

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3期 2026年5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. 3 May 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 第三期

二〇二六年五月

河海大学学报

(自然科学版)

JOURNAL OF HOHAI UNIVERSITY

(NATURAL SCIENCES)



第54卷 第3期

Vol. 54_ No. 3

2026

5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 汪集旻 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 沈晓腾
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

工程与自然融合的海岸带保护修复新理论、 新方法、新技术专题征稿

为进一步推动学科交叉与技术创新，切实服务国家适应气候变化战略要求，现针对工程与自然融合的海岸带保护修复新理论、新方法、新技术展开征稿。 欢迎相关专家学者积极参与讨论、踊跃投稿，录用文章将于2026—2027年《河海大学学报（自然科学版）》正刊发表。

《河海大学学报（自然科学版）》（ISSN 1000-1980，CN 32-1117/TV）创刊于1957年。 本刊知网复合影响因子（2025年）位居148种工程技术综合类期刊第2名，荣获第三届、第六届中国精品科技期刊，入选北大核心期刊、中国科技核心期刊、CSCD核心期刊、RCCSE中国核心学术期刊，被荷兰《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）、波兰《哥白尼索引》（IC）等国外重要数据库收录，多次被评为中国高校百佳科技期刊、华东地区优秀期刊、江苏省高校精品期刊。

一、征稿召集人

郑金海 教 授 港口、海岸及近海工程 陶爱峰 教 授 港口、海岸及近海工程
陈伟秋 研究员 港口、海岸及近海工程 范 骏 副教授 港口、海岸及近海工程

二、征稿主题

本次征稿重点关注以下研究方向（包括但不限于）：

1. 气候变化背景下海岸动力灾害变化
2. 海岸柔性要素减灾效能分析
- 海岸带多源动力灾害发生过程
- 海岸柔性要素减灾动力作用机制
- 海岸带典型承灾体失效特征及机制
- 海岸多要素减灾耦合效果分析
- 海岸防护能力变化趋势与响应
- 海岸柔性措施空间优化配置
3. 工程与自然融合的韧性海岸防护技术
4. 海岸减灾能力与韧性评估技术
- 海岸生态地貌系统保护修复
- 海岸柔性措施防护能力评估
- 海岸绿色防护工程及生态化改造
- 极端条件下海岸防护能力判定
- 工程建筑物与柔性要素协同减灾
- 韧性海岸综合防护能力及防御模式
5. 海岸工程防御韧性创新研究
- 基于机器学习的韧性海岸减灾特性研究
- 人工智能在海岸防护监测、灾害预报中的应用
- 海岸防护措施智慧设计与智能优化

三、投稿要求

1. 学术性与创新性：
论文需具备原创性、学术价值或工程应用前景，数据详实，逻辑严谨，鼓励跨学科交叉。
2. 格式规范：
中英文标题、摘要（300～400字）、关键词（6～8个），正文需包含引言、方法、结果与讨论。图表清晰，采用三线表及标准化单位；参考文献不少于20篇，按GB/T 7714格式著录。
3. 投稿方式：
通过我刊网址投稿，<https://jour.hhu.edu.cn/hhdxxbzh/home>，投稿时注明“工程与自然融合的海岸带保护修复新理论、新方法、新技术投稿”。
4. 截稿日期：
2026年12月31日。

四、联系方式

编辑部地址：南京市西康路1号，《河海大学学报（自然科学版）》编辑部（邮编：210098）
咨询电话：025-83786642
联系人：彭编辑

欢迎广大学者围绕上述热点提交高质量论文，共同推动海岸带保护修复领域的理论突破与实践创新！

《河海大学学报（自然科学版）》编辑部
2026年1月10日

河海大学学报

(自然科学版)

第 54 卷第 3 期

2026 年 5 月

目次

· 水文水资源 ·

考虑融雪和降雨径流过程的网格化模拟方法及应用

…………… 王一帆, 王宇昊, 张珂, 罗煜宁, 李顺章, 吴南, 沈龙, 马仪 (1)

基于 SuperflexPy 的流域水文模型构建方法

…………… 王文鹏, 李欣靖, 侯爱中, 张馨月, 刘波, 王欣沂, 黎春蕾 (8)

基于断面数据生成虚拟水尺的河道水位视觉测量方法 …………… 汪崎宇, 张振, 张田雨, 王嘉诚 (18)

基于盘古气象大模型的台风路径及台风浪波高预报研究

…………… 胡正元, 冯曦, 冯卫兵, 倪兴也, 秦知朋, 吴浩宇 (28)

考虑降雨和径流协调关系的长江上游流域入汛指标 …………… 王浩先, 朱坚, 钟平安 (37)

气象条件对生物滞留单元水文效应的影响 …………… 王瑶, 王卫光 (44)

粤港澳大湾区雨潮复合灾害遭遇分析 …………… 戴驰航, 季小梅, 乔煜, 张蔚 (51)

公明水库与清林径水库连通工程的水环境效应及长期演变规律

…………… 黄河, 张霞, 冯韬, 吴穹, 闫兴成, 叶宝民, 乔如霞, 陈求稳 (60)

· 水利水电工程 ·

梯级水库拦沙条件下水库排沙比公式修正 …………… 张国帅, 金中武, 李志晶, 陈鹏, 周其航 (70)

基于组合赋权-云模型的溃坝生命损失风险评价 …………… 程井, 向思瑶, 周伟, 何子瑶 (78)

输水工程实时水量调控的机理模型与数据模型对比研究

…………… 黄宇杰, 俞晓东, 汪怡然, 石林, 张健 (87)

渗流-盐侵耦合作用下水泥砂浆力学性能酸蚀劣化规律

…………… 张延贺, 徐力群, 赵邵峰, 陆誉婷, 李凌, 栗宏飞, 倪勇 (92)

河道型水库支流库湾流速和水温对整流幕设置响应的数值模拟

…………… 龚轶青, 洪浩, 顾家丞, 毛劲乔, 张培培 (101)

高水头闸门水封密封有效性试验研究

…………… 陈吉丰, 黎军杰, 沈燕萍, 胡坚柯, 董依培, 姜青林, 郭建斌 (111)

非均质岩溶含水层电阻率层析扫描探测试验研究

…………… 张斌, 梁越, 王平义, 代磊, 张宏杰, 许彬, 夏日风, 孙志伟 (117)

· 土木工程 ·

拉应力作用下水工混凝土抗盐冻性能试验研究 …………… 詹韵泓, 钱文勋, 石勇刚, 葛津宇, 徐菲 (125)

钢结构模块单元间卡件-螺栓式连接节点力学性能分析

…………… 王俊轶, 陈志华, 郭宁, 刘洋, 吕太辉, 韩树勋 (134)

· 港口航道与海岸海洋工程 ·

基于随机森林算法的台风风场经验参数优化 …………… 时健, 孙海飞, 刘威, 张弛, 李元 (141)

淤泥质海岸多要素协同减灾数值模拟研究 …………… 岑林, 倪兴也, 冯曦, 陶爱峰, 郑金海 (149)

基于 SWAN 模型的海上光伏群桩对近岸波浪场的影响分析 …………… 涂或涵, 张蔚, 黄睿, 王晓光 (161)

基于解析解的珠江口虎门盐度扩散特性研究 …………… 周苑, 徐龔文, 张蔚, 唐苏轩, 王子杰 (169)

JOURNAL OF HOHAI UNIVERSITY

(NATURAL SCIENCES)

Vol. 54 No. 3

May 2026

CONTENTS

Gridded simulation method considering snowmelt and rainfall-runoff processes and its application	
..... Wang Yifan, Wang Yuhao, Zhang Ke, Luo Yuning, Li Shunzhang, Wu Nan, Shen Long, Ma Yi(1)	
Construction method of catchment hydrological model based on SuperflexPy	
..... Wang Wenpeng, Li Xinjing, Hou Aizhong, Zhang Xinyue, Liu Bo, Wang Xinyi, Li Chunlei(8)	
Visual measurement method of water level in rivers based on virtual water gauge generated by cross-section data	
..... Wang Qiyu, Zhang Zhen, Zhang Tianyu, Wang Jiacheng(18)	
Research on prediction of typhoon tracks and typhoon wave heights based on Pangu-Weather	
..... Hu Zhengyuan, Feng Xi, Feng Weibing, Ni Xingye, Qin Zhipeng, Wu Haoyu(28)	
Flood season onset index of the upper reaches of the Yangtze River Basin considering concurrent relationship between rainfall and runoff	
..... Wang Haoxian, Zhu Jian, Zhong Ping'an(37)	
Impacts of meteorological conditions on hydrological effects of a bioretention cell	
..... Wang Yao, Wang Weiguang(44)	
Analysis of rainfall-tide compound disasters in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	
..... Dai Chihang, Ji Xiaomei, Qiao Yu, Zhang Wei(51)	
Water environmental effects and long-term evolution of the Gongming Reservoir-Qinglinjing Reservoir connection project	
... Huang He, Zhang Xia, Feng Tao, Wu Qiong, Yan Xingcheng, Ye Baomin, Qiao Ruxia, Chen Qiuwen(60)	
Correction of sediment discharge ratio formula for cascade reservoirs under sediment interception conditions	
..... Zhang Guoshuai, Jin Zhongwu, Li Zhijing, Chen Peng, Zhou Qihang(70)	
Risk assessment of life loss in dam breach based on combined weighting-cloud model	
..... Cheng Jing, Xiang Siyao, Zhou Wei, He Ziyao(78)	
Comparative study on mechanistic model and data model for real-time water flow regulation of water diversion project	
..... Huang Yujie, Yu Xiaodong, Wang Yiran, Shi Lin, Zhang Jian(87)	
Acid corrosion-induced deterioration law of mechanical properties of cement mortar under coupled seepage and salt attack	
..... Zhang Yanhe, Xu Liqun, Zhao Shaofeng, Lu Yuting, Li Ling, Li Hongfei, Ni Yong(92)	
Numerical simulation of response of flow velocity and water temperature in tributary bay of river-type reservoirs to installation of rectification curtains	
..... Gong Yiqing, Hong Hao, Gu Jiacheng, Mao Jingqiao, Zhang Peipei(101)	
Experimental study on sealing effectiveness of water seals for high-head gates	
..... Chen Jifeng, Li Junjie, Shen Yanping, Hu Jianke, Dong Yipei, Jiang Qinglin, Guo Jianbin(111)	
Experimental study on electrical resistivity tomography detection of heterogeneous karst aquifers	
... Zhang Bin, Liang Yue, Wang Pingyi, Dai Lei, Zhang Hongjie, Xu Bin, Xia Rifeng, Sun Zhiwei(117)	
Experimental study on salt-freeze resistance of hydraulic concrete under tensile stress	
..... Zhan Yunhong, Qian Wenxun, Shi Yonggang, Ge Jinyu, Xu Fei(125)	
Analysis of mechanical performance of clamp-bolted connection joints between steel structure module units	
..... Wang Junyi, Chen Zhihua, Guo Ning, Liu Yang, Lyu Taihui, Han Shuxun(134)	
Optimization of empirical parameters for typhoon wind field based on random forest algorithm	
..... Shi Jian, Sun Haifei, Liu Wei, Zhang Chi, Li Yuan(141)	
Numerical simulation study on multi-factor synergistic disaster reduction on muddy coasts	
..... Cen Lin, Ni Xingye, Feng Xi, Tao Aifeng, Zheng Jinhai(149)	
Impact analysis of offshore photovoltaic pile groups on nearshore wave fields based on SWAN model	
..... Tu Yuhan, Zhang Wei, Huang Rui, Wang Xiaoguang(161)	
Study on salinity dispersion characteristics in Humen of the Pearl River Estuary based on analytical solutions	
..... Zhou Yuan, Xu Yanwen, Zhang Wei, Tang Suxuan, Wang Zijie(169)	

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.03.001

考虑融雪和降雨径流过程的网格化模拟方法及应用

王一帆¹, 王宇昊^{2,3,4}, 张珂^{2,3,4,5,6}, 罗煜宁^{2,3,4}, 李顺章^{2,3,4}, 吴南^{2,3,4},
沈龙¹, 马仪¹

(1. 云南电网有限责任公司; 2. 河海大学水灾害防御全国重点实验室; 3. 河海大学水文水资源学院;
4. 长江保护与绿色发展研究院; 5. 中国气象局水文气象重点开放实验室; 6. 水利部水利大数据重点实验室)

摘要: 针对目前考虑融雪的概念性水文模型大多为集总式水文模型这一问题,以网格新安江模型为基础,通过耦合融雪模块构建了考虑融雪和降雨径流过程的网格新安江模型(iRainSnowHydro模型),以金沙江上游梨园流域和澜沧江上游乌弄龙流域为典型流域进行日径流模拟,并与集总式融雪径流模型(Hydromad模型)进行对比分析。结果表明:iRainSnowHydro模型在梨园和乌弄龙流域的日径流模拟效果均良好,率定期和验证期的决定系数和纳什效率系数均超过了0.85,百分比偏差绝对值均小于10%;iRainSnowHydro模型的模拟性能优于Hydromad模型,且其分布式结构具有显著优势。

关键词: 融雪径流; 网格新安江模型; 径流模拟; 高寒山区

Gridded simulation method considering snowmelt and rainfall-runoff processes and its application

Wang Yifan¹, Wang Yuhao^{2,3,4}, Zhang Ke^{2,3,4,5,6}, Luo Yuning^{2,3,4}, Li Shunzhang^{2,3,4}, Wu Nan^{2,3,4}, Shen Long¹, Ma Yi¹

(1. Yunnan Power Grid Co., Ltd.; 2. State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University;
3. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University; 4. Yangtze Institute for Conservation and Development;
5. Hydro-Meteorology Key Laboratory of China Meteorological Administration;
6. Key Laboratory of Water Big Data Technology of Ministry of Water Resources)

Abstract: To address the issue that most conceptual hydrological models considering snowmelt are lumped models, a gridded Xin'anjiang model considering snowmelt and rainfall-runoff processes (iRainSnowHydro model) was constructed based on the gridded Xin'anjiang model by coupling a snowmelt module. Daily runoff simulations were conducted taking the Liyuan basin in the upper reaches of the Jinsha River and the Wunonglong basin in the upper reaches of the Lancang River as typical basins, and the results were compared with those of a lumped snowmelt runoff model (Hydromad model). The results indicate that the iRainSnowHydro model exhibits good daily runoff simulation performance in both the Liyuan and Wunonglong basins, with R^2 and NSE exceeding 0.85 and the absolute value of PBIAS being less than 10% in the calibration and validation periods. The simulation performance of the iRainSnowHydro model is superior to that of the Hydromad model, and its distributed structure has significant advantages.

Key words: snowmelt runoff; gridded Xin'anjiang model; runoff simulation; alpine region

高寒山区的融雪径流是下游地区的重要水源,尤其在春夏两季。在全球气候变化的背景下,高寒山区的融雪过程变得更加复杂,直接影响了流域内的水文过程。在考虑融雪径流的基础上对高寒山区的径流进行准确模拟与预测,可以为水资源管理与配置,生态保护与修复、旱涝灾害防治提供重要依据^[1]。目前,许多学者将不同的水文模型应用于高寒山区的径流模拟与预报,主要包括概念性模型、基于物理机制的水文模型、数据驱动模型^[2]。相比于后两者,概念性水文模型通常基于度日因子概念建立融雪与气温间的关系,具有结构简单、数据需求低等特点,因此得到了广泛应用^[3-4],例如:张海川等^[5]分别运用 HBV 模型和 SRM 模型对新疆玛纳斯河流域的径流进行了模拟;田富强等^[6]以雅鲁藏布江为研究区,采用 THREW 模型进行了径

基金项目: 中国南方电网云南电网有限责任公司科技项目(YNKJXM20222329);青海省重大科技专项项目(2024-SF-A1);山东省水文中心科研项目(37000000025001720250235)

作者简介: 王一帆(1994—),男,高级工程师,博士,主要从事新能源预测管理技术研究。E-mail:wangyifan@yn.csg.cn

通信作者: 王宇昊(1997—),男,博士研究生,主要从事水文预报研究。E-mail:yuhaowang@hhu.edu.cn

流模拟并解析了径流水源组成。基于物理机制的水文模型通常基于能量平衡模拟融雪过程,典型代表有 SWAT 模型^[7-8],VIC 模型^[9-10]等,但这类模型建模所需资料较多且过程复杂^[11]。近年来,伴随着计算机技术的发展,人工神经网络^[12]、长短期记忆网络模型^[13]、支持向量机模型^[14]等数据驱动模型被用于提高径流模拟与预测的准确性,然而数据驱动模型对建模过程描述不足,且模型效果与提供的数据量密切相关,在资料短缺地区的局限性较大^[15-16]。目前,考虑融雪的概念性水文模型大多为集总式模型,无法反映流域融雪-产流-汇流过程的空间异质性。

新安江模型是在中国南方应用最广泛的概念性水文模型之一^[17],基于该模型开发的全分布式水文模型——网格新安江模型的结构已在多个湿润和半湿润流域得到了验证^[18-19]。因此,本文在网格新安江模型的基础上,通过耦合融雪模块构建了考虑融雪和降雨径流过程的网格新安江模型(iRainSnowHydro 模型),并以金沙江上游梨园流域和澜沧江上游乌弄龙流域为典型流域进行日径流模拟,与集总式融雪径流模型(Hydromad 模型)的模拟结果进行对比分析。

1 研究方法

1.1 iRainSnowHydro 模型

iRainSnowHydro 模型将 SNOW-17 模型和网格新安江模型进行耦合:①根据气温计算降水形式为降雪的概率,将降水划分为降雨和降雪;②基于气温和降雪量模拟雪层中的物理过程,包括雪层积累、雪-气交界面的能量传输、雪层内部状态、液态水在雪层中的传输、土壤-积雪交界面处的热交换等,得到雪层的融雪液态水出流量;③将经过植被冠层截留后的降雨量和融雪液态水出流量合计为网格新安江模型的输入,进行 3 层蒸散发计算、产流与分水源计算、汇流计算,输出流量过程线。

a. 降水形式判别。根据气温以概率方式判别是否会发生降雪比单一的气温阈值法更符合实际。当气温低于阈值时,降雪的概率为 1,当气温逐渐升高时,降雪的概率呈指数形式减小:

$$p_s = \begin{cases} 1 & T_f < 28^\circ\text{F} \\ e^{-\left(\frac{T_f - 3.5}{8}\right)^5} & T_f \geq 28^\circ\text{F} \end{cases} \quad (1)$$

式中: p_s 为降雪的概率; T_f 为气温。

b. 雪层积累。新雪的密度随气温的变化而变化,气温越低新降雪的概率越小。SNOW-17 模型中用放大系数调整未添加到现雪层中的新雪,主要用来弥补降雪观测、升华以及风吹雪导致的损失:

$$P_n = P p_s S_c \quad (2)$$

式中: P_n 为新降雪水当量; P 为降水量; S_c 为放大系数,用于调整雪量损失。

c. 雪-气交界面的能量传输。SNOW-17 模型对积雪表层能量的交换按照是否融化来考虑,若积雪表层融化,则还需细分为是否有降雨发生的情况,利用能量平衡原理计算积雪表层的能量传输过程,基本原理详见文献[20-21]。

d. 雪层内部状态。当积雪不能保持融雪水时,融雪水将会渗透形成径流;此时,液态水持水能力表示为:

$$W_{qx} = P_L W_i \quad (3)$$

式中: W_{qx} 为液态水容量; P_L 为液态水持水量; W_i 为积雪水当量。根据一系列经验推导的成熟方程^[22],对超出持水能力的融雪液态水进行滞后和衰减模拟相应的出流量 R_{snow} 。

e. 植被冠层截留计算。在一场降雨中,时段内植被冠层截留量 I_{ca} 的计算公式参见文献[23]。

f. 土壤蒸散发计算。模型采用 3 层蒸散发模型考虑土壤湿度垂向分布作用^[24]。当上层张力水蓄量 (W_U) 足够时,上层蒸散发 E_U 为:

$$E_U = K E_p - I_{ca} \quad (4)$$

式中: K 为蒸散发折算系数; E_p 为实测水面蒸发。当 W_U 小于蒸散发能力且下层张力水蓄量 (W_L) 足够时,下层蒸散发 E_L 为:

$$E_L = (K E_p - I_{ca} - E_U) \frac{W_L}{W_{LM}} \quad (5)$$

式中: W_{LM} 为下层张力水容量。当 W_L 不足时, 深层蒸散发 E_D 为:

$$E_D = C(KE_p - I_{ca} - E_U) - E_L$$

(6)

式中: C 为深层蒸散发系数。时段总蒸散发量 E 为:

$$E = E_U + E_L + E_D$$

(7)

g. 基产流与分水源计算。基于融雪液态水出流计算及蒸散发计算, 得到用于产流计算的净雨量 P_e :

$$P_e = R_{snow} + P(1 - p_s) - I_{ca} - E$$

(8)

模型采用蓄满产流机制, 即时段产流量 R 可以表示为:

$$R = \begin{cases} 0 & P_e \leq 0 \text{ 或 } P_e + W \leq W_M \\ P_e + W - W_M & P_e + W > W_M \end{cases}$$

(9)

式中: W 为网格的张力水蓄量; W_M 为张力水蓄水容量, 由网格的地形指数、土壤和植被属性确定。根据网格的自由水蓄水量 (S) 和自由水蓄水容量 (S_M), 将 R 划分为地面径流 R_s 、壤中流 R_i 以及地下径流 R_g , 具体公式参见文献[25]。

h. 汇流计算。模型采用网格-网格 Muskingum 汇流方法将各径流成分分别演算至流域出口, 基本原理详见文献[26-27]。对于日径流模拟, 模型采用线性水库法和滞后演算法计算流域的出流过程:

$$Q_{si,t} = R_{si,t} U$$

(10)

$$Q_{ii,t} = Q_{ii,t-1} C_i + R_{ii,t} (1 - C_i) U$$

(11)

$$Q_{gi,t} = Q_{gi,t-1} C_g + R_{gi,t} (1 - C_g) U$$

(12)

$$Q_{T,t+L_{ag}} = Q_{T,t+L_{ag}-1} C_{ch} + \left(\sum_{i=1}^k Q_{si,t} + \sum_{i=1}^k Q_{ii,t} + \sum_{i=1}^k Q_{gi,t} \right) (1 - C_{ch})$$

(13)

式中: $R_{si,t}$ 、 $R_{ii,t}$ 、 $R_{gi,t}$ 分别为 t 时刻网格 i 产生的地面径流、壤中流和地下径流; $Q_{si,t}$ 、 $Q_{ii,t}$ 、 $Q_{gi,t}$ 分别为 t 时刻网格 i 的地面径流、壤中流和地下径流相对应的出流量, 作为网格-网格 Muskingum 汇流方法的输入; U 为将径流深转化为流量的单位折算系数; C_i 、 C_g 、 C_{ch} 分别为壤中流, 地下径流, 河道径流的消退系数; L_{ag} 为河网汇流滞时; $Q_{T,t+L_{ag}}$ 为 $t+L_{ag}$ 时刻流域出口流量。

1.2 Hydromad 模型

本文基于 R 软件的 Hydromad 包实现流域湿度指数 (CWI) 产流模块、融雪模块和线性汇流模块的耦合, 得到的 Hydromad 模型是集成降雨-径流和融雪-径流模块的集总式水文模型。模型的核心计算过程包括土壤水计算 (SMA) 模块和汇流模块。SMA 模块将降水 and 气温转换为有效降水量, 即最终到达流域出口形成径流的那部分降水 (包含降雨和降雪)。汇流模块将有效降水转换为流量, 这涉及定义洪峰响应时间和退水曲线的形状^[28]。Hydromad 模型结构如图 1 所示。

2 实例验证

2.1 研究区概况

金沙江为长江上游, 横跨青海、西藏、四川、云南等 4 省 (区), 控制面积约为 50.2 万 km^2 , 占长江流域总面积的 26%。澜沧江同样发源于唐古拉山脉, 是国际河流澜沧江-湄公河的上游, 流经青海、西藏、云南后出境, 控制面积约为 16.7 万 km^2 。梨园流域位于金沙江上游, 流域面积约为 21.4 万 km^2 ; 乌弄龙流域位于澜沧江上游, 流域面积约为 7.6 万 km^2 ; 两个流域的地势均呈现西北高东南低的特点, 高程落差超过 4 km^[29-30]。两个典型流域相邻, 地理位置及高程分布如图 2 所示。

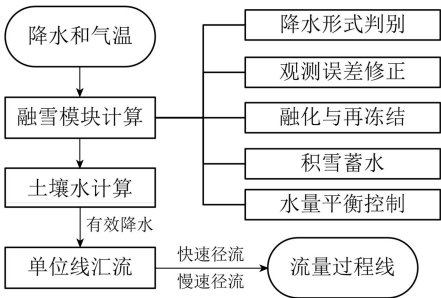


图 1 Hydromad 模型结构
Fig. 1 Hydromad model structure

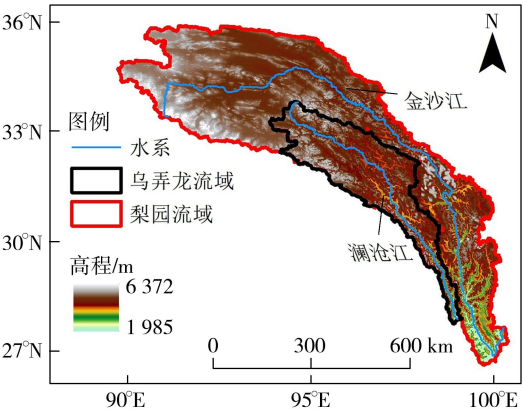


图 2 研究区域地理位置及高程分布
Fig. 2 Geographical location and elevation distribution of study area

2.2 数据来源

梨园流域和乌弄龙流域的数据来源如下:DEM 数据来自地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为 1 km;土壤数据来自全球土壤数据集(<https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/>),空间分辨率为 1 km;土地利用来自中国多时期土地利用遥感监测数据集(<https://www.resdc.cn/>),空间分辨率为 1 km;气象数据(降水及气温)来自中国气象信息中心(<https://data.cma.cn/>),空间分辨率为 5 km;径流量数据来自梨园水电站和乌弄龙水电站的实测入库流量;雪深数据来自中国雪深长时间序列数据集(<https://data.tpdc.ac.cn/>),空间分辨率为 25 km。

2.3 模型参数率定及性能评价

本文采用 SCE-UA 算法对 iRainSnowHydro 模型和 Hydromad 模型进行参数率定,并选取决定系数(R^2),纳什效率系数(NSE)和百分比偏差(PBIAS)作为模型模拟效果的评价指标^[31-32]。

2.4 典型流域下垫面分析

梨园流域和乌弄龙流域的上层土壤(0~30 cm)和下层土壤(30~100 cm)类型如图 3 所示,土地利用类型如图 4 所示。梨园流域的上层土壤主要为砂壤土和壤土,其中壤土主要分布在流域下游;下层土壤主要为水域或无值区、黏壤土和壤土,其中黏壤土主要分布在流域下游,壤土主要分布在流域上游。乌弄龙流域的上层土壤同样以砂壤土和壤土为主,且壤土主要分布在流域中下游,下层土壤则以水域或无值区和黏壤土为主。梨园流域的土地利用类型主要为草地,其次是裸地和林地,其中裸地大多位于流域上游,林地大多位于流域下游。此外,水域主要集中在流域上游。乌弄龙流域的土地利用类型主要为草地,其次是林地和裸地。两个流域的耕地和城市用地占比之和均小于 1%,表明流域受人类活动影响较小。综上,两个流域的土壤和土地利用空间分布差异较大,采用分布式水文模型较集总式水文模型更加合理。

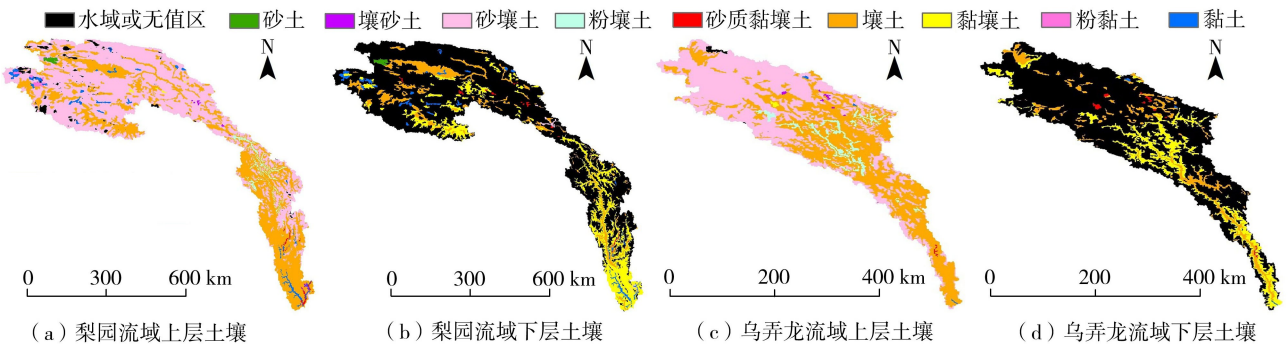


图 3 典型流域土壤空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of soil in typical basins

从中国雪深长时间序列数据集中获取梨园流域 2013 年 12 月 31 日、乌弄龙流域 2017 年 12 月 31 日的网格雪深数据作为初始雪深数据,如图 5 所示。梨园流域的积雪深度空间差异较大,流域中部地区较大,西北地区地区和东南地区较小;乌弄龙流域的积雪深度呈现两边大中间小的空间分布,空间差异较梨园流域偏小。

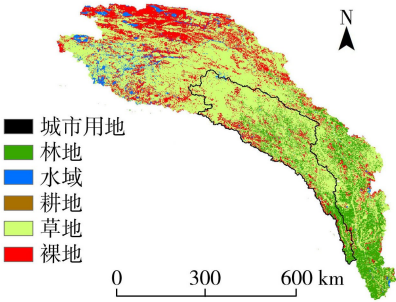


图 4 典型流域土地利用类型空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of land use types in typical basins

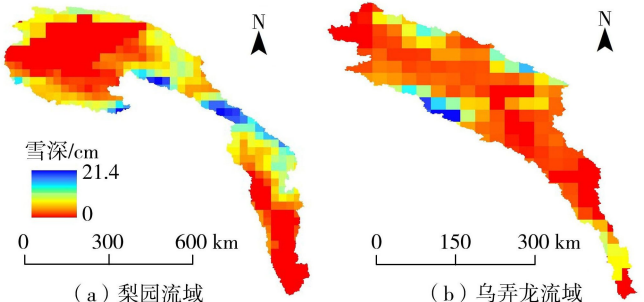


图 5 初始雪深数据

Fig. 5 Initial snow depth data

2.5 模拟效果评价与比较

对于梨园流域,基于 2014 年 1 月 1 日至 2023 年 7 月 31 日的历史逐日降水和气温数据,分别采用 iRainSnowHydro 模型和 Hydromad 模型对径流进行模拟。其中,两个模型均以 2014 年 1 月 1 日至 2015 年

4 月 30 日为预热期,2015 年 5 月 1 日至 2020 年 12 月 31 日为率定期,2021 年 1 月 1 日至 2023 年 7 月 31 日为验证期。对于乌弄龙流域,基于 2018 年 1 月 1 日至 2023 年 7 月 31 日的历史逐日降水和气温数据,分别采用 iRainSnowHydro 模型和 Hydromad 模型对径流进行模拟。其中,两个模型均以 2018 年 1 月 1 日至 2019 年 4 月 30 日为预热期,2019 年 5 月 1 日至 2021 年 12 月 31 日为率定期,2022 年 1 月 1 日至 2023 年 7 月 31 日为验证期。iRainSnowHydro 模型和 Hydromad 模型对两个流域的模拟结果如图 6、表 1 所示。由图 6 和表 1 可知,iRainSnowHydro 模型和 Hydromad 模型在梨园流域和乌弄龙流域均呈现了良好的模拟效果,无论是率定期还是验证期, R^2 和 NSE 均大于 0.8,PBIAS 的绝对值均小于 10%。此外,iRainSnowHydro 模型对两个流域日径流量的整体模拟效果均优于 Hydromad 模型,且在梨园流域的优越性更为显著。

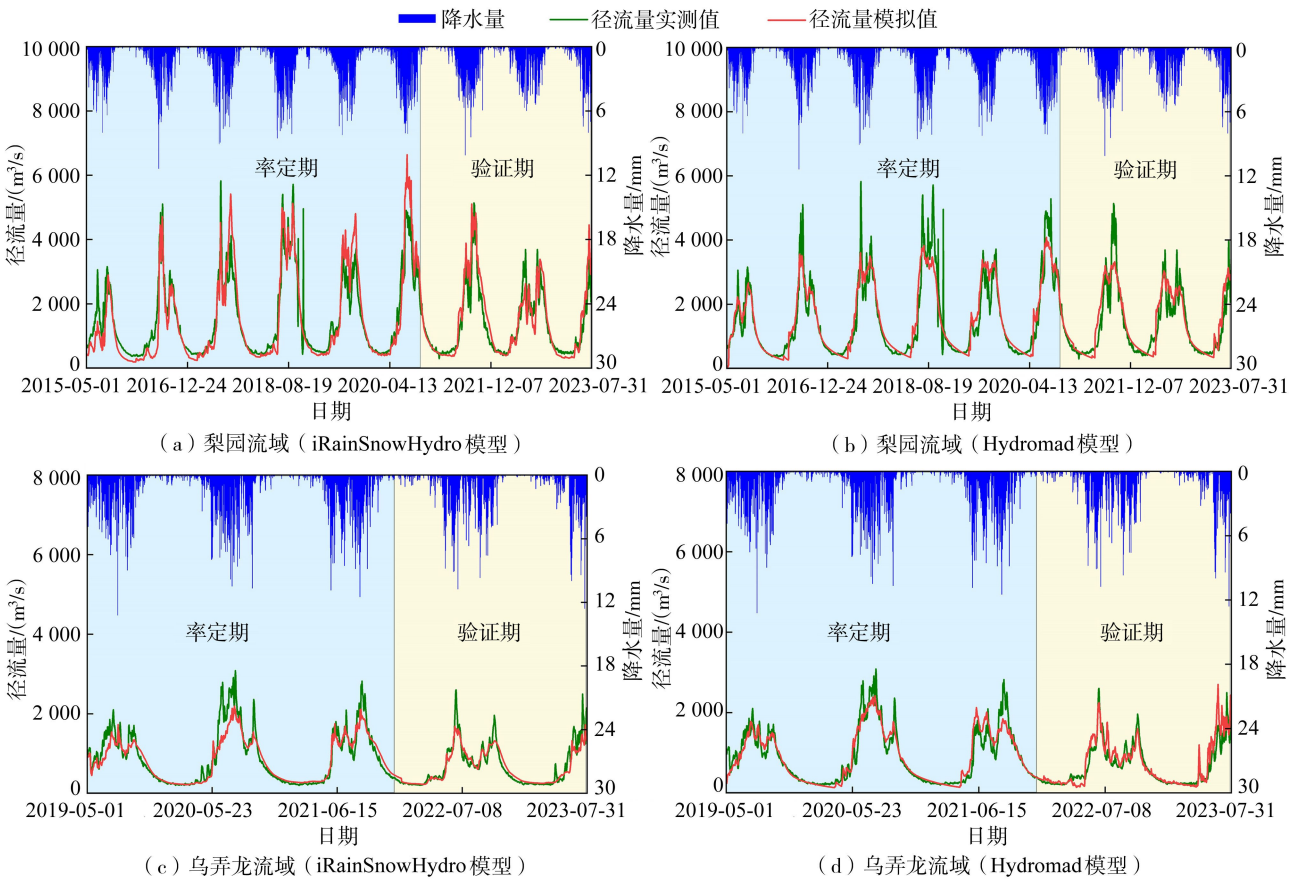


图 6 iRainSnowHydro 模型和 Hydromad 模型梨园流域和乌弄龙流域的模拟结果

Fig. 6 Simulation results of iRainSnowHydro model and Hydromad model in Liyuan and Wunonglong basins

表 1 iRainSnowHydro 模型和 Hydromad 模型的性能评价指标

Table 1 Performance evaluation indicators of iRainSnowHydro model and Hydromad model

流域	模型	率定期			验证期		
		R^2	NSE	PBIAS/%	R^2	NSE	PBIAS/%
梨园流域	iRainSnowHydro 模型	0.90	0.89	-1.80	0.89	0.85	3.81
	Hydromad 模型	0.88	0.88	-0.69	0.83	0.82	-4.56
乌弄龙流域	iRainSnowHydro 模型	0.90	0.88	-4.86	0.86	0.85	2.46
	Hydromad 模型	0.87	0.87	0.87	0.83	0.81	-5.79

以梨园流域为例,基于 iRainSnowHydro 模型得到 2017 年 3 月网格的融雪液态水出流量,如图 7 所示。2017 年 3 月的融雪液态水出流量呈现显著的空间异质性,流域中部地区较大,西北地区 and 东南地区较小,和雪深的分布规律基本一致。相比于 Hydromad 模型,iRainSnowHydro 模型可以呈现任意时刻雪深,融雪液态水出流量的空间分布。吴南等^[33]的研究表明,高山流域汛期的主导径流成分为降雨径流,非汛期则以河道基流与融雪径流为主。基于 iRainSnowHydro 模型对梨园流域不同季节径流组分的划分结果显示:春季融雪径流占比最高,多年平均占比达 27.04%;冬季融雪径流占比次之,但受冬季径流量偏小影响,其实际贡献可

基本忽略;秋季融雪径流多年平均占比为 5.55%,而夏季融雪径流占比均低于 2%。

3 结 语

iRainSnowHydro 模型在梨园流域和乌弄龙流域的日径流模拟效果均良好,率定期和验证期的 R^2 和 NSE 均超过了 0.85,PBIAS 绝对值均小于 10%。iRainSnowHydro 模型的模拟性能优于 Hydromad 模型,且其分布式的结构具有显著优势,可以为我国高寒山区地径流预报提供技术支撑。梨园流域春季融雪径流占比为四季中最大且相对稳定,多年平均占比为 27.04%,表明春季融雪径流的准确模拟和预测对于水资源管理和旱涝灾害防治尤为重要。

参考文献:

[1] 班春广,徐宗学,左德鹏,等. 高寒流域水文模拟与径流水源解析:以雅鲁藏布江帕隆藏布上游流域为例[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2023,59(1):85-93. (Ban Chunguang, Xu Zongxue, Zuo Depeng, et al. Hydrological simulation and runoff components analysis in the high cold alpine region:case study in the upper reaches of the Parlung Zangbo watershed of the Yarlung Zangbo River Basin[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science),2023,59(1):85-93. (in Chinese))

[2] 郭帅帅. 寒区积雪融雪变化及其对径流影响模拟研究:以呼兰河流域为例[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2022.

[3] Zhao Hongling, Li Hongyan, Xuan Yunqing, et al. Investigating the critical influencing factors of snowmelt runoff and development of a mid-long term snowmelt runoff forecasting[J]. Journal of Geographical Sciences,2023,33(6):1313-1333.

[4] 余其鹰,胡彩虹,白云岗,等. 新疆洪水预报预警中融雪径流模型应用进展[J]. 干旱区地理,2023,46(12):1951-1962. (Yu Qiyong, Hu Caihong, Bai Yungang, et al. Application of snowmelt runoff model in flood forecasting and warning in Xinjiang[J]. Arid Land Geography,2023,46(12):1951-1962. (in Chinese))

[5] 张海川,尤洋,乔长录,等. HBV 模型在玛纳斯河流域的适用性[J]. 长江科学院院报,2023,40(12):37-44. (Zhang Haichuan, You Yang, Qiao Changlu, et al. Applicability of HBV model in the Manas River basin[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute,2023,40(12):37-44. (in Chinese))

[6] 田富强,徐冉,南熠,等. 基于分布式水文模型的雅鲁藏布江径流水源组成解析[J]. 水科学进展,2020,31(3):324-336. (Tian Fuqiang, Xu Ran, Nan Yi, et al. Quantification of runoff components in the Yarlung Tsangpo River using a distributed hydrological model[J]. Advances in Water Science,2020,31(3):324-336. (in Chinese))

[7] 邢贞相,金超群,纪毅,等. 基于 SWAT 模型与 Copula 修正的融雪径流模拟[J]. 东北农业大学学报,2020,51(6):79-87. (Xing Zhenxiang, Jin Chaoqun, Ji Yi, et al. Study on snowmelt runoff simulation based on SWAT model and Copula correction [J]. Journal of Northeast Agricultural University,2020,51(6):79-87. (in Chinese))

[8] Zhang Yixin, Liu Gengwei, Dai Changlei, et al. Simulation and prediction of snowmelt runoff in the Tangwang River Basin based on the NEX-GDDP-CMIP6 climate model[J]. Water,2024,16(15):2082.

[9] 高瑞,穆振侠. 天山西部山区 VIC 模型的应用[J]. 南水北调与水利科技,2017,15(4):44-48. (Gao Rui, Mu Zhenxia. Application of VIC model in Western Tianshan Mountains[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017,15(4):44-48. (in Chinese))

[10] Zhou Gang, Zhao Qiudong, Zhang Shiqiang, et al. Rolling forecast of snowmelt floods in data-scarce mountainous regions using weather forecast products to drive distributed energy balance hydrological model[J]. Journal of Hydrology,2024,637:131384.

[11] Wang Guoyu, Hao Xiaohua, Yao Xiaojun, et al. Simulations of snowmelt runoff in a high-altitude mountainous area based on big data and machine learning models:taking the Xiyang River basin as an example[J]. Remote Sensing,2023,15(4):1118.

[12] 李福威,孙凯昕,丁伟. 基于多模型融合的中期径流预报[J]. 中国农村水利水电,2023(2):9-15. (Li Fuwei, Sun Kaixin, Ding Wei. Medium-term runoff forecasting based on information fusion models[J]. China Rural Water and Hydropower,2023 (2):9-15. (in Chinese))

[13] 李晶,刘时银,张世强,等. 中国西北山区融雪径流模拟研究回顾与展望[J]. 冰川冻土,2022,44(3):1029-1040. (Li Jing, Liu Shiyin, Zhang Shiqiang, et al. Review on snowmelt runoff simulation in mountain regions, Northwest China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2022,44(3):1029-1040. (in Chinese))

[14] 闻昕,陈然,谭乔凤,等. 基于多因素相似性的融雪径流预报方法研究[J]. 水力发电学报,2022,41(3):46-59. (Wen Xin, Chen Ran, Tan Qiaofeng, et al. Study on forecasting method of snowmelt runoff based on multi-factor similarity[J]. Journal of

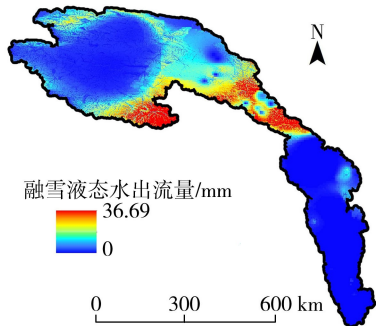


图 7 2017 年 3 月梨园流域网格融雪液态水出流量
Fig. 7 Gridded snowmelt liquid water outflow in
Liyuan Basin in March 2017

Hydroelectric Engineering,2022,41(3):46-59. (in Chinese))

[15] 王国宇. 基于机器学习的融雪径流模拟:以西营河流域为例[D]. 兰州:西北师范大学,2023.

[16] Pham L T,Luo Lifeng,Finely A. Evaluation of random forests for short-term daily streamflow forecasting in rainfall- and snowmelt-driven watersheds[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2021,25(6):2997-3015.

[17] 陆旻皎. 新安江模型研究的回顾和展望[J]. 水利学报,2021,52(4):432-441. (Lu Minjiao. Recent and future studies of the Xinanjiang model[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2021,52(4):432-441. (in Chinese))

[18] 杜若愚,姚成,刘玉环,等. 基于蓄满超渗时空动态组合的网格新安江模型[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(6):25-32. (Du Ruoyu, Yao Cheng, Liu Yuhuan, et al. Grid-Xin' anjiang model based on spatio-temporal dynamic combination of saturation-excess and infiltration-excess runoff[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(6): 25-32. (in Chinese))

[19] 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))

[20] Wang Yuanheng, Gupta H V, Zeng Xubin, et al. Exploring the potential of long short-term memory networks for improving understanding of continental- and regional-scale snowpack dynamics [J]. Water Resources Research, 2022, 58(3): e2021WR031033.

[21] 师俞晨. 基于 MODIS 长时序数据分析青藏高原东部融雪速率变化[D]. 北京:中国地质大学(北京),2021.

[22] He M X,Hogue T S,Franz K J, et al. Corruption of parameter behavior and regionalization by model and forcing data errors: a Bayesian example using the SNOW17 model[J]. Water Resources Research,2011,47:W07546.

[23] 何涯舟,张珂,晁丽君,等. 基于多源遥感土壤湿度与模型数据同化的流域径流模拟[J]. 水资源保护,2023,39(2):145-151. (He Yazhou,Zhang Ke,Chao Lijun, et al. Watershed runoff simulation based on multi-source remotely sensed soil moisture and data assimilation[J]. Water Resources Protection,2023,39(2):145-151. (in Chinese))

[24] 韩文彪,姚成,李致家,等. 考虑水库泄水影响的逐网格汇流演算方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(3):34-41. (Han Wenbiao,Yao Cheng,Li Zhijia, et al. Routing method of confluence considering the influence of reservoir drainage at grid scale[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(3): 34-41. (in Chinese))

[25] 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):25-30. (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))

[26] 姚成,纪益秋,李致家,等. 栅格型新安江模型的参数估计及应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2012,40(1):42-47. (Yao Cheng, Ji Yiqiu, Li Zhijia, et al. Parameter estimation and application of grid-based Xin'anjiang model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, 40(1): 42-47. (in Chinese))

[27] Yao Cheng, Li Zhijia, Bao Hongjun, et al. Application of a developed grid-Xinanjiang model to Chinese watersheds for flood forecasting purpose[J]. Journal of Hydrologic Engineering,2009,14(9):923-934.

[28] Andrews F T,Croke B F W,Jakeman A J. An open software environment for hydrological model assessment and development[J]. Environmental Modelling & Software,2011,26(10):1171-1185.

