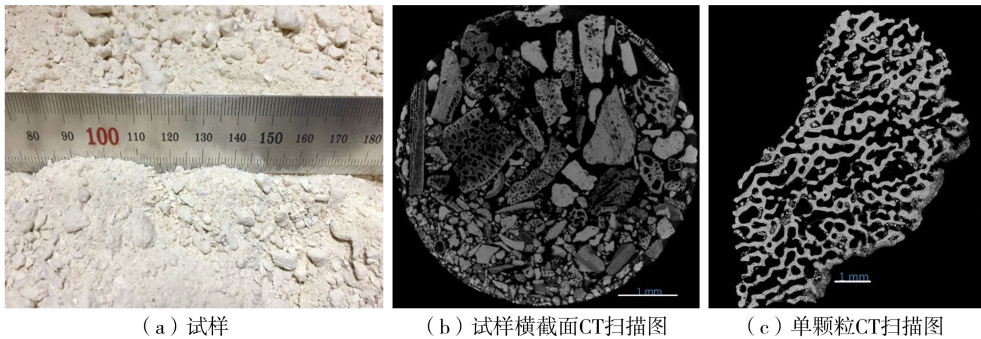


图 1 钙质砂试样
Fig. 1 Calcareous sand sample

从试样颗粒扫描结果(图 1(b))可见,钙质砂颗粒形状表现出显著的不规则性,试样中包含枝状、棒状、块状、片状等不同形状的颗粒,且含有完整的贝壳类生物成分;单颗粒扫描结果(图 1(c))显示,该颗粒可能来源于珊瑚碎屑沉积,表面粗糙多孔,并具有丰富的内孔隙结构,其中部分孔隙为连通结构,有的孔隙中还填充着细小颗粒。

三轴试验采用英国 GDS 生产的应力路径静三轴仪,由压力室、围压控制系统、反压控制系统、轴压控制系统、孔隙水压力测量系统、位移测量系统等部分组成。围压量程为 2 MPa、轴压量程为 3.5 MPa、轴向位移为 25 mm。试样高度为 100 mm,直径为 50 mm,最大粒径为 2 mm,排水和不排水试验的剪切速率分别为 0.2、0.4 mm/min^[20],试样的初始制样相对密实度 I_d 为 20%~75%、初始有效围压 σ'_3 为 50~800 kPa。

2 试验结果与分析

三轴排水试验中每个试样都可以观察到明显的剪切带,剪切带与水平向的夹角为 45° 左右,图 2 为初始相对密实度为 75%、有效围压为 400 kPa 的试样破坏时产生的剪切带。

2.1 应力-应变响应

试样固结后对密实度进行校正,发现固结前松散的试样在固结后密实度绝大多数在 40% 以上。图 3 和图 4 为中密($I_d = 41\%, 43\%$)和密实($I_d = 73\%, 74\%$)试样在较低、较高有效围压下剪切过程中的应力-应变关系和体应变-轴向应变关系,其中 q 为偏应力, ε_a 为轴向应变, ε_v 为体应变。

从图 3 可以看出,中密和密实试样在排水剪切过程中都表现出应变软化的性质,密实试样在轴向应变 6%~12% 时达到峰值强度,而中密试样需要 10%~15% 的轴向应变才能达到峰值强度。中密试样在达到临界状态时的残余强度与峰值强度相比衰退了 1/5 左右,而密实试样衰退了 1/3 左右。从图 4 可以看出,中密和密实试样受剪后首先表现为体积收缩,随后低应力水平下的密实试样表现为剪胀,中密试样和高应力水平下的密实试样表现出剪胀的趋势。由于轴向应变较大时(超过 15%)试样可能已经破坏,此时的体应变结果