[29] 龙笛,韩忠颖,王一鸣. 变化环境下澜沧江-湄公河流域干旱趋势[J]. 水科学进展,2022,33(5):766-779. (Long Di, Han Zhongying, Wang Yiming. Projection of future droughts across the Lancang-Mekong River under a changing environment[J]. Advances in Water Science,2022,33(5):766-779. (in Chinese))

[30] 罗煜宁,张珂,吴南,等. 梨园水电站径流分析与模拟[J]. 云南电力技术,2023,51(3):7-12. (Luo Yuning,Zhang Ke,Wu Nan, et al. Runoff analysis and simulation of Liyuan hydropower station[J]. Yunnan Electric Power,2023,51(3):7-12. (in Chinese))

[31] 张金萍,王宇昊. 基于 SWAT 模型和降水随机模拟的径流预测[J]. 中国农村水利水电,2021(7):12-18. (Zhang Jinping, Wang Yuhao. Runoff prediction based on SWAT model and stochastic simulation of precipitation[J]. China Rural Water and Hydropower,2021(7):12-18. (in Chinese))

[32] 周鹏,许月萍,周欣磊,等. 基于多模型融合的椒江流域季节性径流集合预报[J]. 水利水电科技进展,2025,45(3):62-69. (Zhou Peng, Xu Yueping, Zhou Xinlei, et al. Ensemble forecasting of seasonal streamflow in the Jiaojiang River Basin based on multi-model fusion[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2025,45(3):62-69. (in Chinese))

[33] 吴南,张珂,管晓祥,等. 1979—2018 年雅砻江中上游积雪时空变化及影响因素分析[J]. 水资源保护,2022,38(5):151-158. (Wu Nan,Zhang Ke,Guan Xiaoxiang, et al. Spatiotemporal variations of snow cover and its influencing factors in upper-middle reaches of the Yalong River from 1979 to 2018[J]. Water Resources Protection,2022,38(5):151-158. (in Chinese))

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.03.002

基于 SuperflexPy 的流域水文模型构建方法

王文鹏^{1,2}, 李欣靖¹, 侯爱中³, 张馨月¹, 刘波¹, 王欣沂¹, 黎春蕾⁴

(1. 河海大学水文水资源学院; 2. 水利部水利大数据重点实验室; 3. 水利部信息中心(水利部水文水资源监测预报中心);
4. 重庆市水文监测总站)

摘要: 为提升水文模型结构对流域产汇流时空异质特征的适配能力,改善传统固定结构模型在不同流域的适用性局限,系统阐述了基于灵活架构理论的 SuperflexPy 建模框架基本原理,以重庆綦江流域为研究区,构建了分散式流域水文模型,通过 18 种水文过程元件组合方案开展对比试验,定量评估不同模型结构的日径流模拟效果。结果表明:基于 SuperflexPy 构建的分散式水文模型可较好地模拟流域控制断面日径流过程;不同元件组合的模拟结果存在显著差异,能够有效识别并反映径流形成过程中的关键水文环节;SuperflexPy 采用面向对象范式实现水文元件模块化封装,通过模拟单元、节点与网络分层组织概化流域拓扑结构,可灵活组配不同产汇流过程,具备较强的流域适应性,能较好刻画流域产汇流时空异质性。

关键词: 水文模型;灵活架构;SuperflexPy;綦江流域

Construction method of catchment hydrological model based on SuperflexPy

Wang Wenpeng^{1,2}, Li Xinjing¹, Hou Aizhong³, Zhang Xinyue¹, Liu Bo¹, Wang Xinyi¹, Li Chunlei⁴

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

2. Key Laboratory of Water Big Data, Ministry of Water Resources;

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

4. Chongqing Hydrology Monitoring Center)

Abstract: To enhance the adaptability of hydrological model structures to the spatiotemporal heterogeneous characteristics of catchment runoff generation and routing and improve the applicability limitations of traditional fixed-structure models in different catchments, the fundamental principles of the SuperflexPy modeling framework based on the flexible architecture theory were systematically elaborated. By taking the Qijiang River Basin in Chongqing as the study area, a semi-distributed catchment hydrological model was constructed. A comparative test was carried out through 18 assembly schemes of hydrological process elements, and the daily runoff simulation effects of different model structures were quantitatively evaluated. The results indicate that the semi-distributed hydrological model constructed based on SuperflexPy can effectively simulate the daily runoff processes at catchment control sections; the simulation results of different element assembly schemes show significant differences, which can effectively identify and reflect the key hydrological links in the runoff formation process; SuperflexPy adopts an object-oriented paradigm to achieve the modular encapsulation of hydrological elements and generalizes the catchment topological structure through the hierarchical organization of simulation units, nodes, and networks. It can flexibly assemble different runoff generation and routing processes, possesses strong catchment adaptability, and can well depict the spatiotemporal heterogeneity of catchment runoff generation and routing.

Key words: hydrological model; flexible architecture; SuperflexPy; the Qijiang River Basin

概念性水文模型是流域水文模拟与洪水预报最常用的计算工具。受流域下垫面、气候及水文特性空间异质性影响,不同产汇流机制的物理概化方式形成了种类繁多的概念性水文模型。目前尚无单一固定结构的概念性水文模型能够通用于各类流域。在实际洪水预报方案构建中,模型结构选择仍存在较强不确定性,是制约洪水预报精度提升的关键难点之一^[1]。在当前技术条件下,采用一种通用的固定结构水文模型模拟不同气候、地理、下垫面特征的流域产汇流过程还难以实现^[2-3]。水文模型灵活架构理论^[4]认为,模型结构

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3006501);国家自然科学基金联合基金项目(U24A20587);水利部重大科技项目(SKS-2022132);湖南省水利科技项目(XSKJ2025056-22)

作者简介: 王文鹏(1983—),男,副教授,博士,主要从事水文不确定性理论及应用研究。E-mail:wangwphhu@163.com

通信作者: 刘波(1980—),女,副教授,博士,主要从事水资源评价与管理研究。E-mail:liubohhu@hhu.edu.cn

应当由模型各个元件机动组合而成,针对特定流域的产汇流特征,可通过灵活增减或替换水文模型元件,构建适配流域特性的个性化模型结构。基于灵活架构理论,现有研究已提出了实用的水文模型构建方法^[5]。其中,FUSE 框架以 PRMS、SACRAMENTO、TOPMODEL、ARNO/VIC 为原型,将产流过程概化为上层非饱和带与下层饱和带土壤水分的蒸散发、下渗、蓄存及运移等子过程;在各子过程内部,通过兼容并适配上述 4 种模型的本构方程与控制方程,最终形成 79 种模型结构组合;借助 MOPEX 数据集中 2 个典型试验流域,验证了模型结构优化对提升水文模拟精度的重要作用^[6]。Superflex 框架^[7]对模型结构拆分得更精细,它按水文响应功能函数解析模型元件,并提供了开源 Python 工具包 SuperflexPy^[8]允许用户根据实际需求扩展和定制模型元件。赵铜铁钢等^[9]率先建立了基于 Superflex 框架的新安江模型定制元件,并支持与其他概念性水文模型元件的组配。

面向智慧水利发展需求,新一代洪水预报系统建模框架应能充分利用网格或子流域尺度土壤、土地利用类型、植被等影响洪水预报精度的下垫面信息,智能配置产流、汇流等元件,模拟产汇流过程^[10-11]。目前灵活架构理论在国内的研究和应用已取得了初步成果。理论研究方面:Huang 等^[12]提出了地形曲线数与地形指数相结合(CN-TI)的流域主导产流模式划分方法;刘玉环等^[13-14]将 CN-TI 法与水文模型相结合,在子流域尺度发展出了蓄满、超渗、蓄超产流模式的空间组合模型(SCMs);刘玉环等^[15-16]依据降雨和土壤含水量动态识别网格尺度的主导产流模式,提出了基于蓄满超渗时空动态组合的 TOKAISIDE 模型和网格新安江模型。建模应用方面:基于组件技术的模型管理方式^[17]、面向对象的模型服务封装方法^[18]、基于云工作流的模型搭建与并行调度技术^[19],已逐渐推广应用于水利业务系统,为水文模型元件组配提供了可实现的软件技术路径。

依据 Superflex 框架组配水文模型,是在水文响应功能函数的粒度上开展模型适配原理和方法研究,对于进一步研究建立适用于我国洪水预报业务的水文模型灵活架构具有很好的借鉴意义。本文系统阐释了 SuperflexPy 建模框架的基本原理,以重庆綦江流域为研究区,选取 M4^[20]、HYMOD^[21]、GR4J^[22-23] 模型搭建分散式水文模型,并开展模型元件的组配试验,以期为实现流域水文模型的自适应配置提供技术参考。

1 SuperflexPy 基本原理

1.1 Superflex 建模框架的通用元件

SuperflexPy 是用 Python 编程语言实现的 Superflex 建模框架。Superflex 将流域水文过程概化为水量分配、蓄泄、传输过程的有机组合,分别采用水箱、滞后函数和连接件 3 类通用元件表征上述水文过程(图 1)^[7]。图 1 中 I 为输入通量; O 为输出通量; S 为水箱蓄量状态; θ 为水箱蓄泄参数; w 为滞后函数的权重; $I_1 \sim I_n$ 为 n 个输入通量; $O_1 \sim O_n$ 为 n 个输出通量; E 为损失通量; $O_{\text{over-Thr}}$ 为超过阈值的输出通量; $O_{\text{under-Thr}}$ 为低于阈值的输出通量; lag 为输入量对输出量有明显影响的最长滞后时间。水箱用于描述水量的分配和蓄泄过程,可用于模拟土壤水、地下水、积雪融水等动态变化;滞后函数对通量做卷积计算,可用于刻画坡面和河网汇流通量的推移和坦化;连接件用于通量的合并与拆分。连接件既可以将原通量直接拆分,也可以从原通量中扣除损失,将余量流向下一个计算单元,比如从降水中扣减蒸散发等损失形成净雨的计算过程,还可

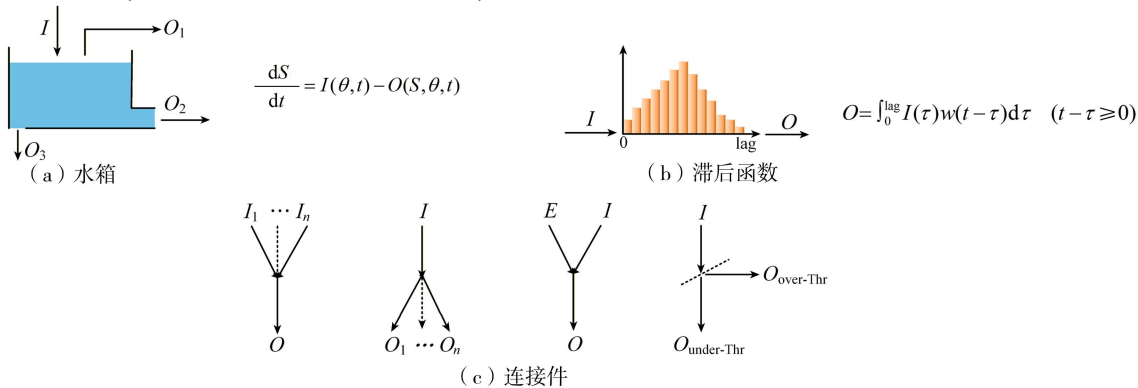


图 1 Superflex 建模框架通用元件

Fig. 1 Generic elements of Superflex modeling framework

以依据门槛将原通量进行拆解,比如模拟超渗产流机制。

1.2 流域拓扑结构的概化

针对实际流域构建水文模型可采用分散式和分布式两种拓扑结构,以考虑降雨空间分布不均匀性和下垫面条件变异性对流域产汇流的影响。分散式结构将流域划分成互不嵌套、不相交叉的若干个子流域,使得每个子流域降雨空间分布基本均匀,然后对每个子流域使用水文模型反映下垫面变异对产流的影响,再通过河网汇流,将各子流域的输出汇集成为流域出口断面流量过程^[24-25]。分布式结构则进一步将子流域剖分成若干个网格单元,使每个单元内的下垫面条件基本一致,进而为各单元配置与其下垫面条件相适应的模型结构及参数;单元之间依循地形、地貌和水系特征形成汇流联系,直至流域出口。

SuperflexPy 框架采用了分散式结构,同时允许将子流域分解成若干单元,但是它要求每个单元之间不能发生水力联系,子流域内部的各个单元为平级关系。各单元流域出口的流量过程独立地进行出口以下河道汇流计算,得到各单元流域在子流域出口的流量过程,再将以上过程线性叠加作为子流域出口流量过程。类似地,各子流域出口流量亦是独立演算至全流域出口,再做线性叠加,组成全流域出口的流量过程。

用于组建流域拓扑结构的 SuperflexPy 构件有 4 个层级:元件、单元、节点和网络^[8]。元件是最基础的构件,用于表征流域水文循环和水流运动的某个子过程;单元由多个元件相连组成,可以模仿集总式水文模型的结构来搭配元件,以模拟单元流域的水文过程;节点可视作子流域出口,连接了多个并行单元,起到将单元出流汇集到子流域出口的作用;网络可看作子流域的拓扑关系,通过连接多个节点,将子流域出流汇集到全流域出口。

1.3 概念性水文模型的定制元件

概念性水文模型是将流域产汇流现象概化为若干个子过程,对每个子过程采用统计曲线、数学方程、逻辑关系等方式表达水量变化和能量转化,形成若干个计算单元,再将这些计算单元按物理关联集成计算系统。从灵活建模的观点考察各种概念性水文模型的区别,主要体现在以下 3 个方面:将流域产汇流现象拆解为子过程的方式不同;对同一子过程采用了不同的数学表达方式;对同一数学表达使用的数值解法有区别。如果想通过改造几种固定结构的水文模型适配一种新的模型结构,要求各模型必须有相同的子过程,并且对子过程的输入输出有一致的定义^[26],这个条件并不容易满足。

SuperflexPy 从最基础的元件层级起步构建流域水文模型,通过元件或多个元件组合表征某个子过程,再将元件组配成单元构件便可以模拟单元流域的产汇流现象。该方法从数学逻辑上来看,对于不同水文子过程,只要采用类型相同且输入输出定义一致的元件,即可通过元件替换,为目标流域组配适宜的模型结构。元件的输入输出是指单位时段内流入流出元件的水量或能量的累积量,记为通量,通量是相邻元件联系的桥梁;元件储存的水量和能量随时间而变,记为状态变量。要计算元件的输出通量和状态变量需定义两类方程:①本构方程,用于描述元件系统在当前状态下系统输出对输入的响应关系;②控制方程,用于描述系统状态在单位时段的改变量。若元件不改变流域状态就不必包含状态变量,也不用定义控制方程。

SuperflexPy 基于面向对象编程范式封装了通用元件类的属性和方法,利用面向对象的继承性和多态性自定义元件的通量与本构方程、状态变量与控制方程,从而将具体的概念性水文模型分解成元件,形成一批最基础的模型构件。本文以日尺度水文模型 GR4J 为例,说明定制元件的构建思路,其他概念性水文模型可以借鉴该例,制定个性化的 SuperflexPy 元件。GR 系列模型结构简单且具有较高的日径流模拟精度,已在我国南方湿润地区得到了初步应用^[27-29]。GR4J 模型结构主要由截留、产流、汇流 3 个子阶段组成^[22](图 2(a)):①截留阶段根据流域面降雨强度 P 、潜在蒸散发能力 E ,确定有效降雨强度 P_n 和剩余蒸散发能力 E_n ;②产流阶段通过 P_n 和 E_n 计算产流水箱补给强度 P_s 和实际蒸散发强度 E_s ;总产流强度 P_r 由水箱出流强度 Q_{UR} 和剩余有效降雨强度 $(P_n - P_s)$ 构成;③汇流阶段将 P_r 按固定比例 9 : 1 分为两组径流成分:90% 径流成分由单位线函数 $1(U_1)$ 演算,经汇流水箱二次调节后,出流强度记为 Q_{RR} ;10% 径流成分采用单位线函数 $2(U_2)$ 演算,直接汇集到流域出口,出流强度记为 Q_d ;对非闭合流域,两组径流成分都要扣减地下水交换强度 Q_{RF} ;④流域总出流强度 Q 为 Q_{RR} 与 Q_d 之和。

SuperflexPy 采用单元构件模仿 GR4J 模型结构,单元构件共分为 7 层,由 6 个定制连接元件和 3 个通用连接件组成(图 2(b))。第 1 层是模拟截留作用的水箱,通过比较 P 和 E 的数值大小计算 P_n 和 E_n ,不含状态变量。第 2 层是模拟产流作用的水箱,水箱蓄量 S_{UR} 为状态变量。SuperflexPy 支持采用微分形式的状态

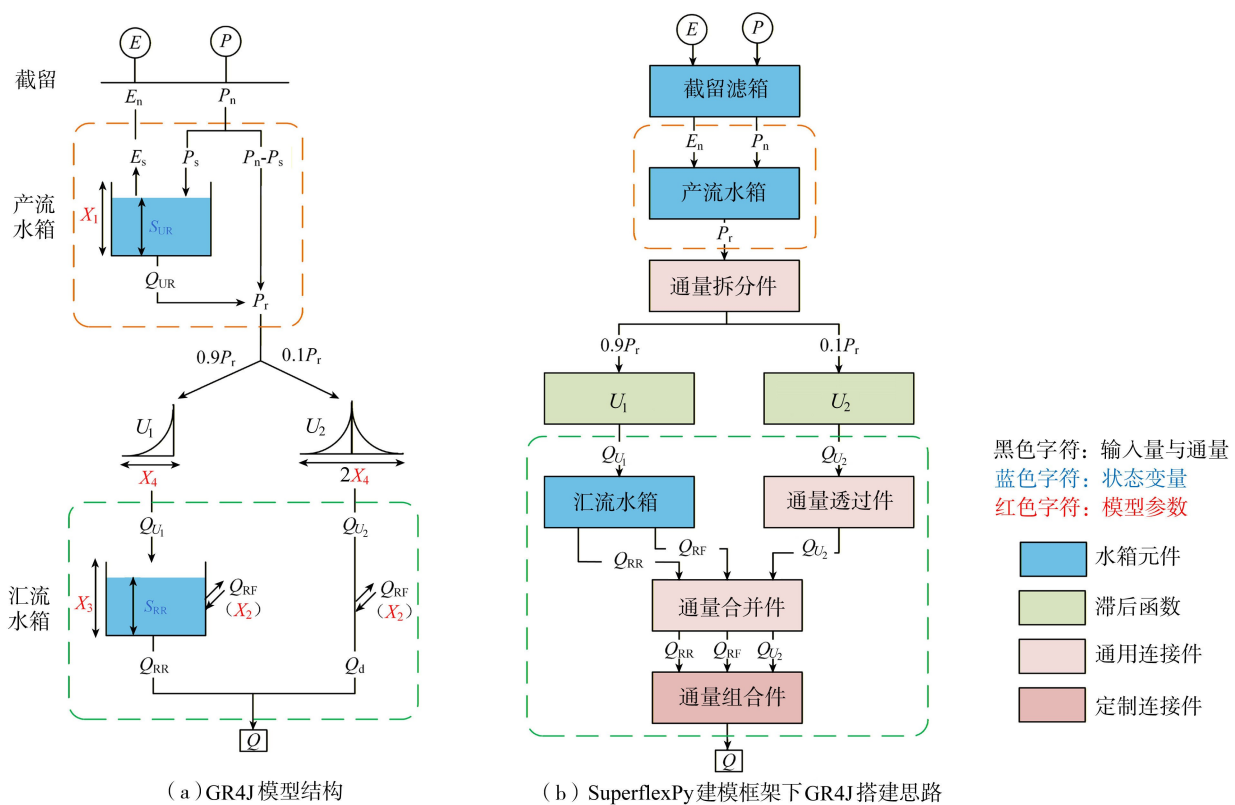


图 2 GR4J 模型及 SuperflexPy 建模框架下 GR4J 模型的结构
Fig. 2 Structure of GR4J model and its configuration under SuperflexPy modeling framework

控制方程,目的是实现模型数学方程与数值解法的分离,使能通过数值解法控制状态变量的求解误差和计算效率^[23,30-31]。微分形式的状态控制方程及初始条件,构成了微分方程的初值问题,可用数值法求解状态变量在不同时刻的取值(式(1))。控制方程的左侧为状态变量的微分,右侧是依据水量平衡原理推导出的多个通量组成的算式。进一步根据模型原理逐一确定右侧通量与状态变量的关系式,即本构方程,就可以形成状态微分方程的完整表达,见表 1^[23]。采用微分方程求解产流水箱状态时,通量 P_s 、 E_s 、 Q_{UR} 都与状态变量 S_{UR} 同步随时间演变,不能将它们分开独立求解,即仅依据时段初或时段末的状态值计算通量,也就是说上述通量计算都应当在产流水箱元件内部与状态变量一并求解完成。第 3 层是通量拆分件,属于通用连接件,无需自定义,只要规定通量 P_r 拆分后流向哪个元件,确定拆分比例即可。第 4 层是模拟两条单位线的滞后函数,作用是将两个径流成分通量分别与相应的单位线做卷积计算。第 5 层包括汇流水箱和通量透过件;汇流水箱的蓄量 S_{RR} 为状态变量,可参考产流水箱的思路推导 S_{RR} 的状态控制方程;通量透过件也是一种通用连接件,不对通量做任何计算,仅起到连接跨层元件并传递通量的作用。第 6 层是通量合并件,亦属于通用连接件,作用是将出自两个上层元件的 3 项通量,依次指派给下层元件。最后一层的通量组合件是定制元件,它先从单位线 UH_2 出流中扣减地下水交换强度,再与汇流水箱出流叠加,形成输出量,即流域总出流强度 Q 。定制元件共包含了 2 个状态变量和 13 个通量,具体定义见表 1。

控制方程

$$\frac{dS_{UR}}{dt} = P_s - E_s - Q_{UR} \Rightarrow S_{UR,t_1} = S_{UR,t_0} + \int_{t_0}^{t_1} dS_{UR} = S_{UR,t_1}$$

初始条件

$$S_{UR} = S_{UR,t_0}$$

式中: S_{UR,t_0} 为时段初的产流水箱蓄量; S_{UR,t_1} 为时段末的产流水箱蓄量。

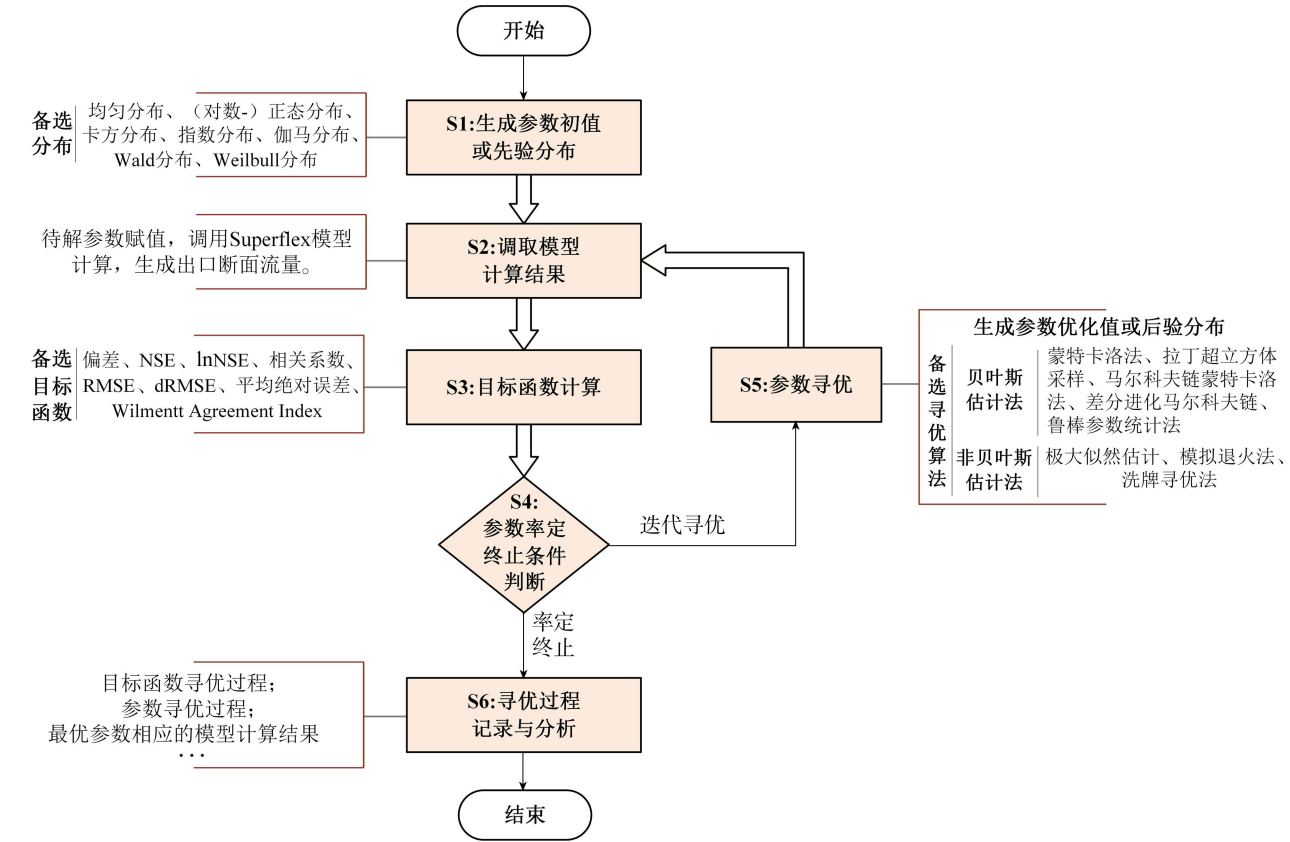
1.4 SuperflexPy 模型的参数率定

SuperflexPy 没有参数率定功能。SPOTPY (statistical parameter optimization tool) 是一款专门用于模型参数率定、不确定性分析和敏感性分析的开源 Python 工具包。SPOTPY 执行模型参数寻优的流程(图 3)与水文模型参数率定的通用流程类似,其特点主要是实现了模型计算与参数寻优算法的解耦,囊括了 8 种参数率定和不确定性分析算法、8 种先验分布可供参数随机采样、11 种目标函数,且支持并行计算^[32]。

表 1 SuperflexPy 建模框架下 GR4J 模型定制元件的数学表达

Table 1 Mathematical expressions of customized elements of GR4J model under SuperflexPy modeling framework

通用元件	定制元件	通量	本构方程	状态量	控制方程
截留滤箱		P	$P_n = \max\{P - E, 0\}$ $E_n = \max\{E - P, 0\}$		
		E			
		P_n			
		E_n			
水箱	产流水箱	E_s	$E_s = E_n \left[2 \frac{S_{UR}}{X_1} - \left(\frac{S_{UR}}{X_1} \right)^2 \right]$	产流水箱蓄量 S_{UR}	$\frac{dS_{UR}}{dt} = P_s - E_s - Q_{UR}$
		P_s	$P_s = P_n \left[1 - \left(\frac{S_{UR}}{X_1} \right)^2 \right]$		
		Q_{UR}	$Q_{UR} = \left(\frac{4}{9} \right)^4 \frac{1}{4X_1^4} S_{UR}^5$		
		P_r	$P_r = Q_{UR} + P_n - P_s$		
		Q_{RR}	$Q_{RR} = \frac{S_{RR}^5}{4X_3^4}$		
汇流水箱		Q_{RF}	$Q_{RF} = X_2 \left(\frac{S_{RR}}{X_3} \right)^{3.5}$	汇流水箱蓄量 S_{RR}	$\frac{dS_{RR}}{dt} = Q_{U_1} - Q_{RR} - Q_{RF}$
滞后函数	U_1	Q_{U_1}	$Q_{U_1} = \sum_{\tau=0}^{X_4} 0.9P_r(\tau)U_1(t-\tau)$		
	U_2	Q_{U_2}	$Q_{U_2} = \sum_{\tau=0}^{2X_4} 0.1P_r(\tau)U_2(t-\tau)$		
连接件	通量组合件	Q	$Q = Q_{RR} + \max\{0, Q_{U_2} - Q_{RF}\}$		



注:S2步允许替换灵活组配的任何模型,双线箭头表示该步骤允许并行计算。

图 3 SPOTPY 参数寻优流程

Fig. 3 Parameter optimization process of SPOTPY

SPOTPY 提供了名为“spotpy_model”的标准接口,接口下属 5 个方法,包括:类初始化(__init__)、提取待解参数值(parameters)、调取模型计算结果(simulation)、提取评价依据(evaluation)、设置目标函数

(objectivefunction)。调用方只要编码实现了以上 5 个方法,就可以生成 spotpy_model 类的实例对象,执行参数寻优的程序,完成确定模型参数的任务。对于使用 SuperflexPy 灵活组配的模式而言,将模型待求解参数的取值编码写入“parameters”方法,将调用模型计算及生成流域出口断面流量序列的程序写入“simulation”方法,将提取流域出口断面实测流量序列的编码写入“evaluation”方法,就实现了 SuperflexPy 与 SPOTPY 的集成。

2 实例分析

2.1 研究区概况

綦江是长江上游干流南岸一级支流,发源于贵州省桐梓县北大娄山系,由南向北于江津区注入长江。綦江地势南高北低,河长约 220 km,流域面积 5 566 km²,属亚热带湿润季风气候区,降雨集中于 5—9 月,多年平均降水量 1 040 mm,最大年降水量 1 350 mm,最小年降水量 750 mm。

綦江流域共设有 47 个雨量站,站网密度 118 km²/站,4 座水文站为东溪、石角、羊市、五岔(图 4)。获取水文整编资料为 2010—2019 年雨水情连续日数据,羊市站设立较晚,日径流资料长度为 2016—2019 年。

2.2 流域水文模型构建

对綦江流域拓扑结构概化如下:以水文控制站为流域出口节点,按照水系流向自源头而下,将流域划分为 4 个子流域区间,即石角以上区间、东溪以上区间、东溪与石角至羊市区间、羊市至五岔区间。本次建模方案在子流域内仅设一个水文响应单元,如需进一步研究可以根据下垫面空间变异性对子流域做更精细的单元流域划分^[33-34]。石角以上区间与东溪以上区间独立地进行产汇流计算,出流经河道汇流演算至羊市节点做线性叠加,再会同羊市区间出流向五岔节点做河道汇流演算,最后与五岔区间出流叠加后组成出口断面流量。

依据 SuperflexPy 建模框架,将綦江流域水文模型概化为由 4 个节点构成的网络。区间节点之间的汇流演算和流量叠加计算由网络构件完成,节点之间的河道汇流演算用滞后函数元件模拟,节点内设唯一单元,单元内由模拟单元流域产汇流过程的若干个计算元件组成(图 5)。本次建模采用 GR4J 模型结构模拟单元流域的日径流过程。

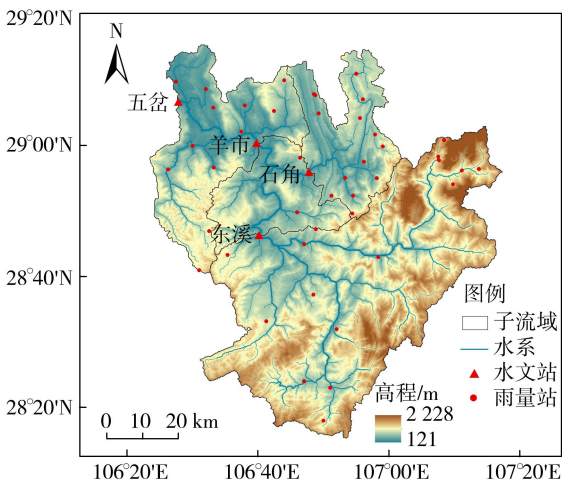


图 4 綦江流域水系与雨水情站网分布

Fig. 4 Distribution of river system and rainfall and hydrological station network in the Qijiang River Basin

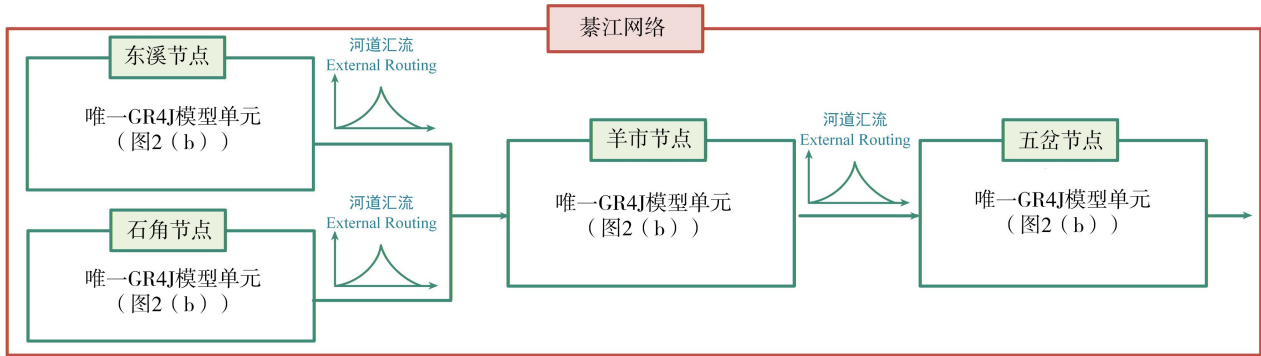


图 5 基于 Superflex 建模的綦江流域拓扑结构

Fig. 5 Topological structure of the Qijiang River Basin based on Superflex modeling

模型参数率定按照水系流向逐级进行,先率定石角以上区间、东溪以上区间的模型参数;再以石角以上区间、东溪以上区间模拟出流过程为上边界入流,用东溪与石角至羊市区间面雨量为输入,以羊市站实测日径流为模型输出依据,率定东溪与石角至羊市区间模型参数;最后以东溪与石角至羊市区间模拟出流过程为上边界入流,用羊市至五岔区间面雨量为输入,依据五岔站实测日径流,率定五岔区间模型参数。

在石角以上区间、东溪以上区间、羊市至五岔区间取 2010—2016 年为模型率定期,2017—2019 年为模

型检验期;在东溪与石角至羊市区间取 2016—2018 年为模型率定期,2019 年为模型检验期。采用参数寻优算法 SCE-UA,以纳什效率系数(NSE)为目标函数率定模型参数。

2.3 模型元件组配方案

Superflex 提供了从元件级组配流域水文模型的计算工具。结合具体流域的气候条件与下垫面特性适配模型结构的基本思路如下^[35-36]:①流域特征信号提取,即提取能够反映流域气候与下垫面条件空间变异性的特征量,如降水中的降雪占比、固结不透水层面积占比等,以及反映流域出流响应的特征量,如年平均径流量、基流指数等,这些特征量称为“信号”;②流域出流响应的控制信号分析,即通过相关分析、建模经验等提出控制流域出流特征的关键信号;③提出模型结构的原假设和备择假设,即依据控制信号选择相应的模型元件,使模型能够模拟特定的水文过程,或者依据控制信号划分单元流域,使模型在不同单元流域的参数取值差异能够反映控制信号的空间变异性;④验证模型结构假设,即依据实测数据比较两类假设下的模型精度,用实例反证接受或拒绝原假设,得出适宜的模型结构。例如,Dal Molin 等^[37]对瑞士图尔河流域的研究表明:固结不透水层面积与基流指数有较强的相关性,据此将每个区间按照固结不透水层面积占比的高低划分为两类单元,分开率定汇流水箱元件的参数,反映基流贡献的差异,得到的日径流模拟精度要优于依据土地利用类型划分单元的方法。

为简要说明不同元件组配模型的差异,以 GR4J 模型为綦江流域水文过程的原型,提出原假设:①截留作用影响水量平衡;②有未经包气带调蓄的直接径流产出(P_n-P_s);③流域不封闭,有地下水交换量 Q_{RF} 产生。为验证该假设,采用另外两种概念性水文模型 M4 和 HYMOD 元件,组建备择假设的模型。M4 和 HYMOD 都不包含截留元件;产流部分都只采用了一个模拟土壤包气带产流作用的水箱元件;汇流部分都不考虑地下水交换量,M4 用一个幂函数水箱元件模拟汇流过程,HYMOD 将径流分为地表和地下两部分,分别用串联线性水库和单个线性水库模拟汇流过程。将 M4、HYMOD、GR4J 模型元件自由组配,共形成 18 种模型结构(图 6),其中 S_{max} 为产流水箱容量, β 为产流水箱产流指数, C_e 为产流水箱产流系数, $k, k_1 \sim k_3, k_{LZ}$ 为

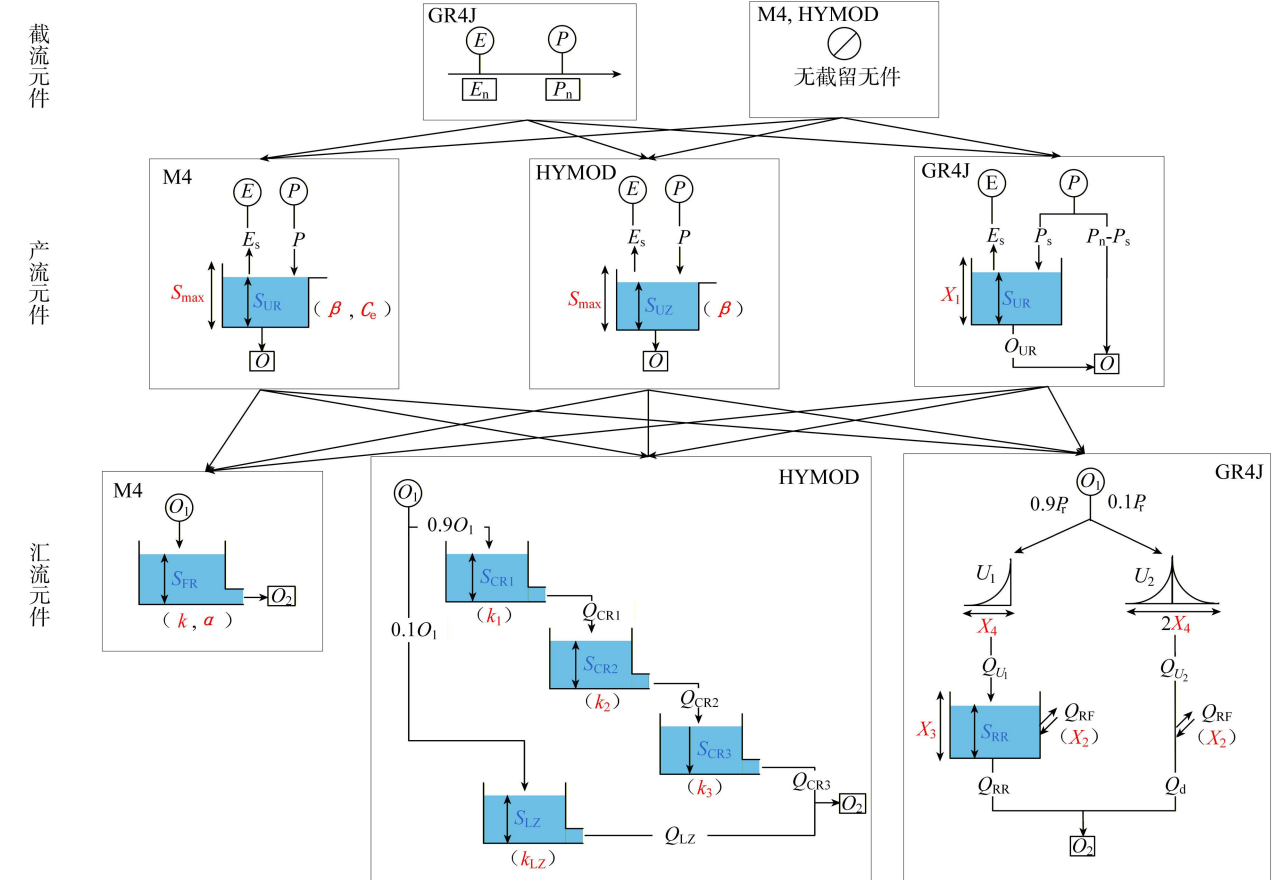


图 6 M4、HYMOD、GR4J 模型元件组配方案

Fig. 6 Element assembly schemes of M4, HYMOD, and GR4J models

汇流水箱退水系数, α 为汇流水箱退水指数, S_{UZ} 为产流水箱状态变量, S_{FR} 、 S_{CR1} 、 S_{CR2} 、 S_{CR3} 、 S_{LZ} 为汇流水箱状态量, $Q_{CR1} \sim Q_{CR3}$ 依次为 1~3 层高流速水箱出流量, Q_{LZ} 为低流速水箱出流量。以五岔站为出口构建集总式水文模型, 比较不同元件组配方案的精度。

2.4 结果与分析

2.4.1 径流模拟效果

由图 7 可知, 模型能较好地模拟各断面日径流过程。流域出口断面五岔站的 NSE 在率定期为 0.88, 验证期为 0.85; 其余断面 NSE 在率定期为 0.81~0.87, 验证期为 0.78~0.85。模型参数在 4 个子流域区间呈现出一定的空间分布规律, 产流水箱容量 X_1 、汇流水箱容量 X_3 以及地下水交换系数 X_2 整体上均为从上游向下游递减; 单位线汇流时间 X_4 由上游向下游递增。此外, X_2 取正值说明流域有不闭合产生的地下水交换问题, 具体表现为地下水对径流有补给作用。

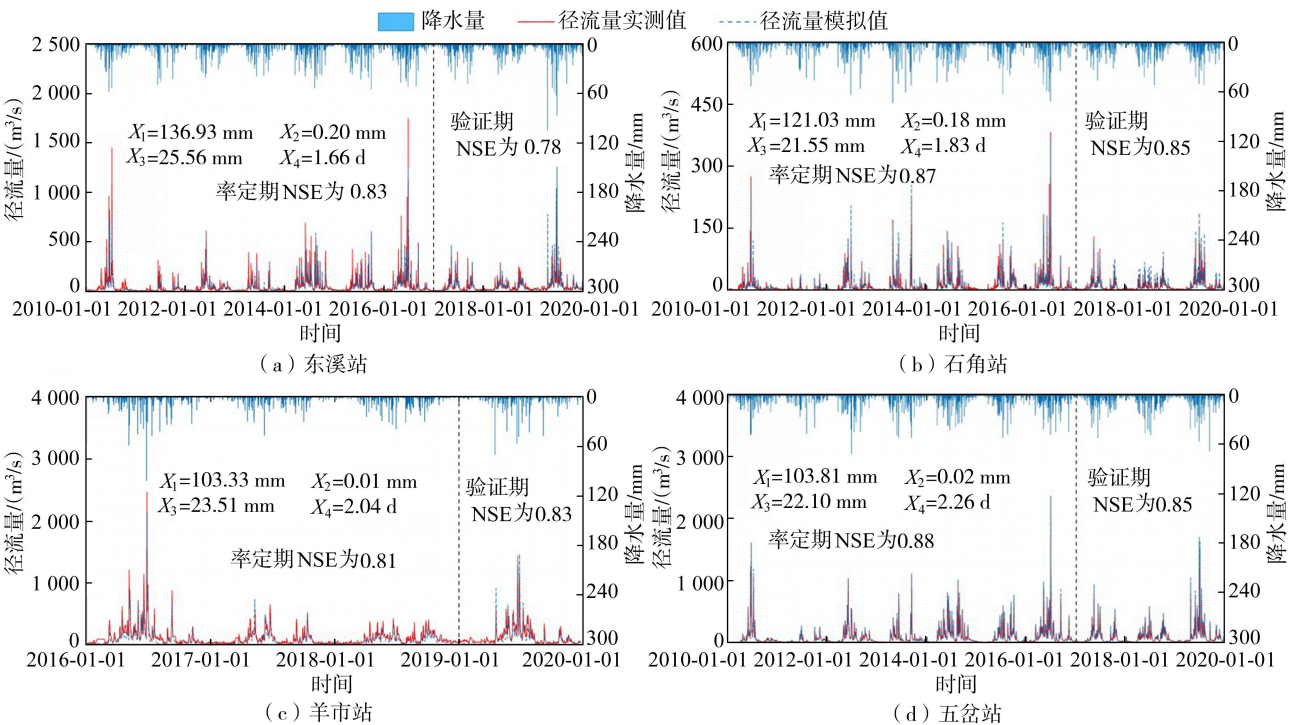


图 7 水文站实测与模拟日径流过程比较

Fig. 7 Comparison of measured and simulated daily runoff processes at hydrological control stations

2.4.2 元件组配效果

灵活组配 18 种模型结构模拟五岔站日径流过程的 NSE 如图 8 所示。考虑截留元件的模型精度仅稍优于未考虑情景, 率定期有无截留元件的各模型结构 NSE 均值均为 0.71, 验证期 NSE 均值从无截留元件的 0.64 略增至有截留元件的 0.65; 产流部分, 率定期采用 M4 产流元件的模型 NSE 均值为 0.73, 优于 GR4J(0.72) 和 HYMOD(0.69), 验证期采用 HYMOD 产流元件的模型 NSE 均值为 0.67, 优于 GR4J(0.65) 和 M4(0.62); 汇流部分, 采用 GR4J 汇流元件的模型精度, 率定期为 0.87, 验证期为 0.80, 都要明显高于 HYMOD(0.66 与 0.59) 和 M4(0.61 与 0.54)。由此可见, 所提原假设①和③都可接受, 但可以拒绝原假设②, 对綦江流域产流部分只要考虑包气带产流作用便可以取得不错的

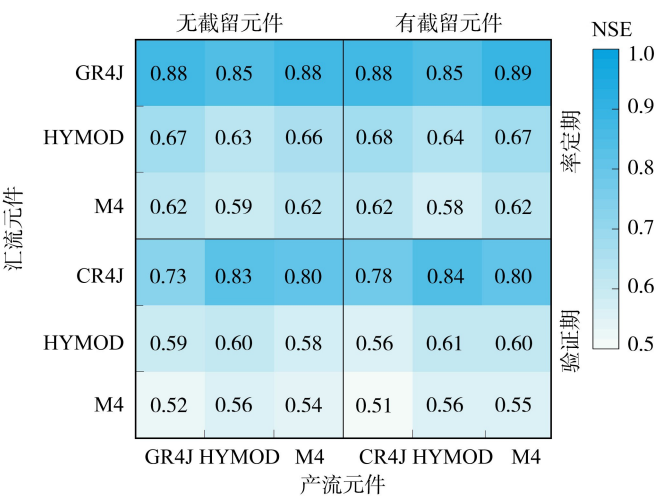


图 8 灵活组配模型的 NSE

Fig. 8 NSE values of flexibly assembled models

径流模拟效果,最适配的模型结构为 GR4J 原型搭配 HYMOD 或 M4 的产流元件。进一步以 2016 年五岔站日径流过程为例,观察汇流元件对日径流过程的影响。由图 9 可见,GR4J 径流过程峰值都要明显高于 HYMOD 和 M4,说明 GR4J 考虑地下水对径流的补给起了作用。需要说明的是,GR4J 和 HYMOD 汇流元件的参数数量都要多于 M4,容易取得较好的径流模拟效果。更严格的元件组配差异分析建议在参数数量一致的条件下进行。

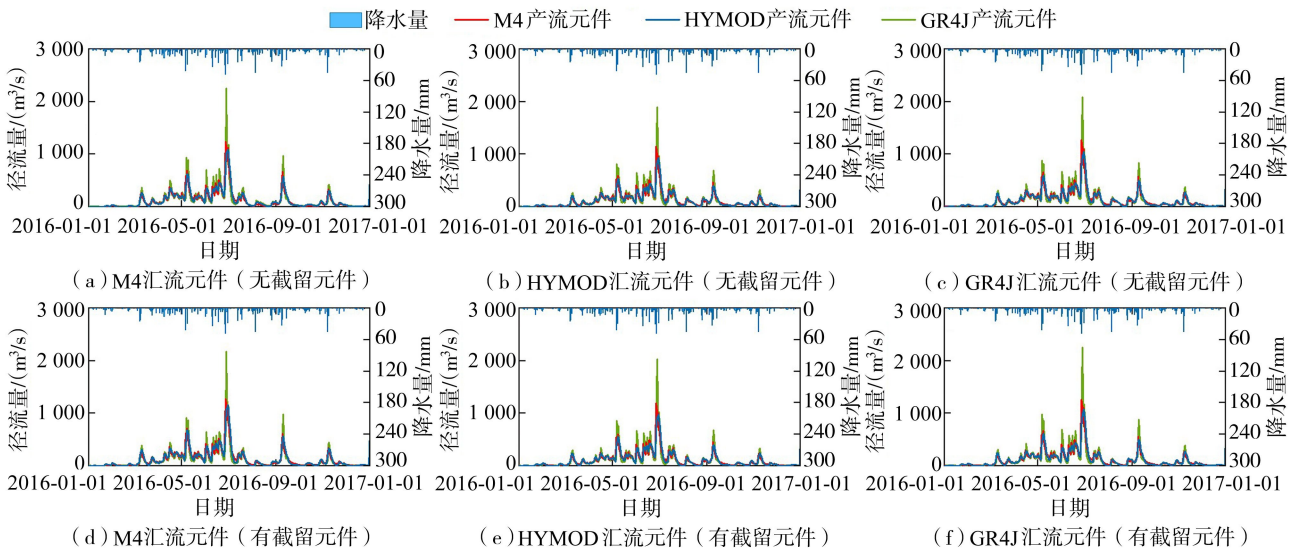


图 9 灵活组配模型模拟的 2016 年五岔站日径流过程

Fig. 9 Daily runoff processes at Wucha Station in 2016 simulated by flexibly assembled models

3 结 语

基于 SuperflexPy 在綦江流域构建的分散式流域水文模型可较好地模拟流域水文站控制断面的日径流过程。利用 SuperflexPy 可灵活替换模型元件的特点,构建并对比分析了 18 种不同组配方案对模拟结果的影响差异,揭示了控制綦江流域日径流形成的关键水文过程。SuperflexPy 采用面向对象编程范式进行封装,支持用户自定义概念性水文模型元件,具有较强的模块化与扩展性。未来研究可结合我国长期水文观测实践与区域产汇流特征,进一步优化模型模块的灵活组配方式,研发更贴合我国流域实际的水文模型,持续提升径流模拟精度。同时,鉴于该工具现有内置元件尚难以全面满足复杂水文过程的模拟需求,建议拓展集成主流产汇流模块,包括蓄满产流(如新安江模型)、超渗产流(如 Green-Ampt 模型)等产流机制,以及二水源、三水源等分水源计算模块,以增强模型适用性与模拟能力。

参考文献:

[1] Addor N,Melsen L A. Legacy, rather than adequacy, drives the selection of hydrological models[J]. Water Resources Research, 2019,55:378-390.

[2] Sivapalan M,Blöschl G,Merz R,et al. Linking flood frequency to long-term water balance:incorporating effects of seasonality[J]. Water Resources Research,2005,41:W06012.

[3] Kirchner J W. Getting the right answers for the right reasons:linking measurements,analyses,and models to advance the science of hydrology[J]. Water Resources Research,2006,42:W03S04.

[4] Clark M P,Kavetski D,Fenicia F. Pursuing the method of multiple working hypotheses for hydrological modeling[J]. Water Resources Research,2011,47:W09301.

[5] 申笑萱,张珂,张兆安,等. 水文多模型拆分组配与协同优化研究进展[J]. 水资源保护,2025,41(4):189-196. (Shen Xiaoxuan,Zhang Ke,Zhang Zhaoan,et al. Research progress on hydrological multi-model decomposition allocation and collaborative optimization[J]. Water Resources Protection,2025,41(4):189-196. (in Chinese))

[6] Clark M P,Slater A G,Rupp D E,et al. Framework for understanding structural errors (FUSE):a modular framework to diagnose differences between hydrological models[J]. Water Resources Research,2008,44:W00B02.

[7] Fenicia F,Kavetski D,Savenije H H G. Elements of a flexible approach for conceptual hydrological modeling:1. motivation and theoretical development[J]. Water Resources Research,2011,47:W11510.

[8] Dal Molin M,Kavetski D,Fenicia F. SuperflexPy 1. 3. 0: an open-source Python framework for building, testing, and improving conceptual hydrological models[J]. Geoscientific Model Development,2021,14(11):7047-7072.

[9] 赵钢铁,陈泽鑫,段凯,等. 一种模块化的新安江模型构建方法:CN117540560A[P]. 2024-02-09.

[10] 刘志雨,侯爱中. 洪水影响预报和风险预警理念与业务实践[J]. 水文,2020,40(1):1-6. (Liu Zhiyu,Hou Aizhong. Concept and practice of impact-based flood forecasting and risk-based flood warning [J]. Journal of China Hydrology,2020,40(1):1-6. (in Chinese))

[11] 李致家,黄鹏年,姚成,等. 灵活架构水文模型在不同产流区的应用[J]. 水科学进展,2014,25(1):28-35. (Li Zhijia,Huang Pengnian,Yao Cheng,et al. Application of flexible-structure hydrological models in different runoff generation regions [J]. Advances in Water Science,2014,25(1):28-35. (in Chinese))

[12] Huang Pengnian,Li Zhijia,Yao Cheng,et al. Spatial combination modeling framework of saturation-excess and infiltration-excess runoff for semihumid watersheds[J]. Advances in Meteorology,2016,2016:5173984.

[13] 刘玉环,李致家,刘志雨,等. 半湿润半干旱流域空间组合模型研究[J]. 湖泊科学,2020,32(3):826-839. (Liu Yuhuan,Li Zhijia,Liu Zhiyu,et al. Spatial combination model for semi-humid and semi-arid watersheds [J]. Journal of Lake Sciences,2020,32(3):826-839. (in Chinese))

[14] Liu Yuhuan,Zhang Ke,Li Zhijia,et al. A hybrid runoff generation modelling framework based on spatial combination of three runoff generation schemes for semi-humid and semi-arid watersheds[J]. Journal of Hydrology,2020,590:125440.

[15] 刘玉环,刘志雨,李致家,等. 华北地区分布式蓄超空间动态组合 TOKASIDE-D 模型研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(2):105-112. (Liu Yuhuan,Liu Zhiyu,Li Zhijia,et al. TOKASIDE-D model of spatial dynamic combination of saturation-excess and infiltration-excess runoff for North China region[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2021,49(2):105-112. (in Chinese))

[16] 杜若愚,姚成,刘玉环,等. 基于蓄满超渗时空动态组合的网格新安江模型[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(6):25-32. (Du Ruoyu,Yao Cheng,Liu Yuhuan,et al. Grid-Xin' anjiang model based on spatio-temporal dynamic combination of saturation-excess and infiltration-excess runoff[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2022,50(6):25-32. (in Chinese))

[17] 张刚,解建仓,罗军刚. 洪水预报模型组件化及应用[J]. 水利学报,2011,42(12):1479-1486. (Zhang Gang,Xie Jiancang,Luo Jungang. Componentized model of flood forecast and its application[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2011,42(12):1479-1486. (in Chinese))

[18] 余宇峰,胡健伟,严琳,等. 水文模型的服务化封装方法研究与应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(4):34-41. (Yu Yufeng,Hu Jianwei,Yan Lin,et al. Research and application of service encapsulation method of hydrological model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(4):34-41. (in Chinese))

[19] 贺挺,李凤生,成建国,等. 水利部数字孪生流域模型管理云平台设计及应用研究[J]. 水利水电技术(中英文),2024,55(2):1-15. (He Ting,Li Fengsheng,Cheng Jianguo,et al. Design and application research of digital twin basin model platform of Ministry of Water Resources [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2024,55(2):1-15. (in Chinese))

[20] Kavetski D,Fenicia F. Elements of a flexible approach for conceptual hydrological modeling:2. Application and experimental insights[J]. Water Resources Research,2011,47:W11511.

[21] Boyle D P. Multicriteria calibration of hydrologic models[M]. Washington DC:The University of Arizona,2001.

[22] Perrin C,Michel C,Andréassian V. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation[J]. Journal of Hydrology,2003,279(1/2/3/4):275-289.

[23] Santos L,Thirel G,Perrin C. Continuous state-space representation of a bucket-type rainfall-runoff model:a case study with the GR4 model using state-space GR4 (version 1. 0) [J]. Geoscientific Model Development,2018,11(4):1591-1605.

[24] 芮孝芳. 论流域水文模型[J]. 水利水电科技进展,2017,37(4):1-7. (Rui Xiaofang. Discussion of watershed hydrological model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2017,37(4):1-7. (in Chinese))

[25] 芮孝芳. 对流域水文模型的再认识[J]. 水利水电科技进展,2018,38(2):1-7. (Rui Xiaofang. More discussion of watershed hydrological model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2018,38(2):1-7. (in Chinese))

[26] 黄鹏年. 灵活架构水文模型的研制与应用[D]. 南京:河海大学,2016.

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.03.003

基于断面数据生成虚拟水尺的河道水位视觉测量方法

汪崎宇¹, 张 振^{1,2}, 张田雨¹, 王嘉诚¹

(1. 河海大学信息科学与工程学院; 2. 水利部水循环与水动力系统重点实验室)

摘要:为解决岸基摄像机在高洪期因水尺易被漂浮物缠绕、损坏而导致水位监测精度低、可靠性差的问题,基于单目视觉摄影测量原理,建立了图像水位线像素纵坐标与实际水位的映射关系,采用金字塔场景解析网络对水体与河岸进行语义分割,同时结合断面地形数据构建虚拟水尺,将水位线像素纵坐标转换为实际水位。实例验证结果表明:水位线检测的均方根误差小于 2 像素,通过合理的摄像机选型控制成像的高程空间分辨率,可使水位测量精度优于 2 cm;本文方法采用岸基倾斜布设,无需实体水尺与地面控制点,实现了完全非接触式水位在线监测,具有运维成本低、鲁棒性强、结果直观等优点,适用于天然河道、人工明渠等不规则断面场景。

关键词:水位测量;虚拟水尺;图像语义分割;水位线检测;深度学习

Visual measurement method of water level in rivers based on virtual water gauge generated by cross-section data

Wang Qiyu¹, Zhang Zhen^{1,2}, Zhang Tianyu¹, Wang Jiacheng¹

(1. College of Information Science and Engineering, Hohai University;

2. Key Laboratory of Hydrologic-Cycle and Hydrodynamic-System of Ministry of Water Resources)

Abstract: To address the problem of low accuracy and poor reliability of water level monitoring caused by water gauges being easily entangled by floating debris and damaged during flood periods under shore-based camera deployment, a mapping relationship between the pixel's vertical coordinate of the waterline in an image and the actual water level was established based on monocular photogrammetry. The pyramid scene parsing network was employed to perform semantic segmentation of water and riverbank regions. Meanwhile, cross-sectional terrain data were combined to construct a virtual water gauge, through which the pixel's vertical coordinate of the waterline was converted into the actual water level. Experimental results show that the root mean square error of waterline detection is less than 2 pixels. By properly selecting cameras to control the spatial resolution of imaging elevation, the accuracy of water level measurement can be better than 2 cm. With inclined shore-based camera deployment, the proposed method achieves fully non-contact online water level monitoring without requiring a physical water gauge or ground control points. It has the advantages of low operation and maintenance cost, strong robustness, and intuitive results and is applicable to irregular cross-sectional scenarios such as natural rivers and artificial open channels.

Key words: water level measurement; virtual water gauge; semantic segmentation of image; waterline detection; deep learning

水位测量是江河湖库水文监测的基础工作,及时、准确的水位测量对于水资源精细化管理和水灾害预警预报具有十分重要的意义^[1-3]。为了准确实时地测量水位,目前国内大多数水文监测站仍依赖传统的水位测量方法,主要包括人工测量和自动水位计测量。人工定时监测水尺获取水位虽然普遍,但该方法智能化程度低、准确性差,且在洪水等极端条件下存在安全隐患。在河流水文监测中,自动水位计测量技术可分为接触式和非接触式两类。接触式水位计(如浮子式水位计^[4]、压力式水位计^[5]、液介式超声波水位计)需要直接接触水体,容易受到水体环境因素的影响,导致测量故障或精度降低。非接触式水位计(如气介式超声波水位计^[6]、激光水位计^[7]、雷达水位计^[8])虽然避免了接触水体带来的问题,但是安装复杂,应用场景受限且成本较高。

随着计算机视觉技术的快速发展,基于视频监控的图像法水位测量逐渐成为研究热点。根据是否依赖物理水尺,该方法可分为两类:有水尺和无水尺。有水尺方法通过图像处理技术识别水尺信息,分为两种:

基金项目:江苏省水利科技项目(2021070)

作者简介:汪崎宇(1999—),男,硕士研究生,主要从事信息获取与处理研究。E-mail:231323020017@hhu.edu.cn

通信作者:张振(1985—),男,副教授,博士,主要从事光电成像与多传感器系统、图像法测流技术研究。E-mail:zz_hhuc@hhu.edu.cn

①识别水尺上的刻度线和字符^[9-11],从而确定实际水位值;②检测水尺的水位线,并利用模板配准或映射关系计算实际水位值^[12-15]。有水尺方法精度较高,已在水文测量中得到初步应用。但其受光照条件、漂浮物遮挡等环境因素的影响较大,且需依赖水尺在固定环境中的稳定安装。相比之下,无水尺方法通过检测图像中的水位线推算水位,避免了对水尺的依赖,具有更广泛的适用场景,但现有技术仍存在诸多局限。无水尺方法的核心问题之一是如何检测水位线位置。基于传统图像处理的水位线检测方法^[16]在水面耀光、倒影及干湿分界线等干扰下表现不佳。部分研究尝试引入深度学习技术,通过语义分割模型^[17-18]提高水位线检测的鲁棒性。无水尺方法的另一个核心问题在于如何将检测的水位线坐标转换为实际水位值。例如:孙英豪等^[19-20]通过计算水位线与控制点之间的相对距离推算水位值,该方法采用线性插值计算水位,操作简便,适用于断面平整、地形规则的水岸边坡,然而该方法需要提前布设控制点并要求相机处于平视视角下,不适应复杂地形;Kim 等^[21-22]通过标定得到图像中像素点和世界坐标之间的透视转换关系,利用转换关系计算图像中水位线的实际水位值,该方法仍需特定条件下的多个控制点,在控制点布设困难的场景下适用性较差;石晗耀等^[23]采用双目相机的视差原理提取水域三维信息,利用相机的内外参数计算水位线的三维坐标,该方法标定复杂并且随着距离的增加可靠性会降低,在野外河道水位测量中难以适用。综上,这些方法通常依赖特定的控制点布设,在复杂地形中的适应性较差,且通常仅输出数值,缺乏直观性^[24-25]。

鉴于此,本文提出一种基于断面数据生成虚拟水尺的河道水位视觉测量方法。该方法融合单目视觉摄影测量原理与深度学习语义分割技术,实现水位线高精度提取与虚拟水尺可视化。与传统水位测量方法相比,本文方法充分利用已有河道断面地形数据,无需布设实体水尺与地面控制点,可适用于复杂、不规则河道断面。通过宽断面天然河道与窄断面人工渠道两组对比实验,验证了所提方法的有效性,并对测量精度与误差来源进行了系统分析与评估。

1 测量方法

水位测量的基本流程如图 1 所示,具体步骤如下:①对采集图像进行畸变校正;②结合断面地形数据,根据水位线像素纵坐标与实际水位间可逆的关系,建立倾斜视角下的水位摄影测量模型;③选取包含水位最大变幅区域的感兴趣区域(region of interest, ROI)进行数据集构建;④训练金字塔场景解析网络(pyramid scene

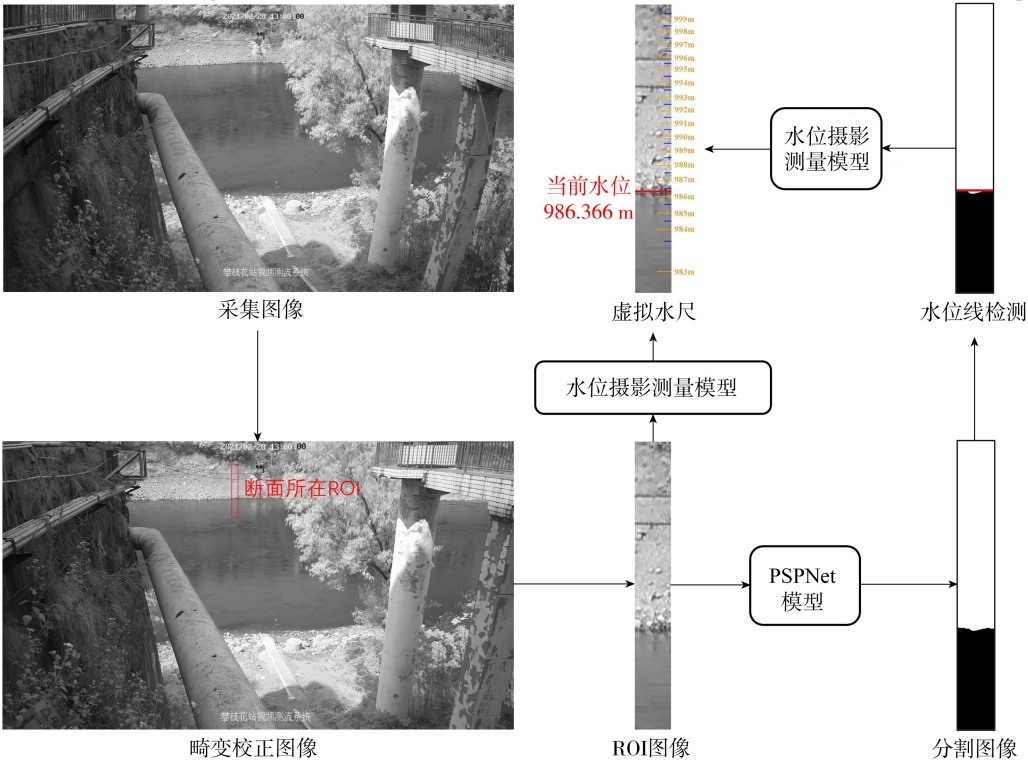


图 1 水位测量的基本流程

Fig. 1 Basic process of water level measurement

parsing network, PSPNet)模型,并对待测图像进行语义分割;⑤通过图像分割结果,确定水位线的像素纵坐标;⑥利用水位摄影测量模型在 ROI 图像中生成虚拟水尺,将水位线的像素纵坐标换算成实际水位,并在虚拟水尺中显示。

1.1 倾斜视角下的水位摄影测量模型

1.1.1 成像模型校准

由于镜头的畸变会导致图像变形,在测量之前先进行成像模型校准。校准过程采用平面棋盘格法,获取相机内参和畸变参数,完成图像的畸变校正。其内参矩阵 K 和畸变参数矩阵 D 如下:

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & C_x \\ 0 & f_y & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$D = (k_1, k_2, p_1, p_2) \tag{2}$$

式中: C_x 、 C_y 分别为相机像主点在 x 、 y 方向上的像素坐标,像主点是相机光轴与成像平面的交点,其位置通常接近图像中心; f_x 、 f_y 分别为 x 、 y 方向上的等效焦距; k_1 、 k_2 为径向畸变系数; p_1 、 p_2 为切向畸变系数。设 (x, y) 为无畸变的图像坐标, (x', y') 为畸变图像坐标,采用式(3)进行校正。校正后的图像能反映实际几何关系,为后续的水位测量奠定基础。

$$\begin{cases} x' = x(1 + k_1r^2 + k_2r^4) + 2p_1y + p_2(r^2 + 2x^2) \\ y' = y(1 + k_1r^2 + k_2r^4) + 2p_2x + p_1(r^2 + 2y^2) \end{cases} \tag{3}$$
$$r^2 = x^2 + y^2$$

其中

1.1.2 倾斜视角下的中心透视投影模型

在实际水位测量中,相机通常以倾斜角度布设,因此建立了一种倾斜视角下的中心透视投影模型,将图像中的水位线像素纵坐标映射到实际水位值,如图 2(a) 所示。在物平面上以水流方向为 X 轴,断面方向为 Y 轴,高程为 Z 轴;将断面参考点(起点桩)作为 X 轴和 Y 轴的零点,黄海高程零点作为 Z 轴零点; (X_c, Y_c, Z_c) 为相机光心的世界坐标。通过对齐断面和调整云台,设置相机的横滚角和方位角为零,俯仰角 ω 为相机主光轴和物平面间的夹角,采用基于断面水位线定向的摄像机姿态角标定方法^[26]获取。

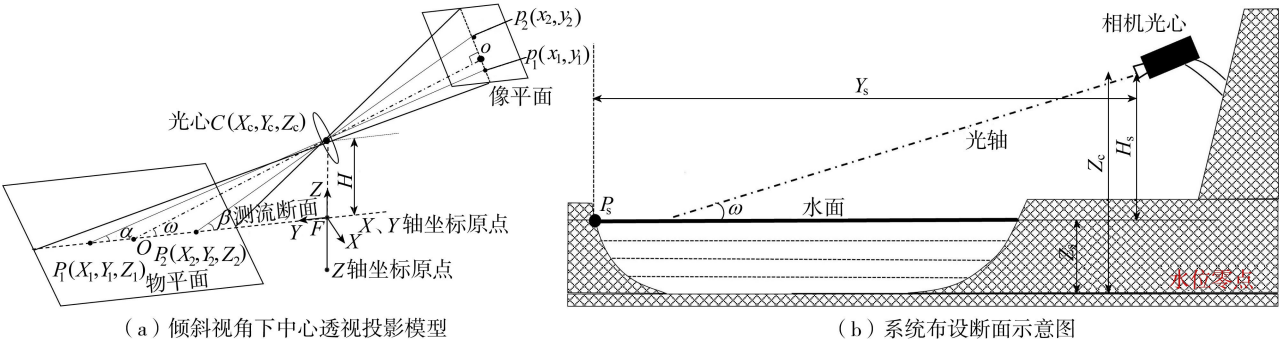


图 2 系统布设方案示意图

Fig.2 Schematic diagram of system layout

模型中物点 P , 光心 C 和像点 p 位于同一直线上,像主点 o 位于图像的正中间位置,坐标为 (x_o, y_o) 。像平面坐标 (x, y) 可用对应的像素坐标 (i, j) 表示:

$$\begin{cases} x = si \\ y = sj \end{cases} \tag{4}$$

式中: s 为图像传感器的像元尺寸。当物距远大于像距时,焦距和像距近似相等,焦距 f 可通过 f_x 、 f_y 计算得到:

$$f = s(f_x + f_y)/2 \tag{5}$$

当物点 P 的起点距大于 O 点起点距,即图 2(a) 中 P_1 点位置时。射线 P_1C 和射线 P_1O 的夹角为 α , P_1 在像平面上的投影点为 p_1 , H 为相机光心到物平面间的垂直距离, F 为对应的垂足点。由三角关系有:

$$\alpha = \omega - \arctan \left[s \left(\frac{n}{2} - j_1 \right) / f \right] \quad (6)$$

式中: n 为图像的高; j_1 为投影点 p_1 的像素纵坐标,可由像平面坐标 y 根据式(4)换算得到。

因为 $\tan \alpha = H/Y_1$,因此 H 可表示为:

$$H = Y_1 \tan \left\{ \omega - \arctan \left[s \left(\frac{n}{2} - j_1 \right) / f \right] \right\} \quad (7)$$

当物点 P 的起点距小于 O 点起点距,即图2(a)中 P_2 点位置时。同 P_1 点计算过程可得

$$H = Y_2 \tan \left\{ \omega + \arctan \left[s \left(j_2 - \frac{n}{2} \right) / f \right] \right\} \quad (8)$$

由于反正切函数是奇函数,所以对于 P_1 和 P_2 ,均可得到:

$$H = Y \tan \left\{ \omega + \arctan \left[s \left(j - \frac{n}{2} \right) / f \right] \right\} \quad (9)$$

如图2(b)所示,设水面与断面的交点 P_s 所对应的起点距和高程分别为 Y_s 和 Z_s ,以水面作为物平面,则相机光心到水面的垂直距离 $H_s = Z_c - Z_s$,由式(9)可得水位高程为:

$$Z_s = Z_c - Y_s \tan \left\{ \omega + \arctan \left[s \left(j_s - \frac{n}{2} \right) / f \right] \right\} \quad (10)$$

式中: j_s 为水位线的像素纵坐标。

根据物像变换的单源性,水位线像素纵坐标可唯一映射为实际水位值。当水岸垂直时,待测水位线的起点距 Y_s 为定值,可以直接代入水位线像素坐标计算水位值。若断面地形总体存在多个不同比降,需结合断面地形数据确定起点距与高程的关系,河流断面地形数据如图3所示。图中 Y_k 为断面 k 地形数据点对应的起点距, Z_k 为断面 k 对应的高程。 Y_s 为待测点 P_s 的起点距, Z_s 为待测水位点对应的水位高程,可以通过线性关系得到待测水位线的起点距:

$$Y_s = Y_k + \frac{(Z_s - Z_k)(Y_{k+1} - Y_k)}{Z_{k+1} - Z_k} \quad (11)$$

将式(11)代入式(10),得水位高程 Z_s (水岸垂直时亦满足):

$$Z_s = \left[Z_c + \frac{Z_k(Y_{k+1} - Y_k)g}{Z_{k+1} - Z_k} - Y_k g \right] (Z_{k+1} - Z_k) / [Z_{k+1} - Z_k + (Y_{k+1} - Y_k)g] \quad (12)$$

其中

$$g = \tan \left\{ \omega + \arctan \left[s \left(j_s - \frac{n}{2} \right) / f \right] \right\}$$

1.2 基于 PSPNet 模型的水位线检测方法

1.2.1 PSPNet 模型

水位线检测是测量的核心环节,直接决定水位测量的精度。传统方法在复杂环境(如光照变化和干湿分界线模糊)下表现不佳。为提高精度,采用 PSPNet 模型进行图像语义分割。PSPNet 模型通过聚合不同区域的上下文信息,在分割过程中捕捉全局细节,增强了对周围特征的提取能力,从而有效提高了分割精度。模型的输入为原图裁剪后的 ROI 图像,在特征提取阶段,图像经过四次下采样,尺寸被压缩至原始大小的 1/16,通过膨胀卷积扩大感受野。随后,16 倍下采样的特征图被输入金字塔池化模块,并划分为 4 组不同尺度进行池化,以提取全局与局部信息。池化后生成的特征图通过 1×1 卷积调整通道数至原始特征图的 1/4,保证与整体网络结构适配。随后,这些特征图通过双线性插值被上采样至原始尺寸,并与初始特征图拼接。拼接后,特征图经过 3×3 卷积进行特征整合,随后通过 1×1 卷积调整通道数。最终,特征图再次通过双线性插值上采样至输入图像大小,并由 Softmax 分类器完成像素级分类。PSPNet 模型结构如图 4 所示。

1.2.2 水位线检测

利用训练完成的 PSPNet 模型对待测 ROI 图像进行语义分割,生成二值图像。其中,河岸与水体的灰度

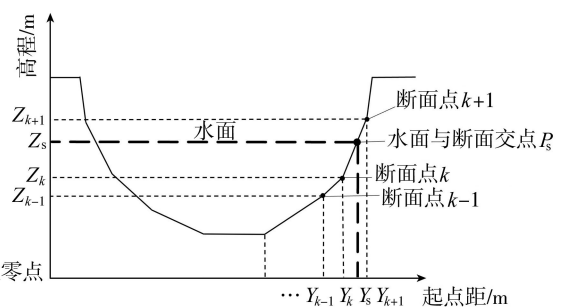


图3 河流断面地形数据

Fig. 3 River cross-section topography data

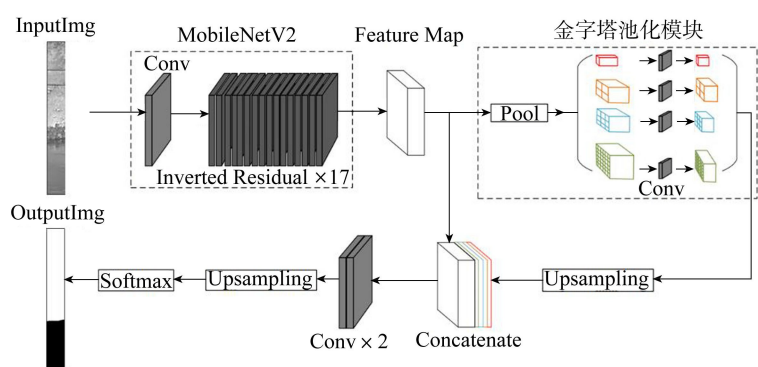


图 4 金字塔场景解析网络模型结构

Fig. 4 Model structure for pyramid scene parsing network

值分别设定为 255 和 0。通过逐列扫描图像,确定每列最后一个非零像素的位置,并计算其平均值,得到 ROI 图像中水位线像素纵坐标 v_s :

$$v_s = \sum_{w=1}^W v_w / W \tag{13}$$

其中

$$v_w = \max \{ r \mid I_{r,w} > 0, 1 \leq r \leq R \}$$

式中: $I_{r,w}$ 为 ROI 图像 I 在第 r 行第 w 列的像素值; W 为 ROI 图像的列数; R 为 ROI 图像的行数; v_w 为第 w 列中最后一个非零像素纵坐标。

将 v_s 转换到原始图像坐标系下,可得原图中水位线的像素纵坐标 j_s :

$$j_s = v_s + \Delta j \tag{14}$$

式中: Δj 为 ROI 图像左上角顶点在原图中的像素纵坐标偏移量。得到 j_s 后,将其代入式(12),即可计算得到对应的水位高程。

2 实例验证

通过两种典型场景下的试验验证所提方法的可行性与测量精度。测点 1 设于攀枝花水文站,用于检验本文方法在天然河道复杂地形及宽断面远距离测量条件下的性能;测点 2 选取河海大学金坛校区人工渠道,验证其在窄断面干湿分界线场景下的适用性。

2.1 测点 1

2.1.1 测站概况及试验设置

测点 1 位于四川省攀枝花市金沙江上的攀枝花水文站,是国家重要的报讯站和水文站,配备了缆道流速仪、双轨雷达流速仪、气泡式水位计等测流设备,同时具备人工校核的水位整编数据。河段断面宽约 200 m,断面控制条件较好。受上游水电站发电调度影响,河段水位变化频繁。为保障水文监测精度,需定期对断面地形进行复测。多次测量表明,断面形态总体变化不大,如图 5(a)所示。该测点环境较为复杂,存在水面耀光、倒影及干湿分界线模糊等现象。测量系统布设在河流右岸混凝土边坡上,如图 5(b)所示,摄像机固定于

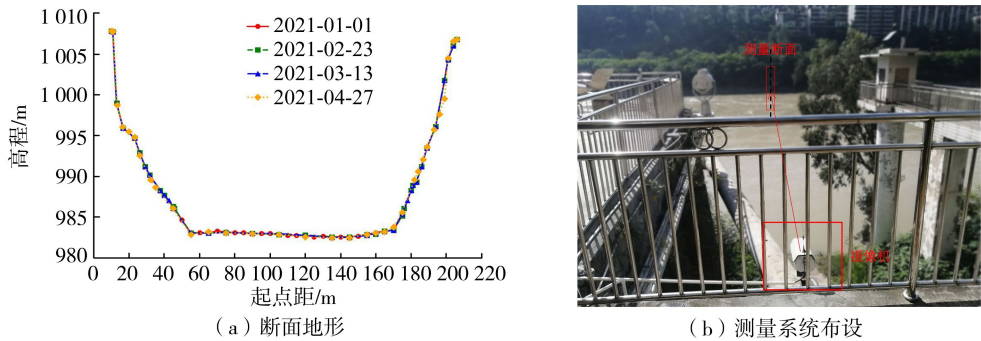


图 5 测点 1 断面地形及测量系统布设

Fig. 5 Cross-section topography and measurement system layout at measurement point 1

悬臂支架,选用海康威视 800 万像素枪式网络摄像机,安装位置的高程为 1 007.8 m,对应起点距为 2.906 m。试验中对摄像机进行内外参数标定,标定结果如下:图像宽 m 为 3 840 像素、 $n=2\,160$ 像素 $f_x=2\,876.507$ 像素、 $f_y=2\,884.631$ 像素、 $C_x=1\,947.382$ 像素、 $C_y=1\,043.743$ 像素、 $k_1=-0.407$ 、 $k_2=-0.217$ 、 $p_1=0.001$ 、 $p_2=0$ 、 $\omega=19.761^\circ$

2.1.2 数据集构建和 PSPNet 模型训练

试验选取水位线较为清晰的对岸区域作为检测对象,在畸变校正后图像中设置 400 像素×50 像素的 ROI 图像,如图 6(a)所示。该 ROI 图像覆盖水位范围为 983~999.5 m,将高程值每隔 0.5 m 带入水位摄影测量模型,换算为像素坐标,生成虚拟水尺,如图 6(b)所示。

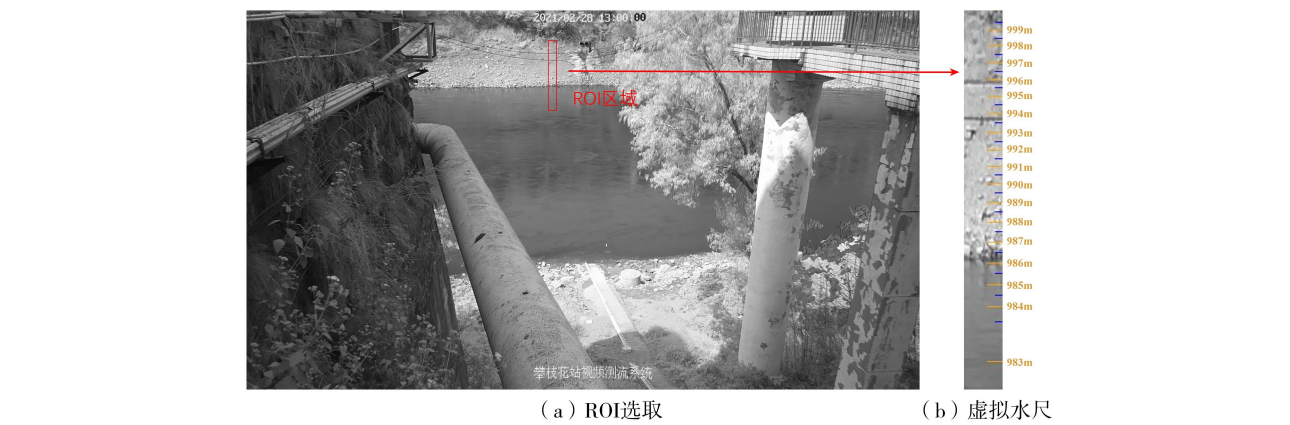


图 6 测点 1 的 ROI 选取及虚拟水尺生成

Fig. 6 Selection of ROI and generation of virtual water gauge at measurement point 1

数据集包括 2021 年 1—4 月在多种水文条件下采集的 2 874 张图像,训练集和测试集以 4 : 1 划分,分别包含 2 299 张与 575 张图像,水位范围为 986.15~993.48 m,并使用 Labelme 工具标注生成语义分割标签图。基于 Pytorch 框架对 PSPNet 模型进行端到端训练,输入和输出都为 400 像素×50 像素的图像。训练共迭代 100 次,前 50 次学习率为 0.000 1, Batch_size 为 16,后 50 次学习率调整为 0.000 01, Batch_size 为 8。

2.1.3 结果分析

试验选取该测点 2021 年 2 月 28 日每隔 1 h 的 24 组连续观测数据进行验证,该日干湿分界线特征明显,包括晴天、阴天和黑夜等多种光照变化,水位范围为 986.23~988.84 m,所使用的断面数据为 2021 年 2 月 23 日测量。将本文方法测量结果与水文站水位计实测值进行对比分析(图 7),均方根误差(RMSE)为 0.1 m,绝对误差小于 0.1 m 的数据量占比为 70.83%,小于 0.02 m 的仅占 25%。进一步分析发现,误差主要来源于以下两方面:①水位线检测误差。PSPNet 模型在水位线检测中存在一定误差。以人工获取的水位线像素坐标为参考基准,水位线检测结果的均方根误差为 1.69 像素。图 8 为水位线区域分割的整体可视化结果,图 8(a)中红色线条为模型检测水位线。在夜间弱光照时段(5:00—7:00、17:00—21:00)与白天强光反射及强烈倒影时段(9:00—11:00),受水位涨落与光照变化共同作用,干湿分界线特征复杂多变;同时受限于数据集标注规模及人眼标注本身存在的误差,上述时段检测的随机误差较大,难以有效控制。②高程空间分辨率的限制。由图 9 可知,高程空间分辨率受断面地形显著影响,高程与起点距的斜率越小,空间分辨率越小;斜率越大,空间分辨率越大。这是因为斜率较小时,高程变化较缓,被更多像素分摊;而斜率较大时,高程变化集中,每像素的高程变化值相应增大。在比测的高程范围 986.23~988.84 m,高程空间分辨率范围为 4~5 cm/像素,而该测点水位线检测均方根误差为 1.69 像素,导致最终水位测量误差较大。

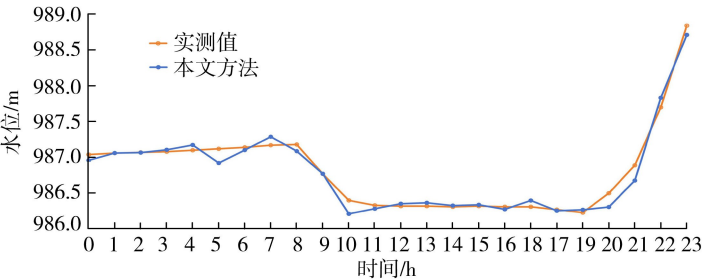


图 7 测点 1 水位比测

Fig. 7 Water level comparison at measurement point 1

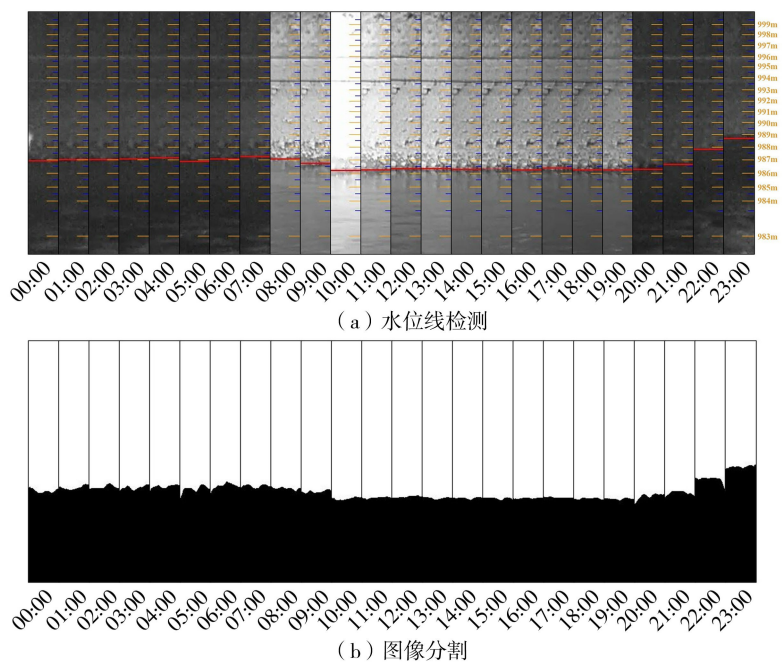


图 8 测点 1 水位线检测和分割

Fig. 8 Waterline detection and segmentation at measurement point 1

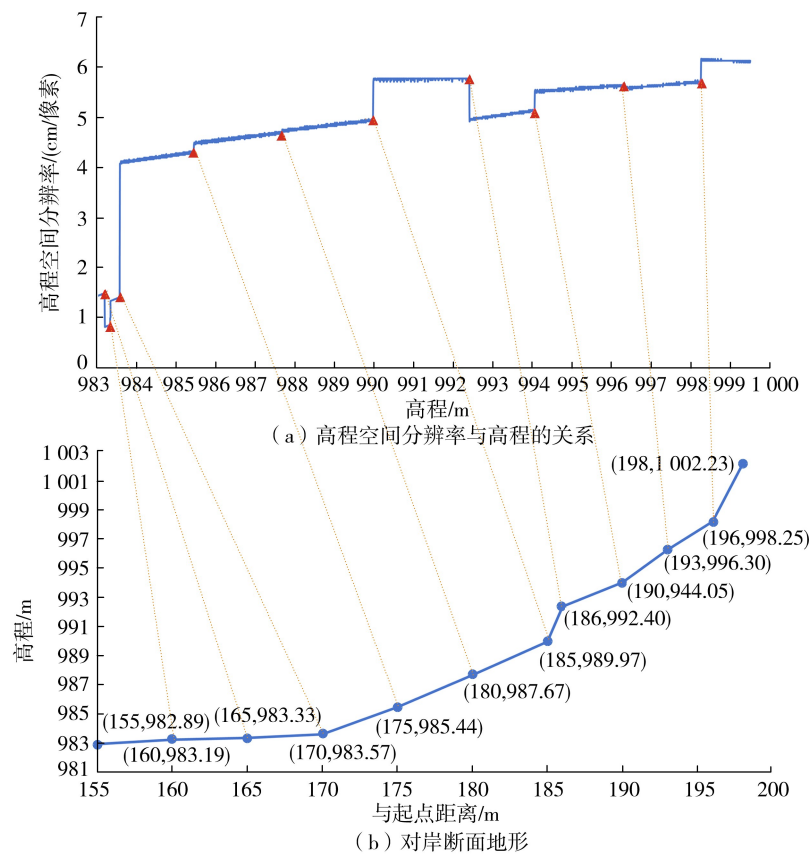


图 9 测点 1 高程空间分辨率与断面地形的关系

Fig. 9 Relationship between spatial resolution of elevation and cross-sectional topography at measurement point 1

2.2 测点 2

2.2.1 测站概况及试验设置

测点 2 位于河海大学金坛校区内人工渠道,该测点断面垂直,干湿分界线清晰,通过布设的物理水尺获取比测真值,现场的断面地形和测量系统布设如 10 所示。相机安装高程为 8.40 m,起点距为 0 m,内外参数

标定结果如下: $m=2560$ 像素、 $n=1440$ 像素、 $f_x=4201.030$ 像素、 $f_y=4150.197$ 像素、 $C_x=1322.558$ 像素、 $C_y=813.354$ 像素、 $k_1=-0.246$ 、 $k_2=-3.948$ 、 $p_1=0.002$ 、 $p_2=0.001$ 、 $\omega=35.45^\circ$

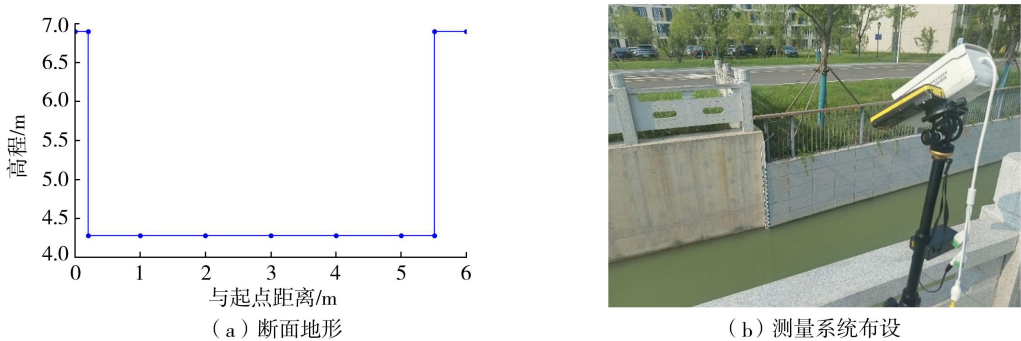


图 10 测点 2 断面地形及测量系统布设

Fig. 10 Cross-section topography and measurement system layout at measurement point 2

2.2.2 数据集构建和 PSPNet 模型训练

选取 ROI 图像覆盖水位 4.41~5.15 m,在 ROI 图像中生成虚拟水尺,如图 11 所示。由于该测点是临时搭建,且水位变化较小,通过垂直上下平移 ROI 图像模拟中低高水位,共采集 64 张标注图像用于训练。基于 Pytorch 框架对 PSPNet 模型进行端到端训练,输入和输出都为 400 像素×50 像素的图像。训练共迭代 100 次,学习率为 0.0001,Batch_size 为 8。

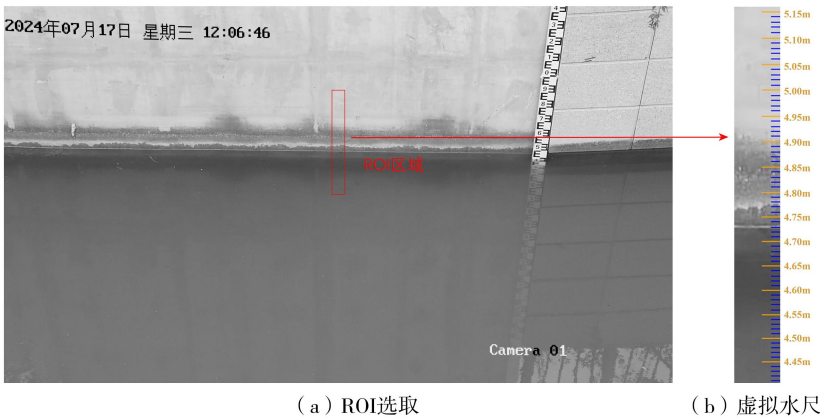


图 11 测点 2 的 ROI 选取及虚拟水尺生成

Fig. 11 Selection of ROI and generation of virtual water gauge at measurement point 2

2.2.3 结果分析

选取 2024 年 7 月 17 日 13:00—17:00 每 30 min 的 9 组连续观测数据,人工读取水尺作为真值。水位线区域的分割结果和水位线检测结果如图 12 所示,水位线检测均方根误差为 1.20 像素,对应水位测量均方根误差为 0.4 cm。选取 ROI 图像对应的高程空间分辨率介于 0.18~0.20 cm/像素之间,在这一条件下,水位测量不仅满足 2 cm 的精度要求,还实现了毫米级的高精度。

3 结 语

提出了一种采用断面数据生成虚拟水尺的河道水位视觉测量方法。该方法通过水位线像素纵坐标与断面地形数据建立可逆的水位摄影测量模型,从而实现水位线像素纵坐标到实际水位的精确映射。采用 PSPNet 模型对图像进行语义分割,在水面耀光、倒影及干湿分界线模糊等复杂环境下有效检测水位线,最终在图像中生成虚拟水尺及水位线,实现测量结果的可视化。该方法利用断面地形数据,无需布设水尺或控制点,适用于断面水位线清晰可见的场景,在天然河道和人工渠道中均表现出较高的精度和适用性。测点 1 的天然河道复杂环境中,水位线检测均方根误差为 1.69 像素,对应水位测量均方根误差为 10 cm,检测精度受环境光照条件和高程空间分辨率影响较大。测点 2 的人工渠道环境中,水位线检测均方根误差为 1.20 像素,对应水位测量均方根误差为 0.4 cm,达到了毫米级精度。该方法具有运维成本低,鲁棒性强,结

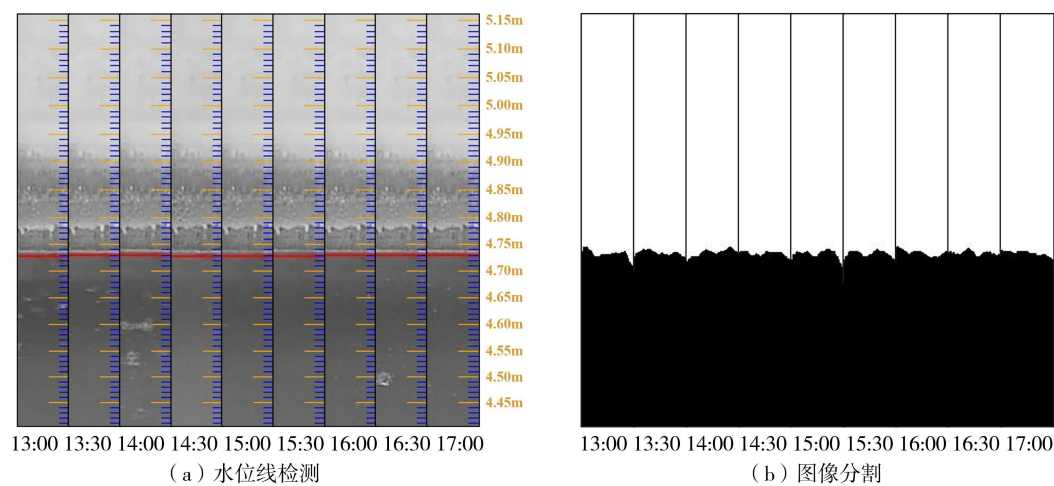


图 12 测点 2 水位线检测和分割结果

Fig. 12 Waterline detection and segmentation results at measurement point 2

果直观等优势。通过合理的摄像机选型来控制成像的高程空间分辨率可以使水位测量精度控制在 2 cm 以内。本文方法适用于天然河流和人工明渠等不规则监测断面。其中,天然河流场景更适用于断面形态相对稳定或能够通过水文站常规测流工作及时更新断面数据的测站;人工明渠场景由于断面形态稳定,具有更好的应用便利性和推广性。本文方法可与大尺度粒子图像测速法(LSPIV)、时空图像测速法(STIV)结合,基于单台摄像机实现完全非接触式的水位、流速、流量在线监测。然而,本文方法仍存在一定的局限性,例如在高程变化较小的宽断面地形中,受摄像机焦距、倾斜角度和图像分辨率影响,高程空间分辨率可能限制精度提升。此外,夜间低光照、强烈倒影和水面耀光等环境条件下,语义分割模型的鲁棒性仍需进一步优化。未来研究将重点分析误差来源,如断面高程梯度、摄像机参数、图像分辨率等,并建立完善的测量不确定性评估体系,以进一步提升方法的精度和适用性。

参考文献:

[1] Naderi M. Assessing level of water resources management based on water supply and availability concepts[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 305: 127086.