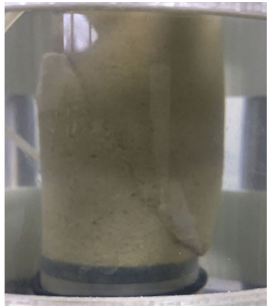


图 2 试样剪切带
Fig. 2 Sample shear zone

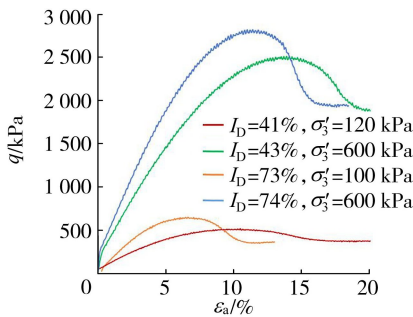


图 3 排水试验应力-应变关系曲线

Fig. 3 Stress-strain relationship curves of drained tests

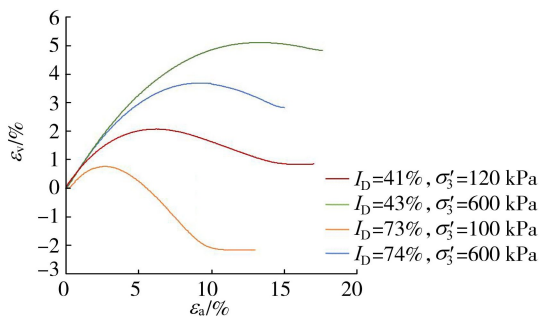


图 4 排水试验体应变-轴向应变关系曲线

Fig. 4 Volumetric strain-axial strain relationship curves of drained tests

并不可靠,因此忽略图 4 体应变-轴向应变关系中不可靠的体应变部分,保留的部分仍能体现出剪胀的趋势。

对于密实试样,所受的有效围压越大,达到强度峰值所需的轴向应变越大,受到剪应力后体积收缩所需的轴向应变也越大。对于受到相同初始有效围压的试样,试样的相对密实度越高,试样达到强度峰值时所需的轴向应变越小,试样的剪胀性越强,达到临界状态时强度衰退的程度越高,应变软化的现象越明显。

2.2 内摩擦角与剪胀角

在排水条件下剪切,达到强度峰值时对应的内摩擦角为峰值内摩擦角。石英砂的强度-剪胀理论^[17]表明:峰值内摩擦角与相对密实度和应力水平有关,随相对密实度的增大而增大、随应力水平的增大而减小;剪切产生较大的变形后,石英砂会达到临界状态,此时砂土会继续变形,但体积和抗剪强度不再发生变化,此时对应的内摩擦角为临界内摩擦角,临界内摩擦角的取值主要取决于颗粒的矿物组成,除此之外还可能受级配、颗粒形状、平均有效正应力和切应力的影响。对于石英砂,临界内摩擦角的范围在 28°~33°之间^[17,21]。在达到临界状态之前,石英砂抵抗外力所需的内摩擦角由砂土的剪胀率控制,峰值内摩擦角与临界内摩擦角的差值可表示为剪胀角的倍数。对于不考虑破碎的未胶结钙质砂,本文尝试采用石英砂的强度-剪胀理论分析其在排水条件下内摩擦角与剪胀角的变化规律。

如图 5 所示,可通过偏应力 q 与平均有效正应力 p' 的应力路径获得钙质砂的峰值和临界内摩擦角:对于三轴排水试验的应力路径,将应力路径中偏应力的最高点与坐标轴原点连接,由连线的斜率推算峰值内摩擦角 φ'_p ;将临界状态时的偏应力与坐标轴原点连接,由斜率推算临界内摩擦角 φ'_{cv} 。针对三轴压缩试验的计算公式为:

$$M = \frac{6\sin\varphi'}{3 - \sin\varphi'} \tag{1}$$

式中: φ' 、 M 分别为所求的内摩擦角 (φ'_p 、 φ'_{cv}) 和对应的斜率 (M_p 、 M_{cv}),如图 5 所示。根据 Rowe^[22] 提出的应力剪胀理论,剪胀率主要取决于土的相对密实度、平均有效正应力以及压缩性,剪胀角 ψ 通过下式求得:

$$\sin\psi = -\frac{d\varepsilon_1/2d\varepsilon_3 + 1}{d\varepsilon_1/2d\varepsilon_3 - 1} \tag{2}$$