[2] 栾清华,秦志宇,王东,等. 城市暴雨道路积水监测技术及其应用进展[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 106-116. (Luan Qinghua, Qin Zhiyu, Wang Dong, et al. Review on monitoring technology of urban road waterlogging after rainstorm and its application[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 106-116. (in Chinese))

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

[4] 陈顺胜,周珂,吕忠烈. 浮子式水位计进水口改良研究[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(10): 3103-3104. (Chen Shunsheng, Zhou Ke, Lyu Zhonglie. Study on the water inlet of float-type stage gauge[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2014, 42(10): 3103-3104. (in Chinese))

[5] 丰建勤. 压力式水位计应用及精度分析[J]. 海洋测绘, 2002, 22(2): 52-54. (Feng Jianqin. The application of the pressure-type water gauge and its precision analysis[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2002, 22(2): 52-54. (in Chinese))

[6] 马娟,张振,严锡君,等. 一种基于 ZigBee 技术的河工模型超声波水位计的设计[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(2): 89-94. (Ma Juan, Zhang Zhen, Yan Xijun, et al. Design of ZigBee-based ultrasonic water gauge for river model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(2): 89-94. (in Chinese))

[7] 唐馨. 激光水位计在红水河都安水文站的应用[J]. 广西水利水电, 2012(6): 4-5. (Tang Xin. Application of laser water level gauge at Duan hydrological station on Hongshui River[J]. Guangxi Water Resources & Hydropower Engineering, 2012(6): 4-5. (in Chinese))

[8] 周冬生,宗军,张恒. 大量程大变率高精度雷达水位计关键技术研究[J]. 水文, 2017, 37(1): 68-71. (Zhou Dongsheng, Zong Jun, Zhang Heng. Key technology of radar water-level gauge with wide range and high precision[J]. Journal of China Hydrology, 2017, 37(1): 68-71. (in Chinese))

[9] Chen Guijun,Bai Kejia,Lin Zhengchun,et al. Method on water level ruler reading recognition based on image processing[J]. Signal,Image and Video Processing,2021,15(1):33-41.

[10] 房爱印,王永贤,尹曦萌,等. DetSegNet:一种基于检测和分割的高精度水尺水位检测网络[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(2):28-34. (Fang Aiyin,Wang Yongxian,Yin Ximeng,et al. DetSegNet:a high-precision water gauge level detection network based on detection and segmentation[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(2):28-34. (in Chinese))

[11] Lin F,Chang Wenyi,Lee L C,et al. Applications of image recognition for real-time water level and surface velocity[C]//2013 IEEE International Symposium on Multimedia. Anaheim:IEEE,2013:259-262.

[12] 张文静,张振,黄剑,等. 基于图像语义分割的水位智能监测方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):24-30. (Zhang Wenjing,Zhang Zhen,Huang Jian,et al. Intelligent water-level monitoring method based on image semantic segmentation [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(5):24-30. (in Chinese))

[13] 张振,周扬,王慧斌,等. 标准双色水尺的图像法水位测量[J]. 仪器仪表学报,2018,39(9):236-245. (Zhang Zhen,Zhou Yang,Wang Huibin,et al. Image-based water level measurement with standard bicolor staff gauge [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2018,39(9):236-245. (in Chinese))

[14] Kim J D,Han Y J,Hahn H S. Image-based water level measurement method under stained ruler[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation,2010,1(1):28-31.

[15] 李翊,兰华勇,严华. 基于图像处理和 BP 神经网络的水位识别研究[J]. 人民黄河,2015,37(12):12-15. (Li Yi,Lan Huayong,Yan Hua. Research on water-level recognition based on image processing and BP artificial neural network technology [J]. Yellow River,2015,37(12):12-15. (in Chinese))

[16] 鲍江,陶青川,张鹏. 基于图像处理的水位线检测算法[J]. 水电能源科学,2015,33(4):96-99. (Bao Jiang,Tao Qingchuan,Zhang Peng. Image processing based water level detection algorithm[J]. Water Resources and Power,2015,33(4):96-99. (in Chinese))

[17] 曹文卓,王太固,徐兵,等. 基于语义分割的船闸水位检测方法研究[J]. 仪器仪表学报,2023,44(2):238-247. (Cao Wenzhuo,Wang Taigu,Xu Bing,et al. Research on water level detection of ship lock based on semantic segmentation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2023,44(2):238-247. (in Chinese))

[18] 程淑红,赵考鹏,张仕军,等. 基于 U-net 的水位线检测[J]. 计量学报,2019,40(3):361-366. (Cheng Shuhong,Zhao Kaopeng,Zhang Shijun,et al. Water level detection based on U-net[J]. Acta Metrologica Sinica,2019,40(3):361-366. (in Chinese))

[19] 孙英豪,丁勇,李登华,等. 基于图像识别的无标尺水位测量技术研究[J]. 水利水运工程学报,2023(4):91-97. (Sun Yinghao,Ding Yong,Li Denghua,et al. Research on measuring technique of water level without scale based on image recognition [J]. Hydro-Science and Engineering,2023(4):91-97. (in Chinese))

[20] 孙传猛,魏宇,李欣宇,等. 复杂场景下无水尺水位的影像水位反演智能检测方法[J]. 测绘学报,2024,53(3):558-568. (Sun Chuanmeng,Wei Yu,Li Xinyu,et al. Intelligent detection method of image water level inversion for water level without water scale in complex scenes[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2024,53(3):558-568. (in Chinese))

[21] Kim K,Lee N K,Han Y,et al. Remote detection and monitoring of a water level using narrow band channel[C]//Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Signal Processing,Robotics and Automation. Corfu:World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS),2007:25-30.

[22] 聂鼎,张龔,刘毅,等. 基于图像处理的小型水库水位测量方法[J]. 水电能源科学,2019,37(11):28-32. (Nie Ding,Zhang Yan,Liu Yi,et al. Water level measurement method of small reservoir based on image processing[J]. Water Resources and Power,2019,37(11):28-32. (in Chinese))

[23] 石晗耀,陶青川. 基于双目视觉的水位测量算法[J]. 现代计算机,2017(8):55-59. (Shi Hanyao,Tao Qingchuan. Water level measurement based on binocular vision[J]. Modern Computer,2017(8):55-59. (in Chinese))

[24] Chen Juifa,Liao Yuting,Wang Pochun. Development and deployment of a virtual water gauge system utilizing the ResNet-50 convolutional neural network for real-time river water level monitoring;a case study of the Keelung River in Taiwan[J]. Water,2023,16(1):158.

[25] Seibert J,Strobl B,Etter S,et al. Virtual staff gauges for crowd-based stream level observations[J]. Frontiers in Earth Science,2019,7:70.

[26] 张振,姜天生,赵丽君,等. 基于断面水边线定向的视频测流摄像机标定[J]. 电子与信息学报,2024,46(4):1428-1437. (Zhang Zhen,Jiang Tiansheng,Zhao Lijun,et al. Camera calibration using cross-section waterline orientation for video-based flow measurement[J]. Journal of Electronics & Information Technology,2024,46(4):1428-1437. (in Chinese))

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.03.004

基于盘古气象大模型的台风路径及台风浪 波高预报研究

胡正元^{1,2}, 冯曦^{1,2}, 冯卫兵^{1,2}, 倪兴也^{1,2}, 秦知朋¹, 吴浩宇¹

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院; 2. 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室)

摘要: 利用盘古气象大模型对台风天气下的地表气象要素以及高空气象要素进行预报, 结合热带气旋追踪算法对台风路径进行预报研究; 基于盘古气象大模型的路径预报结果和直接修正法改进的预报风场数据驱动 SWAN 模式, 将计算得到的有效波高数据与实测数据进行对比验证, 评估该模型在广东和海南岛台风路径及台风浪预报的效果。结果表明: 盘古气象大模型能够实现长时台风路径预报, 且结果优于高分辨率的数值大气模式(ECMWF-HRES), 但盘古气象大模型对台风风场存在低估现象; 将盘古气象大模型预报的台风路径与直接修正法改进的台风风场相结合, 以此驱动波浪场, 能有效提高台风浪波高的预报精度。

关键词: 盘古气象大模型; 台风路径预报; 台风浪; 波高预报; 热带气旋追踪算法

Research on prediction of typhoon tracks and typhoon wave heights based on Pangu-Weather

Hu Zhengyuan^{1,2}, Feng Xi^{1,2}, Feng Weibing^{1,2}, Ni Xingye^{1,2}, Qin Zhipeng¹, Wu Haoyu¹

(1. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University;

2. Key Laboratory of Coastal Disaster and Protection of Ministry of Education, Hohai University)

Abstract: Surface meteorological elements and upper-air meteorological elements under typhoon weather conditions were predicted using Pangu-Weather, and the prediction of typhoon tracks was studied combined with the tropical cyclone tracking algorithm. The SWAN model was driven based on the typhoon track prediction results of Pangu-Weather and the predicted wind field data improved by a direct correction method. The calculated significant wave height data were compared with the measured data for verification, thereby evaluating the effectiveness of the model in predicting typhoon tracks and typhoon waves in Guangdong Province and Hainan Island. The results indicate that Pangu-Weather can achieve long-term typhoon track prediction, and the results are superior to those of the high-resolution numerical atmospheric model (ECMWF-HRES), but Pangu-Weather underestimates the typhoon wind field. Combining the typhoon track predicted by Pangu-Weather with the typhoon wind field improved by the direct correction method to drive the wave field can effectively improve the prediction accuracy of typhoon wave heights.

Key words: Pangu-Weather; typhoon track prediction; typhoon wave; wave height prediction; tropical cyclone tracking algorithm

台风是一种具有超强破坏力的气旋系统, 西北太平洋每年生成约占全球总数 1/3 的台风^[1-2]。台风的发生通常伴随着狂风、巨浪、风暴潮以及暴雨等直接灾害, 同时带来衍生的滑坡、泥石流等次生灾害, 对海上作业、航运、海岸工程、海洋渔业和水产养殖业等造成严重破坏, 对人民的生命财产和生产生活造成严重威胁。准确预报台风路径以及台风浪灾害, 对减少台风灾害损失, 保障海上航运及海洋工程安全施工与运行, 维持海洋经济持续健康发展意义重大^[3-6]。

传统台风路径预报方法主要有主观经验预报方法与客观预报方法。主观经验预报方法受研究人员主观经验的影响, 且效率较低; 客观经验预报方法需要巨大的计算资源, 同时难以提取台风的三维非线性特征, 这使其在台风防灾预报中的作用受到制约^[7-9]。近年来, 随着人工智能技术的发展, 机器学习算法在处理高维非线性数据上优势更加明显, 更适合复杂特征数据的提取与学习, 已有不少研究者将机器学习算法应用于台风预报领域^[10]。曹祥村等^[11]利用 CLIPER 方法建立回归模型并筛选出经纬度、中心气压等相关性好的因子

基金项目: 装备预研教育部联合基金项目(8091B022123); 江苏省水利科技项目(2022023); 港口航道泥沙工程交通行业重点实验室开放课题项目(YK223001-3); 国家自然科学基金项目(52471282)

作者简介: 胡正元(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事海岸水动力研究。E-mail: 221303020014@hhu.edu.cn

通信作者: 冯曦(1987—), 女, 教授, 博士, 主要从事海岸水动力和海岸带灾害研究。E-mail: xifeng@hhu.edu.cn

作为 BP 网络的输入因子,研究表明在 24、48、72 h 的预报结果上 BP 神经网络的预报精度都要高于传统的 CLIPER 方法。Wang 等^[12]对比不同深度学习模型在西北太平洋台风短期预报的效果,发现使用门控循环单元模型(GRU)与卷积神经网络(CNN)相结合的模型最优,其中 6、12 h 的平均位置误差分别为 17.22、43.90 km,同时加入转向流、海表温度与位势高度数据进行训练,可以逐渐改善 24~72 h 的预报精度。邓志弘等^[13]针对珠江河口搭建了一种基于卷积-长短期记忆神经网络(CNN-LSTM)和误差校正(EC)技术的台风实时预报模型,结果发现基于 CNN-LSTM-EC 的滚动预报结果更加准确。此外,AI 气象模型 FourCastNet 达到了与 ECMWF 的综合预报系统(IFS)相同的空间分辨率($0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$),同时实现了对飓风“迈克尔”路径的集合预报,预报时长达到 96 h^[14]。2022 年底,DeepMind 和谷歌研究团队联合推出基于图神经网络的自回归天气预报模型 GraphCast,研究表明 GraphCast 在 18~114 h 的热带气旋路径预报结果优于欧洲中期天气预报中心的高精度预报结果^[15]。

机器学习方法已被广泛应用于波浪预报中。沈晖华等^[16]建立了基于 Stacking 集成机器学习的波浪预报算法,该算法建立了精确的风速与有效波高相关关系,可以准确预测波高变化。Feng 等^[17]利用 LSTM 和 GRU 网络分别在渤海、东海和南海 3 个不同的海域建立了有效波高预测模型,结果表明,基于 LSTM 和 GRU 网络的性能优于传统的 RNN 神经网络,利用 EMD 方法并结合 LSTM 神经网络能够改善 12 h 和 24 h 的预报结果。罗锋等^[18]利用 SWAN 模型模拟的有效波高数据训练多层感知机、随机森林和支持向量回归 3 个模型,同时引入空间性特征对算法输入进行改进,结果表明,改进后的模型显著提高了台风浪波高的预报精度,可用于台风浪的短期预报。

现阶段基于机器学习算法的台风路径预报受限于模型本身的能力,在短期预报中的表现较优,但模型极限预报时长通常在 24~36 h,难以实现长时(72~120 h)台风路径预报。在波浪预报中,以常风浪的预报为主,针对台风浪的预报研究较少且预报时长较短。为了克服以上研究的不足,本文利用华为云团队开发的人工智能大模型(盘古气象大模型)并结合热带气旋追踪算法实现长时台风路径预报。盘古气象大模型是华为云团队依托强大的计算资源与海量数据训练得到的气象大模型,在预报精度与计算速度上有了极大的提升^[19-20]。本文利用直接修正法对盘古气象大模型的预报风场进行修正,通过修正后的台风风场数据驱动 SWAN 模型计算得到的波高数据(即为预报波高数据),并评估盘古气象大模型在广东沿海以及海南岛台风路径预报与台风浪波高预报的效果。

1 数据与方法

1.1 数据来源

1.1.1 气象资料

本文采用的气象资料来自 ERA5 再分析数据集,ERA5 是由欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-range Weather Forecasts,ECMWF)开发的第五代再分析数据产品,其采用数据同化方法,每隔 12 h 将最新获取的观测数据与数值模型前期预报结果通过计算结合起来得到最佳大气预报结果,目前可以获取 1940 年以来的逐小时数据,空间分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ ^[21]。本文选用的是 ERA5 数据集中单级水平以及不同气压级水平的数据,气象变量包括地表变量和高空变量。其中地表变量包含单级水平下的平均海平面气压、10 m 高度 U 风速、10 m 高度 V 风速和 2 m 高度温度,高空变量包含 13 个不同气压级水平(50、100、150、200、250、300、400、500、600、700、850、925、1000 hPa)的重力位势、比湿度、温度、U 风速以及 V 风速^[19]。本文下载台风发生时某个时刻全球范围内的气象资料作为盘古气象大模型的输入数据。

1.1.2 台风资料

实测台风资料来自中国气象局热带气旋资料中心的 CMA 最佳路径数据集,目前 CMA 热带气旋最佳路径数据集提供 1949 年以来西北太平洋海域热带气旋每 6 h 的位置(经纬度)以及强度(中心气压与最大风速)^[22-23]。本文还利用 ECMWF-HRES 模式以及 JMA 模式的台风路径预报数据。ECMWF-HRES 模式是一种基于高分辨率($9\text{ km}\times 9\text{ km}$)的大气预报模型,是当前最好的基于数值气象预报的热带气旋追踪方法之一。ECMWF-HRES 模式和 JMA 模式所需要的气旋预报数据可以从交互式全球大集合预报系统(THORPEX Interactive Grand Global Ensemble,TIGGE)中下载^[19],两种数值模式提供台风发生期间每日 0 时或 12 时向后预报的台风路径数据,数据检索时间范围从 2006 年至今。本文利用影响广东沿海以及海南岛的部分台风数

据来评估盘古气象大模型对台风路径预报的效果。

1.1.3 站点实测资料

本文选用美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的小时级实测站点资料,资料主要包含风速、风向、海平面气压以及降水等变量信息。实测波浪资料来源于广东沿海和海南岛部分实测站点以及外海浮标^[24-26]。以上风速资料与波浪资料均用于验证预报风场以及模拟波浪的精度。

1.2 研究方法

1.2.1 台风天气场预报

首先利用华为团队开发的盘古气象大模型进行台风期间的天气场信息预报,然后根据不同气象变量的空间分布信息去捕捉台风特征并进行台风路径预报。盘古气象大模型通过深度学习方法建立天气预报系统,使用 1979—2017 年的 ERA5 全球天气场数据作为训练数据,输入天气变量包括地表气象变量(平均海平面气压、10 m 高度 U 风速、10 m 高度 V 风速以及 2 m 高度温度)和高空气象变量(13 个不同气压层的重力位势、比湿度、温度、U 风速以及 V 风速)。盘古气象大模型使用区块嵌入降低空间分辨率,并将采样的数据组合成一个三维数据体。神经网络的主体部分是典型的编码器-解码器的架构,共包含 16 个采用 Swin Transformer 的基本计算单元(16 个模块),最后经过区块恢复将空间分辨率恢复至与输入数据一致^[27]。

盘古气象大模型超越数值模型的主要原因是其提出了采用适配地球坐标系统下的三维神经网络架构(3D Earth-Specific Transformer, 3DEST)来处理复杂不均匀的气象数据^[19]。3DEST 是视觉变换器(Vision Transformer)的一种变体,同时采用 Swin transformer 的滑窗注意力机制,有效减少了网络的计算量。

气象变量在不同经纬度地区以及不同高度层分布不均匀,盘古气象大模型引入了地球坐标系,将每个特征图上的像素都对应地球上的一个绝对位置,而普通的特征图的像素往往只包含一个相对位置,这使得神经网络中的每个神经元能够感知其绝对位置,进而加速了神经网络的收敛速度。基于二维神经网络的模型是将不同气压层的数据分开处理后拼接成整体再输出结果,而盘古气象大模型是将不同气压层的数据集中在一个单独的维度中进行处理,使得神经元能够感知高度信息。实验证明三维神经网络模型能够更好地捕捉不同气压层中气象要素之间的关系。

除了建立基于地球位置信息的三维神经网络,盘古气象大模型在进行预报时使用每次预报的结果作为下一步预报的输入。研究发现,预报误差随迭代次数的增加而增加,所以采用层次化时域聚合算法来减少预报迭代次数^[19],进而减少迭代误差。这是一种贪心算法,总是调用当前允许的最大预报时长的深度网络模型,可使迭代次数最小化。盘古气象大模型共包含 4 个不同提前时间(输入和输出之间的时间差)的模型,分别为 1 h 预报模型、3 h 预报模型、6 h 预报模型和 24 h 预报模型。4 种模型自由组合可以对未来任何时间(中期)的天气场进行预报研究。本文在进行台风天气预报时采用 24 h 预报模型与 6 h 预报模型组合的方式进行预报研究。盘古气象大模型基于 ERA5 再分析数据训练,采用适配地球坐标的三维 Transformer 架构,统一处理多气压层的气象变量。模型引入绝对地理位置编码,提升气象要素关联捕捉能力;采用层次化时域聚合策略,通过多时长预报模型组合减少迭代误差,预报精度与效率显著优于传统数值模式^[19]。

1.2.2 热带气旋追踪算法

本文根据盘古气象大模型预报的部分气象要素,结合热带气旋追踪算法,定位台风中心位置,得到台风中心的经纬度信息,实现台风路径预报。

首先设定起报时间和台风初始位置信息(经纬度),每 6 h 给定一个预报结果,将每次预报结果作为下一次预报的输入。图 1(a)为平均海平面气压的空间分布图,在每次预报结果中寻找以上一时刻台风位置为中心的 445 km 半径范围内的平均海平面气压的极小值,同时满足以该极小值位置为中心、以 278 km 为半径的范围内存在 850 hPa 处旋度的极大值,且该旋度的绝对值大于 5×10^{-5} ,如图 1(b)所示。同时 10 m 高度风速的最大值超过 8 m/s,如图 1(c)所示。其中平均海平面气压由盘古气象大模型直接预报,850 hPa 处的旋度由预报的 850 hPa 处的 U 风速和 V 风速计算得到,10 m 高度风速由 10 m 高度 U 风速和 10 m 高度 V 风速计算得到^[28]。旋度、风速计算公式分别为:

$$\omega = \frac{\partial v_{850\text{ hPa}}}{\partial \varphi} - \frac{\partial u_{850\text{ hPa}}}{\partial \lambda}$$

（1）

$$S_{10} = (u_{10}^2 + v_{10}^2)/2$$

（2）

式中: ω 为旋度; λ 为经度; φ 为纬度; $u_{850\text{ hPa}}$ 为 850 hPa 处的 U 风速; $v_{850\text{ hPa}}$ 为 850 hPa 处的 V 风速; S_{10} 为 10 m 高度风速; u_{10} 为 10 m 高度 U 风速; v_{10} 为 10 m 高度 V 风速。

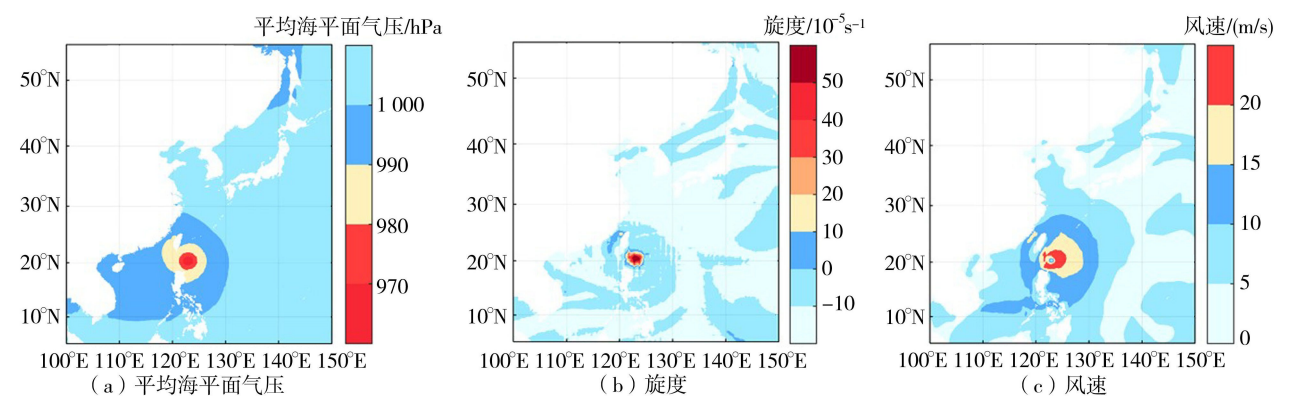


图 1 某台风期间平均海平面气压、旋度以及风速分布

Fig. 1 Distribution map of mean sea level pressure ,vorticity, and wind speed during a typhoon

1.2.3 SWAN 模型

由于盘古气象大模型无法直接预报出波浪场,本文将盘古气象大模型与第 3 代近岸海浪数值模式 SWAN 模型相结合,利用盘古气象大模型预报的风场驱动 SWAN 模型模拟出波浪数据。

SWAN 模型是由荷兰代尔夫特理工大学研发并维护的海浪数值模型,该模型以风场为驱动,同时考虑了风浪的成长与消散、白帽耗散、底部摩擦、波浪破碎、非线性波相互作用、波浪绕射以及反射等多个物理过程^[29],适用于大洋尺度到近岸沿海等尺度海域的波浪场模拟计算。

本文所计算的区域为中国近海,范围为 10°N~45°N,100°E~145°E。采用非结构化三角形网格,在广东沿海以及海南岛附近加密处理,计算区域内共 65 709 个节点和 33 804 三角单元,网格如图 2(a)。模型水深数据采用 ETOPO1 全球地形数据集,该水深数据集是由 NOAA(美国国家海洋和大气管理局)提供,水深数据分辨率 1'×1',如图 2(b)所示;风速测站与波浪测站分别见图 2(c)与图 2(d)。风速测站共 4 个,分别是上川岛、阳江、海口与美兰,波浪测站为珠江口外测站与东方站。SWAN 模型输出时间步长为 3 600 s,输出变量为有效波高。

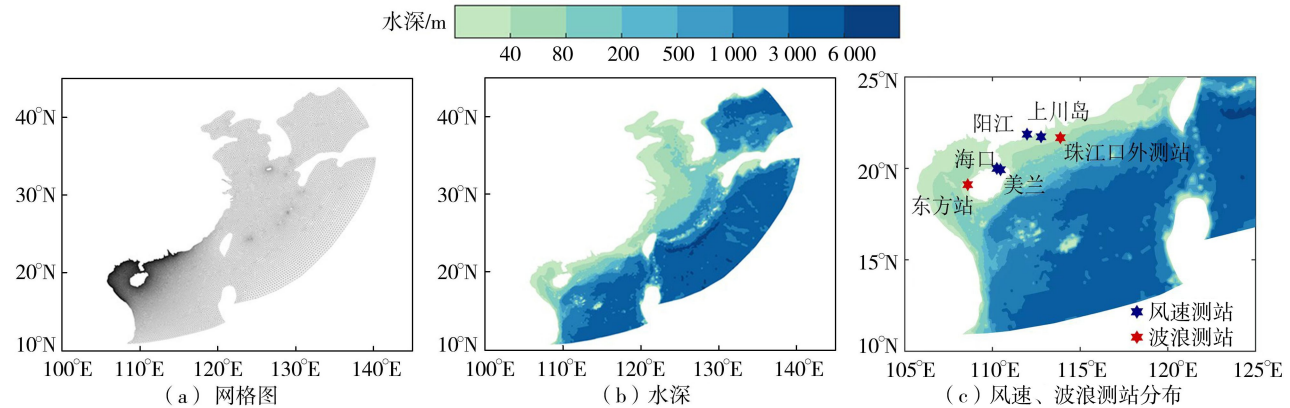


图 2 计算区域信息

Fig. 2 Information of calculation domain

2 台风路径预报结果分析

2.1 台风路径整体预报结果分析

本文利用盘古气象大模型预报的天气场信息结合热带气旋追踪算法对经过广东沿海以及海南岛的部分台风进行预报研究。为了定量评估盘古气象大模型在台风路径预报中的效果,对预报结果(经纬度)与 CMA 最佳路径数据集的实测结果(经纬度)进行比较,计算每个预报点与 CMA 最佳路径数据集的实测路径结果之间的直接位置误差。计算直接位置误差时,使用球面距离误差公式表示预测经纬度点与实测路径经

纬度点之间的差异,计算公式参见文献[8]。

本文选取了 12 场台风进行台风路径预报研究,其中包含 3 场台风,5 场强台风及 4 场超强台风,所选台风基本信息见表 1。计算不同强度等级台风的平均直接位置误差(同等级台风路径预报误差的均值),并绘制其随预报时间变化的折线图,如图 3 所示。研究表明,随着预报时间的增加,台风路径预报的误差整体上呈现增长趋势。本文将下载 ECMWF-HRES 模式的台风路径预报数据与盘古气象大模型进行比较分析,发现盘古气象大模型在第 72 小时以及第 120 小时的平均位置误差分别为 68.43 km 和 93.62 km,而 ECMWF-HRES 模式在第 72 小时和第 120 小时的台风路径预报误差分别为 227.22 km 和 234.82 km,表明盘古气象大模型的预报精度远超于该模式。基于其他机器学习方法的台风路径预报尽管在短期预报(6~24 h)中的精度有所提升,但对于未来 3~5 d 的预报误差仍然较大^[10]。盘古气象大模型之所以在长时(72~120 h)台风路径预报中表现较优,是因为与以往基于机器学习的预报方法不同的是,盘古气象大模型通过学习不同的天气场信息来预报未来不同气象要素的场信息(如气压场,风场等),然后通过捕捉天气场中的台风特征去预报台风路径,这显著降低了台风路径的预报误差并实现长时台风路径预报。强度等级为台风的预报结果显示,第 3 天与第 5 天的平均直接位置误差分别为 87.54 km 与 107.75 km。强度等级为强台风以及超强台风预报结果,第 3 天与第 5 天的平均直接位置误差分别为 58.88 km 与 91.26 km。可见,随着台风强度等级的增加,盘古气象大模型对台风位置的捕捉更加准确。

2.2 典型台风预报结果分析

为了评估盘古气象大模型在长时台风路径预报的效果,本文选取 4 个具有代表性的台风案例(图 4)对盘古气象大模型的预报结果与 ECMWF-HRES 模式以及 JMA 模式的预报结果进行比较。

1117 号台风“纳沙”是一场发生在 2011 年影响海南岛以及广东、广西省(自治区)的强台风,盘古气象大模型、ECMWF-HRES 模式以及 JMA 模式的路径预报结果如图 4(a)所示。在预报初期,三者的预报能力不相上下,但随着预报时间的增加,盘古气象大模型预报的精度远超数值模式。通过计算得到盘古气象大模型在预报第 72 小时以及第 120 小时的直接位置误差分别为 40.17 km 和 62.78 km,而 ECMWF-HRES 模式的误差分别为 172.82 km 和 338.89 km,JMA 模式的误差分别为 331.19 km 和 509.38 km,不同时间平均路径预报误差可见表 2。此外,ECMWF-HRES 模式只提供了 5 d 的预报结果,而盘古气象大模型可以提供 7 d 甚至更长时间的预报结果。对于台风“纳沙”,盘古气象大模型提前 5 d 预报其在海南岛登陆,提前 6 d 预报出在越南二次登陆,而 ECMWF-HRES 模式与 JMA 模式在第 5 天的预报结果已经出现较大偏差。

1330 号台风“海燕”是 2013 年最强的热带气旋,致灾极重,灾情遍及菲律宾、越南、中国等地。盘古气象大模型预报结果、ECMWF-HRES 模式及 JMA 模式预报结果如图 4(b)所示。超强台风“海燕”于 2013 年 11 月 8 日登陆于菲律宾莱特岛北部沿海,盘古气象大模型预报结果与真实路径登陆时的直接位置误差为 117.56 km,而 ECMWF-HRES 模式预报误差为 269.06 km,且该数值模式比盘古气象大模型至少晚 6 h 预报出台风登陆。JMA 模型预报误差为 395.71 km。盘古气象大模型的预报优势不仅仅体现在台风初期,在长时台风路径预报中表现也较优。

2017 年 8 月 20 日 14 时,1713 号超强台风“天鸽”在西北太平洋洋面上生成,给珠海、香港、澳门等地区带来重大破坏,共造成了 24 人死亡和 68.2 亿美元经济损失。由图 4(c)可知,盘古气象大模型在台风生成与发展过程中的预报结果均最优,盘古气象大模型早在台风登陆前 78 h 已做出正确的预报,而 ECMWF-

表 1 12 场台风基本信息

Table 1 Basic information of 12 typhoons

年份	编号	中文名	最强强度	登陆强度
2008	0814	黑格比	强台风	强台风
2010	1003	灿都	台风	台风
2011	1117	纳沙	强台风	台风
2012	1213	启德	强台风	台风
2013	1311	尤特	强台风	强台风
2013	1330	海燕	超强台风	强热带风暴
2014	1409	威马逊	超强台风	超强台风
2014	1415	海鸥	强台风	强台风
2017	1713	天鸽	超强台风	强台风
2018	1822	山竹	超强台风	强台风
2022	2209	马鞍	台风	强热带风暴
2023	2304	泰利	台风	台风

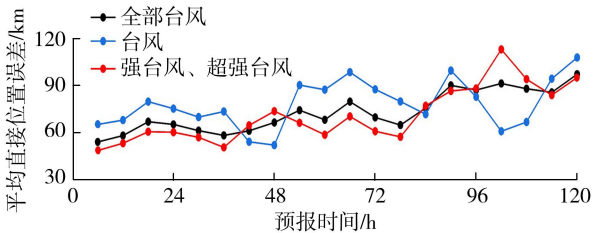


图 3 不同强度等级台风的平均直接位置误差

Fig. 3 Mean direct position error of typhoons with different intensity levels

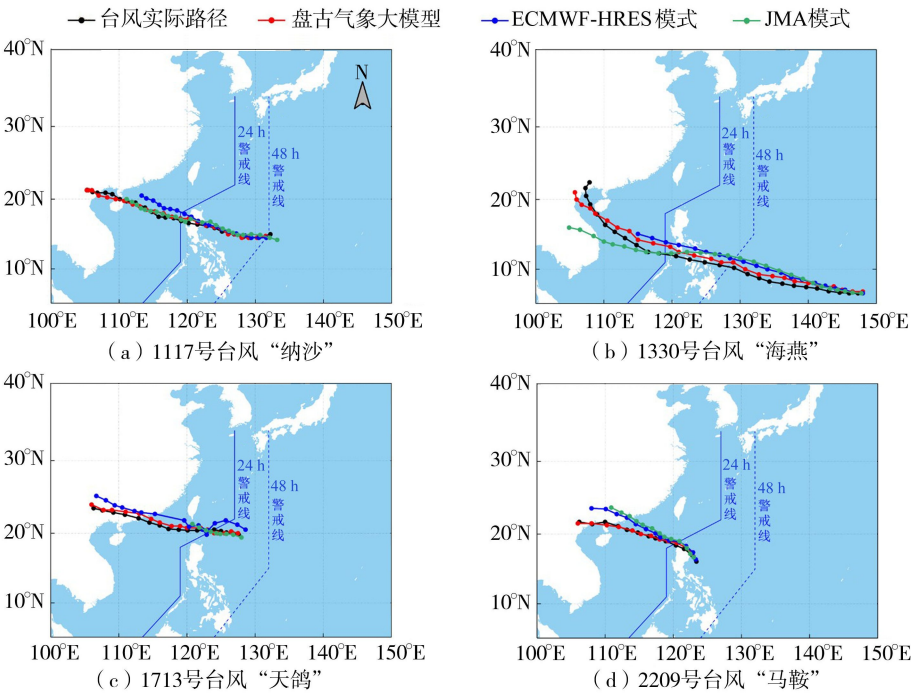


图 4 4 场典型台风的路径预报结果对比

Fig. 4 Comparison of track prediction results of four typical typhoons

表 2 盘古气象大模型与 ECMWF-HRES 模式及 JMA 模式的平均路径预报误差对比

Table 2 Comparison of mean track prediction errors among Pangu-Weather, ECMWF-HRES model, and JMA model		不同时间平均路径预报误差/km				
		24 h	48 h	72 h	96 h	120 h
纳沙	盘古气象大模型	24. 23	11. 07	40. 17	90. 84	62. 79
	ECMWF-HRES 模式	39. 16	39. 00	172. 82	198. 03	338. 88
	JMA 模式	136. 55	229. 41	331. 19	378. 97	509. 38
海燕	盘古气象大模型	113. 38	99. 65	89. 16	79. 37	130. 88
	ECMWF-HRES 模式	119. 02	174. 39	182. 69	327. 83	215. 04
	JMA 模式	145. 37	339. 47	332. 55	395. 71	401. 98
天鸽	盘古气象大模型	61. 93	40. 13	61. 11	16. 32	
	ECMWF-HRES 模式	153. 64	183. 77	198. 35	163. 20	
	JMA 模式	45. 50	182. 66			
马鞍	盘古气象大模型	40. 15	52. 01	15. 17		
	ECMWF-HRES 模式	76. 46	136. 90	310. 57		
	JMA 模式	84. 81	228. 90	477. 45		

HRES 模式在距离初始预报时间 60 h 时产生错误预报,JMA 模式已经停止跟踪。此外,盘古气象大模型在超强台风“天鸽”登陆后的追踪也有很大优势,而 ECMWF-HRES 模式预报结果明显偏北。

台风“马鞍”是一场影响菲律宾和中国的台风,共造成 7 人死亡和 913 万美元的损失^[19]。台风“马鞍”于 2022 年 8 月 23 日以强热带风暴级登陆菲律宾伊萨贝拉省附近,并于 8 月 25 日以台风级强度登陆广东茂名电白沿海。如图 4(d)所示,盘古气象大模型大约在台风登陆前 3 d 做出来准确的预报,登陆时的直接位置误差为 56. 16 km。而 ECMWF-HRES 模式与 JMA 模式预报其在广东珠海登陆,产生了一个错误预报,预报结果的直接位置误差分别为 310. 57 km 与 381. 89 km。

通过以上对比分析得出,盘古气象大模型在台风路径预报的初期和后期都具有较大优势,能够实现长时台风路径预报。

3 台风浪波高预报结果分析

准确预报台风浪波高,首先需要得到准确的台风路径与台风风场的预报结果,由于盘古气象大模型无法直接预报出波浪场,故本文利用其预报出的风场数据驱动第三代海浪数值模型 SWAN 模型,计算得到的有

效波高数据即为预报波高数据,将预报波高数据与实测站点的波高数据进行对比分析,以此评估盘古气象大模型在台风浪波高预报中的效果。

3.1 风速预报结果分析

在台风浪的数值模拟中,海浪的模拟精度很大程度上依赖于海面风场资料的准确性^[21],故本文在评估盘古气象大模型在台风浪预报中的效果前先检验盘古气象大模型预报风场的精度。选择 1330 号台风“海燕”及 1713 号台风“天鸽”这两场典型台风进行验证,结果如图 5 所示。美兰站实测最大风速值为 15 m/s,盘古气象大模型在该站点预测风速为 13.57 m/s,相对误差为 9.5%。海口站实测最大风速值为 16 m/s,盘古气象大模型在该站点预测风速为 13.68 m/s,相对误差为 14.5%。2013 年 11 月 10 日 14:00 左右台风“海燕”到达海南岛西南部,盘古气象大模型预报位置较实际台风位置偏西,同时海口以及美兰站距离台风大风区较远,所以两个站的风速都存在低估现象。台风“天鸽”登陆时的强度达到强台风等级,上川岛站实测风速为 18 m/s,盘古气象大模型预测风速为 9.8 m/s,相对误差达到 45.6%。阳江站实测风速为 15 m/s,盘古气象大模型预测风速为 7.68 m/s,相对误差高达 48.8%。计算结果表明盘古气象大模型对超强台风的风速严重低估。

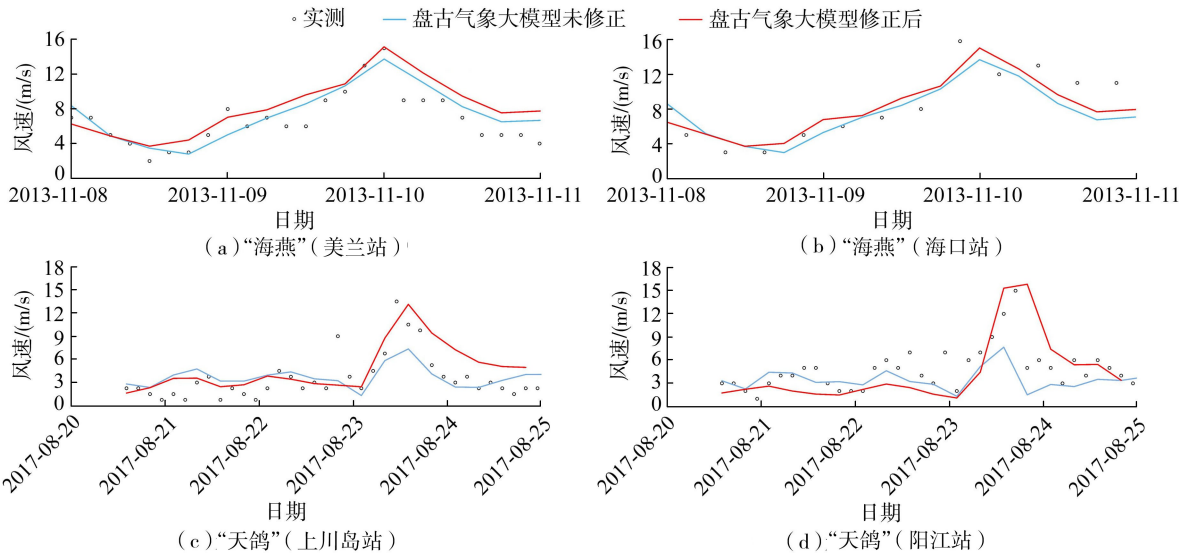


图 5 台风“海燕”“天鸽”期间风速验证

Fig. 5 Wind speed validation during typhoon “Haiyan” and “Hato”

3.2 有效波高预报结果分析

根据风速验证结果,可知盘古气象大模型在台风核心区的风速预报结果普遍低估,尤其对于超强台风存在严重低估,但在受台风影响较小的站点预报结果较好。盘古气象大模型产生低估的原因是其训练数据本身也低估了风速,ERA5 数据对台风风场的低估已有学者做了研究^[28]。因此,使用盘古气象大模型预报的风场进行台风浪模拟时,有必要对台风中心附近的数据进行一定的修正和改进,以提高波高模拟结果的准确性。本文根据李江夏等^[28]提出的 ERA5 再分析最大风速与实测最大风速相关关系式,对盘古气象大模型预测的最大风速进行修正:

$$v_r = av_{r0}^b \tag{3}$$

式中: v_r 为实测最大风速; v_{r0} 为盘古气象大模型预报风场数据中的最大风速; a 、 b 为参数,分别取 0.69 和 1.24。

对最大风速进行修正后,本文根据 Pan 等^[30]提出的再分析风场直接修正法对盘古气象大模型的预报风场进行修正:

$$v_{\text{fix}} = \begin{cases} v_{\text{pangu}} \left[\frac{r}{R_{\text{max}}} \left(\frac{v_r}{v_{r0}} - 1 \right) + 1 \right] & r < R_{\text{max}} \\ v_{\text{pangu}} \left[\frac{R_{\text{bnd}} - r}{R_{\text{bnd}} - R_{\text{max}}} \left(\frac{v_r}{v_{r0}} - 1 \right) + 1 \right] & R_{\text{max}} \leq r < R_{\text{bnd}} \\ v_{\text{pangu}} & r \geq R_{\text{bnd}} \end{cases} \tag{4}$$

式中: v_{fix} 为修正后的风速; v_{pangu} 为盘古气象大模型的预报风速; r 为计算点与台风中心的距离; R_{max} 为最大风速半径; R_{bnd} 为修正范围半径大小,一般取 6 倍最大风速半径。

基于以上方法,对 2013 年的台风“海燕”以及 2017 年的台风“天鸽”进行了计算与模拟,结果如图 5 所示。修正后的美兰站极值风速相对误差为 1.00%,相较于未修正的盘古气象大模型降低了 8.50 个百分点。另外海口站极值风速的相对误差降低了 8.25 个百分点。修正后的上川岛站极值风速为 17.5 m/s,阳江站的极值风速为 15.8 m/s,相较于未修正的盘古气象大模型,相对误差分别减少了 42.80 个百分点和 43.50 个百分点,各站点极值风速的相对误差可见表 3。

表 3 两场台风风场修正前后站点极值风速的相对误差
Table 3 Relative errors of extreme wind speeds at stations before and after wind field correction for two typhoons

台风名称	站点	极值风速相对误差/%	
		修正前	修正后
海燕	美兰	9.50	1.00
	海口	14.50	6.25
天鸽	上川岛	45.60	2.80
	阳江	48.80	5.30

由图 6 可知,1330 号台风“海燕”在东方站的实测极值波高为 2.78 m,未修正的盘古气象大模型预报的极值波高为 1.70 m,低估了 38.8%,修正后的极值波高为 2.70 m,仅低估了 2.90%,误差降低了 35.9 个百分点。1713 号台风“天鸽”,珠江口外测点实测极值波高为 8.4 m,未修正的盘古气象大模型预测极值波高为 3.8 m,低估了 54.8%。在风速预报结果中,上川岛与阳江站的风速数据都存在严重低估现象,这是波浪模拟误差的主要来源。修正后的风场数据驱动 SWAN 模型模式计算得到的极值波高为 6 m,误差降低了 26.2 个百分点。

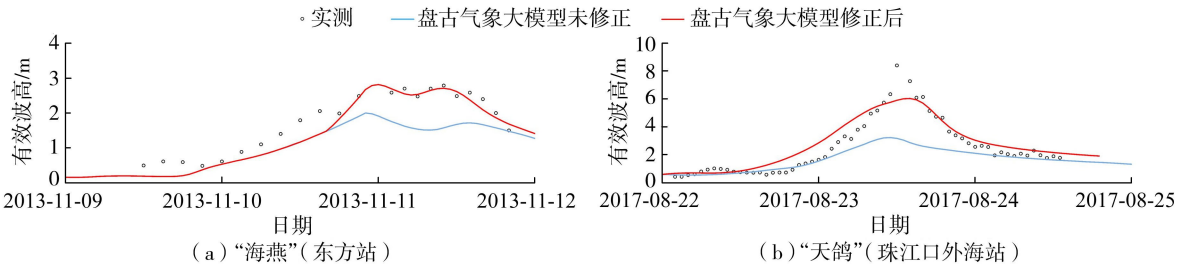


图 6 不同台风期间的有效波高对比
Fig. 6 Comparison of significant wave heights during different typhoons

根据上述计算结果发现,直接利用盘古气象大模型的预报风场进行台风浪的模拟,会导致极值波高存在严重低估现象,导致这一现象的主要原因是盘古气象大模型对台风风场的低估,次要原因是台风路径的偏差。本文提出的对盘古气象大模型预报风场直接进行修正的方法能够有效对台风期的风速进行修正,修正后的风场对台风浪波高预报精度有明显提升。

4 结 语

盘古气象大模型的台风路径预报结果优于欧洲中期天气预报中心的高分辨率大气模型 (ECMWF-HRES 模式),同时台风强度越大,盘古气象大模型越能够准确地捕捉台风中心的位置。盘古气象大模型对台风风场存在低估现象,在计算台风浪波高时,预测的极值波高明显偏小,因此有必要对台风中心附近的风场数据进行一定的修正和改进,以提高波高结果的准确性。将基于盘古气象大模型预报的台风路径和采用直接修正法改进的台风风场数据作为 SWAN 模型的输入条件,对 1330 号台风“海燕”和 1713 号台风“天鸽”的预报结果与实测数据进行对比验证,结果表明极值波高的相对误差分别降低了 35.9 个百分点和 26.2 个百分点,同时有效波高过程能真实反映台风浪的发生、发展以及衰减过程。

对台风路径的预报,盘古气象大模型具有较高的精度与可靠性,结合修正台风风场数据驱动波浪模型,能显著提升台风浪波高的预报精度,这为我国沿海台风浪的计算分析和沿海地区的防灾减灾提供了技术借鉴。需要指出的是,本文目前只评估盘古气象大模型在广东和海南岛台风路径及台风浪预报的效果,针对其他海域的预报有待进一步研究。

参考文献:

[1] Webster J P, Holland J G, Curry A J, et al. Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment

[J]. Science,2005,309(5742):1844-1846.