式中: ε_1 、 ε_3 分别为轴向和径向主应变。

普通石英砂的峰值内摩擦角由临界内摩擦角和剪胀角两部分组成,虽然钙质砂颗粒破碎的性质不同于普通石英砂^[15,23],但钙质砂的力学特性仍然与普通石英砂类似。因此对于不考虑破碎作用的钙质砂,认为其峰值内摩擦角同样由临界内摩擦角和剪胀角两部分组成。

三轴排水试验结果如表 1 所示,固结后相对密实度为 31%~83%、初始有效围压为 50~600 kPa 的钙质砂试样,临界内摩擦角 φ'_{cv} 在 36°~40°之间,与已有研究结果相差不大,如 Coop^[15] 发现澳大利亚 Dogs Bay 钙质砂的临界内摩擦角为 40°,且与应力水平无关;Jamolkowski 等^[17] 测得钙质砂的临界内摩擦在 36°~42°之间。

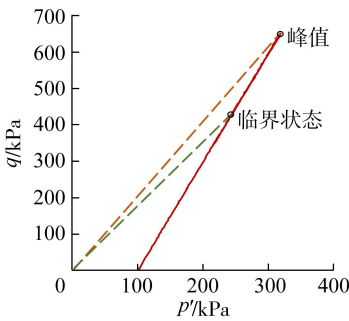


图 5 三轴排水试验内摩擦角求法

Fig. 5 Method for determining internal friction angle in drained triaxial test

图 6 给出了临界内摩擦角随相对密实度和应力水平的变化,临界内摩擦角受应力水平的影响较小,受相对密实度 I_D 的影响较大。当 $I_D < 50\%$ 时,临界内摩擦角随相对密实度的增大而增大,当 $I_D \geq 50\%$ 时,临界内摩擦角几乎不随相对密实度变化。因此根据相对密实度的大小可确定钙质砂的临界内摩擦角,当 $I_D < 50\%$ 时,临界内摩擦角由式(3)求得;当 $I_D \geq 50\%$ 时,建议取临界内摩擦角为 39° 。

$$\varphi'_{cv} = 15(I_D - 0.3) + 36 \quad (I_D < 50\%)$$

(3)

表 1 三轴排水试验测得的内摩擦角和剪胀角

Table 1 Internal friction angles and dilatancy angles measured in drained triaxial tests

试验编号	K_0	$I_D/\%$	p'_p/kPa	$\varphi'_p/(\circ)$	$\psi_p/(\circ)$	$\varphi'_{cv}/(\circ)$
1	0.38	31	382	43.7	3.4	38.5
2	1	37	767	44.2	4.3	36.4
3	1	40	129	44.9	8.9	38.7
4	1	40	496	43.8	5.0	37.3
5	1	41	293	43.1	5.0	37.2
6	1	43	213	45.3	8.9	37.5
7	1	45	1 431	42.5	1.2	37.7
8	1	46	141	46.6	11.8	38.2
9	1	48	382	44.4	5.7	37.9
10	1	51	1 003	43.9	3.6	38.7
11	1	53	274	46.2	7.8	39.2
12	1	54	510	44.4	6.0	39.5
13	1	55	230	47.6	10.6	39.4
14	1	57	757	44.0	4.0	39.1
15	0.38	61	626	46.2	6.7	39.1
16	0.50	67	217	51.1	14.9	38.0
17	1	67	225	46.9	10.9	39.2
18	1	68	578	47.9	10.6	38.2
19	1	70	579	47.4	9.0	38.8
20	1	70	1 077	45.9	6.4	38.8
21	1	71	535	48.3	9.4	39.8
22	1	72	803	45.7	5.7	38.1
23	1	73	318	49.8	11.8	40.1
24	1	74	1 539	44.6	6.0	38.3
25	1	76	272	51.1	14.5	38.9
26	1	80	430	47.7	10.9	39.8
27	0.50	80	1 088	47.6	8.9	38.8
28	1	83	1 149	47.5	8.2	38.4

注: K_0 为静止土压力系数; p'_p 为应力峰值处的平均有效正应力; ψ_p 为峰值剪胀角。

由表 1 可见,固结后密实度为 31%~83%、初始有效围压为 50~600 kPa 的钙质砂试样,试验测得的峰值内摩擦角 φ'_p 大致范围在 $42^\circ \sim 51^\circ$ 之间,剪胀角在 $1^\circ \sim 15^\circ$ 之间。由图 7 可见,与普通石英砂的特性相同,钙质砂的峰值内摩擦角同样受 I_D 和 p'_p 的影响,随 I_D 的增大而增大,随 p'_p 的增大而减小。由于钙质砂颗粒形状不规则、磨圆度低、多棱角,颗粒间具有很强的咬合作用,因此对于相对密实度较低并且受到较大平均有效正

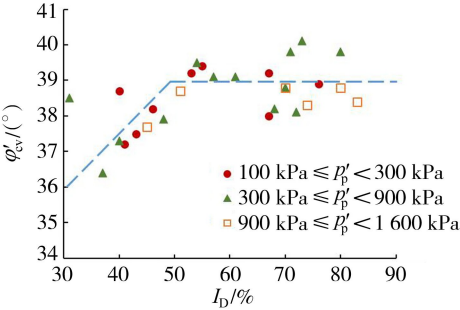


图 6 临界内摩擦角随相对密实度和应力水平的变化

Fig. 6 Variation of critical internal friction angle with relative density and stress level

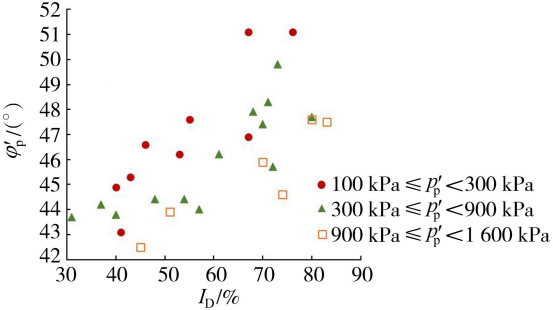


图 7 峰值内摩擦角随相对密实度和应力水平的变化

Fig. 7 Variation of peak internal friction angle with relative density and stress level

应力的试样,试样的剪胀角仍然为正值,钙质砂具有天然的剪胀性。

3 峰值内摩擦角和剪胀角预测的经验公式

与石英砂的性质类似,钙质砂的峰值内摩擦角与相对密实度和应力水平有关,随 I_D 的增大而增大,随 p'_p 的增大而减小。Bolton^[21]根据石英砂的三轴排水试验数据,总结出一套经验公式,将土的 I_D 、 p'_p 以及土粒的粒径分布、矿物成分和颗粒形状考虑在内,定量估算石英砂峰值内摩擦角和剪胀角。将表 1 数据代入石英砂的经验公式中发现,石英砂的经验公式并不适用于钙质砂。因此,本文对石英砂经验公式中的参数进行修正,提出定量估算钙质砂峰值内摩擦角和剪胀角的经验公式。

3.1 经验公式的拟合

对于不考虑破碎的钙质砂,认为其峰值内摩擦角由临界内摩擦角和剪胀角组成。公式中钙质砂的临界内摩擦角按图 6 拟合曲线(式(3))取值。因此在经验公式的拟合中,每个数据不再使用测得的临界内摩擦角,而是根据相对密实度确定临界内摩擦角的经验取值。

Bolton^[21]将相对密实度和应力水平考虑在内,提出了相对剪胀度(I_R)的概念:

$$I_R = I_D(Q - \ln p'_p) - R \tag{4}$$

式中: Q 为一个与土颗粒的矿物组成以及颗粒形状有关的参数; R 为与数据拟合有关的参数。当 $p'_p = p'_{crit}$ (p'_{crit} 为临界状态时的平均有效正应力)时不再发生剪胀,即 $I_R = 0$,因此 p'_{crit} 可以用下式表示:

$$\ln p'_{crit} = Q - R/I_D \tag{5}$$

式(5)能够确保在试样达到临界状态的条件 下保证剪胀度为零。通过总结大量的试验数据,Bolton^[21]确定了石英砂强度参数 Q 、 R 的经验取值,此公式为砂土剪胀性有关的行为提供了一套定量分析框架。Bolton^[21]给出了不同类型颗粒 Q 的建议取值,对于石英砂 Q 取值为 10,对于石灰石取值为 8。Jamiolkowski 等^[17]发现 Q 可以表示为土颗粒屈服应力的函数,与土颗粒的临界破碎应力或者极限围压水平相关。通过拟合表 1 的试验数据,确定钙质砂 Q 的取值为 8。