[2] Chan L C J. Interannual and interdecadal variations of tropical cyclone activity over the western North Pacific[J]. Meteorology and Atmospheric Physics,2005,89(1/2/3/4):143-152.

[3] 朱宇翔. 路径和环境场对西北太平洋热带气旋强度气候变率的影响[D]. 南京:南京信息工程大学,2023.

[4] 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))

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

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

[7] 徐光宁. 基于深度学习的台风路径与强度预测方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.

[8] 高鹏. 基于深度学习对西北太平洋台风路径的预测研究[D]. 广汉:中国民用航空飞行学院,2023.

[9] 陈国民. 西北太平洋台风路径预报性能研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2023.

[10] Chen Rui, Zhang Weimin, Wang Xiang. Machine learning in tropical cyclone forecast modeling: a review[J]. Atmosphere,2020,11(7):676.

[11] 曹祥村,邵利民. 一种利用 BP 网络预报台风路径的新方法[J]. 海洋预报,2007(3):75-82. (Cao Xiangcun, Shao Limin. A new method for predicting typhoon tracks using BP networks[J]. Marine Forecasts,2007(3):75-82. (in Chinese))

[12] Wang Liang, Wan Bingcheng, Zhou Shaohui, et al. Forecasting tropical cyclone tracks in the northwestern Pacific based on a deep-learning model[J]. Geoscientific Model Development,2023,16(8):2167-2179.

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

[14] Kurth T, Subramanian S, Harrington P, et al. FourCastNet: accelerating global high-resolution weather forecasting using adaptive fourier neural operators[J]. Proceedings of the Platform for Advanced Scientific Computing Conference,2022,15(8):1-11.

[15] Lam R, Sanchez-Gonzalez A, Willson M, et al. Learning skillful medium-range global weather forecasting[J]. Science,2023,382(6677):1416-1421.

[16] 沈晖华,时健,徐佳丽,等. 基于 Stacking 集成机器学习的波浪预报[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(4):354-358. (Shen Huihua, Shi Jian, Xu Jiali, et al. Wave forecasting algorithm with stacking ensemble machine learning method[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(4):354-358. (in Chinese))

[17] Feng Zhijie, Hu Po, Li Shuiqing, et al. Prediction of significant wave height in offshore China based on the machine learning method[J]. Journal of Marine Science and Engineering,2022,10(6):836.

[18] 罗锋,张杰,全秀峰,等. 基于机器学习方法对台风浪短期预报应用[J]. 海洋湖沼通报,2023,45(5):8-16. (Luo Feng, Zhang Jie, Quan Xiufeng, et al. Application of machine learning-based methods to short-term forecasting of typhoon waves [J]. Transactions of Oceanology and Limnology,2023,45(5):8-16. (in Chinese))

[19] Bi Kaifeng, Xie Lingxi, Zhang Hengheng, et al. Accurate medium-range global weather forecasting with 3D neural networks[J]. Nature,2023,619(7970):533-538.

[20] 黄小猛,林岩鑫,熊巍,等. 数值预报 AI 气象大模型国际发展动态研究[J]. 大气科学报,2024,47(1):46-54. (Huang Xiaomeng, Lin Yanluan, Xiong Wei, et al. Research on international developments in numerical forecasting[J]. Transactions of Atmospheric Sciences,2024,47(1):46-54. (in Chinese))

[21] 李新文,丁骏,黄君宝,等. 不同风场数据集对台风期间海浪模拟的影响[J]. 水利水运工程学报,2021(6):34-42. (Li Xinwen, Ding Jun, Huang Junbao, et al. Performance assessment of different wind forcing datasets for simulation of wind wave during typhoon [J]. Hydro-Science and Engineering,2021(6):34-42. (in Chinese))

[22] Ying Ming, Zhang Wei, Yu Hui, et al. An overview of the China meteorological administration tropical cyclone database[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,2014,31(2):287-301.

[23] Lu Xiaoqin, Yu Hui, Ying Ming, et al. Western North Pacific tropical cyclone database created by the China Meteorological Administration[J]. Advances in Atmospheric Sciences,2021,38(4):1-10.

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.03.005

考虑降雨和径流协调关系的长江上游流域入汛指标

王浩先,朱 坚,钟平安

(河海大学水文水资源学院)

摘要: 利用 1979—2019 年长江上游流域 79 个雨量站日降雨资料以及三峡逐日流量资料,探究了不同阈值判别条件下长江上游流域雨季入汛与流量入汛之间的协调关系,基于不同阈值下雨季入汛日期和流量入汛日期的相关系数,确定了降雨和径流关系最显著时降雨和径流各自对应的阈值,并依此确定了长江上游流域雨季入汛指标和流量入汛指标。结果表明:长江上游流域降水量增加提前于三峡入库流量上涨 2~4 候,入汛前降水量最显著的增加出现在第 30 候,相应的三峡入库流量在第 32 候亦出现明显的上涨;雨季入汛和流量入汛日期的多年平均值分别为 5 月 31 日和 6 月 11 日,1979—2019 年大部分年份雨季入汛日期早于流量入汛日期,但有 8 年雨季入汛稍晚于流量入汛,主要原因是雨季入汛指标中达标雨量站数量不足;采用流域降雨体积指标优化雨季入汛指标后,优化效果显著,仅 2 年雨季入汛日期晚于流量入汛日期。

关键词: 长江上游流域;雨季入汛;流量入汛;累计降水量;滑动平均

Flood season onset index of the upper reaches of the Yangtze River Basin considering concurrent relationship between rainfall and runoff

Wang Haoxian, Zhu Jian, Zhong Ping'an

(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University)

Abstract: Based on the daily rainfall data of 79 rainfall stations in the upper reaches of the Yangtze River Basin from 1979 to 2019 and the daily runoff data at the Three Gorges, the concurrent relationship between the rainy season onset and the runoff-based flood season onset in the upper reaches of the Yangtze River Basin under different threshold discrimination conditions was explored. Based on the correlation coefficients between the rainy season onset dates and the runoff-based flood season onset dates under different thresholds, the respective thresholds for rainfall and runoff when their relationship was the most significant were determined, and accordingly, the rainy season onset index and the runoff-based flood season onset index of the upper reaches of the Yangtze River Basin were determined. The results indicate that the increase in rainfall in the upper reaches of the Yangtze River Basin precedes the rise of the inflow at the Three Gorges by 2-4 pentads. Before the flood season onset, the most significant increase in rainfall occurs at the 30th pentad, and the corresponding inflow at the Three Gorges shows an obvious rise at the 32nd pentad; the multi-year average dates of the rainy season onset and the runoff-based flood season onset are May 31 and June 11, respectively. In most years from 1979 to 2019, the rainy season onset date is earlier than the runoff-based flood season onset date, but there are eight years when the rainy season onset is slightly later than the runoff-based flood season onset, mainly because the number of rainfall stations meeting the standard in the rainy season onset index is insufficient. After optimizing the rainy season onset index using the basin rainfall volume index, the optimization effect is remarkable, and there are only two years when the rainy season onset date is later than the runoff-based flood season onset date.

Key words: the upper reaches of the Yangtze River Basin; rainy season onset; runoff-based flood season onset; cumulative rainfall; moving average

三峡水库在防洪、发电和综合利用方面发挥了重要作用,显著减轻了四川、重庆河段的防洪压力,有效保障了长江中下游地区的防洪安全^[1]。近年来,三峡工程和嘉陵江等一些具有防洪调度功能的蓄水发电工程有效利用了长江上游水资源并且带来了良好的经济效益^[2-3]。

三峡水库在入汛及出汛阶段水位会出现明显抬升与回落,因此需依据入库流量对汛期与非汛期进行划分^[4]。在工程初步设计阶段^[5],结合长江中下游防洪需求,确定三峡水库于每年 6 月 10 日至 9 月 30 日按汛

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3202801)

作者简介: 王浩先(2001—),男,硕士研究生,主要从事气候变化研究。E-mail:231301010039@hhu.edu.cn

通信作者: 朱坚(1983—),男,副教授,博士,主要从事气候成因机制分析研究。E-mail:levoca@hhu.edu.cn

期防洪限制水位 145.00 m 运行^[6]。此后,众多学者围绕三峡水库汛期划分开展了优化研究;刘攀等^[7]采用变点分析法的 3 种模型,结合不同取样方法开展汛期分期,并通过统计分析法进行对比评价,发现基于超定量取样的概率变点分析模型具有更优的无偏性与有效性,分期成果最佳;刘克林等^[8]验证了 Fisher 最优分割法可实现多指标聚类且不破坏样本序列顺序,据此提出以最优分期数为依据开展汛期分期;汪肖雅等^[9]采用均值变点、矢量统计等方法,基于入库流量初步划分出丹江口水库的夏汛期、过渡期与秋汛期;秦智伟等^[10]分析了三峡上游流域汛期暴雨时空特征及洪水量级变化,将三峡水库洪水划分为主汛期与汛末期两个阶段;丁胜祥等^[11]综合数理统计与成因分析,通过探究流域洪水与西太平洋副热带高压位置的关联,揭示了三峡水库与瀑布沟水库汛期洪水的分期特征;薄会娟等^[12]对三峡水库 6 月 1 日至 9 月 30 日多年逐日入库流量开展矢量统计分析,将 6 月 1 日至 6 月 30 日划分为前汛期,7 月 1 日至 9 月 10 日划分为主汛期。

随着当前长江上游梯级水库防洪、兴利库容占河道径流比例不断增大,固定单一的汛期运行水位限制了洪水资源化的水平^[13]。如何实现三峡汛期的动态划分及预测,对三峡水库发电、长江流域水资源调蓄等工作具有一定的指导意义^[14-16]。本文参照 QX/T 396—2017《中国雨季监测指标 西南雨季》,通过不断变换各项阈值揭示长江上游流域雨季入汛日期与流量入汛日期的相关关系,尝试给出基于降雨和流量的长江上游入汛日期预判方法。

1 研究区概况与研究数据

长江上游流域位于 24°N~36°N、90°E~112°E 之间,包含乌东德、溪洛渡等众多重要大型水电站^[17]。流域东临海拔差异大,气温和降水量主要呈现自上游至下游、自东向西递减的趋势,气候类型主要为亚热带季风气候^[18],降雨的季节分布变化很大^[19],暴雨多发生在雨季,雨季降水占全年降水的 50% 以上^[20-21]。三峡水库位于四川盆地和长江中下游平原交界处,长江上游流域降水对三峡径流量变化会造成至关重要的影响^[22-23],三峡库区的多年平均降水量约为 1 200 mm^[24],且年降水量以 1.02 mm/a 的速率增长^[25]。

本文降水数据采用中国气象局提供的 1979—2019 年长江上游流域 79 个雨量站逐日降水观测资料,流域地形及雨量站分布如图 1 所示。同时,选取三峡水库 1979—2019 年经还原处理的逐日入库流量序列作为研究数据。

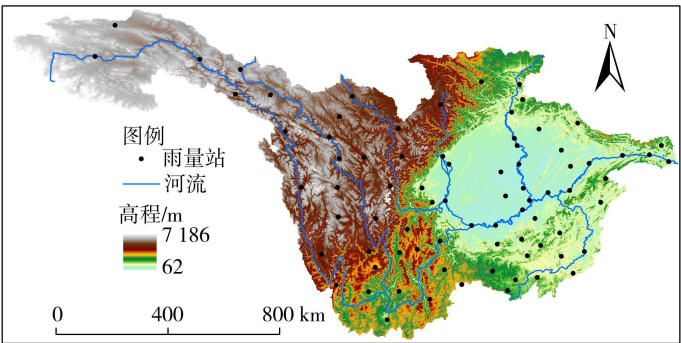


图 1 长江上游流域地形及雨量站分布

Fig.1 Topography and distribution of rainfall stations in the upper reaches of the Yangtze River Basin

2 研究方法

2.1 滑动累计降水量

滑动累计降水量是指在给定时间窗口内连续数日的降水量总和,并把最后一日记为该滑动累计降雨的日期。例如,5 月 5 日滑动 5 d 累计降水量表示 5 月 1—5 日的降水量总和,5 月 6 日滑动 5 d 累计降水量表示 5 月 2—6 日的降水量总和,以此类推,直至整个研究期间的时间序列均被覆盖。这种计算方式能够平滑日降雨数据的波动,便于分析降水量的变化趋势,常用于雨季的划分。文中滑动平均流量的定义与累计降水量类似,区别在于使用的是多日平均流量。

2.2 滑动 t 检验

滑动 t 检验是用于识别序列突变点的常用统计方法,其核心思路是将某一气候序列中两段子序列的均值差异等效为两个独立总体均值的显著性差异进行检验。如果两段子序列的均值差异超过一定的显著性水平,可以认为均值发生了质变,有突变发生。

对于具有 n 个样本量的时间序列 x ,人为设置某一时刻为基准点,基准点前后两段子序列 x_1 和 x_2 的样本量分别为 n_1 和 n_2 。两段子序列方差的平均值为 $\bar{x}_1$ 和 $\bar{x}_2$,两段子序列的方差分别为 s_1^2 和 s_2^2 ,定义统计量:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s \sqrt{1/n_1 + 1/n_2}}$$

(1)

其中
$$s = \sqrt{(n_1 s_1^2 + n_2 s_2^2) / (n_1 + n_2 - 2)}$$
 式(1)遵循自由度为 $\nu = n_1 + n_2 - 2$ 的 t 分布。

3 结果与分析

3.1 三峡入库流量和长江上游流域降雨过程分析

由图 2 可知,长江上游流域降水量增长超前于流量上涨 10~20 d,降水量与入库流量峰值出现时间相差 15~20 d,降水量峰值出现在第 37 候,超过 30 mm,三峡入库流量峰值出现在第 40 候,最大入库流量超过 30 000 m³/s。 t 检验结果表明,降水量序列和入库流量序列分别在第 30 候和第 31、32 候通过显著性检验, t 统计量大于 $\alpha = 0.05$ 水平下的临界值,说明入汛前降水量最显著的增加出现在第 30 候,相应的三峡入库流量在第 31、32 候亦出现明显的上涨。

黄青兰等^[26]通过分析我国东部地区降雨的时间-纬度剖面图得到东部雨带的演进过程规律,本文参照其统计方法得到长江上游流域滑动 5 d 雨带演进过程(图 3)。由图 3 可知,流域内降雨由东部向西部逐渐减少,全流域滑动 5 d 累计降水量在 6 月 1 日前后开始完全超过 15 mm,与流域平均降水量在第 30 候明显增多这一结论相符。

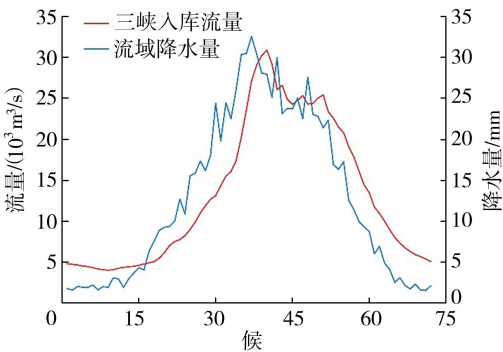


图 2 长江上游流域逐候累计降水量和三峡逐候平均入库流量过程

Fig. 2 Variation process of pentad-based cumulative rainfall in the upper reaches of the Yangtze River Basin and pentad-based average inflow at the Three Gorges

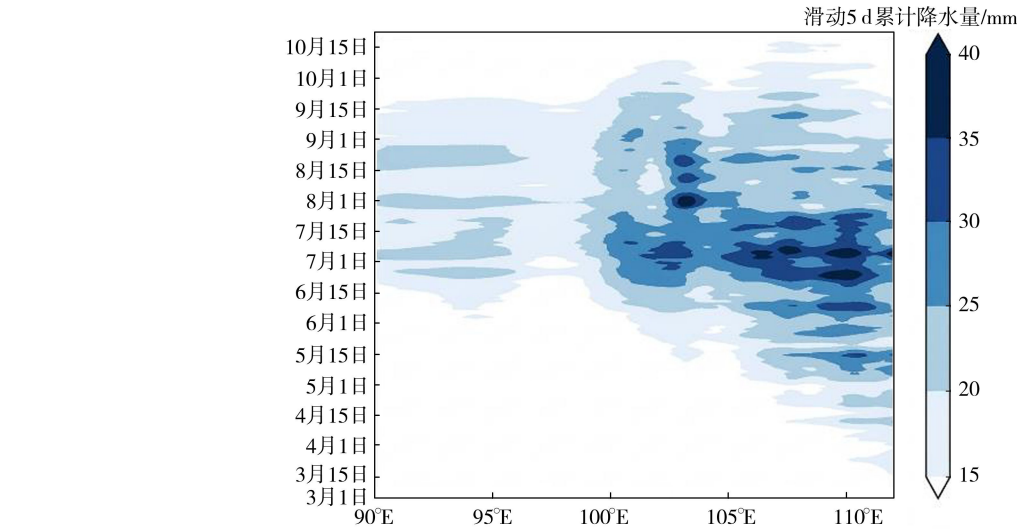


图 3 长江上游流域雨带演进过程

Fig. 3 Evolution process of rain belt in the upper reaches of the Yangtze River Basin

3.2 雨季入汛与流量入汛指标的协调确定

参考 QX/T 396—2017《中国雨季监测指标 西南雨季》确定长江上游流域雨季入汛日期的指标。各雨量站雨季入汛阈值 K 为:

$$K = R / R_1 \tag{2}$$

式中: R 为滑动 5 d 平均降水量; R_1 为 5—10 月多年平均候累计降水量。

若某雨量站在 4 月 21 日后的任意 20 日内,当 $K \geq 1$ 至少 i 次时,将日降水量超过 j mm 的首日日期作为该雨量站的雨季入汛日期;但若在 4 月 21 日后的 10 d 之内未出现 i 次 $K \geq 1$ 的情况,则直接将日降水量超过 j mm 的首日日期作为该雨量站的雨季入汛日期。在整个流域尺度上,当长江上游流域中占比为 p 的雨量站雨季入汛日期都在某日之前,则将该日日期作为流域的雨季入汛日期。其中 i, j, p 为变量,通过不断调整其取值,可改变单站及全流域雨季入汛日期,进而筛选出最优雨季入汛日期并确定相应的雨季入汛指标。

当连续 y 个滑动 5 d 的三峡平均入库流量均大于流量阈值 x 时,将首个滑动 5 d 日期作为流量入汛日期。通过调整变量 x, y 的取值改变流量入汛日期,以找出合理的流量入汛日期并确定流量入汛指标。

基于上述两类指标定义。遍历 i (2~10 次)、 j (10、15、20 mm)、 p (40%、45%、50%、55%、60%) 的各项值可以得到不同 i, j, p 对应的 1979—2019 年长江上游流域雨季入汛日期序列,再利用得到的各 i, j, p 对应雨季入汛日期序列分别与不同 x, y 对应的流量入汛日期序列进行相关性分析,可以得到各 i, j, p 对应的相关系数和流量入汛日期分布情况,随后对分布图中的相关系数求平均即可得到各 i, j, p 对应的平均相关系数。由图 4 可知,当 $i=10$ 次、 $j=15$ mm、 $p=55\%$ 时对应的平均相关系数最大(0.343),于是可以得到 $i=10$ 次、 $j=15$ mm、 $p=55\%$ 对应的相关系数及流量入汛日期分布情况(图 4(b))。由图 4(b)可知,相关系数大致随 x, y 增加而减小,流量入汛日期随着 x, y 的增加而逐渐推迟,相关系数在 $y=6$ 个、 $x=17\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 时达到最大,对应流量入汛日期为 6 月 11 日,与国家规定三峡每年维持汛限水位开始日期(6 月 10 日)大致相符。因此可以初步将 $i=10$ 次、 $j=15$ mm、 $p=55\%$ 对应的雨季监测指标作为长江上游流域雨季入汛指标, $y=6$ 个、 $x=17\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 对应指标作为流量入汛指标。

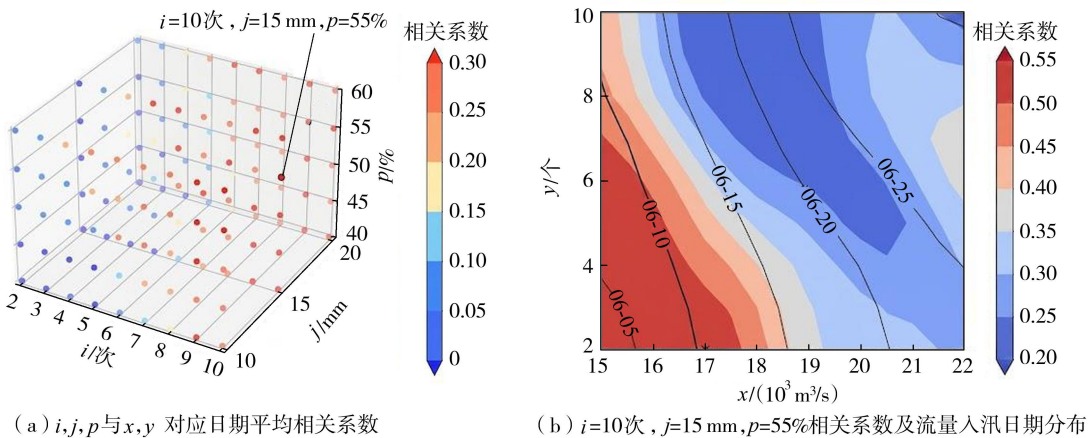


图 4 不同阈值相关系数

Fig. 4 Correlation coefficients under different thresholds

长江上游流域雨季入汛指标和流量入汛指标确定出的逐年日期序列如图 5 所示。1979—2019 年长江上游流域平均雨季入汛日期为 5 月 31 日,与第 3.1 节中流域平均降水量在第 30 候明显上升这一结论相符,多年平均流量入汛日期为 6 月 11 日,与第 3.1 节中三峡入库流量在第 32 候明显上涨这一结论相符,雨季入汛日期比流量入汛日期提前约 11 d。雨季入汛日期和流量入汛日期最早年分别为 2013 年(5 月 10 日)和 1992 年(5 月 12 日),最晚年分别为 1979 年(6 月 15 日)和 2006 年(7 月 3 日)。1979—2019 年中,多数年份雨季入汛日期早于流量入汛日期,有 8 年晚于流量入汛,分别是 1983 年、1985 年、1990 年、1991 年、1992 年、2005 年、2018 年、2019 年。雨季入汛日期与流量入汛日期相关系数为 0.533,通过 99.9%信度检验,说明两类指标下,入汛日期序列具有较好的相关性。

3.3 雨季入汛较迟原因分析及指标优化

长江上游流域有 8 个年份流量入汛日期早于雨季入汛日期,主要是由于流量入汛前已入雨季的雨量站集中分布在青藏高原以东(图 6,分图名括号中百分数代表进入雨季的雨量站占比),且此类雨量站个数不足(p 未达到 55%),降雨笼罩范围偏不足。虽然降雨笼罩面积没有达到雨季入汛指标要求,但是考虑到上游来水量可能已满足三峡入库流量上涨的需求,因此进一步探讨流量入汛前长江上游流域降雨体积的变化情况。

定义当流域连续 n 个滑动 5 d 的平均雨量体积大于阈值 m 时,首个滑动 5 d 日期作为降雨体积入汛日

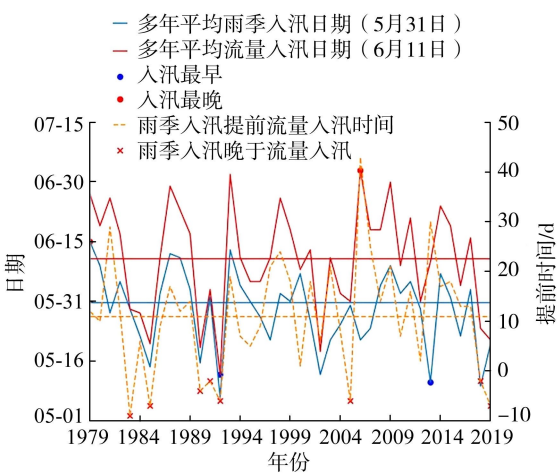


图 5 雨季入汛指标和流量入汛指标对应的日期序列及两者超前滞后特征

Fig. 5 Corresponding date series of rainy season onset index and runoff-based flood season onset index and their lead-lag characteristics

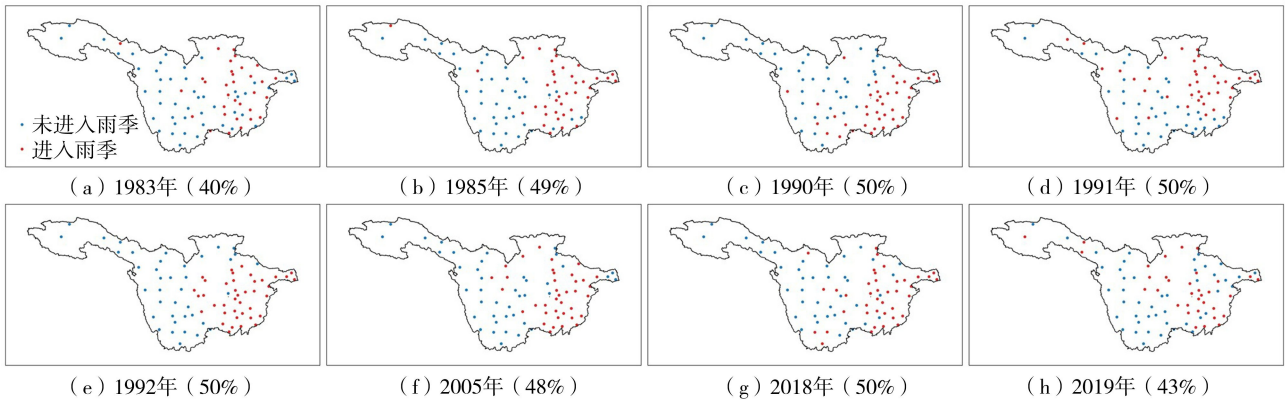


图 6 流量入汛日期早于雨季入汛日期年份流量入汛前已进入雨季的雨站分布

Fig. 6 Distribution of monitoring stations that have entered rainy season before runoff-based flood season onset in years when runoff-based flood season onset date is earlier than rainy season onset date

期。通过变换变量 m 、 n 的值改变降雨体积入汛日期,以找出合理的降雨体积入汛日期并确定降雨体积入汛指标。

三峡入库流量与上游流域降雨体积过程(图 7(a))表明多年平均雨季入汛日期(5 月 31 日)前后,流域内单日降雨总体积可以达到 400 万~500 万 m^3 ,根据这一特征初步限制降雨体积阈值 m 的范围,并将连续滑动 5 d 数 n 的范围限制在 1~9 个,得到不同 m 、 n 对应降雨体积入汛日期与流量入汛日期的相关系数(图 7(b))。 $m=410$ 万 m^3 、 $n=6$ 个时对应相关系数最大(图 7(b) 黑色 x 处),将其对应的降雨体积指标作为长江上游流域降雨体积入汛的标准,可以得到逐年降雨体积入汛日期序列(图 7(c))。降雨体积入汛平均日期(5 月 28 日)较雨季入汛平均日期(5 月 31 日)提前 3 d,降雨体积入汛指标确定出的日期仅有 2 年(1991 年和 2019 年)晚于流量入汛日期,但与流量入汛日期序列的相关系数有所降低,仅为 0.524,且 1991 年与 2019 年的降雨体积入汛日期相比雨季入汛日期更晚。

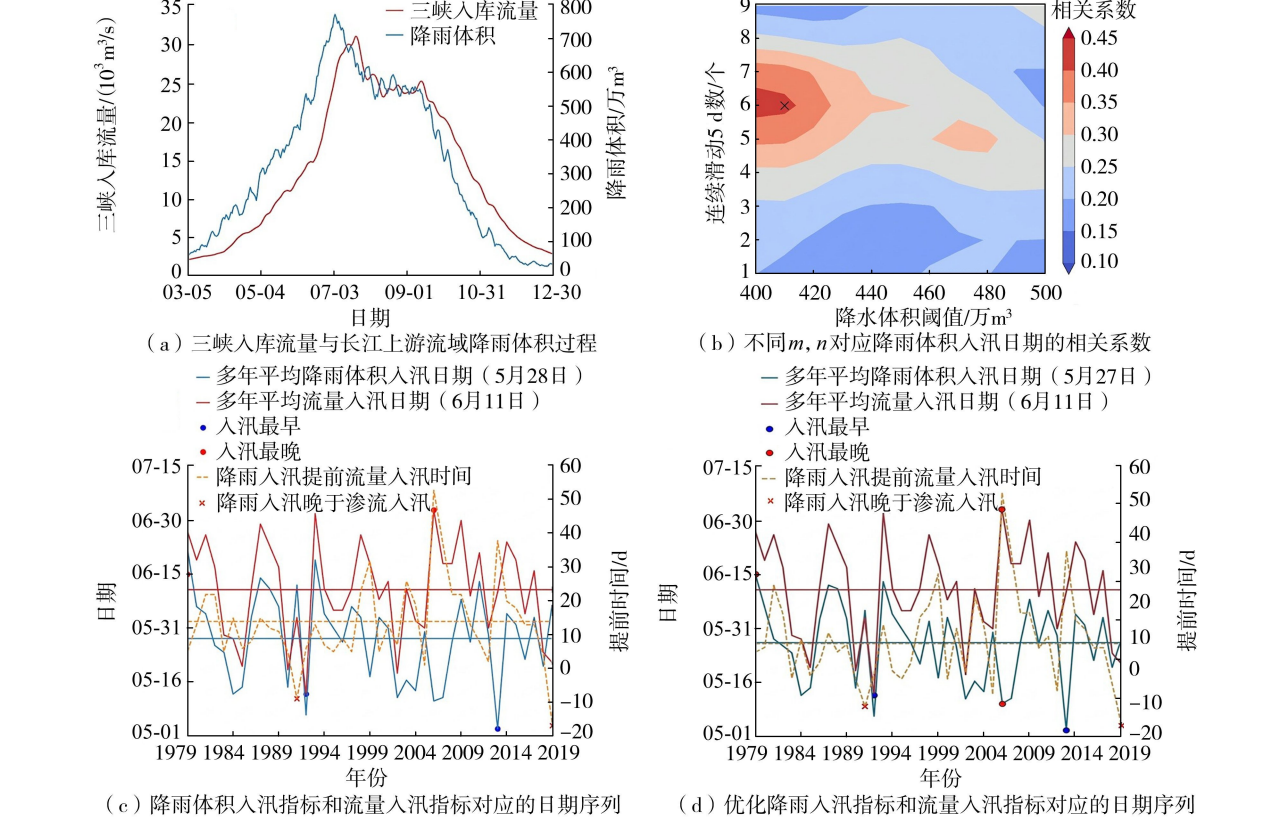


图 7 基于降雨体积入汛的指标优化

Fig. 7 Optimization of flood season onset index based on rainfall volume

为改善雨季入汛日期晚于流量入汛日期的问题,提出优化的雨季入汛指标:将原雨季入汛指标与降雨体积入汛指标确定出较早的入汛日期作为当年的雨季入汛日期。由图 7(d)可知,优化后的雨季入汛与流量入汛日期间的相关系数比原指标有所提高,并且雨季入汛晚于流量入汛的年份减少至 2 年,雨季入汛多年平均日期为 5 月 27 日,相比流量入汛(6 月 11 日)提前约 15 d。

4 结 论

- a. 滑动 t 检验结果表明,三峡入库流量在第 31 候和第 32 候出现明显上涨,长江上游流域降雨在第 30 候明显增多。长江上游流域降水量总体呈现由东部向西部逐渐减少的趋势,全流域滑动 5 d 累计降水量在 6 月 1 日前后开始超过 15 mm,与流域降水量在第 30 候明显增多结论相符。
- b. 根据不同 i, j, p 的平均相关系数,将 $i=10$ 次 $j=15$ mm $p=55\%$ 对应的指标作为长江上游流域雨季入汛指标,并根据雨季入汛指标下 x, y 相关系数分布确定出 $x=17\,000\text{ m}^3/\text{s}$, $y=6$ 个对应的流量入汛指标。
- c. 根据雨季入汛日期迟于流量入汛日期的主要原因以及滑动 5 日降雨体积过程,引入降雨体积入汛指标,并确定了 $m=410$ 万 m^3 , $n=6$ 个对应的降雨体积入汛指标。将原雨季入汛指标与降雨体积入汛指标确定出的较早入汛日期作为当年优化后的雨季入汛日期,优化指标下雨季入汛日期晚于流量入汛日期的年份由 8 年减少至 2 年,且雨季入汛日期与流量入汛日期间相关系数也有所提高。

参考文献:

[1] 郭生练,熊丰,王俊,等. 三峡水库运行期设计洪水及汛控水位初探[J]. 水利学报,2019,50(11):1311-1325. (Guo Shenglian,Xiong Feng,Wang Jun,et al. Preliminary exploration of design flood and control water level of Three Gorges Reservoir in operation period[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2019,50(11):1311-1325. (in Chinese))

[2] 张轩,张行南,王高旭,等. 长江上游水库入库流量的中长期预报[J]. 水资源保护,2022,38(4):131-136. (Zhang Xuan,Zhang Xingnan,Wang Gaoxu,et al. Medium and long term forecast of reservoir inflow in upper reaches of the Yangtze River[J]. Water Resources Protection,2022,38(4):131-136. (in Chinese))

[3] 茅昌平,肖衡,王帅,等. 三峡库区表层沉积物有机碳、氮同位素特征及对有机质来源的指示[J]. 水资源保护,2023,39(6):160-168. (Mao Changping,Xiao Heng,Wang Shuai,et al. Characteristics of organic carbon and nitrogen isotopes in surface sediment of Three Gorges Reservoir region and their implications for sources of organic matter[J]. Water Resources Protection,2023,39(6):160-168. (in Chinese))

[4] Mo Chongxun,Deng Juan,Lei Xingbi,et al. Flood season staging and adjustment of limited water level for a multi-purpose reservoir[J]. Water,2022,14(5):775.

[5] 水利部长江水利委员会. 长江三峡水利枢纽初步设计报告[R]. 武汉:水利部长江水利委员会,1992.

[6] 李肖男,傅巧萍,张松,等. 三峡水库汛期运行水位运用方式研究[J]. 人民长江,2022,53(2):21-26. (Li Xiaonan,Fu Qiaoping,Zhang Song,et al. Study on operating water level during flood season of Three Gorges Reservoir[J]. Yangtze River,2022,53(2):21-26. (in Chinese))

[7] 刘攀,郭生练,方彬,等. 汛期分期变点分析方法的原理及验证[J]. 长江科学院院报,2006(6):27-31. (Liu Pan,Guo Shenglian,Fang Bin,et al. Change Point Analysis Methods for Flood Seasonality Determination[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research,2006(6):27-31. (in Chinese))

[8] 刘克琳,王银堂,胡四一,等. Fisher 最优分割法在汛期分期中的应用[J]. 水利水电科技进步,2007,27(3):14-16. (Liu Kelin,Wang Yintang,Hu Siyi,et al. Application of Fisher optimal dissection method to flood season division[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2007,27(3):14-16. (in Chinese))

[9] 汪肖雅,郭生练,王俊,等. 考虑梅雨和华西秋雨特征的丹江口水库汛期分期研究[J]. 长江科学院院报,2025,42(8):68-75. (Wang Xiaoya,Guo Shenglian,WANG Jun,et al. Study of flood season division for Danjiangkou Reservoir considering Meiyu and autumn rain characteristics[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research,2025,42(8):68-75. (in Chinese))

[10] 秦智伟,戴明龙,陈炼钢,等. 三峡水库汛期分期洪水特征及成因研究[J]. 人民长江,2018,49(22):1-6. (Qin Zhiwei,Dai Minglong,Chen Liangang,et al. Study on staged flood characteristics and climatic causes for flood of Three Gorges Reservoir[J]. Yangtze River,2018,49(22):1-6. (in Chinese))

[11] 丁胜祥,张莉,张明波. 长江流域洪水分期规律对水库优化蓄水运用方式的科学支撑作用[J]. 水文,2012,32(5):62-68. (Ding Shengxiang,Zhang Li,Zhang Mingbo. Division of flood seasonal phases for Yangtze River Basin and its scientific supporting role in the optimization of reservoir impoundment process[J]. Journal of China Hydrology,2012,32(5):62-68. (in

Chinese))

[12] 薄会娟,董晓华,邓霞. 三峡水库汛期分期方法研究[J]. 人民黄河,2011,33(2):43-44. (Bo Huijuan,Dong Xiaohua,Deng Xia. Study on flood stage method of Three Gorges Reservoir[J]. Yellow River,2011,33(2):43-44. (in Chinese))

[13] 郭生练,李娜,王俊,等. 华西秋雨与梅雨对三峡水库蓄水调度影响分析[J]. 人民长江,2023,54(7):69-74. (Guo Shenglian,Li Na,Wang Jun,et al. Influence of autumn rain of West China and Meiyu on impoundment operation of Three Gorges Reservoir[J]. Yangtze River,2023,54(7):69-74. (in Chinese))

[14] 蒋海艳,莫崇勋,韦逗逗,等. 水库汛期分期研究综述[J]. 水利水电科技进展,2012,32(3):75-80. (Jiang Haiyan,Mo Chongxun,Wei Doudou,et al. Review of reservoir flood season staging[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2012,32(3):75-80. (in Chinese))

[15] 李文杰,冯志刚,李晓丽,等. 洪泽湖汛期划分综合分析[J]. 中国农村水利水电,2023(6):74-78. (Li Wenjie,Feng Zhigang,Li Xiaoli,et al. A comprehensive analysis of the flood season division of Hongze Lake[J]. China Rural Water and Hydropower,2023(6):74-78. (in Chinese))

[16] 徐泗鑫. 联系数方法在水库流域汛期分期中的应用[D]. 合肥:合肥工业大学,2023.

[17] 谭乔凤,施颖,闻昕,等. 大渡河流域汛期涨水阶段径流相似性预报[J]. 水资源保护,2024,40(6):139-147. (Tan Qiaofeng,Shi Ying,Wen Xin,et al. Runoff similarity forecast during water rise stage of flood season in the Dadu River Basin[J]. Water Resources Protection,2024,40(6):139-147. (in Chinese))

[18] 王文鹏,陈元芳,刘波. 长江上游时空相关气候要素的区域趋势诊断[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(1):14-21. (Wang Wenpeng,Chen Yuanfang,Liu Bo. Regional climatic trend analysis in upper Yangtze River with consideration of both temporal and spatial correlation[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2017,45(1):14-21. (in Chinese))

[19] 朱艳欣,桑燕芳. 青藏高原降雨季节分配的空间变化特征[J]. 地理科学进展,2018,37(11):1533-1544. (Zhu Yanxin,Sang Yanfang. Spatial variability in the seasonal distribution of precipitation on the Tibetan Plateau[J]. Progress in Geography,2018,37(11):1533-1544. (in Chinese))

[20] Wu Chunyu,Li Qingquan,Dong Lili,et al. Rainy season onset date in Southwest China and the related atmospheric circulations[J]. Atmospheric Research,2024,298:107127.

[21] Chen Xiaoyang,You Qinglong. Effect of Indian Ocean SST on Tibetan Plateau precipitation in the early rainy season[J]. Journal of Climate,2017,30(22):8973-8985.

[22] 李林,王振宇,秦宁生,等. 长江上游径流量变化及其与影响因子关系分析[J]. 自然资源学报,2004(6):694-700. (Li Lin,Wang Zhenyu,Qin Ningsheng,et al. Analysis of the relationship between runoff amount and its impacting factor in the upper Yangtze River[J]. Journal of Natural Resources,2004(6):694-700. (in Chinese))

[23] 施晓晖,徐祥德. 三峡库区来水流量与长江流域上游前期降雨的关系研究[J]. 长江流域资源与环境,2011,20(9):1062-1066. (Shi Xiaohui,Xu Xiangde. Relationship between runoff of the three gorges reservoir area and anterior precipitation in upstream of the Yangtze River valley[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2011,20(9):1062-1066. (in Chinese))

[24] 王雨潇,孙营营,张天宇,等. 1998—2020 年三峡库区最大 1 h 降雨的时空变化特征[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(1):10-18. (Wang Yuxiao,Sun Yingying,Zhang Tianyu,et al. Temporal and spatial variations of maximum one-hour precipitation in the Three Gorges Reservoir Region from 1998 to 2020[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2023,51(1):10-18. (in Chinese))

[25] 王艳君,姜彤,施雅风. 长江上游流域 1961—2000 年气候及径流变化趋势[J]. 冰川冻土,2005(5):709-714. (Wang Yanjun,Jiang Tong,Shi Yafeng. Changing trends of climate and runoff over the upper reaches of the Yangtze River in 1961-2000[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2005(5):709-714. (in Chinese))

[26] 黄青兰,王黎娟,李熠,等. 江淮梅雨区域入、出梅划分及其特征分析[J]. 热带气象学报,2012,28(5):749-756. (Huang Qinglan,Wang Lijuan,Li Yi,et al. Determination of the onset and ending of regional Meiyu over Yangtze-Huaihe river valley and its characteristics[J]. Journal of Tropical Meteorology,2012,28(5):749-756. (in Chinese))

(收稿日期:2025 - 02 - 06 编辑:刘晓艳)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.03.006

气象条件对生物滞留单元水文效应的影响

王 瑶^{1,2}, 王卫光^{1,2}

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室; 2. 河海大学水文水资源学院)

摘要: 基于 8 座海绵城市建设试点城市的气象资料,采用全分布式地表水-地下水耦合模型 ParFlow-CLM 对理想化生物滞留汇水区长期水文过程开展数值模拟,系统探究典型生物滞留单元径流、渗漏、蒸散发过程对气象条件的响应特征。结果表明:生物滞留单元的地表径流量主要受模拟年降雨场次的平均降雨强度影响;平均降雨强度也是影响年深层渗漏量与年降水量比值的主要气象因子;当生物滞留单元底部原土的渗漏能力为零(或生物滞留单元经过防渗处理)时,年地下径流系数与年内各场次的平均降雨强度呈一定的负相关关系,而与年降水量、年潜在蒸散量与年降水量的比值(E_p/P)基本不相关;随着原土渗漏能力的增强,年地下径流系数与平均降雨强度的相关性逐渐转向正相关,与年降水量、 E_p/P 也逐渐呈现一定的相关性;生物滞留单元总蒸散量与汇水区年降水量的比值与 E_p/P 呈现较强的线性相关关系。

关键词: 海绵城市;低影响开发;生物滞留设施;水文模型;ParFlow-CLM

Impacts of meteorological conditions on hydrological effects of a bioretention cell

Wang Yao^{1,2}, Wang Weiguang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University;
2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University)

Abstract: Based on the meteorological data of eight pilot cities for sponge city construction, the fully distributed surface water-groundwater coupled model ParFlow-CLM was applied to simulate long-term hydrological processes of an idealized bioretention catchment, and response characteristics of runoff, seepage, and evapotranspiration processes of a typical bioretention cell to meteorological conditions were systematically explored. The results indicate that the surface runoff volume of the bioretention cell is primarily influenced by the average rainfall intensity of rainfall events in the simulation year; the average rainfall intensity is also the main meteorological factor affecting the ratio of annual deep seepage to annual precipitation; when the seepage capacity of native soil at the bottom of the bioretention cell is zero (or the bioretention cell is treated with anti-seepage measures), the annual subsurface runoff coefficient shows a certain negative correlation with the average rainfall intensity of events within the year but is largely uncorrelated with annual precipitation and the ratio of annual potential evapotranspiration to annual precipitation (E_p/P); as the seepage capacity of native soil increases, the correlation between the annual subsurface runoff coefficient and average rainfall intensity gradually shifts to a positive correlation, and a certain correlation with annual precipitation and E_p/P gradually emerges; the ratio of total evapotranspiration of the bioretention cell to annual precipitation of the catchment shows a strong linear correlation with E_p/P of the catchment.