通过三轴排水试验数据(表 1)可以发现,对于一定相对密实度和初始有效围压的试样,钙质砂达到临界状态时的平均有效正应力普遍高于石英砂,为了保证经验公式成立,钙质砂参数 R 的取值应小于石英砂,经过拟合数据,钙质砂 R 取-0.8,因此得到经验公式(6)。通过比较表 1 中 $\varphi'_p - \varphi'_{cv}$ (其中 φ'_{cv} 根据试样的相对密实度取建议值)与相对剪胀度 I_R ,拟合得到经验公式(7)。

$$I_R = I_D(8 - \ln p'_p) + 0.8 \tag{6}$$

$$\varphi'_p - \varphi'_{cv} = 4I_R \tag{7}$$

同时,将每个试验的 $\varphi'_p - \varphi'_{cv}$ 与测得的剪胀角比较,拟合得到:

$$\varphi'_p - \varphi'_{cv} = 0.6\psi_p + 3 \tag{8}$$

3.2 经验公式的精度

为了更直观地评价公式的拟合效果,将包含等向固结和 K_0 固结两种固结方式的 28 个三轴排水试验数据代入经验公式(6)(7)(8),得到内摩擦角和剪胀角的预测值,与实测值对比如图 8、9 所示。由图 8、9 可以明显看出,式(7)对峰值内摩擦角的预测精度较高,所有数据都落在 5% 的误差范围内;而式(8)对剪胀角的预测精度相对较低,但 89% 的预测值也落在 25% 的误差范围内。剪胀角预测误差较大的预测值均高于实测值,在这些试验中,两个试样的 I_D 小于 40%,一个试样受到的 p'_p 大于 1 400 kPa, I_D 过小或受到的 p'_p 过高都可能抑制试样的剪胀,因此可以解释剪胀角预测值与实测值的偏离。总体来说,给出的经验公式可以较准确地预测钙质砂峰值内摩擦角和剪胀角。

3.3 经验公式的适用性分析

Bolton^[21]提出的经验公式适用于 $p'_p < 1\,000$ kPa 的试样,这是由于其经验公式中采用固结后的相对密实度代替应力峰值处的相对密实度。而当试样受到的 p'_p 过高时,试样在应力峰值处可能会发生很大的应变,因此用固结后的相对密实度得到的预测结果的可靠性较低。

式(6)(7)(8)适用于固结后 I_D 范围在 31%~83%之间、 p'_p 范围在 100~1 600 kPa 之间的试样。本文对每个试样应力峰值处的相对密实度进行校正,并将应力峰值处的相对密实度代入经验公式,结果发现,当试

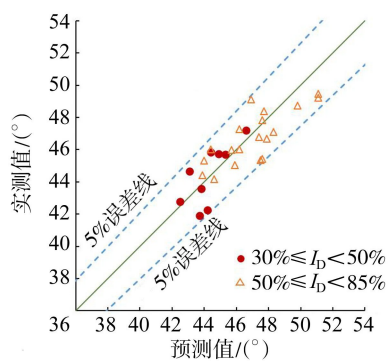


图 8 峰值内摩擦角预测值与实测值的对比

Fig. 8 Comparison between predicted and measured values of peak internal friction angle

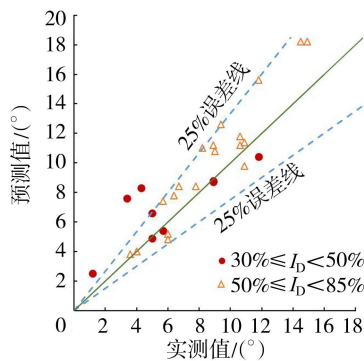


图 9 剪胀角预测值与实测值的对比

Fig. 9 Comparison between predicted and measured values of dilatancy angle

样受到较大的 p'_p 时, 固结完成后初始状态、剪切达到应力峰值状态这两种情况下的相对密实度对预测的峰值内摩擦角影响不大, 相差大多不超过 1° , 这综合表明本文拟合得到的经验公式参数适用区间划分合理, 公式整体适用性较好。