Key words: sponge city; low impact development; bioretention facility; hydrological model; ParFlow-CLM

生物滞留设施是海绵城市建设与现代雨洪管控体系的关键基础性设施,可有效实现径流削减、洪峰滞延与面源污染管控,在城市雨洪综合治理中发挥着至关重要的作用^[1-2]。生物滞留设施通过汇集雨水径流,利用植物、土壤和微生物的协同作用,实现径流的蓄滞与净化,能有效缓解城市内涝^[3-5]、改善水环境质量^[6-7]、促进雨水资源化利用^[8-9]。生物滞留设施的径流控制效果与降雨条件密切相关^[10-12];高强度、短历时降雨往往会导致生物滞留设施迅速饱和,降低其径流控制效果,而低强度、长历时降雨则有利于生物滞留设施充分发挥其渗透和滞蓄功能。此外,在长期过程中,气象条件还会影响蒸散发、地下水补给、降雨产流等过程,不同气象条件下生物滞留设施的水文响应可能有显著差异^[13-15]。我国气候区域跨度大,气候类型多样,从热带季风气候到温带大陆性气候,不同区域的气象条件差异显著。这种气候多样性决定了我国海绵城市建设不能采用统一标准或固定模式,而需要根据当地气象特征因地制宜地进行规划和设计。开展不同气象条件

下生物滞留设施水文响应规律研究,对海绵城市的科学规划与建设具有重要意义。

本文以理想化生物滞留汇水区为研究对象,采用全分布式地表水-地下水耦合模型 ParFlow-CLM 开展水文模拟试验。该模型可实现地表与地下水文过程的精细化模拟,近年来已广泛应用于城市水文演变、低影响开发水文效应评估等领域,具备良好的适用性。本文选取 8 座海绵城市建设试点城市的实测气象资料,构建多组差异化气象情景,通过模拟典型生物滞留单元的径流、渗漏、蒸散发等关键水文过程,系统剖析不同气象条件下的水文变化特征,进而揭示生物滞留设施对气象条件变化的响应规律。

1 研究方法

1.1 ParFlow-CLM

ParFlow-CLM 是一个基于物理控制方程的全分布式水文模型。ParFlow-CLM 通过耦合求解 Richards 方程(式(1))以及运动波/扩散波方程(式(2))模拟地表、地下水流,同时耦合 CLM(community land model)计算地表与大气的 水分、热量交换,模拟土壤、植被的蒸散发过程。

$$SS_s \frac{\partial p}{\partial t} - \varphi \frac{\partial S}{\partial t} = \nabla \cdot \boldsymbol{q} + q_s + \frac{q_e}{m'} \tag{1}$$

$$\frac{\partial \psi_s}{\partial t} = \nabla \cdot \boldsymbol{v} \psi_s + q_r + q_e \tag{2}$$

其中
$$S = \begin{cases} S_{\text{res}} + \frac{S_{\text{sat}} - S_{\text{res}}}{(1 + |\alpha p|^n)^m} & p < 0 \\ S_{\text{sat}} & p \geq 0 \end{cases} \quad \boldsymbol{q} = -K \nabla(p - z)$$

$$K = K_{\text{sat}} S_e^l [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad S_e = \frac{S - S_{\text{res}}}{S_{\text{sat}} - S_{\text{res}}}$$

$$\boldsymbol{v} = (v_x, v_y) = \left(-\frac{\sqrt{S_{f,x}}}{n} \psi_s^{\frac{2}{3}}, -\frac{\sqrt{S_{f,y}}}{n} \psi_s^{\frac{2}{3}} \right)$$

式中: S 为土壤水分饱和度; p 为土壤水压力水头; S_s 为土壤贮水率; t 为时间; φ 为土壤孔隙度; q_s 为源汇项; q_e 为地下与地表的水分交换通量; m' 为区分地表、地下区域的边界层厚度; K 为土壤导水率; z 为高程; S_{res} 为土壤残余饱和度; S_{sat} 为土壤完全饱和时的饱和度; α 、 m 、 n 、 l 均为经验参数; K_{sat} 为土壤饱和导水率; ψ_s 为地表水深; $\boldsymbol{v}$ 为水平平面上地表水的平均流速矢量; q_r 为降雨强度; $S_{f,x}$ 、 $S_{f,y}$ 分别为水平平面上横向和纵向的摩阻坡度。当采用运动波形式时, $S_{f,x}$ 、 $S_{f,y}$ 分别等于横向、纵向的地表坡度;当采用扩散波形式时, $S_{f,x}$ 、 $S_{f,y}$ 分别等于横向、纵向的地表坡度与水深坡度之和。ParFlow-CLM 假设水头压力及水流通量在地表、地下的交界处连续,将式(2)转换为 Richards 方程的边界条件,并在此基础上对耦合系统进行求解,实现地表、地下水流的耦合模拟^[16]。

1.2 气象情景及模型设置

本文采用 ParFlow-CLM 模拟一个理想化生物滞留汇水区的水文过程。汇水区包括生物滞留单元和不透水面集水区两部分,模拟区域地表高程设置如图 1 所示。图 1 中,黑色虚线框内的区域为透水面部分,即生物滞留单元,其余部分均为不透水面,不透水面汇集区的坡度为 1%。设置溢流口高程高于透水面 0.2 m,以模拟生物滞留单元的地表蓄水层,即只有生物滞留单元的积水深度超过 0.2 m 时,才能在溢流口处形成出流。生物滞留单元的面积为 34 m²,约占汇水区总面积的 1/20,符合住建部《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》的规定。模型模拟的水平方向空间精度为 1 m。

生物滞留单元内部结构设置为上层填料层、下层砾石层两层。其中,上层填料层为 0.5 m 厚壤土,下层砾石层厚度为 0.3 m,壤土及砾石的土壤水动力参数参考相关文献^[17-18]的经验

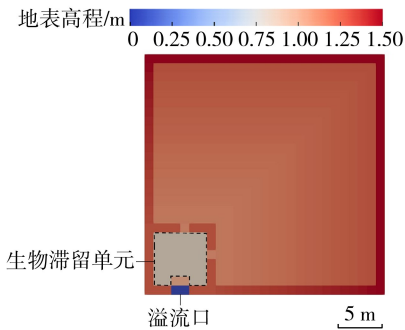


图 1 生物滞留汇水区地表高程
Fig.1 Land surface elevation of bioretention catchment

值确定(表1)。垂直方向上将模拟区域离散为6层进行模拟,自地表向下的逐层深度为0.05、0.10、0.15、0.20、0.15、0.15 m。生物滞留单元的植被类型设置为灌木,植被根系分布参数 a 和 b 分别设置为12.57、8.20^[19]。模拟区域底部设置为恒定零水头边界,以模拟砾石层的排水效应。

表1 生物滞留单元土壤水动力参数
Table 1 Soil hydrodynamic parameters of bioretention cell

土层	饱和含水量	残余含水量	饱和导水率/(m/h)	α/m^{-1}	n
填料层(壤土)	0.43	0.08	0.01	3.6	1.56
砾石层	0.35	0.03	1.44	24.4	2.49
不透水面	0.001	0.0005	1×10^{-6}	4.0	2.50

参考我国不同海绵城市建设试点城市的气象条件设置8种气象情景。8种气象情景分别以白城市(BC)、北京市(BJ)、重庆市(CQ)、青岛市(QD)、三亚市(SY)、深圳市(SZ)、武汉市(WH)、西宁市(XN)2020年的逐小时降水、辐射、风速、温度、湿度、气压数据作为模型输入,数据来源为ERA5-Land(<https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-land>)。不同气象情景的年降水量及潜在蒸散量见表2。初始土壤湿度分布通过代表性土柱预模拟结果确定。代表性土柱与生物滞留单元具有相同的土壤、植被参数。选取BC、BJ、CQ、QD、SY、SZ、WH、XN 8座城市的2010—2019年逐小时气象数据,驱动ParFlow-CLM开展预模拟,并将预模拟稳定后的土壤湿度空间分布作为正式数值模拟的初始条件。

1.3 生物滞留单元深层渗漏

本文深层渗漏特指生物滞留单元砾石层水分渗漏进入砾石层底部原土的过程,基于一定的假设与概化计算深层渗漏:对每个模拟时段,基于ParFlow-CLM的模拟结果可计算得到砾石层底部边界的排水速率,假定砾石层排水中超出原土渗漏能力(f)的部分迅速经由砾石层盲管排出生物滞留单元形成地下径流,剩余部分则形成深层渗漏;当砾石层底部边界排水速率小于渗漏能力时,则所有排水全部形成深层渗漏。此外,假定生物滞留单元底部原土的渗漏能力恒定,不随时间变化。共考虑了4种渗漏能力情景: $f=0, 2, 5, 10\text{ mm/h}$,其中 $f=0\text{ mm/h}$ 情景对应生物滞留单元经过防渗漏处理的情况; $f=2\text{ mm/h}$ 情景大致等于黏土的经验饱和导水率^[17]; $f=10\text{ mm/h}$ 情景大致等于本文中生物滞留单元填料层的饱和导水率。

2 结果与分析

2.1 地表径流

生物滞留单元的地表径流是指从溢流口排出的径流。图2为不同气象情景下,模拟年内所有降雨场次地表径流系数的频次分布。各气象情景的大部分降雨场次的地表径流系数均在0~0.1的范围内,表明生物滞留单元能较好地控制常规降雨事件中的雨水径流,不发生溢流。但是,地表径流系数整体的密度分布与模拟年的干旱程度(以模拟年年潜在蒸散量与年降水量的比值(E_p/P)表示)相关性较弱。部分气象条件差异较大的情景有着相似的地表径流系数密度分布,如BJ与SZ、QD与SY。由图3(a)(b)可知,年地表径流系数与年降水量、 E_p/P 相关性较弱,线性回归的决定系数 R^2 分别仅为0.18、0.11。该现象主要由生物滞留单元的内部结构特征所致:底部砾石层可持续排出土壤重力水,填料层能够长期维持稳定的下渗能力。在此条件下,生物滞留单元产生溢流的关键取决于降雨强度,而非降雨

表2 不同气象情景年降水量及年潜在蒸散量
Table 2 Annual precipitation and annual potential evapotranspiration under different meteorological scenarios

气象情景	年降水量/mm	年潜在蒸散量/mm
BC	629.16	1766.04
BJ	423.36	1626.35
CQ	1353.31	1108.09
QD	962.27	1486.99
SY	1858.13	2449.22
SZ	1537.32	2230.98
WH	1984.83	1275.66
XN	614.14	1431.62

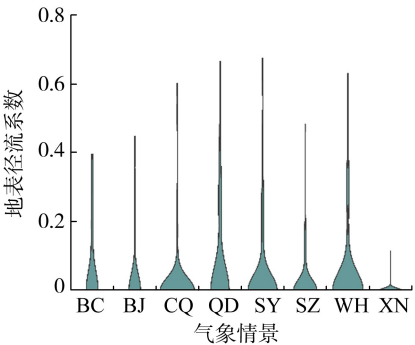


图2 不同气象情景下生物滞留单元场次降雨地表径流系数统计
Fig. 2 Statistics of event-based surface runoff coefficients of bioretention cell under different meteorological scenarios

总量,因此地表径流系数与年降水量、 E_p/P 的线性关联程度较低。若生物滞留单元不具备砾石排水层,则地表径流将表现出较强的蓄满产流特性,地表径流量将主要受降雨总量的影响^[11]。图 3(c) 中各降雨场次的平均最大 1 h 降水量一定程度上能代表降雨强度,可以看出,年地表径流系数与不同气象情景下各降雨场次的平均最大 1 h 降水量呈现较强的正相关性,线性回归的 R^2 达到 0.76。综上,带有砾石排水层的生物滞留单元的地表径流量主要与降雨场次的降雨强度相关,受降雨总量、干旱程度的影响较小。

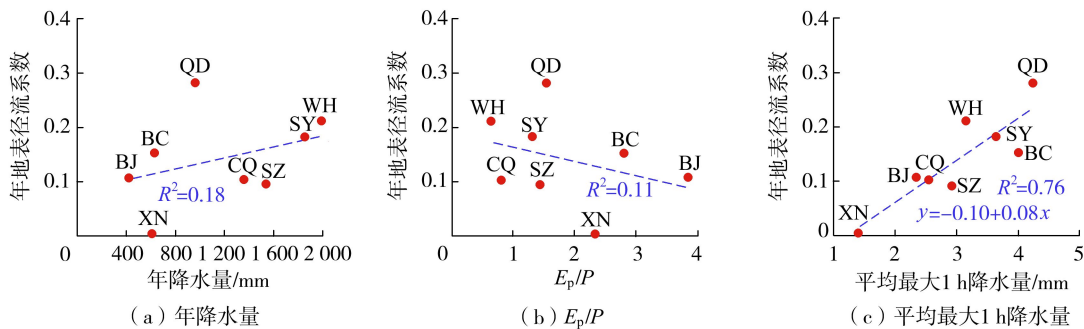


图 3 年地表径流系数与主要水文气象因子的关系

Fig. 3 Relationship between annual surface runoff coefficient and major hydrometeorological factors

2.2 地下径流及深层渗漏

生物滞留单元产生的地下径流,经填料层渗滤与吸附净化作用,水质显著优于地表径流,可收集回用于绿地灌溉、道路清扫、市政冲厕等场景,实现雨水资源化利用^[20-21]。不同的原土渗漏能力下,各气象情景的年地下径流系数如图 4 所示。当 $f=0\text{ mm/h}$ 时,各气象情景的年地下径流系数分布范围为 0.44~0.64,远大于地表径流系数。年地下径流系数与各气象条件因子的关系随渗漏能力的变化而变化。当 $f=0\text{ mm/h}$ 时,年地下径流系数与年降水量、 E_p/P 基本不相关,而与平均最大 1 h 降水量呈一定的负相关关系。随着渗漏能力的增大,年地下径流系数与平均最大 1 h 降水量的关系先转变为不相关,后逐渐表现出一定的正相关关系。当渗漏能力增加至 2 mm/h 以上时,地下径流系数与年降水量开始表现出一定的正相关性,与 E_p/P 也表现出弱相关性。

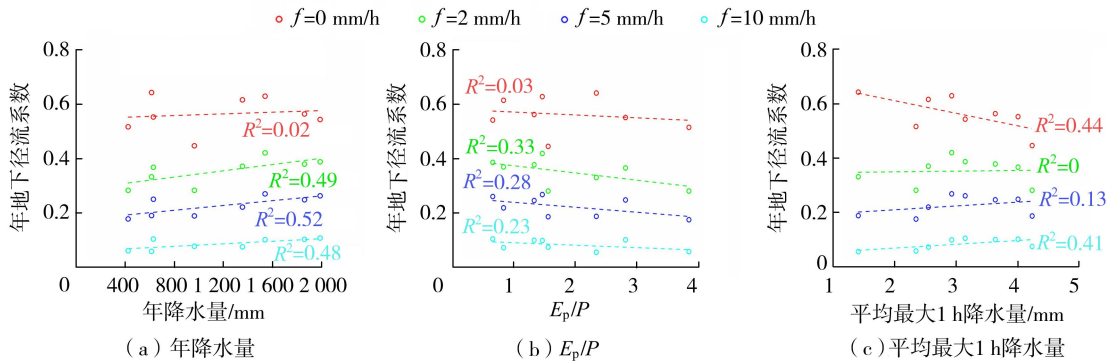


图 4 年地下径流系数与主要水文气象因子的关系

Fig. 4 Relationship between annual subsurface runoff coefficient and major hydrometeorological factors

图 4 (c) 所呈现的变化特征,是降雨强度对地下径流产生双重效应共同作用的结果:①降雨强度越大时,生物滞留单元越容易形成溢流(图 3),总下渗及地下径流随之减少,即溢流效应;②降雨强度增大,易在生物滞留单元表面积水并形成水头压力,加速填料层土壤水下渗并快速排出,使填料层排水速率超过原土渗漏能力,进而产生地下径流,即地下超渗效应。当原土渗漏能力较弱时,溢流效应占据主导;随渗漏能力逐步提升,地下超渗效应的作用不断增强,且在 f 达到 2 mm/h 时,两类效应的影响基本持平。渗漏能力继续提高后,地下超渗效应应逐步成为主导控制因素。

干旱程度对地下径流的影响也与填料层排水速率有关。气象条件越湿润、土壤越饱和,越有利于降雨期间填料层排水速率超出渗漏能力,从而促进地下径流的形成,导致图 4 中地下径流与年降水量的正相关性以及与 E_p/P 的负相关性。特别是 $f=0\text{ mm/h}$ 时,地下径流的形成只与填料层排水总量相关,而不再受填料层

排水速率的影响,即与干旱程度无关,导致图 4 中 $f=0\text{ mm/h}$ 时,地下径流与年降水量、 E_p/P 基本不相关。

深层渗漏是生物滞留汇水区地下水补给的主要来源。由图 5 可知,所有气象情景的生物滞留单元的深层渗漏总量均较为可观。当 $f=10\text{ mm/h}$ 时,不同气象情景下的年深层渗漏量与年降水量的比值(D_d/P)可达到 $0.37\sim0.58$;即使当 $f=2\text{ mm/h}$ 时,不同气象情景下的 D_d/P 也可达到 $0.16\sim0.31$,与地表径流系数相近。 D_d/P 主要与平均最大 1 h 降水量有关,而与年降水量、 E_p/P 的相关性较弱。原因在于:渗漏总量主要受控于填料层总出流量,与填料层排水速率的关联性较弱,因此渗漏总量受干旱程度的影响有限。结合前文分析可知,填料层总出流量主要由降雨强度决定,这也使得最大 1 h 降水量成为深层渗漏的主要水文气象因子。

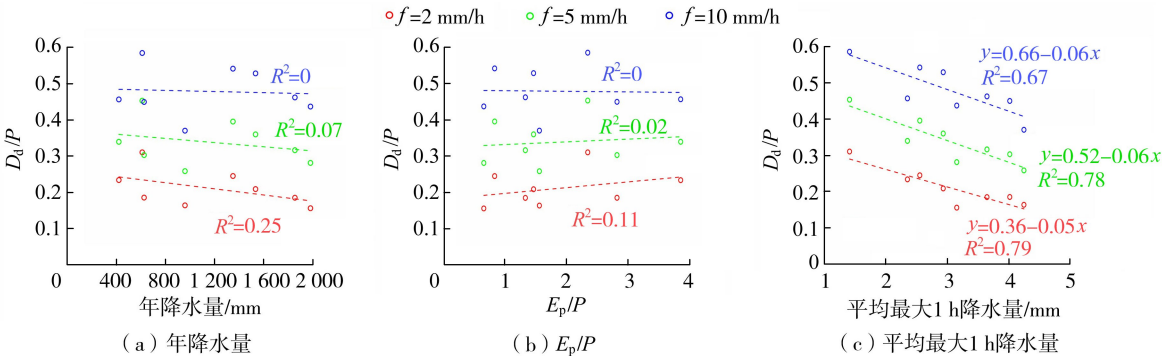


图 5 不同渗漏能力情景下 D_d/P 与主要水文气象因子的关系

Fig. 5 Relationship between D_d/P and major hydrometeorological factors under different seepage capacity scenarios

2.3 蒸散发

不同气象情景下生物滞留单元总蒸散量与汇水区年降水量的比值($E_{a,c}/P$)差异明显,且随着 E_p/P 的增加而增加(图 6)。 $E_{a,c}/P$ 与 E_p/P 表现出较强的相关性,线性拟合的 $R^2=0.78$,这一强线性相关关系与传统的 Budyko 理论框架有较大差异,是生物滞留单元的汇集特性导致的。根据 Budyko 框架,流域多年平均蒸散发系数与干旱指数之间为极强非线性关系:当干旱指数小于 0.5 时,蒸散发系数基本随干旱指数线性增加;当干旱指数持续增长至 0.5 以上时,蒸散发系数随之增长的增长率逐渐降低;当干旱指数位于 1.0~2.0 范围时,蒸散发系数与干旱指数呈现明显的非线性关系;随着干旱指数持续增加,蒸散发系数无限逼近于 1.0^[22]。而图 6 中,在 E_p/P 位于 0.5~4.0 的范围内时, $E_{a,c}/P$ 基本随 E_p/P 线性增加,这是因为,在生物滞留汇水区,生物滞留单元的水量输入除了其上方降水外,还包括不透水面汇集区的大量地表径流。例如,本文生物滞留单元的汇集比为 20:1,模型计算的不透水面年蒸发量约占其上方降水的 20%,这一比例也与 Ragab 等^[23]的试验计算结果接近,则生物滞留单元的年水量输入约为其上方降水的 3.8 倍。若定义潜在蒸散发与实际输入水量的比值为生物滞留单元的干旱指标(A_c),则当 E_p/P 位于 0.5~4.0 的范围内时(图 6), A_c 大致位于 0.13~1.05 的范围。在这一范围内,由于供水较为充足,实际蒸散发主要取决于蒸散能力, $E_{a,c}/P$ 与 E_p/P 也因此近似呈现线性相关关系。

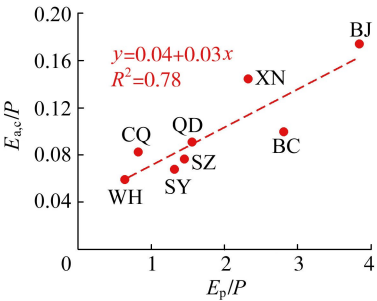


图 6 $E_{a,c}/P$ 与 E_p/P 的关系

Fig. 6 Relationship between $E_{a,c}/P$ and E_p/P

3 结 论

- a. 生物滞留单元的地表径流量主要受各降雨场次的平均降雨强度影响,而与年降水量、干旱程度等因素基本不相关。
- b. 生物滞留单元地下径流量受到地表溢流效应与地下超渗效应的共同影响。当生物滞留单元下方原土渗漏能力较低时,地表溢流效应占主导地位,地下径流量与平均降雨强度呈一定的负相关关系;随着原土渗漏能力增加,地下超渗效应逐渐占主导地位,地下径流量与平均降雨强度逐渐由负相关关系转变为不相关,进一步转变为正相关关系。
- c. 生物滞留单元的深层渗漏主要取决于填料层出流总量,出流总量主要取决于地表径流量,因此深层

渗漏与平均降雨强度呈较强负相关关系,而与年降水量、干旱程度的相关性较弱。

d. 由于生物滞留汇水区的径流汇集作用,生物滞留设施的供水比自然情况下更充足,其实际蒸散发更加依赖于不同气象条件下的蒸散能力,生物滞留单元的蒸散发系数($E_{a,c}/P$)与干旱程度(E_p/P)因此呈现近似线性的关系。

参考文献:

[1] 张文龙,张守红,张建军. 生物滞留系统径流与水质调控效应研究进展[J]. 应用生态学报,2023,34(1):264-276. (Zhang Wenlong,Zhang Shouhong,Zhang Jianjun. Stormwater quantity and quality control performance of bioretention systems: a literature review [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2023,34(1):264-276. (in Chinese))

[2] Davis A P,Hunt W F,Traver R G,et al. Bioretention technology:overview of current practice and future needs[J]. Journal of Environmental Engineering,2009,135:109-117.

[3] Liang C,Zhang X,Xu J,et al. An integrated framework to select resilient and sustainable sponge city design schemes for robust decision making [J]. Ecological Indicators,2020,119:106810.

[4] Huang F,Harman C J,Hobbs B F,et al. Assessment of climate,sizing,and location controls on green infrastructure efficacy:a timescale framework [J]. Water Resources Research,2020,56(5):e2019WR026141.

[5] Hdeib R,Aouad M. Rainwater harvesting systems:an urban flood risk mitigation measure in arid areas[J]. Water Science and Engineering,2023,16(3):219-225.

[6] 蒋春博,李家科,李怀恩. 生物滞留系统处理径流营养物研究进展[J]. 水力发电学报,2017,36(8):65-77. (Jiang Chunbo,Li Jiake,Li Huaen. Advances in studies on bioretention systems for purifying runoff nutrients [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2017,36(8):65-77. (in Chinese))

[7] 仇付国,陈丽霞. 雨水生物滞留系统控制径流污染物研究进展[J]. 环境工程学报,2016,10(4):1593-1602. (Qiu Fuguo,Chen Lixia. Research progress on contaminants removal from stormwater runoff by bioretention [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2016,10(4):1593-1602. (in Chinese))

[8] 李海燕,罗艳红,张悦. LID 措施在道路雨水利用工程中的应用[J]. 节水灌溉,2013(11):44-49. (Li Haiyan,Luo Yanhong,Zhang Yue. Application of LID in road runoff utilization engineering [J]. Water Saving Irrigation,2013(11):44-49. (in Chinese))

[9] 孔东莲,田露,袁普金,等. 我国南方城市建设项目雨水集蓄利用措施及其配置模式[J]. 中国水土保持,2018(4):15-19. (Kong Donglian,Tian Lu,Yuan Pujin,et al. Storage and infiltration measures of rainwater and its allocation modes of city construction projects in southern China [J]. Soil and Water Conservation in China,2018(4):15-19. (in Chinese))

[10] 肖婉婷,宋聚生,马翔,等. 基于 SWMM 的校园海绵城市布局优化研究:以深圳市某中学校园为例[J]. 水利水电技术(中英文),2023,54(9):48-60. (Xiao Wanting,Song Jusheng,Ma Xiang,et al. Optimization of LID facilities planning strategy based on PSO algorithm and SWMM model:a case study of middle school campus in Shenzhen [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2023,54(9):48-60. (in Chinese))

[11] Wang Yao,Zhang Xiang,Gong Li,et al. On the relationship between surface runoff and impervious area in the urban RPA (receiving pervious area)-DIA (disconnected impervious area) system:a simple equation expressing the sensitivity of runoff to changes in imperviousness [J]. Journal of Hydrology,2024,631:130836.

[12] Palla A,Gnecco I. Hydrologic modeling of low impact development systems at the urban catchment scale [J]. Journal of Hydrology,2015,528:361-368.

[13] 王恺,章孙逊,张守红. 基于 Hydrus-1D 不同气候区城市绿色屋顶径流调控效益研究[J]. 环境科学学报,2023,43(3):195-205. (Wang Kai,Zhang Sunxun,Zhang Shouhong. Hydrological performances of green roofs in different climates based on Hydrus-1D simulation [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2023,43(3):195-205. (in Chinese))

[14] Voter C B,Loheide S P. Climatic controls on the hydrologic effects of urban low impact development practices [J]. Environmental Research Letters,2021,16:064021

[15] 崔瑞君,侯精明,王雁鸿,等. 小区绿色屋顶改造对径流的影响[J]. 水利水电科技进展,2025,45(4):94-101. (Cui Ruijun,Hou Jingming,Wang Yanhong,et al. Effects of green roof retrofitting in residential communities on runoff[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2025,45(4):94-101. (in Chinese))

[16] Kollet S J,Maxwell R M. Integrated surface-groundwater flow modeling:a free-surface overland flow boundary condition in a parallel groundwater flow model [J]. Advances in Water Resources,2006,29(7):945-958.

[17] Carsel R F,Parrish R S. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics [J]. Water Resources

Research,1988,24(5):755-769.

[18] Mace A,Rudolph D L,Kachanoski G. Suitability of parametric models to describe the hydraulic properties of an unsaturated coarse sand and gravel [J]. Groundwater,1998,36(3):465-475.

[19] Zeng X B. Global vegetation root distribution for land modeling[J]. Journal of Hydrometeorology,2001,2(5):525-530.

[20] 贾斌凯,李怀恩,黄绵松,等. 固原市玫瑰苑小区低影响开发措施改造对降雨径流的调控效益[J]. 水土保持通报,2020,40(1):130-135. (Jia Binkai,Li Huairen,Huang Miansong,et al. Regulation and control benefits of rainfall-runoff by low impact development measures in a residential district of Guyuan city[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2020,40(1):130-135. (in Chinese))

[21] 路琪儿,罗平平,虞望琦,等. 城市雨水资源化利用研究进展[J]. 水资源保护,2021,37(6):80-87. (Lu Qier,Luo Pingping,Yu Wangqi,et al. Research progress of urban rainwater resources utilization[J]. Water Resources Protection,2021,37(6):80-87. (in Chinese))

[22] Wang Cong,Wang Shuai,Fu Bojie. Advances in hydrological modelling with the Budyko framework;a review [J]. Progress in Physical Geography,2016,40(3):409-430.

[23] Ragab R,Rosier P,Dixon A,et al. Experimental study of water fluxes in a residential area:2. road infiltration,runoff and evaporation [J]. Hydrological Processes,2003,17:2423-2437.

(收稿日期:2025-02-18 编辑:刘晓艳)

(上接第17页)

[27] 王文鹏,何站鹏,巫义锐,等. 基于集合卡尔曼滤波的水文模型状态变量反馈校正方法[J]. 水力发电学报,2024,43(10):17-31. (Wang Wenpeng,He Dianpeng,Wu Yirui,et al. State variable feedback-correction method of hydrological model based on ensemble Kalman filter[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2024,43(10):17-31. (in Chinese))

[28] 邓鹏鑫,王银堂,胡庆芳,等. GR4J 模型在赣江流域日径流模拟中的应用[J]. 水文,2014,34(2):60-65. (Deng Pengxin,Wang Yintang,Hu Qingfang,et al. Application of GR4J in daily runoff simulation for Ganjiang river basin[J]. Journal of China Hydrology,2014,34(2):60-65. (in Chinese))

[29] 许王辰,陈瑞弘,孙岸炜. 基于峰值导向型粒子群优化算法的城市水文模型自动率定方法[J]. 水利水电科技进展,2025,45(4):31-38. (Xu Wangchen,Chen Ruihong,Sun Anwei. Automatic calibration method for urban hydrological models based on peak-oriented particle swarm optimization algorithm[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2025,45(4):31-38. (in Chinese))

[30] 梁忠民,赵建飞,段雅楠,等. 微分形式新安江模型[J]. 水科学进展,2024,35(3):374-386. (Liang Zhongmin,Zhao Jianfei,Duan Ya'nan,et al. Differential-form Xin'anjiang model[J]. Advances in Water Science,2024,35(3):374-386. (in Chinese))

[31] Zhao Jianfei,Liang Zhongmin,Singh V P,et al. Two-dimensional differential form of distributed Xin'anjiang model [J]. Hydrology and Earth System Sciences,2025,29(15):3745-3769.

[32] Houska T,Kraft P,Chamorro-Chavez A,et al. SPOTting model parameters using a ready-made Python package[J]. PLOS ONE,2015,10(12):e0145180.

[33] 张旭,蒋卫国,周廷刚,等. GIS 支持下的基于 DEM 的水文响应单元划分:以洞庭湖为例[J]. 地理与地理信息科学,2009,25(4):17-21. (Zhang Xu,Jiang Weiguo,Zhou Tinggang,et al. Hydrological response unit division for Dongting Lake based on DEM and GIS[J]. Geography and Geo-Information Science,2009,25(4):17-21. (in Chinese))

[34] Antonetti M,Buss R,Scherrer S,et al. Mapping dominant runoff processes:an evaluation of different approaches using similarity measures and synthetic runoff simulations[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2016,20(7):2929-2945.

[35] Fenicia F,McDonnell J J. Modeling streamflow variability at the regional scale:(1) perceptual model development through signature analysis[J]. Journal of Hydrology,2022,605:127287.

[36] Fenicia F,Meißner D,McDonnell J J. Modeling streamflow variability at the regional scale:(2) development of a bespoke distributed conceptual model[J]. Journal of Hydrology,2022,605:127286.

[37] Dal Molin M,Schirmer M,Zappa M,et al. Understanding dominant controls on streamflow spatial variability to set up a semi-distributed hydrological model:the case study of the Thur catchment[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2020,24(3):1319-1345.

(收稿日期:2025-06-24 编辑:刘晓艳)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.03.007

粤港澳大湾区雨潮复合灾害遭遇分析

戴驰航^{1,2}, 季小梅^{1,2}, 乔煜^{2,3}, 张蔚^{1,2}

(1. 河海大学江苏省海岸海洋资源开发与环境安全重点实验室; 2. 河海大学港口海岸与近海工程学院;
3. 中国交通建设集团有限公司)

摘要:通过分析粤港澳大湾区 1960—2020 年的降水量和潮位数据,并结合泰森多边形方法与相关性分析,揭示了雨潮复合灾害与风暴增水的非一致性现象及其空间分布特征。结果表明:大湾区风暴增水的非一致性显著,其中口门地区的变异点集中于 1987 年前后,上游流域的变异点则提前至 1975 年前后;雨潮复合灾害的变异点在口门处为 1987 年前后,中腹部流域延后至 1994 年;风暴增水的非一致性主要与气候变化、上游建闸和河口挖沙等人类活动相关,而复合灾害的变化显著受到风暴增水与降雨相互作用的影响。

关键词:雨潮复合灾害;风暴增水;非一致性;相关性分析;粤港澳大湾区

Analysis of rainfall-tide compound disasters in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

Dai Chihang^{1,2}, Ji Xiaomei^{1,2}, Qiao Yu^{2,3}, Zhang Wei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Coast Ocean Resources Development and Environment Security, Hohai University;
2. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University;
3. China Communications Construction Company)

Abstract: By analyzing precipitation and tide level data of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area (GBA) from 1960 to 2020, and combining the Thiessen polygon method with correlation analysis, the non-coincidence phenomena and spatial distribution characteristics of rainfall-tide compound disasters and storm surges were revealed. The results indicate that the non-coincidence of storm surges in the GBA is significant. Specifically, the variation points in the estuary regions are concentrated around 1987, whereas those in the upstream basins occur earlier, around 1975. For rainfall-tide compound disasters, the variation points are observed around 1987 in the estuary areas but are delayed to 1994 in the central basin. The non-coincidence of storm surges is primarily driven by climate change and human activities, such as upstream dam construction and estuarine sand mining. Furthermore, the variations in compound disasters are significantly influenced by the interaction between storm surges and rainfall.

Key words: rainfall-storm surge compound disaster; storm surge; non-coincidence; correlation analysis; the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

当前全球海平面正处于加速上升状态,21 世纪海平面上升速率最快可达 $12.6\text{ mm/a}^{[1]}$,海平面大幅抬升将显著加剧沿海地区灾害风险^[2-3]。在全球气候变化背景下,近几十年来高强度人类活动持续扩张,大规模工程建设与快速城市化进程进一步加剧了自然生态环境扰动。受自然演化与人类活动双重驱动,全球气候变化速率显著加快,极端天气与气候异常事件频发、强度增强,全球范围内水文要素规律亦发生明显变异^[4-6],逐渐出现了以跳跃变异、趋势变异、周期变异为主的水文序列非一致性现象^[7-9]。

在当前的环境变化情形下,以水文条件一致性为前提的传统工程水文学方法界定的海岸警戒潮位线以及建设的海岸防洪工程体系都将面临极大的风险和挑战^[10]。非一致性研究旨在更全面地描述水文变量在变化环境中的随机性与相关性特征,弥补传统方法的局限性。基于 Copula 函数的联合分布模型被广泛应用于多变量相关性分析^[11],通过混合分布法、变异点诊断^[12]以及 Vine Copula^[13]等的引入,不仅解决了高维数据分析中的维数灾难问题,还显著提高了对复杂水文系统的描述能力。尽管当前基于 Copula 函数的复合灾

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3008100)

作者简介:戴驰航(2001—),男,硕士研究生,主要从事河口海岸水动力研究。E-mail:939948458@qq.com

通信作者:季小梅(1981—),女,副教授,博士,主要从事河口海岸水动力环境研究。E-mail:vastocean@hhu.edu.cn

害分析在风险评估中取得了一定进展,但在动态变化规律的捕捉、空间异质性分析以及复合机制研究方面仍存在不足,同时国内研究多集中于东南沿海及河口地区^[14],缺少对河口上游河网的进一步研究。针对这些问题,本文以粤港澳大湾区为研究对象,深入研究区域风暴增水及雨潮复合灾害的非一致性特征及其空间分布规律,以期为区域防灾减灾提供科学依据。

1 研究区概况

粤港澳大湾区位于珠江三角洲,地处中国大陆南端,经纬度范围 21°31'N~23°10'N、112°45'E~113°50'E。珠江三角洲是中国最重要的经济区之一,也是全球知名的城市群聚集地,涵盖了广州、深圳、珠海、香港、澳门等多个重要城市(图 1)。该三角洲流域内河网水系密布,流域总面积约 17 200 km²,呈现“三江汇流、八口入海”的独特格局。西江、北江、东江等多条河流在此交汇,塑造了复杂多样的水文地貌,也给区域水资源配置、生态环境保护与防灾减灾工作带来多重挑战。区域内地势平坦低洼,沿海地带部分区域地面高程甚至低于海平面,对风暴潮、海平面上升及强暴雨等极端事件具有较高的暴露度与脆弱性。



图 1 粤港澳大湾区城市及主要站点分布

Fig.1 Distribution of cities and major stations in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

珠江三角洲属于典型的亚热带海洋季风气候,区域内年际温差较小,但季节变化明显,夏季湿热,冬季温和。多年平均降水量约为 1 200~2 200 mm,季节分布极为不均,主要集中在夏季和秋季,尤其是 6—9 月的暴雨季节,常伴随强降雨、雷暴和热带气旋,极大地增强了区域内的洪水风险。

珠江三角洲同时也是我国风暴潮灾害高发区域之一。每年夏秋季节(7—9 月),受台风及热带气旋影响,风暴潮灾害尤为集中。风暴潮多由强台风或热带风暴诱发,沿岸增水普遍达 60~280 cm^[15],极端条件下增水幅度更为显著。风暴潮不仅直接威胁沿海城市基础设施安全与居民生产生活,还易引发大范围内涝与河道漫溢,进一步放大洪涝灾害影响与致灾风险。在气候变化持续加剧的背景下,未来风暴潮灾害的发生频次与致灾强度均可能呈上升态势,对区域防灾减灾工作提出了更高要求。受海平面上升、风暴潮频发及极端降水事件增多的共同影响,珠江三角洲正面临日趋复杂的雨潮复合灾害风险。因此,开展该区域雨潮复合灾害的非一致性特征及其演变规律研究,对提升区域灾害防控能力、优化应急响应体系及支撑国土空间长远规划,具有重要的理论意义与实践价值。

2 研究数据与方法

2.1 研究数据

研究的基础数据包括潮位数据与降水量数据,其中潮位数据来自《中华人民共和国水文年鉴第 8 卷珠

江流域》,降水量数据来自中国国家级地面气象站(<https://data.cma.cn/>),香港站的潮位与降水量数据来自香港天文台(<https://www.hko.gov.hk/sc/cis/climat.htm>),各站点的分布如图 1 所示。风暴潮是引发海岸洪水的致灾因素之一,本文利用 T_Tide 调和分析方法^[16],从实测潮位序列中分离提取天文潮位,以潮位残差表征风暴潮效应,进而得到各潮位站的逐时风暴增水过程。

2.2 研究方法

2.2.1 泰森多边形

针对潮位与降水观测站点空间不匹配的问题,本文引入泰森多边形进行流域面积划分。泰森多边形是一个关于空间划分的基础数据结构,它通过一组由连接两邻点直线的垂直平分线组成的连续多边形构成,所有在平面上的点,按照最邻近原则划分平面^[17]。本文依据泰森多边形划分各个潮位站在三角洲范围内所控制的面均流域,并划分雨量站 i 在不同潮位站的控制流域内的面积占比 f_i ($i=1,2,\cdots,n;n$ 为雨量站总数),雨量站 i 在控制流域内的日降水量记为 x_i ,则各潮位站控制流域内的降水量 $\bar{x}$ 可表示为:

$$\bar{x}=(f_1x_1+f_2x_2+\cdots+f_nx_n)/(f_1+f_2+\cdots+f_n) \tag{1}$$

2.2.2 极值事件提取

为研究大湾区雨潮的极端灾害事件,需要提取灾害事件的极值样本序列,本文采用超门限峰值(POT)法每年提取 3~4 个超定量事件,构成各个潮位站的风暴增水时间序列。POT 法通过挑选超过某一门限值或者阈值的值,组成极值序列^[18]。确定阈值是最重要的一个环节,但是对于阈值的选取还缺乏公认的标准,常用的方法有百分位阈值法、去趋势波动分析法、平均每年多个超定量值的方法^[19],鉴于平均每年多个超定量值的方法具有操作简便的特点且被广泛应用,本文采用该方法来确定 POT 法的阈值。

2.2.3 相关性度量

为解决降雨表征值无法确定的问题,本文通过量化雨潮相关性,确定具有最高相关性的时间段作为降雨表征事件的时间范围。其中确定随机变量间相关性的方法有很多,本文采用 Pearson 线性相关系数、Spearman 秩相关系数、Kendall 秩相关系数确定变量之间的相关性。

2.3 非一致性识别检验

2.3.1 趋势分析方法

本文水文序列趋势性分析采用 Mann-Kendall(M-K)趋势检验法。该方法为世界气象组织推荐使用的非参数统计方法,适用性强,已在水文序列趋势识别中得到广泛应用^[20]。考虑到水文序列通常存在自相关性,可能影响检验结果的可靠性,本文先采用 Kulkarni 等^[21]提出的预置白处理(Pre-Whitening)消除序列自相关,再进行 M-K 趋势检验。在此基础上,通过计算各站点极端事件序列的 Hurst 系数,揭示其长持续性特征与变异程度。Hurst 系数最初由 Hurst 在研究尼罗河水文情势时提出,用于刻画时间序列的长程相关性与记忆性,目前已广泛应用于水文、气象及地质等领域^[22]。

2.3.2 单因子变异点检验方法

目前单因子水文序列的突变检测方法很多,且各种方法都有其显著的适用性和优缺点。本文参照时翠等^[23]的研究思路,综合采用累积距平法、有序聚类分析法、滑动 F 检验法及 M-K 突变分析法 4 种方法开展突变点识别。通过多方法相互验证、互补支撑,综合对比研判后确定最终的突变结果,可有效克服单一检验方法结果可靠性不足的问题。

2.3.3 复合灾害变异点检验方法

本文利用 Archimedean 型 Copula 函数具有较强的捕捉变量间非线性、非对称相关性的优点,构建雨潮复合灾害的联合分布^[24-25]。对于样本容量为 m 的 Archimedean 型 Copula 函数,样本序列为 $\{(x_1,y_1),(x_2,y_2),\cdots,(x_m,y_m)\}$,其变量的边缘分布函数分别为 $F(x)$ 和 $G(y)$,相应的边缘概率密度函数为 $f(x)$ 和 $g(y)$,其联合分布 $H(x,y)$ 的表达式为:

$$H(x,y)=C(F(x),G(y)) \tag{2}$$

设联合分布函数 $H(x,y)$ 对应的联合概率密度函数为 $h(x,y)$,表达式为:

$$h(x,y)=f(x)g(y)C_{12}(F(x),G(y)) \tag{3}$$

其中

$$C_{12}(u,v)=\frac{\partial}{\partial u}\frac{\partial}{\partial v}C(u,v)$$

Archimedean 型 Copula 函数中参数的极大似然估计为:

$$\lambda = \operatorname{argmax}_{\lambda \in \mathbf{R}} \sum_{j=1}^m \ln C_{12}(\lambda; F(x_j), G(y_j))$$

(4)

假设观测数据存在一个变异点,则原假设 H_0 和对立假设 H_1 分别为:

$$H_0: \lambda_1 = \lambda_2 = \cdots = \lambda_m \quad H_1: \lambda_1 = \cdots = \lambda_{k^*} \neq \lambda_{k^*+1} = \cdots = \lambda_m$$

(5)

式中: λ_k 、 λ_{k^*} 、 λ_m 分别为相应数据参数的极大似然估计。

若拒绝原假设,则 k^* 为序列最可能变异点。当 $k^* = k$, 可以建立极大似然估计法的 Copula 对数似然比统计量:

$$-2\ln\Lambda_k = \sum_{j=1}^k \ln C_{12}(\lambda_j; F(x_j), G(y_j)) + \sum_{j=k+1}^m \ln C_{12}(\lambda_j; F(x_j), G(y_j)) - \sum_{j=1}^m \ln C_{12}(\lambda_j; F(x_j), G(y_j))$$

(6)

根据似然比检验方法,统计量 Z_m 渐近分布为自由度约束个数的 χ^2 分布,即当检验一个变异点时, $Z_m \sim \chi^2(1)$ 。如果 k^* 未知,当统计量 $Z_m = \max_{1 \leq k \leq m} (-2\ln\Lambda_k)$ 在置信水平为 95% 下,大于 $\chi^2(1)$, 拒绝原假设,即存在变异点^[24,26]。

3 结果与分析

3.1 大湾区风暴增水非一致性

3.1.1 风暴增水的趋势性分析

通过研究风暴增水的变化特征,量化分析多年风暴增水灾害的风险变化。首先选取各潮位站提取出的 POT 风暴增水序列,计算各序列的 Hurst 系数、Hurst 变异度以及 M-K 趋势值,结果见表 1。各潮位站的 Hurst 系数均大于 0.5,表明序列均呈现不同程度的正向持续性与变异特征,潮位站之间 M-K 趋势值所表现出的上升与下降趋势不同。

以三沙口站为例,M-K 趋势值为 2.26,通过了显著水平 0.05 的假设检验,风暴增水序列呈现显著上升趋势,具体约为每 10 年上升 16 mm,且三沙口站的 Hurst 系数为 0.9153,表现出很强的正向持续性,表明三沙口的风暴增水在未来仍持续上升的可能性较大,易造成更大的正向变化幅度。南沙、万顷沙西、横门、黄金、西炮台的风暴增水序列也同样呈现上升趋势,表明各潮位站风暴增水在未来均有持续上升的可能性。万顷沙西站的正向持续性较为明显,但序列的上升趋势不显著,表明万顷沙西站的风暴增水在未来将不会有大幅度的上升。黄金站的风暴增水上升趋势较为显著,但序列的正向持续性与变异程度较低,表明黄金站的风暴增水幅度在短期内仍会上升,而未来长期内仍呈上升趋势的可能性不大,存在未来风暴增水降低的可能性。

竹银、紫洞、三水、马口、香港的 M-K 趋势值均为负值,表明风暴增水在未来均有持续下降的可能性;其中紫洞、马口与香港 3 个站的下降趋势明显,马口与紫洞站均达到了每 10 年 30 mm 的下降幅度,且马口站的下降趋势通过了显著水平 0.01 的假设检验,但 3 个站的风暴增水序列在未来持续呈现下降趋势的可能性较小;同样,竹银与三水的序列趋势显著性较差,未来存在风暴增水上升的可能性。

3.1.2 风暴增水序列变异点识别

采用累积距平法、有序聚类分析法、滑动 F 检验法及 M-K 突变分析法对各潮位站的风暴增水序列进行计算,通过综合 4 种方法的检测结果,并结合各站点序列的实际变化情况,全面衡量比较得出最终结果(表 2)。

对于三沙口站,累积距平法、有序聚类分析法和 M-K 突变分析法的结果显示,1962—2017 年的风暴增水序列在 1987 年发生突变,滑动 F 检验法检测出 2012 年的突变点,结合实际数据可以发现,三沙口风暴增水序列在 1987 年前后的均值变化为 45.3%,大于 2012 年前后的均值变化 10.8%,因此最终确定三沙口风暴增

表 1 各潮位站风暴增水 Hurst 系数、变异度及 M-K 趋势值
Table 1 Hurst coefficient, variation, and M-K trend value of storm surge at each tide gauge station

潮位站	Hurst 系数	Hurst 变异度/%	M-K 趋势值
三沙口	0.9153	83.1	2.26
南沙	0.8781	75.6	1.29
万顷沙西	0.9019	80.4	0.62
横门	0.9028	80.6	1.91
黄金	0.7500	50.0	1.68
西炮台	0.8132	62.6	1.39
竹银	0.8108	62.2	-1.16
紫洞	0.6541	30.8	-3.08
三水	0.7730	54.6	-1.48
马口	0.7848	57.1	-4.40
香港	0.6475	29.5	-1.98

水序列的变异点为 1987 年。对于西炮台站,累积距平法和有序聚类分析法识别出序列在 1987 年发生突变, M-K 突变分析法识别出序列在 1978 年发生突变,而滑动 F 检验法未通过显著性检测,因此未检测出突变点,结合实际序列确定西炮台风暴增水序列的变异点为 1987 年。对于竹银站,4 种分析方法识别出 1967 年与 1986 年两个突变点,通过对实际序列分析,1967 年前后序列的变化幅度为 35.8%,大于 1986 年前后序列的变化幅度(21.6%),因此确定竹银风暴增水序列的变异点为 1967 年。万顷沙西风暴增水变异点如图 2 所示,其他站点的分析图由于篇幅原因不再给出。

表 2 各潮位站风暴增水变异点年份
Table 2 Years of storm surge variation point at each tide gauge station

潮位站	变异点年份				综合确定的 变异点年份
	累积距平法	有序聚类分析法	滑动 F 检验法	M-K 突变分析法	
三沙口	1987	1987	2012	1987	1987
南沙	1985	1985	2016	1980	1985
万顷沙西	1987	1987	2016	1985	1987
横门	1987	1987	2016	1983	1987
黄金	1987	1988	1975	1975	1975
西炮台	1987	1987	—	1978	1987
竹银	1986	1967、1986	1967	1967	1967
紫洞	1974	1974	2006	2000	1974
三水	1975	1975	2016	1975	1975
马口	1975	1975	2012	1975	1975
香港	2016	1965	2016	1965	1965

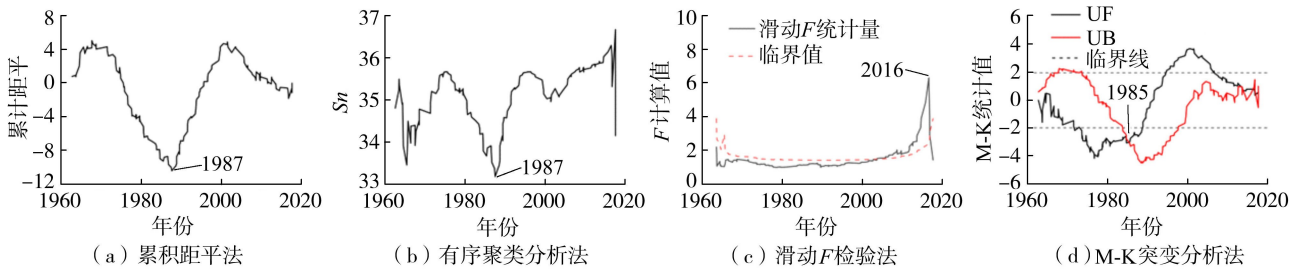


图 2 万顷沙西站风暴增水变异点识别

Fig. 2 Identification of variation points of storm surge at Wanqingshaxi Station

3.1.3 大湾区风暴增水非一致性特征

通过对大湾区各潮位站的风暴增水序列进行趋势性分析以及变异点识别,发现其非一致性存在明显的空间分布特征。趋势性方面,位于口门附近的三沙口、南沙、万顷沙西、横门及西炮台等站,近年来受风暴强度增强和海面气压降低的影响,风暴增水显著上升,壅水现象愈发突出。珠江口呈典型漏斗形河口特征,尤其是伶仃洋区域,自外海向内逐渐收窄且水深变浅,极易导致风暴潮能量集中、波高增强,并沿虎门方向上溯,加剧口门地区潮位抬升和局地增水效应^[27]。此外,近年来大湾区风暴潮灾害呈现频率增加和强度增强的趋势,热带气旋路径偏北偏西发展显著,进一步放大了下游及口门区域的致灾强度^[27-28]。位于中上游流域的紫洞、三水、马口等站,因距离河口较远、河道束窄及上游来流顶托作用,风暴增水呈现不同程度的下降趋势;位于外海的香港站,在海平面持续上升带来的水深增大作用下,使得风暴潮传播至近岸时的浅水作用减弱,增水极值减小^[29];同时也有研究^[30]表明,厄尔尼诺事件与气温变化均会在一定程度上影响风暴潮事件,尽管其影响机制还不够清晰,但气候变暖背景下的强台风活动加剧,使珠江三角洲风暴潮灾害的频率升高以及致灾强度增加已成趋势。

在变异点方面,大湾区风暴增水的变异点空间分布如图 3 所示,图中站点旁的标注为各潮位站点所识别出的变异点年份与序列变异度。位于口门附近的站点如三沙口、南沙、万顷沙西、横门及西炮台,变异点年份集中在 1987 年前后且序列均有较大的变异度,联系实际可以认为,20 世纪 80 年代的大范围挖沙活动极大改变了三角洲的地形^[31],进而影响各口门附近站点的风暴增水演变过程,造成风暴增水序列变异点的产生;黄金站的变异点识别过程虽也检测出 1987 年的变异点,但通过对实际序列的分析,认为黄金站在 1975 年发生的突变更为显著,反映了 20 世纪 70 年代珠江流域上游建闸和水库调控对下游风暴潮过程的影响;同样,

位于三角洲中腹部以上的站点如紫洞、三水及马口,其变异点也集中在 1975 年附近,进一步印证了上游水利工程建设引发的径潮相互作用变化^[32];稍靠下游的竹银站在上游径流与外海潮位的共同作用下,风暴增水的突变在 1967 年较为显著;对于外海的香港站,在海平面上升的作用下,风暴增水序列在 1965 年发生突变,尽管变异程度相对较小,但仍表明海平面变化对近岸风暴潮过程的影响不可忽视。

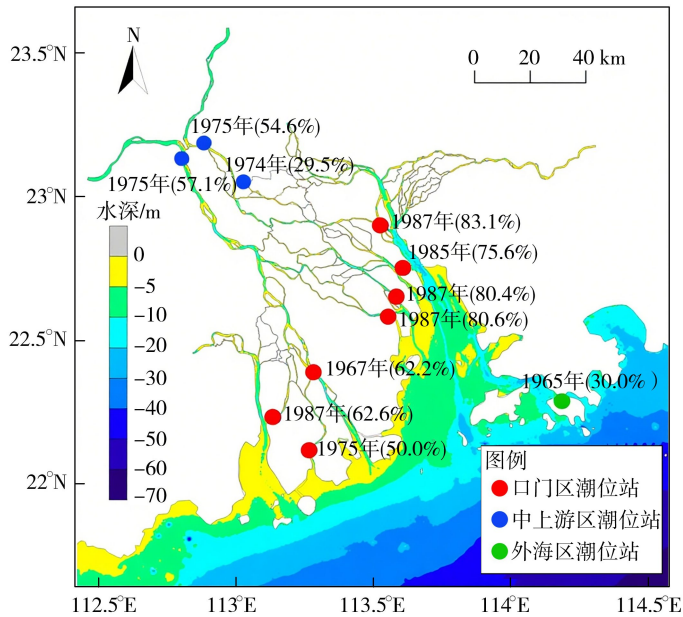


图 3 各潮位站风暴增水变异点空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of variation points of storm surge at each tide gauge station

综上,大湾区风暴增水过程的非一致性演变既受到地形特征、上游来流和人类活动的显著影响,也与近年来区域风暴活动增强、气候变化驱动下的极端天气过程密切相关。该结论与已有研究^[32]对大湾区河口地貌、风暴潮动力响应及人类活动影响的认识基本一致,进一步证实大湾区风暴潮-降雨复合灾害风险正呈现空间非一致性加剧、结构性演变的发展态势。

3.2 雨潮复合灾害非一致性

3.2.1 降雨表征量确定

通过计算 Pearson、Spearman、Kendall 相关系数分析各复合灾害表征变量的相关性,为确保联合分布能够最大程度描述复合灾害的风险特性,优先考虑相关性最高的变量组合作为联合分布的构建序列。

基于泰森多边形法计算得到的各雨量站的面平均日降水量,并据此选取关键降雨特征指标,为后续分析奠定数据基础。通过统计选取了每一个极值增水事件期间的总降水量(P)、发生极值增水事件当天的降雨量(P_1)以及前后 3 天(P_3)、5 天(P_5)、7 天(P_7)的降水量作为降雨候选变量,计算 3 种相关系数以描述各降雨候选变量与风暴增水的相关性,绘制了相关关系散点图(图 4)。针对三沙口站:①基于显著性水平对各降雨候选变量与风暴增水的相关性进行筛选, P 、 P_1 、 P_2 序列与风暴增水之间的相关性显著(显著性水平均小于 0.05),通过 95%置信水平检验;②对相关系数绝对值进行比较, P_1 序列在 3 种相关系数下的相关系数绝对值均为最大,且相关方向一致为正,表明该变量与风暴增水的依赖关系最强、同步性最显著。综合显著性检验与相关系数评估,最终确定选择 P_1 序列作为降雨表征变量,参与三沙口站雨潮复合灾害的联合分布建模。同理,选择了 P_1 序列构成南沙、万顷沙西、横门的联合分布;选择 P 序列构成黄金、西炮台、竹银、三水、香港的联合分布;选择 P_7 序列构成紫洞、马口的联合分布。

3.2.2 大湾区雨潮复合灾害非一致性识别

本文以 Gumbel、Clayton 和 Frank3 种 Archimedean 型 Copula 函数为候选,主要考虑其结构简单、参数少,适用于样本量有限且变量间存在非线性相关性的情形,能有效描述雨潮过程中的联合特征。根据 Archimedean 型 Copula 函数的优选结果,以 Frank 型 Copula 函数构建三沙口、南沙、万顷沙西、横门、黄金、西炮台以及香港站的联合分布函数,以 Clayton 型 Copula 函数构建竹银、紫洞、三水以及马口的联合分布函数^[33],并运用基于 Archimedean 型 Copula 函数的似然比检验方法,对各潮位站的雨潮复合灾害 Copula 结构

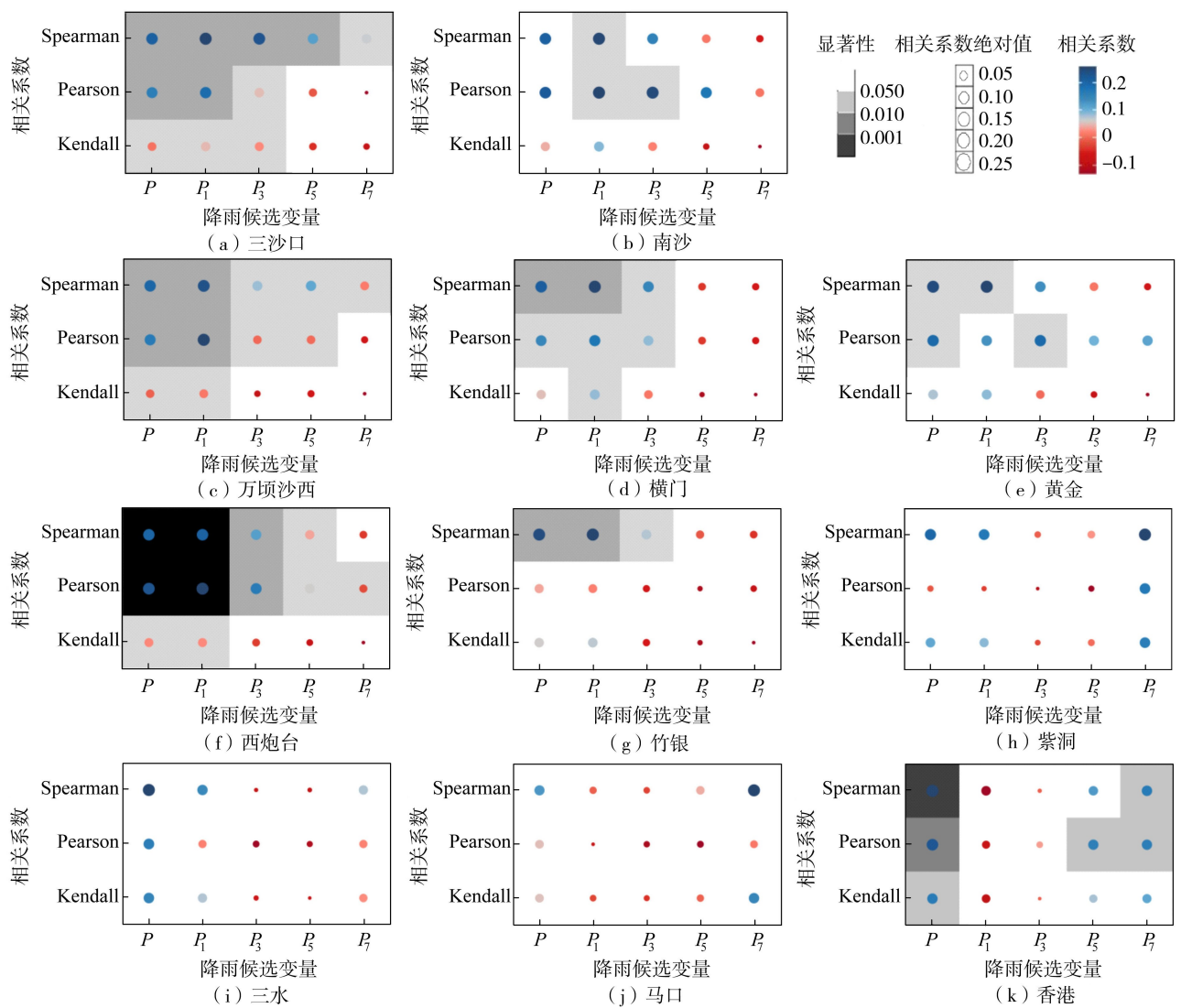


图 4 各潮位站相关关系散点图

Fig. 4 Scatter chart of relationship between each tide gauge station

进行分析,诊断大湾区复合灾害的变异情况。

根据计算结果可以确定各潮位站的复合灾害变异点年份(表 3),其中口门附近的三沙口、万顷沙西、横门以及黄金均在 1987 年前后发生显著突变现象,而南沙与西炮台站分别检测出在 2013 年与 2002 年的显著突变点;位于中上游流域的 4 个站点(竹银、紫洞、三水、马口)均在 1994 年前后发生突变,其中只有竹银站出现的突变点较为显著;外海的香港站检测出在 2016 年发生突变。

3.3 非一致性对雨潮相关性的影响

本文识别的联合分布变异点反映了各潮位站风暴增水与降水量之间依赖关系的变化特征,具体量化结果见表 3。口门附近潮位站及香港站的雨潮相关性在变异点后均显著降低,南沙站与香港站的变异点相对滞后,且在变异点后呈现负相关关系,指示出自 2013 年以来大湾区雨潮关系发生了显著变化。该特征的形成与区域复杂的河道地形特征及风暴过程变化

表 3 各潮位站复合灾害变异点年份及雨潮相关性
Table 3 Years of variation points of compound disasters and rainfall-storm surge correlation at each tide gauge station

潮位站	变异点年份	Kendall 秩相关系数		
		变异点前	变异点后	差值
三沙口	1987	0.419	0.146	-0.273
南沙	2013	0.195	-0.288	-0.483
万顷沙西	1987	0.361	0.117	-0.244
横门	1987	0.338	0.124	-0.214
黄金	1987	0.249	0.135	-0.114
西炮台	2002	0.126	0.620	0.494
竹银	1994	0.039	0.323	0.284
紫洞	1995	0.063	0.142	0.079
三水	1995	-0.082	0.351	0.433
马口	1993	0.079	0.214	0.135
香港	2016	0.308	-0.286	-0.594

密切相关。在下游区域,尽管风暴潮强度增强已在潮位趋势分析中体现,但雨潮关系变化的关键机制并非单纯来源于增水增强,而在于风暴潮对降雨排泄通道的持续阻断作用,使得降雨径流难以及时入海,雨潮关系从同步增强逐渐转变为脱耦甚至负相关,内涝风险显著上升^[34]。上游地区河道相对开阔,受风暴潮顶托效应减弱,降雨主导作用增强,径潮作用关系随时间推移发生变化,这与近年来中上游区域降雨主控风险加大的趋势相符^[27,34]。此外,受气候变化驱动,极端降雨事件频发,雨量集中且强度增强,尤其在南沙和香港等口门及外海区域,降雨过程与风暴潮的响应关系发生变化,表现出降雨过程增强而潮位受限的特征,雨潮相关性转为负相关,复合致灾机制趋于复杂化。综上,联合分布变异点的出现不仅揭示了降雨变化对雨潮关系的重要影响,更反映出大湾区复合型灾害风险已由简单叠加向非线性复杂响应演变。

4 结 论

a. 大湾区内大多数潮位站的风暴增水序列呈现显著上升趋势,特别是在口门地区。口门附近的6个站,其趋势性均表现显著上升,结合Hurst系数可认为这一上升趋势会持续较长时间,其变异点集中在1987年前后,结合实际情况认为20世纪80年代的大范围挖沙活动为变异点的主要成因;中上游及外海香港站点的风暴增水均呈负向变化趋势,表明其未来风暴增水总体呈下降态势。其中,中上游站点突变点集中出现在1975年前后,这一现象可归因于20世纪70年代珠江上游水库闸坝建设与蓄水截流,显著改变了上游来水条件;外海香港站点变异程度相对较弱,其1965年前后检测到的突变点,可能与海平面长期持续上升的累积效应有关。

b. 风暴增水与降水量之间具有显著的相关性,尤其是极值增水事件当天的降水量(P_1)与风暴增水之间的相关性最强。而在非一致性条件下,大湾区的雨潮相关性发生了不同程度的变化,特别是在1987年后,口门地区的风暴增水与降水量的相关性显著下降,甚至在部分站点出现了负相关现象,这反映了风暴潮强度的持续上升导致复合灾害风险显著增加。在中上游地区,风暴增水对复合灾害的影响减弱,而降雨的作用逐渐增强,尤其是在风暴增水和降雨的极值同时发生时,风险显著上升。

c. 降水量的时空分布对风暴潮有显著影响。在风暴潮强度增加的背景下,降雨的空间和时间变化进一步加剧了复合灾害的发生。降雨与风暴潮的极值叠加,导致了大湾区部分地区在特定时间段内(如1987年、1994年等)相关性发生变化,降雨和风暴潮的强度都达到了历史新高,它们相互叠加时产生了更大的灾害风险,显示出明显的非一致性特征。因此,未来的复合灾害风险评估必须考虑这种非一致性现象,以更好地应对日益复杂的极端气候事件。

参考文献:

[1] IPCC. AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

[2] Declin A T, Pan J Y, Lin Hui. Tidal variability in the Hong Kong region[J]. Ocean Science, 2019, 15(4): 853-864.

[3] 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))

[4] 陈晓宏, 涂新军, 谢平, 等. 水文要素变异的人类活动影响研究进展[J]. 地球科学进展, 2010, 25(8): 800-811. (Chen Xiaohong, Tu Xinjun, Xie Ping, et al. Progresses in the research of human induced variability of hydrological elements [J]. Advances in Earth Science, 2010, 25(8): 800-811. (in Chinese))

[5] 张长征, 沈婷, 徐慎晖, 等. 极端天气下特大型城市“水资源-能源-粮食”安全风险研究[J]. 水利经济, 2023, 41(1): 55-61. (Zhang Changzheng, Shen Ting, Xu Shenhui, et al. Study on the security risk of “water-energy-food” in mega cities under extreme weather[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2023, 41(1): 55-61. (in Chinese))

[6] Ren Liliang, Yuan Shanshui, Yang Xiaoli, et al. Initiatives to clarify mechanisms of hydrological evolution in human-influenced Yellow River Basin[J]. Water Science and Engineering, 2023, 16(2): 117-121.

[7] Milly P C D, Betancourt J, Falkenmark M, et al. Stationarity is dead: whither water management? [J]. Science, 2008, 319: 573-574.

[8] 顾海挺. 基于跳跃变异的双非一致性洪水频率分析[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.

[9] 隆院男, 黄春福, 莫军成, 等. 非一致性条件下松澧地区洪水遭遇规律分析[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(4): 14-22.

- (Long Yuannan, Huang Chunfu, Mo Juncheng, et al. Analysis of flood coincidence law in Song-Li Region under non-consistency conditions[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(4): 14-22. (in Chinese))
- [10] 梁忠民, 胡义明, 黄华平, 等. 非一致性条件下水文设计值估计方法探讨[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(1): 50-53. (Liang Zhongmin, Hu Yiming, Huang Huaping, et al. Study on the estimation of design value under non-stationary environment [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(1): 50-53. (in Chinese))
- [11] 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))
- [12] 冯平, 李新. 基于 Copula 函数的非一致性洪水峰量联合分析[J]. 水利学报, 2013, 44(10): 1137-1147. (Feng Ping, Li Xin. Bivariate frequency analysis of non-stationary flood time series based on Copula methods [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(10): 1137-1147. (in Chinese))
- [13] 杨蕊, 吴时强, 高学平, 等. 基于 Vine Copula 函数的河湖连通水环境多因子联合风险识别研究[J]. 水利学报, 2020, 51(5): 606-616. (Yang Rui, Wu Shiqiang, Gao Xueping, et al. A vine copula-based study on identification of multivariate water environmental risk under different connectivity of rivers and lakes [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(5): 606-616. (in Chinese))
- [14] Ji Tao, Li Guosheng, Liu Yangxiaoyue, et al. Spatiotemporal features of storm surge activity and its response to climate change in the southeastern coastal area of China in the past 60 years[J]. JGR Atmospheres, 2020, 125(23): e2020JD033234.
- [15] Fang Jiayi, Liu Wei, Yang Saini, et al. Spatial-temporal changes of coastal and marine disasters risks and impacts in China's mainland[J]. Ocean and Coastal Management, 2017, 139: 125-140.
- [16] Pawlowicz R, Beardsley B, Lentz S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE[J]. Computers and Geosciences, 2002, 28(8): 929-937.
- [17] 刘金义, 刘爽. Voronoi 图应用综述[J]. 工程图学学报, 2004(2): 125-132. (Liu Jinyi, Liu Shuang. A review of Voronoi diagram applications [J]. Journal of Engineering Graphics, 2004(2): 125-132. (in Chinese))
- [18] 杜鸿. 气候变化背景下淮河流域洪水极值时间概率分析与研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
- [19] Lang M, Ouarda T B M J, Bobée B. Towards operational guidelines for over-threshold modeling[J]. 1999, 225(3/4): 103-117.
- [20] Goossens C, Berger A. Annual and seasonal climatic variations over the northern Hemisphere and Europe during the Last Century [J]. Annales Geophysicae, 1986, 4(4): 385-400.
- [21] Kulkarni A, Storch H. Monte Carlo experiments on the effect of serial correlation on the Mann-Kendall test of trend[J]. Meteorol Zeitschrift, 1995, 4(2): 82-85.
- [22] 雷旭, 谢平, 吴子怡, 等. 基于 Hurst 系数与 Bartels 统计量的水文变异性及其敏感性[J]. 应用生态学报, 2018, 29(4): 1051-1060. (Lei Xu, Xie Ping, Wu Ziyi, et al. Hydrological variability and sensitivity based on Hurst coefficient and Bartels statistic [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(4): 1051-1060. (in Chinese))
- [23] 时翠, 陈晓宏, 张强. 近几十年来珠江三角洲 1 月和 7 月水位变异分析[J]. 热带地理, 2012, 32(3): 233-240. (Shi Cui, Chen Xiaohong, Zhang Qiang. Change-points of water levels in the Pearl River Delta in January and July for the last decades [J]. Tropical Geography, 2012, 32(3): 233-240. (in Chinese))
- [24] 郭爱军, 黄强, 王义民, 等. 基于 Archimedean Copula 函数的流域降雨-径流关系变异分析[J]. 水力发电学报, 2015, 34(6): 7-13. (Guo Aijun, Huang Qiang, Wang Yimin, et al. Detection of variations in precipitation-runoff relationship based on Archimedean Copula [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(6): 7-13. (in Chinese))
- [25] Huang Shengzhi, Chang Jianxia, Huang Qiang, et al. Identification of abrupt changes of the relationship between rainfall and runoff in the Wei River Basin, China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2015, 120(1/2): 299-310.
- [26] Xiong Lihua, Jiang Cong, Xu Chongyu, et al. A framework of change-point detection for multivariate hydrological series[J]. Water Resources Research, 2015, 51(10): 8198-8217.
- [27] 罗志发, 黄本胜, 邱静, 等. 粤港澳大湾区风暴潮时空分布特征及影响因素[J]. 水资源保护, 2022, 38(3): 72-79. (Luo Zhifa, Huang Bensheng, Qiu Jing, et al. Spatio-temporal distribution characteristics and influencing mechanisms of storm surge in Guangdong, Hong Kong and Macao Greater Bay Area[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3): 72-79. (in Chinese))
- [28] 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))

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.03.008

公明水库与清林径水库连通工程的水环境效应 及长期演变规律

黄河¹, 张霞¹, 冯韬¹, 吴穹², 闫兴成¹, 叶宝民³, 乔如霞¹, 陈求稳¹

(1. 南京水利科学研究院生态环境研究所; 2. 深圳市原水有限公司; 3. 深圳市东部水源管理中心)

摘要:以珠江三角洲水资源配置工程中的公明水库-清林径水库连通工程为研究对象,基于实测水质与气象数据,结合未来气候模式数据,采用 GOTM 水库水动力学模型与 GOTM-FABM-WET 水库生态动力学模型,构建了公明水库与清林径水库连通工程水动力-水质-生态耦合模型,模拟了不同调度方式下连通工程的水动力特征与水质响应规律,并预测了 2022—2031 年 SSP1-2.6 与 SSP3-7.0 两种气候变化情景下水库的富营养化演变趋势。结果表明:连通后,受水水库清林径总氮质量浓度呈现 1—7 月上升、8—12 月下降的季节性反转特征,而公明水库总氮质量浓度略有下降,叶绿素 a 与总磷质量浓度变化相对较小。在气候变暖背景下,连通工程运行 10 a 后两水库叶绿素 a 质量浓度预计将达到 30~40 $\mu\text{g/L}$,富营养化指数(TLI)进入轻度富营养化区间(50~60),且高排放情景下公明水库总氮质量浓度存在超过Ⅲ类水质标准限值的风险。

关键词:水库连通;气候变化;生态动力学模型;富营养化情势预测;公明水库;清林径水库

Water environmental effects and long-term evolution of the Gongming Reservoir-Qinglinjing Reservoir connection project

Huang He¹, Zhang Xia¹, Feng Tao¹, Wu Qiong², Yan Xingcheng¹, Ye Baomin³, Qiao Ruxia¹, Chen Qiuwen¹

(1. Eco-Environmental Research Department, Nanjing Hydraulic Research Institute;

2. Shenzhen Raw Water Co., Ltd.; 3. Shenzhen Eastern Water Source Management Center)

Abstract: For the Gongming Reservoir-Qinglinjing Reservoir connection project in the Pearl River Delta water resources allocation project, a hydrodynamic-water quality-ecological coupled model for this connection project was established based on measured water quality and meteorological data, as well as future climate model data, by using the GOTM reservoir hydrodynamic model and the GOTM-FABM-WET reservoir ecological dynamics model. The hydrodynamic characteristics and water quality response laws of the connection project under different operation modes were simulated, and the eutrophication evolution trends of the reservoirs from 2022 to 2031 under two climate change scenarios (SSP1-2.6 and SSP3-7.0) were predicted. The results indicate that after connection, the total nitrogen mass concentration in the receiving Qinglinjing Reservoir shows a seasonal reversal characteristic of increasing from January to July and decreasing from July to December. Meanwhile, the total nitrogen mass concentration in Gongming Reservoir decreases slightly, and the changes in chlorophyll a and total phosphorus mass concentrations are relatively small. Under the background of climate warming, the chlorophyll a mass concentration in both reservoirs is expected to reach 30-40 $\mu\text{g/L}$ after 10 years of the connection project operation, and the trophic level index (TLI) enters the mild eutrophication range (50-60). Moreover, under the high-emission scenario, the total nitrogen mass concentration in Gongming Reservoir faces the risk of exceeding the limit of the Class III water quality standard.

Key words: reservoir connection; climate change; ecological dynamics model; eutrophication trend prediction; Gongming Reservoir; Qinglinjing Reservoir

随着全球气候变化与城市化进程加速,水资源时空分布不均、水环境污染及供水安全保障已成为制约区域可持续发展的核心问题^[1-2]。河湖水系连通工程作为优化水资源配置、提升水环境承载能力的重要手段,在缓解区域性水资源短缺、增强水系统韧性方面发挥了关键作用^[3]。以深圳市为例,作为典型的高密度超大城市,其本地水资源禀赋匮乏,80%以上供水依赖东江引水,单一水源结构使城市面临供水安全风险^[4-5]。

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3205902);国家自然科学基金项目(52121006,52209094)

作者简介:黄河(2001—),男,硕士研究生,主要从事水环境数值模拟研究。E-mail:1352951339@qq.com

通信作者:陈求稳(1974—),男,研究员,博士,主要从事生态水力学和环境水信息学研究。E-mail:qwchen@nhri.cn

水库连通工程在长期运行中,受水区水质波动可能引发富营养化等生态风险,威胁供水安全,如跨流域调水可能导致营养盐迁移与累积,进而引发藻类水华和富营养化^[6-7]。因此,科学评估水库连通工程的水环境效应的响应机制至关重要。王喜华等^[8]指出,氮滞留作为流域氮循环的核心调控机制,其时空动态深刻影响水环境安全与生态健康。Liu 等^[9]在查干湖的研究中指出灌区退水是氮磷输入的重要来源,不当的水量调度可能加剧富营养化风险。在气候变化背景下,水温升高与极端水文事件频发可能进一步放大这些生态风险,如气温升高可能导致水体温度升高,加速有机物的分解,降低溶解氧质量浓度,并促进藻类繁殖^[10]。研究水库连通的水环境效应及其对气候变化的响应机制,对保障饮用水安全与生态可持续性具有迫切现实意义。

近年来,面向连通工程水环境效应评估的模拟工具与评价方法协同发展。在生态效应表征方面,基于浮游植物群落的多指标评价指数通过整合功能参数与生物量指标,为识别富营养化与藻类风险提供了新的评估范式^[11],但在与水动力过程的动态耦合方面仍存在不足。现有生物评价指数多数侧重于物理-化学过程,对浮游植物动态、底泥-水体交换等生态过程的耦合模拟较为薄弱,限制了藻类水华等非线性过程的预测精度^[12]。在气候变化响应方面,Savino 等^[13]通过耦合气候与水文模型,指出传统评估方法可能低估极端气候下水库分层对藻类生长的促进作用;Ma 等^[14]基于机器学习预测了全球湖泊藻华对气候与土地利用变化的响应,强调了升温与营养盐输入的协同效应。然而,现有研究多基于历史气象数据,对水库长期运行条件下气候变化对受水区水质和藻类的影响考虑不足^[15-16]。此外,水库连通后的长期生态风险量化,面临短期监测数据与长期生态过程不匹配的挑战,尤其在营养盐累积、沉积物再悬浮等慢变量效应及多情景风险阈值界定方面存在显著不足^[17]。

本文针对珠江三角洲水资源配置工程中的公明水库与清林径水库连通工程,构建水动力-生态耦合模型,动态耦合水动力、浮游植物、底泥-水体交换等过程,以提升藻类水华和营养盐迁移的模拟精度,最终揭示水库营养盐对水库连通工程运行的长期响应规律,量化未来不同气候情景下的水库富营养化风险,为跨区域水系连通工程的水质风险管理与调度优化提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

公明水库与清林径水库连通工程(图 1)是珠江三角洲水资源配置工程在深圳境内配套项目之一,输水干线全长 41.28 km,为 I 等大(1)型工程,是深圳市骨干水网的重要组成部分^[18]。工程全线位于深圳市光明区、龙华区和龙岗区,建成后将深圳市西北部的公明水库(库容 1.38 亿 m³)与东北部的清林径水库(库容 1.86 亿 m³)连通,实现西江水与东江水的水源互通。公明水库-清林径水库连通工程可实现东江和西江水资源联合调配,提升水资源调配能力,从而保障深圳市供水战略储备目标的实现,增强深圳市水安全保障能力,并为向香港应急供水创造条件。工程正常输水规模为 185 万 m³/d,东江应急工况下的供水规模为 347 万 m³/d,西江应急工况下的供水规模为 200 万 m³/d^[5]。两水库形态复杂,岸线曲折(岸线系数分别为 2.0 和 5.8),有很多库湾和分支,存在局部水动力不足、水体交换能力弱等问题,以及水质恶化甚至富营养化的潜在风险。采用水动力-生态动力学模型预测连通后水库水质变化及长期气候响应,可以为连通工程运行管理提供科学依据。

1.2 数据来源及处理

1.2.1 实测数据

结合现有水文水质站分布,在公明水库和清林径水库各布设 6 个采样点(图 1),且在每个水库取水口处设有 1 个采样点,实测数据主要包括用作构建和验证水库生态动力学模型的 2021—2022 年流量、水质与气象等数据。水质监测数据每月月初采样获得,主要包括水下 0.5 m 处的总氮(TN)、总磷(TP)、叶绿素 a(Chl-

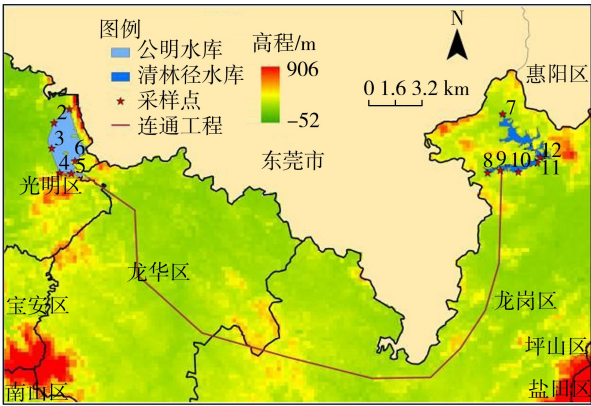


图 1 研究区概况及采样点分布

Fig. 1 Overview of research area and distribution of sampling points

a)的质量浓度和水温等。本文采用的气象数据主要包括 2021—2022 年的气温、风速、降水、2 m 露点温度、大气压强、太阳辐射及云覆盖系数等数据。2 m 露点温度、大气压强、太阳辐射、云覆盖系数的逐小时数据下载自欧洲中期天气预报中心第五代陆面再分析数据集(ERA5-Land),分辨率为 $0.1^{\circ}\times 0.1^{\circ}$ 。

1.2.2 未来气候模式气候数据获取与降尺度

本文未来气候模式气候数据采用第六次国际耦合模式比较计划(CMIP 6)中 ISMIP3b 项目提供的气候模式的输出数据^[19]。该数据包括了共享社会经济路径(SSPs)下经过降尺度处理的降水、气压、温度、光辐射和风速等变量的气候强迫数据,数据分辨率为 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$,这些数据已广泛用于评估未来气候变化下水文过程的变化分析研究^[20]。本文采用 Delta 方法对气候模式数据进行降尺度和偏差修正。

在 CMIP6 中,共享社会经济路径(SSPs)是一系列基于不同假设的未来发展路径,这些路径考虑了经济、社会、技术、政策和环境等因素的影响。SSPs 路径用于评估未来温室气体排放和相关气候变化的潜在影响,本文主要采用 SSP1-2.6 和 SSP3-7.0 两种未来气候路径;①SSP1-2.6 是一个以可持续发展为导向的路径,它假设全球将采取积极措施来减少温室气体排放,实现较低的温室气体排放水平(2.6 W/m^2 的辐射强迫)。在这个路径下,技术创新和社会、经济结构的转型将促进绿色增长;②SSP3-7.0 为中等排放路径,假设未来社会发展延续历史趋势,全球合作水平较低,但未出现长期冲突或社会失稳,该情景下温室气体辐射强迫为 7.0 W/m^2 ,排放水平介于积极减排与高排放之间。

2 研究方法

2.1 水库水动力学模型

本文使用 GOTM(general ocean turbulence model)一维水动力模型对不同调水工况下的水库水动力特征进行模拟。GOTM 是一个一维湍流模型,专为研究自然湖库水体中的关键水动力及热力学过程而设计^[21-22]。综合考虑模型适用性、现有资料情况,采用该模型构建公明-清林径水库连通工程一维水动力模型。该模型可计算水体温度、盐度、水位、太阳辐射、外部压力梯度及湍流混合等物理过程,为后续生态模型提供必要的动力驱动。

模型垂向设置均匀分布的 100 层,每日输出一个数据,密度由温盐的状态方程计算而来。在后续典型工况下的公明水库-清林径水库连通工程水质变化研究中,模型水深设置根据工程预计调度情况采用了两种不同的连通运行工况:①公明水库向清林径水库供水时,公明水库水深 54 m,出库流量 $21.21\text{ m}^3/\text{s}$,清林径水库水深 57 m,入库流量 $16\text{ m}^3/\text{s}$,先计算出库流量 $21.21\text{ m}^3/\text{s}$ 时公明水库取水口表层水质浓度,并作为清林径水库边界条件;②清林径水库向公明水库供水时,公明水库水深 31 m,入库流量 $7.65\text{ m}^3/\text{s}$,清林径水库水深 57 m,出库流量 $12.86\text{ m}^3/\text{s}$,先计算该库流量下清林径水库取水口表层水质浓度,并作为公明水库边界条件。

2.2 水库生态动力学模型

水库生态动力学模型采用 GOTM-FABM-WET 模型,该模型由 GOTM、FABM(frame work for aquatic biogeochemical models)和 WET 模型耦合而成。FABM 是基于 Fortran 2003 编写的耦合水动力和生态模型的应用程序编程接口,允许将生物地球化学模型耦合到一维、二维或三维的各种流体动力学模型,而无需更改任何模型代码,并鼓励和支持生态系统模型的模块化,这使得模型耦合更加便利^[23]。WET 模型是由奥胡斯大学湖泊生态组开发的湖泊生态模型,该模型以湖泊富营养化和生态修复过程的二维稳态转化理论为基础,在前身 PCLake 的基础上^[24]进行结构重组,通过 FABM 平台与不同的水动力模型结合^[25]。

GOTM-FABM-WET 模型采用的 10 m 风速、2 m 气温、气压、云覆盖、短波辐射等气象数据来自 ERA5-land 再分析数据库。模型计算时间段为 2021 年 1 月 1 日至 2022 年 5 月 31 日。入库水质边界值采用 2021—2022 每月的水质监测数据。

计算条件设置:生态模块计算时间步长为内膜时间步长,即 10 s。水动力模块与生态模块采用动态实时耦合的方式连接交换数据。

对模拟结果采用平均绝对误差(MAE)、平均绝对百分比误差(MAPE)、均方误差(MSE)和均方根误差(RMSE)进行评价。

3 结果与分析

3.1 模型验证

根据 2021 年 1 月至 2022 年 5 月的历史实测水质、水文及 ERA5-Land 气象数据分别对公明水库 5 号采样点和清林径水库 9 号采样点连通前水质进行模拟,采用公明水库取水口水质作为公明水库输入边界、清林径水库取水口水质作为清林径水库输入边界,并根据同步监测数据确定水位边界。模拟结果如图 2 所示。两水库的模拟值与实测值在季节尺度上呈现一致性,验证了 GOTM-FABM-WET 模型在水动力-生态耦合模拟中的可靠性。

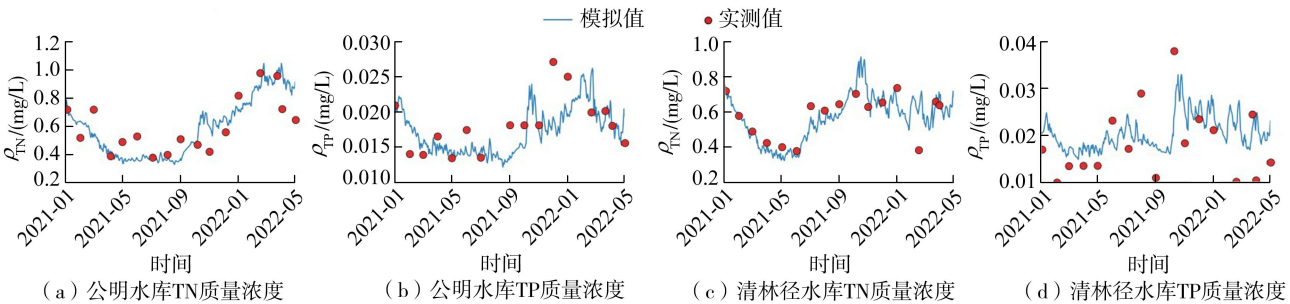


图 2 模型模拟值与实测值对比

Fig. 2 Comparison of simulated and measured values

由表 1 可见,公明水库 TN 和 TP 的均方根误差(RMSE)分别为 0. 141 mg/L 和 0. 004 mg/L,清林径水库 TN 和 TP 的 RMSE 分别为 0. 072 mg/L 和 0. 005 mg/L。两水库 TP 的 RMSE 均不超过 0. 005 mg/L,表明模型对磷循环的模拟精度较高,这与磷吸附-解吸过程受水动力条件主导的特点相符^[26]。

表 1 模型模拟误差分析

Table 1 Error analysis of model simulation

指标	RMSE/(mg/L)		MSE/(mg/L)		MAE/(mg/L)		MAPE/%	
	TN	TP	TN	TP	TN	TP	TN	TP
公明水库	0. 140	0. 040	0. 020	0. 000 13	0. 116	0. 003	19. 731	14. 777
清林径水库	0. 072	0. 005	0. 005	0. 000 59	0. 049	0. 007	9. 702	25. 345

从绝对误差来看,公明水库 TN 的 MAE 为 0. 116 mg/L,MAPE 为 19. 731%;清林径水库 TN 的 MAE 为 0. 049 mg/L,MAPE 为 9. 702%。两者 MAPE 均低于 30%,说明模型对 TN 质量浓度的相对偏差控制较好。TP 的 MAPE 在公明水库和清林径水库分别为 14. 77%和 25. 34%,略高于 TN,可能与浮游植物对磷的吸收-释放动态及监测数据的高频波动相关^[27]。

3.2 典型工况下水质变化

本文设计了两种典型工况(表 2)进行水库连通后的水质模拟,分别考虑了公明水库向清林径水库调水以及清林径水库向公明水库调水的情况。

表 2 计算工况水力特性参数

Table 2 Calculation parameters of engineering hydraulic characteristics

工况	公明水库水位/m	公明水库取水口流量/(m ³ /s)	清林径水库水位/m	清林径水库取水口流量/(m ³ /s)
公明水库调水清林径水库	54	-21. 21	57	16. 00
清林径水库调水公明水库	31	7. 65	57	-12. 86

如图 3 所示,未调水情景下,两水库 TN 质量浓度存在显著季节性交叉。清林径水库 1—7 月 TN 质量浓度低于公明水库,8—12 月高于公明水库。两水库 TP 质量浓度均较低,差异不显著。TP 年均质量浓度公明水库 0. 020 mg/L,清林径水库 0. 019 mg/L,月度波动范围均在±0. 005 mg/L 内。两水库 Chl-a 质量浓度水平接近,季节性趋势一致。公明水库与清林径水库连通后,在清林径水库向公明水库供水时(图 4),公明水库 TN 质量浓度较未调水前显著下降,调水前公明水库 TN 质量浓度年均值为 0. 626 mg/L,受水后 TN 质量浓度年均值下降为 0. 487 mg/L,降幅约 22. 2%。月度数据显示,各月均呈下降趋势。TP 和 Chl-a 基本维持稳定,水质改善主要体现在氮素控制。

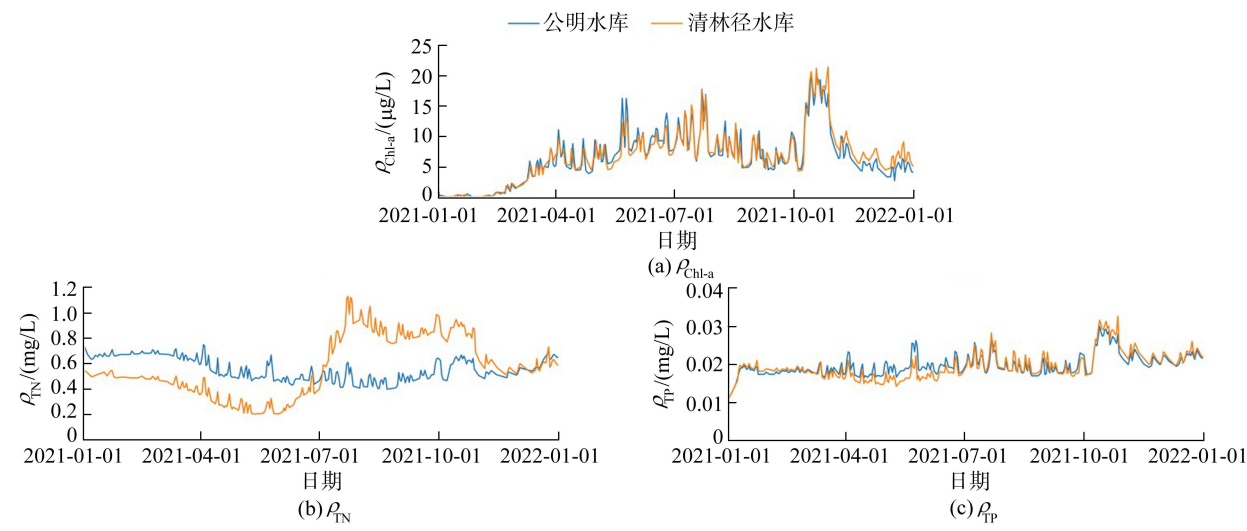


图 3 两水库未调水情景下水质变化
Fig. 3 Water quality changes of two reservoirs under scenario without water transfer

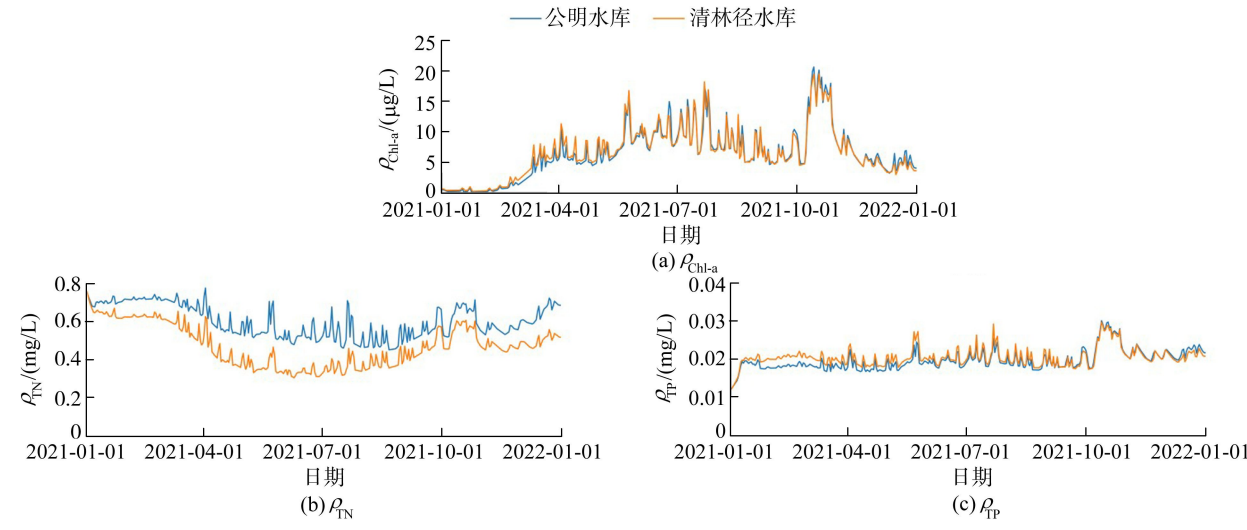


图 4 清林径水库调水公明水库后公明水库水质变化
Fig. 4 Water quality changes of Gongming Reservoir after water transfer from Qinglinjing Reservoir

公明水库与清林径水库连通后,在公明水库向清林径水库供水时(图 5),清林径水库水质呈现“氮素季节反转、磷与藻类波动平缓”的特征。1—7 月 TN 质量浓度较调水前上升 15%~25%,7—12 月则大幅下降。TP 质量浓度调水前后年均值均稳定在 0.018~0.019 mg/L,但因调水流量增加导致水体混合增强,夏季 TP 质量浓度月均波动幅度从±0.002 mg/L 增至±0.005 mg/L。Chl-a 质量浓度调水前后全年平均变化幅度小于 8%,表明藻类生长受氮磷比(25~30)和水温的共同调控,未因为调水出现显著变化。

3.3 连通工程水质长期演变

图 6 和图 7 为 SSP1-2.6(低排放)和 SSP3-7.0(中高排放)路径下,清林径水库及公明水库的水质长期变化情况。

a. TN。公明水库的未来 TN 质量浓度在 SSP3-7.0 情景下呈现显著上升趋势,年均增速为 0.03 mg/L(2022 年为 1.14 mg/L,2031 年为 1.48 mg/L),部分月份(如 2031 年 8 月)超过Ⅲ类限值(1.0 mg/L)。SSP1-2.6 情景下增速较缓,但 2030 年后仍存在超标风险。清林径水库未来 TN 质量浓度受调水影响显著,SSP3-7.0 情景下年均增速为 0.05 mg/L(2022 年 0.60 mg/L,2031 年 1.02 mg/L),峰值集中于夏季(7—9 月),与调水流量增加导致外源污染输入增强有关。

b. TP。两水库 TP 质量浓度均未超过Ⅲ类限值(0.05 mg/L),但 SSP3-7.0 情景下公明水库 TP 质量浓度年均值(0.021 mg/L)高于 SSP1-2.6(0.019 mg/L)。清林径水库 TP 夏季受水动力条件影响更大,因水体

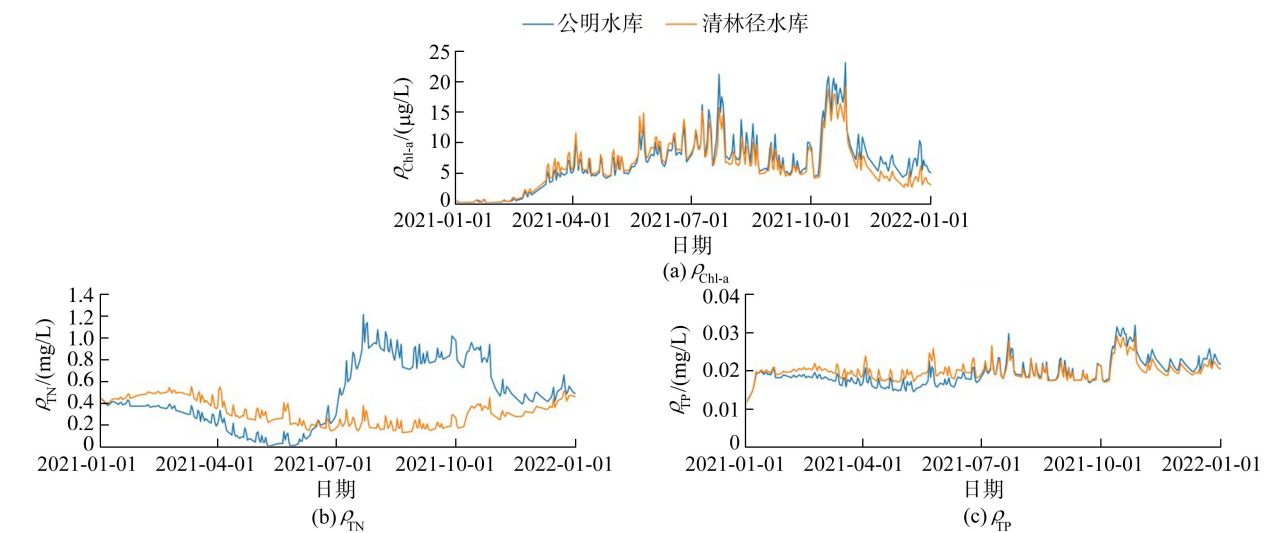


图 5 清林径水库调水公明水库后清林径水库水质变化

Fig. 5 Water quality changes of Qinglinjing Reservoir after water transfer from Gongming Reservoir