4 结 语

本文通过开展三轴排水试验分析了南海岛礁未胶结钙质砂的强度-剪胀特性, 提出了预测排水条件下未胶结钙质砂峰值内摩擦角和剪胀角的经验公式, 并对公式的可靠性进行了验证, 可实现紧急情况下对钙质砂地基材料抗剪强度指标的快速估算, 可为工程设计提供参考依据, 同时对于深入了解钙质砂力学特性、优化工程设计与施工等方面都具有重要意义。由于三轴仪尺寸的限制, 本文提出的钙质砂峰值内摩擦角的经验公式都是基于 2 mm 以下粒径试样的试验数据得到的, 而在大部分回填场地和自然状态下, 钙质砂的粒径和级配都无法控制, 因此在后续的工作中需要进一步探究提出的经验公式在现场的适用性。

参考文献:

[1] 唐国艺,郑建国. 东南亚礁灰岩的工程特性[J]. 工程勘察, 2015, 43(6): 6-10. (Tang Guoyi, Zheng Jianguo. Engineering properties of reef calcareous rock in Southeast Asia [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2015, 43(6): 6-10. (in Chinese))

[2] 秦建军,万仁凯,刘健,等. 援马尔代夫马累-机场岛跨海大桥桥址区边坡稳定性分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2016, 12(5): 241-243. (Qin Jianjun, Wan Renkai, Liu Jian, et al. Analysis of slope stability in the bridge site area of the Male-Airport Island cross-sea bridge in the maldives [J]. Highway Transportation Science and Technology (Applied Technology Edition), 2016, 12(5): 241-243. (in Chinese))

[3] 刘志伟,杨生彬,程东幸,等. 沙特拉比格 2×660 MW 燃油电站珊瑚礁地基工程勘察与实践[J]. 土工基础, 2017, 31(5): 588-590. (Liu Zhiwei, Yang Shengbin, Cheng Dongxing, et al. Geotechnical investigation of a 2×660 MW power plant on coral reef sands in Saudi Arabia [J]. Soil Engineering and Foundation, 2017, 31(5): 588-590. (in Chinese))

[4] 余东华,黄俊文,贺迎喜. 强夯联合振动碾压加固珊瑚礁回填料地基[J]. 中国水运(下半月), 2015, 15(2): 283-285. (Yu Donghua, Huang Junwen, He Yingxi. Reinforcement of coral reef backfill foundation by dynamic compaction combined with vibratory rolling [J]. China Water Transport, 2015, 15(2): 283-285. (in Chinese))

[5] 刘崇权,汪稔. 钙质砂物理力学性质初探[J]. 岩土力学, 1998(1): 32-37. (Liu Chongquan, Wang Ren. Preliminary research on physical and mechanical properties of calcareous sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 1998(1): 32-37. (in Chinese))

[6] 朱长歧,陈海洋,孟庆山,等. 钙质砂颗粒内孔隙的结构特征分析[J]. 岩土力学, 2014(7): 1831-1836. (Zhu Changqi, Chen Haiyang, Meng Qingshan, et al. Microscopic characterization of intra-pore structures of calcareous sands [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014(7): 1831-1836. (in Chinese))

[7] 王丽,鲁晓兵,王淑云,等. 钙质砂的胶结性及对力学性质影响的实验研究[J]. 实验力学, 2009, 24(2): 133-143. (Wang Li, Lu Xiaobing, Wang Shuyun, et al. Experimental investigation on cementation of calcareous sand and its basic mechanical characteristics [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2009, 24(2): 133-143. (in Chinese))

[8] 李钊,陈远中,廖洁,等. 颗粒形状对钙质砂最终级配影响的试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(4): 41-

45. (Li Fan, Chen Yuanzhong, Liao Jie, et al. Experimental study on the effect of particle shape on ultimate particle size distribution of carbonate sands[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(4):41-45. (in Chinese))

[9] 汪稔,吴文娟. 珊瑚礁岩土工程地质的探索与研究:从事珊瑚礁研究 30 年[J]. 工程地质学报,2019,27(1):202-207. (Wang Ren, Wu Wenjuan. Exploration and research on engineering geological properties of coral reefs:engaged in coral reef research for 30 year[J]. Journal of Engineering Geology,2019,27(1):202-207. (in Chinese))

[10] Pei Huimin, Wang Dong. Shear strength and dilatancy of calcareous sand in the south china sea[J]. China Ocean Engineering, 2022,36(5):781-790.

[11] 孙卓艺,张龙文,张俊麒,等. 废弃口罩改良钙质砂力学性能试验研究[J]. 水利水电科技进展,2025,45(6):107-113. (Sun Zhuoyi,Zhang Longwen,Zhang Junqi, et al. Experimental study on mechanical properties of improved calcareous sand mixed with waste mask[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2025,45(6):107-113. (in Chinese))

[12] 叶剑红,曹梦,李刚. 中国南海吹填岛礁原状钙质砂蠕变特征初探[J]. 岩石力学与工程学报,2019,38(6):1242-1251. (Ye Jianhong,Cao Meng,Li Gang. Preliminary study on the creep characteristics of calcareous sand from reclaimed coral reef islands in South China Sea[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2019,38(6):1242-1251. (in Chinese))

[13] 叶剑红,何坤鹏,单继鹏. 中国南海岛礁护岸防波堤在波浪冲击作用下稳定性试验研究[J]. 爆破,2019,36(4):13-23. (Ye Jianhong,He Kumpeng,Shan Jipeng. Experimental study on stability of revetment breakwater built on reclaimed coral reef islands in south china sea under extreme wave impact[J]. Blasting,2019,36(4):13-23. (in Chinese))

[14] 孙卓艺,张龙文,张俊麒,等. 废弃口罩改良钙质砂力学性能试验研究[J]. 水利水电科技进展,2025,45(6):107-113. (Sun Zhuoyi,Zhang Longwen,Zhang Junqi, et al. Experimental study on mechanical properties of improved calcareous sand mixed with waste mask[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2025,45(6):107-113. (in Chinese))

[15] Coop M R. The mechanics of uncemented carbonate sands[J]. Geotechnique,1990,40(4):607-626.

[16] Porcino D,Caridi G,Ghionna V N. Undrained monotonic and cyclic simple shear behaviour of carbonate sand[J]. Geotechnique, 2008,58(8):635-644.

[17] Jamiolkowski M,Presti D C F L,Manassero M. Evaluation of relative density and shear strength of sands from CPT and DMT[J]. Geotechnical Special Publication,2003,119:201-238.

[18] 崔永圣. 珊瑚岛礁岩土工程特性研究[J]. 工程勘察,2014,42(9):40-44. (Cui Yongsheng. Study on geotechnical characteristics of coral reef[J]. Geotechnical Investigation & Surveying,2014,42(9):40-44. (in Chinese))

[19] 余殷鹏,吕亚茹,李峰,等. 珊瑚砂剪切特性试验分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版),2017,18(1):29-35. (She Yinpeng,Liu Yaru,Li Feng, et al. Experimental analyses of shearing mechanism of coral sand[J]. Journal of PLA University of Science and Technology(Natural Science Edition),2017,18(1):29-35. (in Chinese))

[20] Shahnazari H, Rezvani R. Effective parameters for the particle breakage of calcareous sands: an experimental study [J]. Engineering Geology,2013,159(9):98-105.

[21] Bolton M D. The strength and dilatancy of sands[J]. Geotechnique,1986,37(2):219-226.

[22] Rowe P W. The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact[J]. Proceedings of the Royal Society A,1962,269(1339):500-527.

[23] 李钊,陈远中,廖洁,等. 颗粒形状对钙质砂最终级配影响的试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(4):41-45. (Li Fan, Chen Yuanzhong, Liao Jie, et al. Experimental study on the effect of particle shape on ultimate particle size distribution of carbonate sands[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(4):41-45. (in Chinese))

(收稿日期:2025 - 04 - 15 编辑:熊水斌)