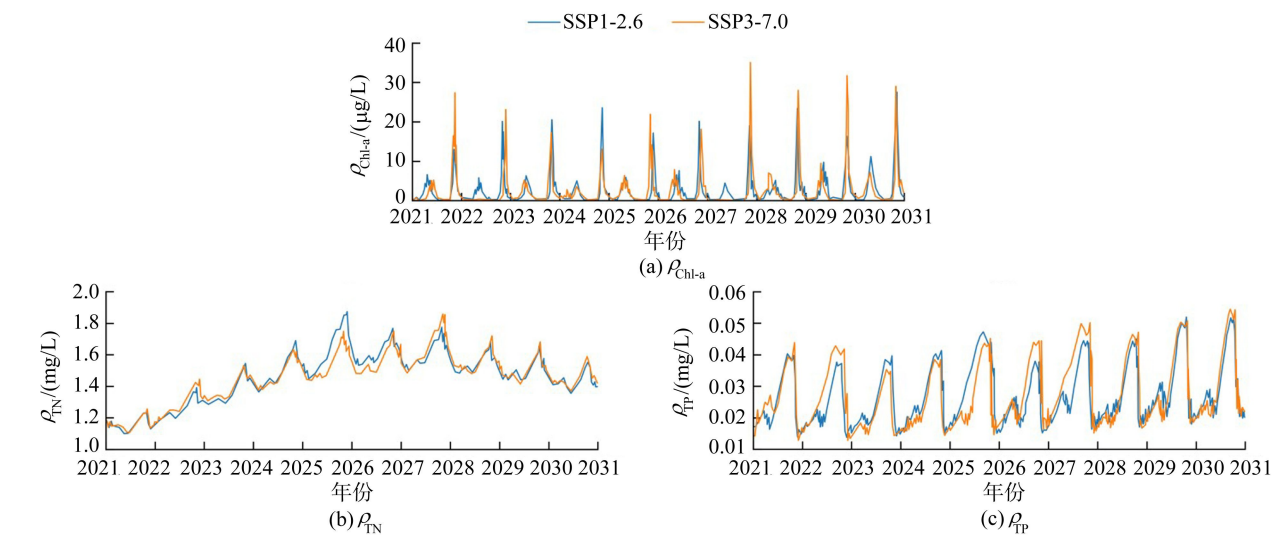


图 6 不同气候情景下两水库连通后公明水库水质变化

Fig. 6 Water quality changes of Gongming Reservoir after connection of two reservoirs under different climate scenarios

混合增强,TP 质量浓度呈现明显夏季升高趋势。

c. Chl-a。两水库 Chl-a 质量浓度在 SSP3-7.0 情景下均呈现显著上升趋势。公明水库 Chl-a 质量浓度峰值从 2022 年的 15.2 $\mu\text{g/L}$ 增至 2031 年的 33.8 $\mu\text{g/L}$,清林径水库从 14.6 $\mu\text{g/L}$ 增至 34.3 $\mu\text{g/L}$ 。Chl-a 质量浓度与水温 ($R^2=0.82$) 及氮磷比 ($R^2=0.67$) 显著正相关,表明气候变暖与营养盐富集共同驱动藻类增殖。

模型预测结果显示,在气候变暖与营养盐输入叠加作用下,公明水库与清林径水库连通后的水质演变呈现显著时空异质性:SSP3-7.0 情景下,公明水库 TN 质量浓度于 2028 年后持续超过Ⅲ类限值 (1.0 mg/L),2031 年峰值达 1.48 mg/L。清林径水库 TN 质量浓度虽未超标,但受调水输入影响,夏季 (7—9 月) 质量浓度波动加剧 (± 0.3 mg/L)。为进一步量化富营养化风险,本文计算了两种气候情景下公明水库与清林径水库的富营养化指数 (TLI)^[28],结果如图 8 所示。两水库 Chl-a 质量浓度在 SSP3-7.0 情景下均呈增长趋势,至 2031 年公明水库年均 Chl-a 质量浓度达 30~40 $\mu\text{g/L}$,富营养化指数进入轻度富营养化区间 (50~60)。Chl-a 质量浓度峰值与夏季高温 ($>28^{\circ}\text{C}$) 及氮磷比大于 20 的时段高度吻合,表明藻类生长受磷限制减弱,氮素富集成为主导因子。SSP3-7.0 情景下,两水库 TN 和 Chl-a 质量浓度均显著高于 SSP1-2.6,尤其在 2030 年后差异加剧 (TN 质量浓度差距扩大至 0.2~0.3 mg/L,Chl-a 质量浓度差距达 5~10 $\mu\text{g/L}$),凸显出高排放情景下的生态风险。SSP1-2.6 情景下,减排措施有效缓解了 TN 和 Chl-a 质量浓度的上升速率,但至 2031 年公明水库 TN 仍接近Ⅲ类限值,即使低碳路径下仍需强化营养盐管控。

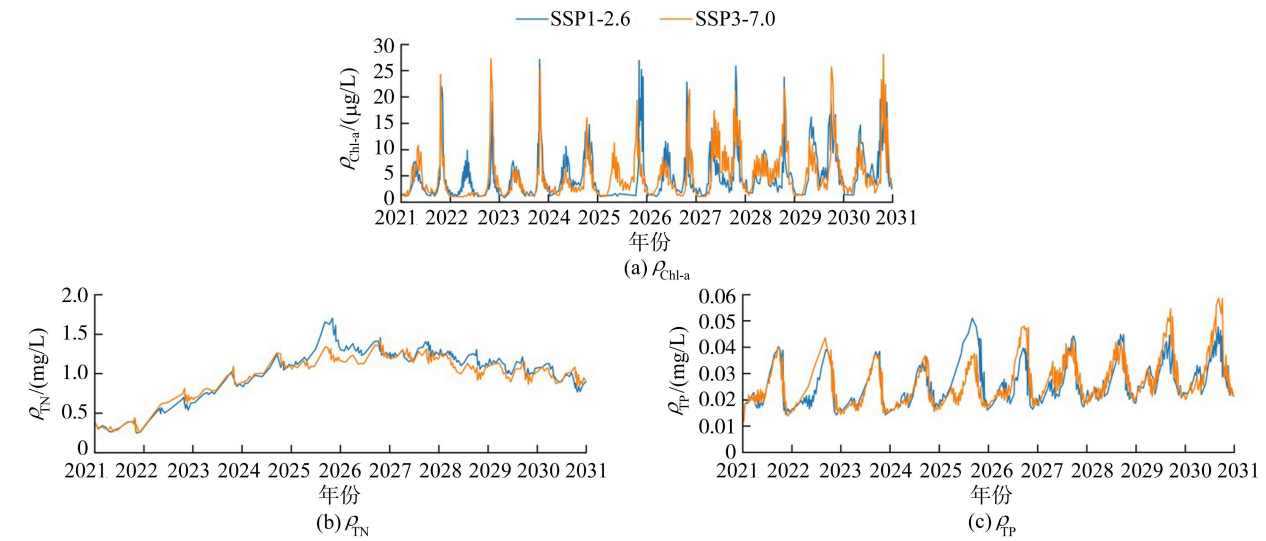


图 7 不同气候情景下两水库连通后清林径水库水质变化

Fig. 7 Water quality changes of Qinglinjing Reservoir after connection of two reservoirs under different climate scenarios

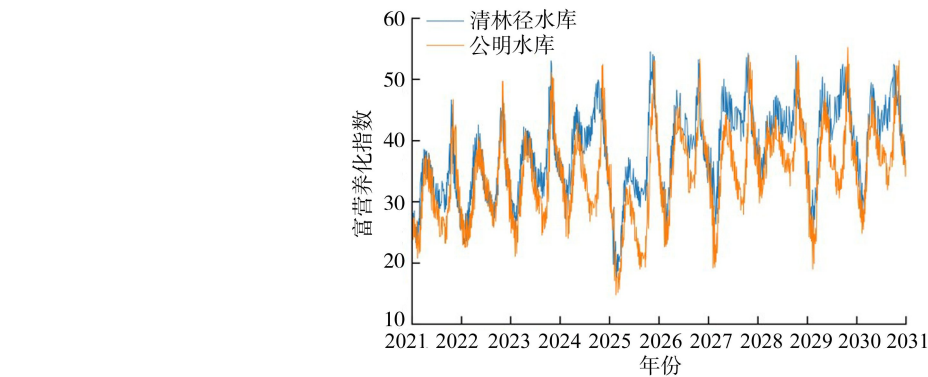


图 8 两水库连通后水库富营养化指数变化

Fig. 8 Changes of trophic level index in reservoirs after their connection

4 讨 论

4.1 气候变化下水库连通工程对受水区水环境的影响

水库连通工程通过增强水体流动性,显著缩短了水体在库区的停留时间。这一变化虽在一定程度上提升了污染物排出的能力,减少了局部污染物累积,但也带来了新的生态风险。本文研究表明,两水库连通后,营养盐(尤其是 TN)的跨水库迁移现象显著,导致受水水库清林径水库在 1—7 月 TN 质量浓度上升,8—12 月下降,呈现出明显的季节性反转。水体停留时间缩短虽增强了污染物迁移和排出的能力,但也促进了藻类和营养盐在系统内的输运与再分布,导致富营养化风险在更广的空间范围内扩散,且持续时间延长。如公明水库调水清林径水库后, TN 质量浓度在冬春季节显著上升,表明外源氮素输入在低流速条件下更易累积;而在夏秋季节,虽因水体交换增强使 TN 质量浓度有所下降,但频繁的水力扰动也可能促进底泥中营养盐的释放,进一步加剧藻类增殖风险。这一结果与 Tan 等^[29]的研究结论一致,即短期调水虽可改善局部水质,但长期运行下营养盐的输入输出失衡可能引发更广泛的富营养化风险。类似地, Zhang 等^[30]在 PFASs 迁移机制研究中发现,溶解相污染物随水流迁移至受水水体后,其生态效应具有明显的延迟性和累积性。因此,水库连通在提升水资源配置能力的同时,也可能成为营养盐和藻类迁移的通道,从而扩大富营养化风险的空间范围并延长其持续时间。

在气候变化背景下,气温持续升高对水库水环境产生了深远影响。本文模拟结果表明,在 SSP3-7.0 情景下,两水库水温显著上升,夏季水温超过 28℃,延长了藻类的生长期。水温升高不仅直接促进藻类代谢和繁殖,还通过加速底泥中有机质的分解和营养盐释放,间接增加了水体中氮、磷等营养盐的浓度。与此同时,

气候变化背景下极端降雨事件频率增加,进一步加剧了外源营养盐的输入。但对于本文研究中的封闭式引调水库而言,其典型特点为集雨面积小、径流量不足,需依赖人为引水来补充蓄水量。这类水库区别于河道型水库,相对于降雨,引调水过程本身成为外源营养盐输入的主要途径之一,调水会显著影响水库的水文情势及营养状态,进而影响藻类生长与水质演变^[31]。本文模型模拟结果表明,至 2031 年公明水库 TN 质量浓度峰值达 1.48 mg/L,超过Ⅲ类水质标准,而 Chl-a 质量浓度持续上升至 30~40 μg/L,富营养化指数进入轻度富营养化区间(50~60)。此外,本文研究还发现 Chl-a 质量浓度与温度($R^2=0.82$)及氮磷比($R^2=0.67$)显著正相关,说明气候变暖与氮素富集共同驱动了藻类增殖,尤其是在磷限制减弱(氮磷比大于 20)的情况下,氮素成为藻类生长的主导因子。长期运行下,水库连通工程与气候变化的叠加效应可能进一步放大水质波动与生态风险。如,在 SSP3-7.0 情景下,公明水库 TN 质量浓度年均增速达 0.03 mg/L,清林径水库 TN 质量浓度年均增速为 0.05 mg/L,均高于 SSP1-2.6 情景,表明高排放路径下气候变暖对营养盐富集和藻类生长的促进作用更为显著。

综上,水库连通工程的规划与运行管理必须在多时空尺度上统筹考虑水量调度与水质响应的协同关系。首先,应高度重视调水过程中营养盐的输入-输出平衡,建立基于实时水质监测的动态调控机制,避免因单一追求水量调配而忽视可能引发的生态反馈。其次,建议制定差异化的季节性调度策略:在藻类高发期(如夏季高温时段),应适度减少从富营养化风险较高水库的调水量,同时通过增加泄流量、优化取水深度等方式增强水体垂向混合,破坏藻类生长所需的稳定分层条件;在非藻华季节,则可适当加大调水规模,利用水力冲刷效应促进污染物输出。此外,还应将多气候路径(如 CMIP6 中的 SSP1-2.6 与 SSP3-7.0)纳入工程长期风险评估与适应性管理框架,通过情景模拟预判不同排放路径下的水质演变趋势,并据此制定针对性的营养盐管控、生态修复与应急调度预案。只有通过多措并举、系统管理,才能在实现水资源优化配置的同时,切实保障供水安全与生态系统的长期可持续性。

4.2 模型局限性与改进方向

尽管 GOTM-FABM-WET 模型较好地模拟了水动力-生态耦合过程,但仍存在局限性,需在未来研究中进一步完善。

a. 模型未充分考虑底泥-水界面的磷交换过程。Lu 等^[32]基于大河口水库的磷吸附动力学试验,建立了磷释放强度与水温、pH 的量化关系($R^2=0.87$),表明长期气候变暖可能加剧底泥释磷风险。本文研究在 SSP3-7.0 情景下观察到公明水库 TP 年均质量浓度(0.0278 mg/L)较 SSP1-2.6 情景(0.0271 mg/L)有所上升,暗示底泥释磷可能成为潜在的长期风险源,而当前模型尚不完整刻画该过程。

b. 所采用的 Delta 降尺度方法在捕捉区域气候异质性方面存在局限。Do 等^[33]通过越南 7 个流域的 CMIP6 降尺度对比研究,指出传统统计降尺度方法对极端降水指标(如 RX1day)的空间分异捕捉能力不足,与实测数据的 RMSE 达 0.34。CMIP6 模式对极端降雨事件的系统性低估,可能进一步影响外源污染负荷的模拟精度。

c. 当前模型在刻画水库水质空间异质性方面尚有不足,尤其是在复杂地形区域和调水口附近,可能存在显著的垂向分层与水平梯度,而现有模型结构难以充分反映这些局部细节。在长期预测方面,本文主要聚焦于气候变化的影响,尚未将人为污染排放(如农业面源与流域景观格局)纳入情景设置^[34-35]。未来可进一步设计多营养负荷情景,并与气候情景进行组合模拟,以科学量化气候与人为驱动因子的相对贡献。

d. 水库进出水口布置、入库河道水文水质条件以及库容形态的空间异质性对局部水动力与水质分布具有重要影响,而本研究在这些工程细节方面的考虑仍较为简单。后续可结合高分辨率地形数据与入库河道实时监测资料,提升模型在关键区域的模拟精度。为提升模型在复杂情景下的预测能力,未来研究可引入三维水动力-水质耦合模型,更精确地模拟营养盐、藻类及溶解氧的空间分布与迁移规律,同时可耦合高分辨率区域气候模式(如 CMIP6-CORDEX)与底泥生物地球化学模块,构建更为系统的水环境模拟框架。

5 结 论

a. 水库连通工程减弱受水水库水质季节异质性。调水方向对水质响应具有显著影响:清林径水库作为受水水库时,受水前 TN 质量浓度呈现冬春低、夏秋高的典型特征,受水后氮素的季节差异性减小(标准差降低 56.8%,变异系数降低 40.3%),公明水库调水有效提升了清林径水库水质的稳定性。公明水库作为受水

水库时,因调水稀释效应,TN 质量浓度年均下降 22.2%。

b. 气候变暖与营养盐输入的协同效应驱动富营养化。SSP3-7.0 情景下,两水库 Chl-a 质量浓度于 2028 年突破 30 $\mu\text{g/L}$,进入轻度富营养化阶段(50~60),且公明水库 TN 质量浓度在 2031 年 8 月达 1.48 mg/L ,超过Ⅲ类限值(1.0 mg/L)。相比之下,SSP1-2.6 情景通过减排措施将 TN 质量浓度增速降低 35%,但至 2031 年仍接近限值(0.98 mg/L),表明单一气候路径难以完全规避水库富营养化风险。

c. 基于模型预测结果,建议实施季节性调水优化策略,夏季增加清林径水库泄流量以增强水体交换,冬季限制外源输入以控制氮素累积。同时,需建立底泥磷释放监测网络,并集成 CMIP6 多模式集合预测,以提升长期风险评估的鲁棒性。

参考文献:

[1] 慕云霄,程玉菲,王军德. 白龙江引水工程受水区水资源利用效率测算与影响因素分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(4):38-46. (Mu Yunxiao, Cheng Yufei, Wang Junde. Measurement and influencing factors for water resources utilization efficiency in water receiving area of the Bailong River Diversion Project [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025,53(4):38-46. (in Chinese))

[2] 刘秀丽,张标. 我国水资源利用效率和节水潜力[J]. 水利水电科技进展,2015,35(3):5-10. (Liu Xiuli, Zhang Biao. Water use efficiency and water conservation potential in China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2015,35(3):5-10. (in Chinese))

[3] 李加林,杨佳铭,刘永超,等. 鄱阳湖流域水系格局与连通性变化分析[J]. 水资源保护,2026,42(1):30-38. (Li Jialin, Yang Jiaming, Liu Yongchao, et al. Analysis of water system pattern and connectivity change in the Poyang Lake Basin [J]. Water Resources Protection,2026,42(1):30-38. (in Chinese))

[4] 邱国玉,张清涛. 快速城市化过程中深圳的水资源与水环境问题[J]. 河海大学学报(自然科学版),2010,38(6):629-633. (Qiu Guoyu, Zhang Qingtao. Issues of water resources and environment in Shenzhen with rapid urbanization [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2010,38(6):629-633. (in Chinese))

[5] 何江华. 公明水库—清林径水库连通工程设计研究[J]. 水利水电技术(中英文),2023,54(增刊2):170-174. (He Jianghua. Design study for the Gongming Reservoir-Qinglinjing Reservoir Connecting Project [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2023,54(S2):170-174. (in Chinese))

[6] 刘瑞艳,张建华,刘凌,等. 南水北调东线工程调水期洪泽湖水质变化规律分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):42-49. (Liu Ruiyan, Zhang Jianhua, Liu Ling, et al. Analysis on the water quality variation of Hongze Lake during the water transfer period of the eastern route of South-to-North Water Diversion Project [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(2):42-49. (in Chinese))

[7] Mukundan R, Hoang L, Geldar K, et al. Climate change impact on nutrient loading in a water supply watershed [J]. Journal of Hydrology,2020,586:124868.

[8] 王喜华,贾顺卿,胥毅军,等. 流域尺度氮滞留研究现状、趋势及展望[J]. 水资源保护,2025,41(6):1-11. (Wang Xihua, Jia Shunqing, Xu Yijun, et al. Current status, trends, and prospects in watershed-scale nitrogen retention research [J]. Water Resources Protection,2025,41(6):1-11. (in Chinese))

[9] Liu Xuemei, Zhang Guangxin, Xu Y T, et al. Determining water allocation scheme to attain nutrient management objective for a large lake receiving irrigation discharge [J]. Journal of Hydrology,2021,603:126900.

[10] Weber C J, Weihrauch C. Autogenous eutrophication, anthropogenic eutrophication, and climate change: insights from the Antrift Reservoir (Hesse, Germany) [J]. Soil Systems,2020,4(2):29.

[11] Meyer A, Prygiel E, Laplace-treiture C. Performance of a multimetric index based on phytoplankton to evaluate the ecological quality of French large rivers: the iphyge index [J]. Ecological Indicators,2024,166:112303.

[12] Wang Yiibo, Liu Pan, Solomatin D, et al. Integrating the flow regime and water quality effects into a niche-based metacommunity dynamics model for river ecosystems [J]. Journal of Environmental Management,2023,336:117562.

[13] Savino M, Todaro V, Maranzoni A, et al. Combining hydrological modeling and regional climate projections to assess the climate change impact on the water resources of dam reservoirs [J]. Water,2023,15(24):4243.

[14] Ma Jing, Duan Hongtao, Chen Cheng, et al. Projected response of algal blooms in global lakes to future climatic and land use changes: machine learning approaches [J]. Water Research,2025,271:122889.

[15] Cheng Bingfen, Xia Rui, Zhang Yuan, et al. Characterization and causes analysis for algae blooms in large river system [J]. Sustainable Cities and Society,2019,51:101707.

[16] Zhao Ziyue, Liu Xuemei, Wu Yanfeng, et al. A review on the driving mechanism of the spring algal bloom in lakes using freezing

and thawing processes[J]. *Water*,2024,16(2): 257.

[17] 孟钰,魏剑林,管新建,等. 流域水生态环境补偿研究进展[J]. *水资源保护*,2024,40(6):215-223. (Meng Yu,Wei Jianlin, Guan Xinjian,et al. Research progress in watershed water ecological environment compensation[J]. *Water Resources Protection*, 2024,40(6):215-223. (in Chinese)).

[18] 高健,李爱国,王胜波,等. 公明水库—清林径水库连通工程隐伏岩溶特征及对隧洞工程的影响[J]. *水利水电技术(中英文)*,2024,55(增刊2):184-191. (Gao Jian, Li Aiguo, Wang Shengbo, et al. Concealed karst characteristics of Gongming Reservoir-Qinglinjing Reservoir Connection Project and its influence on tunnel engineering[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*,2024,55(S2):184-191. (in Chinese))

[19] 张丽霞,陈晓龙,辛晓歌. CMIP6 情景模式比较计划(ScenarioMIP)概况与评述[J]. *气候变化研究进展*,2019,15(5): 519-525. (Zhang Lixia, Chen Xiaolong, Xin Xiaoge. Short commentary on CMIP6 scenario model intercomparison project (ScenarioMIP)[J]. *Climate Change Research*,2019,15(5): 519-525. (in Chinese))

[20] 杨旭. 气候和土地利用变化背景下中国西北干旱区产水和水质净化服务评估:以博斯腾湖流域为例[D]. 上海:华东师范大学,2020.

[21] 唐冉. 非破碎海浪和 Langmuir 环流对海洋上层湍流混合的影响研究[D]. 青岛:自然资源部第一海洋研究所,2023.

[22] 朱鹏航. 基于 PCLake 模型的乌梁素海水质突变及阈值识别研究[D]. 呼和浩特:内蒙古大学,2022.

[23] Bruggeman J,Bolding K. A general framework for aquatic biogeochemical models[J]. *Environmental Modelling & Software*,2014, 61: 249-265.

[24] 张笑欣,于瑞宏,张宇瑾,等. 浅水湖泊稳态转换模型 PCLake 研究进展[J]. *水资源保护*,2017,33(3): 19-24. (Zhang Xiaoxin, Yu Ruihong, Zhang Yujin, et al. Progress in research of regime shift model PCLake for shallow lakes [J]. *Water Resources Protection*,2017,33(3): 19-24. (in Chinese))

[25] Schnedler-meyer N A,Andersen T K,Hu F R S,et al. Water ecosystems tool (WET) 1.0-a new generation of flexible aquatic ecosystem model[J]. *Geoscientific Model Development*,2022,15(9): 3861-3878.

[26] Zheng Yazhi,Wang Xiaoling,Li Songmin,et al. Numerical simulation model of water quality evolution in urban rivers considering adsorption-desorption process of nitrogen and phosphorus in sediments[J]. *Journal of Hydrology*,2024,636: 131104.

[27] 杨震,张会强,陈静,等. 不同氮磷比对北洛河中藻类生长的影响[J]. *农业环境科学学报*,2023,42(9):2069-2076. (Yang Zheng,Zhang Huiqiang,Chen Jing,et al. Effects of nitrogen/phosphorus ratios on algae growth in the Beiluo River[J]. *Journal of Agro-Environment Science*,2023,42(9):2069-2076. (in Chinese))

[28] 王明翠,刘雪芹,张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准[J]. *中国环境监测*,2002(5):47-49. (Wang Mingcui,Liu Xueqin,Zhang Jianhui. Evaluate method and classification standard on lake eutrophication[J]. *Environmental Monitoring in China*,2002(5):47-49. (in Chinese))

[29] Tan Lang,Wang Zongzhi,Bai Ying,et al. Short-term responses of nutrients and algal biomass in a eutrophic shallow lake to different scales of water transfer[J]. *Science of the Total Environment*,2023,880: 163321.

[30] Zhang Jingjie,Chen Huiting,Nguyen V T,et al. Characterizing PFASs in aquatic ecosystems with 3D hydrodynamic and water quality models[J]. *Environmental Science and Ecotechnology*,2024,22:100473.

[31] 黄强,赵梦龙,李瑛. 水库生态调度研究新进展[J]. *水力发电学报*,2017,36(3):1-11. (Huang Qiang,Zhao Menglong,Li Ying. Advancements in studies on reservoir ecological operation[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*,2017,36(3):1-11. (in Chinese))

[32] Lu Junping, Ma Tailing, Liu Tingxi, et al. Study on sediment phosphorus release mechanism of the environmental impact in Dahekou Reservoir[J]. *Environmental Science and Technology*,2017,40(7):72-78.

[33] Do H X,Le T H,Le M H,et al. Future changes in hydro-climatic extremes across Vietnam: evidence from a semi-distributed hydrological model forced by downscaled CMIP6 climate data[J]. *Water*,2024,16(5): 674.

[34] 陈启慧,纪璐,李琼芳,等. 伊犁河三角洲水资源条件变化对景观格局演变的影响[J]. *水资源保护*,2024,40(2):90-99. (Chen Qihui, Ji Lu, Li Qiongfang, et al. Influence of water resources condition changes on landscape pattern evolution in the Ili River Delta[J]. *Water Resources Protection*,2024,40(2):90-99. (in Chinese))

[35] 刘卓然,金中天,姜佳玉,等. 基于荧光指纹的土门西沟小流域农业面源溯源研究[J]. *水资源保护*,2024,40(5):131-140. (Liu Zhuoran, Jin Zhongtian, Jiang Jiayu, et al. Research on agricultural non-point source traceability of Tumenxigou small watershed based on fluorescence fingerprint[J]. *Water Resources Protection*,2024,40(5):131-140. (in Chinese))

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.03.009

梯级水库拦沙条件下水库排沙比公式修正

张国帅^{1,2}, 金中武^{1,2}, 李志晶^{1,2}, 陈 鹏^{1,2}, 周其航^{1,2}

(1. 长江科学院河流研究所; 2. 水利部长江重点实验室)

摘要:为解决梯级水库长期运行中因有效库容持续衰减、入库水沙条件显著改变而导致排沙比经验公式计算精度偏低的问题,通过设计金沙江下游梯级水库未来 100 a 的区间来水来沙过程,分别采用一维水沙模型、水库排沙比 Siyami 经验公式计算梯级水库排沙比,分析了两种方法计算梯级水库排沙比结果的量化关系,并对水库排沙比 Siyami 经验公式进行了修正。结果表明:一维水沙模型计算排沙比的波动性大于 Siyami 经验公式的计算结果,并且随着梯级水库运行时间增加,一维水沙模型计算排沙比的增长速率明显大于 Siyami 经验公式的计算结果;修正的 Siyami 经验公式在乌东德水库、白鹤滩水库、溪洛渡水库、向家坝水库的拟合优度 R^2 分别为 0.95、0.96、0.87、0.86,说明修正公式精度较高。

关键词:金沙江下游梯级水库;泥沙数学模型;水库排沙比;经验公式修正

Correction of sediment discharge ratio formula for cascade reservoirs under sediment interception conditions

Zhang Guoshuai^{1,2}, Jin Zhongwu^{1,2}, Li Zhijing^{1,2}, Chen Peng^{1,2}, Zhou Qihang^{1,2}

(1. River Research Department of Changjiang River Scientific Research Institute;
2. Key Laboratory of Changjiang River of Ministry of Water Resources)

Abstract: To address the problem of low accuracy in empirical sediment discharge ratio formulas caused by the continuous decline in effective reservoir capacity and significant changes in inflow water and sediment conditions during long-term operation of cascade reservoirs, the inflow water and sediment processes in the cascade reservoirs of the lower reaches of the Jinsha River over the next 100 years were designed. The sediment discharge ratios of the cascade reservoirs were calculated using both a one-dimensional water-sediment model and the Siyami empirical formula for sediment discharge ratio. The quantitative relationship between the results obtained by the two methods was analyzed, and the Siyami empirical formula for sediment discharge ratio was subsequently corrected. The results show that the sediment discharge ratio calculated by the one-dimensional water-sediment model exhibits greater volatility than that calculated by the Siyami empirical formula. Moreover, as the operation time of the cascade reservoirs increases, the growth rate of the sediment discharge ratio calculated by the one-dimensional water-sediment model is significantly higher than that calculated by the Siyami empirical formula. The coefficient of determination of the corrected Siyami empirical formula for the Wudongde, Baihetan, Xiluodu, and Xiangjiaba reservoirs is 0.95, 0.96, 0.87, and 0.86, respectively, indicating that the corrected formula has high accuracy.

Key words: cascade reservoir of the lower reaches of the Jinsha River; mathematical model of sediment; sediment discharge ratio of reservoir; empirical formula correction

随着国内大量水利枢纽建成并投入使用,水库淤积已成为影响水库群长期有效运行的关键问题^[1-4]。水库排沙比定义为出库沙量与入库沙量之比,是定量表征水库排沙效率与淤积演变规律的核心指标^[5-7]。研究水库运行方式对排沙比的影响,可揭示水库对流域水沙时空分布的调控效应,为水库泥沙调度与管理提供理论支撑^[8-11]。水库排沙比受入库水沙条件、水库运行方式及梯级水库组合格局等多重因素共同影响,其在不同时间尺度下的变化规律仍有待系统阐明^[12-14]。在梯级水库长期运行过程中,上游水库拦沙作用显著削减了下游河道来沙量,水沙沿程补给与交换对水库排沙比的影响愈发突出;同时,库区泥沙持续淤积导致河床比降减小,水库拦沙能力随淤积进程逐步减弱。考虑梯级水库间水沙沿程传递与反馈关系,入库水沙条件与

基金项目: 中央公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(CKSF2026340/HL);国家自然科学基金项目(52595702,52479058)

作者简介: 张国帅(1995—),男,工程师,博士,主要从事水利枢纽泥沙治理研究。E-mail:18514430909@163.com

通信作者: 金中武(1976—),男,正高级工程师,博士,主要从事水利枢纽泥沙治理研究。E-mail:zhongwuji@163.com

库区淤积形态之间存在显著的互馈机制^[14-16]。因此梯级水库排沙比具有影响因素繁多、演变机理复杂、时空尺度耦合紧密等特征^[17-19],亟须对现有梯级水库排沙比经验公式进行改进与完善,以支撑水库淤积防控及梯级水库泥沙联合调控技术的提升与发展。

水库排沙比受出入库水量、入库沙量、入库水流含沙量(以下简称“入库含沙量”)、水库库容、坝前运行水位及库区地形等多种因素共同影响。目前主要采用 3 类方法计算梯级水库排沙比^[20-21]:泥沙物理模型、泥沙数学模型、经验公式法,其中泥沙物理模型依据水沙相似比尺,通过试验模拟测量水库淤积情况及排沙效果;泥沙数学模型则利用圣维南方程、水流挟沙力公式、河床变形方程等控制方程组,通过离散微分方程计算梯级水库淤积进程;经验公式法则基于水库运行过程中的水沙观测资料,分析水库排沙比与各变量的量化关系。泥沙物理模型与河道水沙输移的物理机制相同,试验结果相对可靠、准确性较高,但泥沙物理模型的试验材料及时间成本消耗巨大,不适于长序列水库淤积进程论证;泥沙数学模型具有完备的控制方程组,可以准确计算梯级水库泥沙输移的时空分布特性,但泥沙数学模型对河道地形资料要求较高,并且模型运算速度与网格划分精度直接相关,在缺少充分水沙、地形资料的条件下,泥沙数学模型的参数难以率定;经验公式法兼具计算成本较小、观测资料要求较少、计算速度快、工程应用广泛等优点,但是受限于梯级水库排沙的复杂机制,经验公式对长序列梯级水库排沙比的计算精度较低^[22-24]。

国内外学者根据众多水库运行的观测资料,研究了水库排沙比与各变量的相关性 & 量化关系,发现水库排沙比与滞留时间(水库总库容与入库水量比值)满足 Brune 曲线关系。虽然 Moragoda 等^[25-28]发展出了不同函数形式的 Brune 曲线公式,但这些公式均是研究单个水库排沙比的变化规律,对于新水沙情势下梯级水库的排沙比变化规律有待论证。本文根据金沙江下游水沙变化周期,设计未来 100a 梯级水库区间水沙补给过程,分别运用一维水沙模型及 Siyami 经验公式计算梯级水库排沙比变化过程,通过分析出入库含沙量系数比值与滞留时间的理论关系,修正梯级水库排沙比 Siyami 经验公式。

1 研究区概况

金沙江流域位于我国横断山脉区域,研究范围主要为金沙江下游流域攀枝花水文站至屏山或向家坝水文站区间,区间集水面积 14.70 万 km²。金沙江下游流域是长江三峡水库重要泥沙来源,随着金沙江下游梯级水库陆续建成运行,乌东德-白鹤滩-溪洛渡-向家坝梯级水库对长江上游减沙效应发挥关键作用。自然条件下金沙江年均输沙量为 2.55 亿 t,约占长江上游来沙量的 50%,在梯级水库拦沙作用下,下游出口年输沙量锐减至 0.015 亿 t。金沙江下游干流河道沿程控制性水文站分布为攀枝花、三堆子、乌东德、乌东德(二)、白鹤滩(或华弹)、溪洛渡、向家坝(或屏山)水文站,其中向家坝水文站为金沙江流域控制站,控制流域面积为 458 592 km²。金沙江下游梯级水库级联排沙关系如图 1 所示,梯级水库拦沙条件下金沙江下游沿程水沙传递关系由上库排沙量、库区区间来沙共同决定。由于上水库拦沙导致下水库入库水沙条件显著变化,下水库排沙比受入库水沙条件及水库淤积进程影响较大。

为模拟梯级水库长期运行条件下坝区淤积对水库排沙比的影响,给定金沙江下游梯级水库运行 100 年入库水沙条件,用于计算分析梯级水库多年淤积进程及水库排沙比。金沙江下游梯级水库在 2012—2020 年陆续建成运行,因此设计水沙序列为 2013—2120 年梯级水库库区来水来沙。根据自然条件下金沙江下游来水来沙条件及金沙江下游水沙变化周期(28 a)^[29],制定长系列(100 a)入库水沙过程如图 2 所示。2013—2120 年乌东德库区区间年均来水量 1 198.58 亿 m³,年均来沙量 3 961.71 万 t;白鹤滩库区区间年均来水量 75.94 亿 m³,年均来沙量 4 524.03 万 t;溪洛渡库区区间年均来水量 47.33 亿 m³,年均来沙量 3 204.51 万 t;向家坝库区区间年均来水量 21.50 亿 m³,年均来沙量 119.61 万 t。

2 水库排沙比计算方法

2.1 一维水沙模型

基于非均匀不平衡输沙理论建立梯级水库淤积计算的一维水沙模型(式(1)~(5)),包括水流连续方程、水流运动方程、水流挟沙力方程、推移质输沙率方程、河床变形方程。通过计算梯级水库长系列淤积进程,分析梯级水库拦沙条件下水库排沙比变化规律。

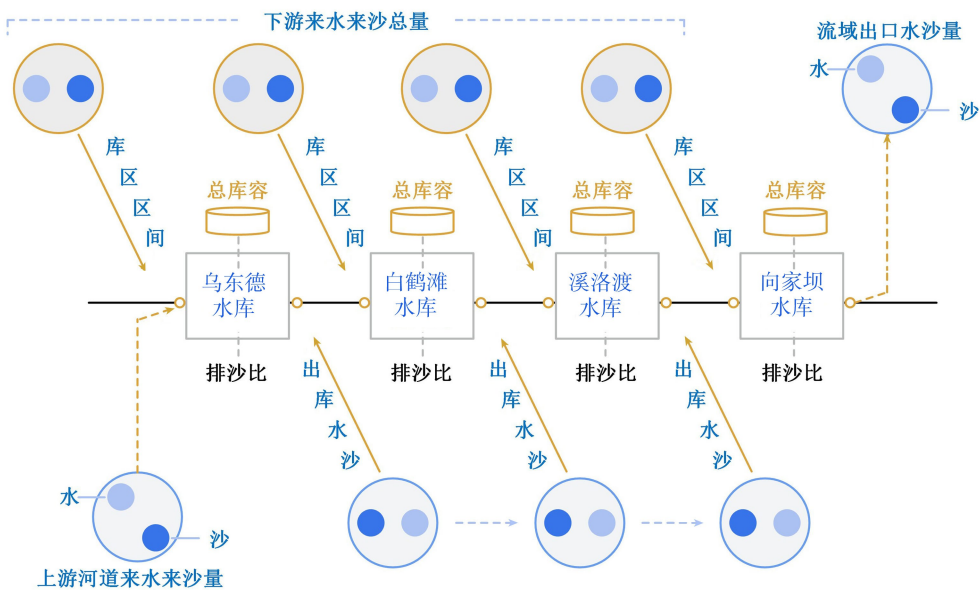


图 1 金沙江下游梯级水库级联排沙关系

Fig. 1 Cascade sediment discharge relationship of cascade reservoirs of the lower reaches of the Jinsha River

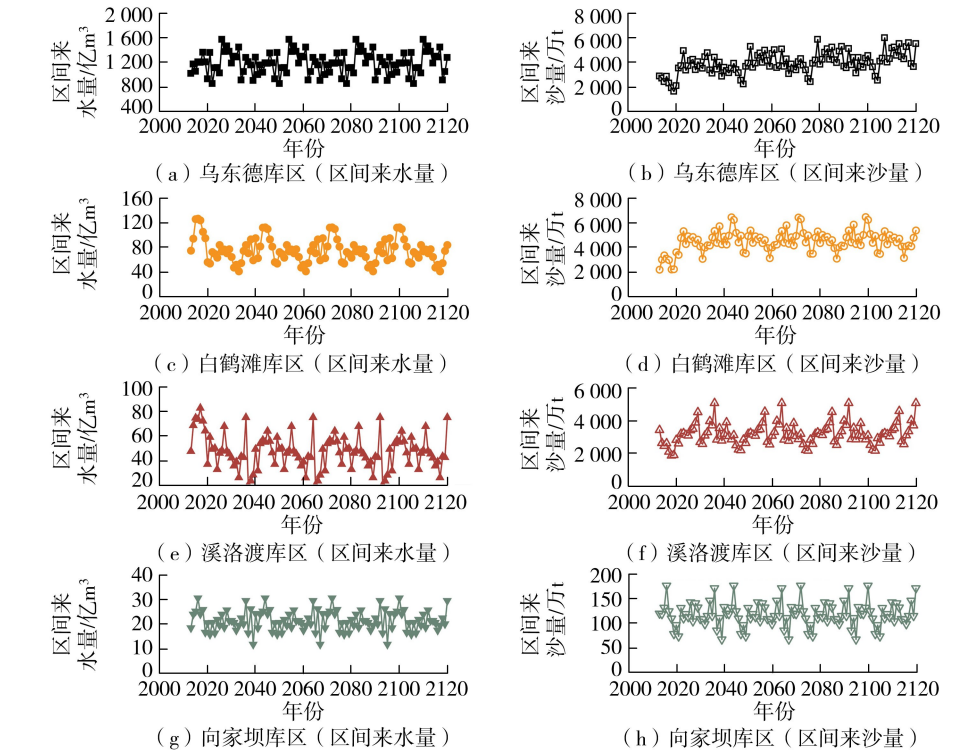


图 2 金沙江下游梯级水库设计入库水沙过程

Fig. 2 Designed inflow water and sediment processes for cascade reservoirs of the lower reaches of the Jinsha River

$$\frac{\partial q}{\partial x} + B \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\partial q}{\partial t} \tag{1}$$

$$J = \frac{q^2 n^2}{B^2 h^{10/3}} + \frac{1}{2g} \frac{\partial V^2}{\partial x} \tag{2}$$

$$S^* = k \left(\frac{V^3}{gh\omega} \right)^m \tag{3}$$

$$q_b = \rho_s d \omega K_b \left(\frac{V_b}{\omega} \right)^{m_b} \tag{4}$$

$$\frac{dS}{dx} = - \frac{\alpha \omega}{q} (S - S^*)$$

(5)

式中: q 为流量; x 为河道纵向迁移距离; B 为河道宽度; h 为水位; J 为水力比降; n 为河道糙率; g 为重力加速度; V 为河流平均流速; S^* 为水流挟沙力; ω 为泥沙沉速; k 为水流挟沙力系数; m 为水流挟沙力指数; q_b 为河流推移质的输沙率; d 为推移质泥沙粒径; ρ_s 为泥沙密度; V_b 为河流摩阻流速; K_b 、 m_b 分别为推移质输沙率公式的系数和指数; S 为河道悬移质含沙量; α 为悬移质沿程恢复饱和系数。

2.2 一维水沙模型验证

运用一维水沙模型计算 2013—2020 年金沙江下游溪洛渡、向家坝水库淤积进程,并与两水库实际淤积情况进行对比验证,结果如图 3 所示。2013—2020 年溪洛渡、向家坝水库年均淤积量的模型计算结果分别为 1.05 亿、252.57 万 t,年均淤积量实际观测值为 1.08 亿、230.57 万 t,两水库淤积量计算结果与观测值的线性拟合度为 0.97,说明模型的计算精度较高,可以用于计算梯级水库未来淤积量。

2.3 水库排沙比经验公式

水库排沙比与水库滞留时间满足 Brune 曲线关系。Tan 等^[30-32]研究发现,Siyami 经验公式(式(6))在金沙江流域水库排沙比的计算中具有最优的适用性。

$$\eta_{it} = 1 - e^{-0.0079(Q_{in,it}/V_{e,it})}$$

(6)

其中

$$Q_{in,it} = Q_{out,(i-1)t} + Q_{z,it}$$

式中: η_{it} 为水库 i 在第 t 年的排沙比; $V_{e,it}$ 为水库 i 在第 t 年水库有效库容; $Q_{in,it}$ 为水库 i 在第 t 年的入库年径流量; $Q_{out,(i-1)t}$ 为水库 $i-1$ 在第 t 年出库水量; $Q_{z,it}$ 为水库 i 在第 t 年的库区补水量。

3 水库排沙比经验公式修正

3.1 水库排沙比计算结果对比

分别采用一维水沙模型与 Siyami 经验公式,计算金沙江下游梯级水库运行 100 年的淤积进程,结果如图 4 所示。一维水沙模型计算结果表明,2021—2120 年金沙江下游梯级水库累积淤积量为 130.14 亿 t,总库容淤损率为 25.79%,其中乌东德水库年均淤积量 3 712.30 万 t,白鹤滩水库年均淤积量 5 434.48 万 t,溪洛渡水库年均淤积量 3 630.76 万 t,向家坝水库年均淤积量 356.83 万 t。未来 100 a 内梯级水库库容淤损率速度从大到小排序结果为:乌东德水库、溪洛渡水库、白鹤滩水库、向家坝水库。截至 2120 年乌东德水库累积淤损率为 45.29%,白鹤滩水库累积淤损率为 23.66%,溪洛渡水库累积淤损率为 25.86%,向家坝水库累积淤损率为 6.18%。水库排沙比 Siyami 经验公式计算结果表明,2021—2120 年金沙江下游梯级水库累积淤积 126.55 亿 t,总库容淤损率为 24.76%。截至 2120 年,乌东德水库年均淤积量 3 450.86 万 t,库容淤损率为 42.05%;白鹤滩水库年均淤积量 5 007.45 万 t,库容淤损率为 21.80%;溪洛渡水库年均淤积量 3 214.91 万 t,库容淤损率为 26.68%;向家坝水库年均淤积量 363.53 万 t,库容淤损率为

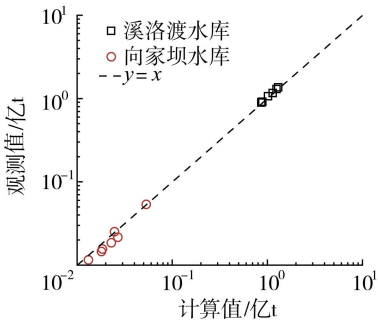


图 3 一维水沙模型计算水库淤积量验证

Fig.3 Verification of reservoir sedimentation volume calculated by one-dimensional water-sediment model

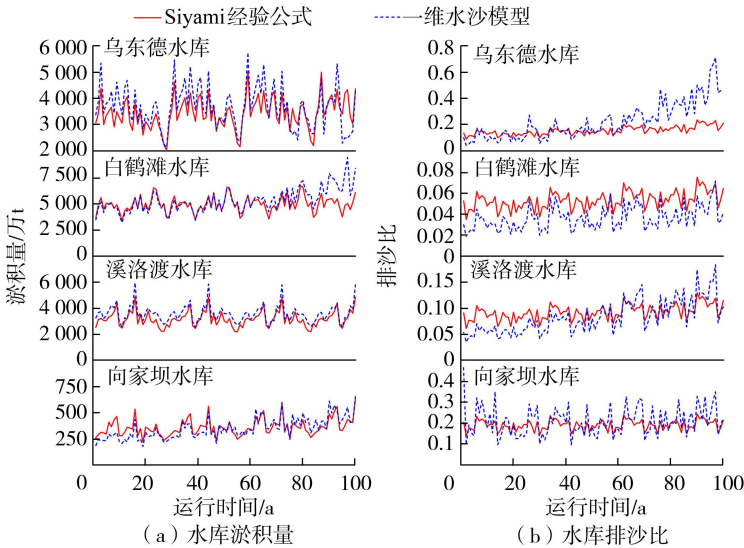


图 4 梯级水库淤积进程计算结果对比

Fig.4 Comparison of calculated sedimentation processes for cascade reservoirs of the lower reaches of the Jinsha River

7.11%。

由图 4 可知,Siyami 经验公式与一维水沙模型的计算结果总体保持一致,说明梯级水库淤积的预测结果相对可靠。两种计算结果在淤积总量预测和淤积空间分布均十分接近。淤积总量方面,Siyami 经验公式与一维水沙模型计算结果的比值为 0.97;淤积空间分布方面,两种计算方法在乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝水库的计算结果比值,分别为 0.93、0.92、0.89、1.02。分析两种计算结果的主要差异,一维水沙模型计算排沙比的波动性大于 Siyami 经验公式计算结果,并且随着梯级水库运行时间增加,一维水沙模型计算排沙比的增长速率明显大于 Siyami 经验公式计算结果,主要是因为不同水库的年入库水沙条件、水库库容存在差异。由于金沙江下游存在显著的水沙异源现象,从三堆子站至向家坝站年径流量沿程变化较小,各水库年入库水量基本持平,而年入库沙量在上游拦沙条件下以库区来沙为主。以金沙江下游梯级水库入库含沙量表征入库水沙条件,结合水库排沙比定义式(7)可知,当入库含沙量与出库含沙量越接近时水库排沙比越大,即入库含沙量越小时,悬移质粒径越小,水库排沙能力越强。

$$\eta_{it} = \frac{Q_{out,it}}{Q_{in,it}} \frac{S_{out,it}}{S_{in,it}}$$

(7)

其中

$$S_{in,it} = 0.1 W_{S,it} / Q_{in,it}$$

式中: $W_{S,it}$ 为水库 i 在第 t 年的入库沙量; $S_{in,it}$ 、 $S_{out,it}$ 分别为水库 i 在第 t 年的入库、出库水流含沙量。

3.2 Siyami 经验公式理论基础

由水库排沙比定义可知,水库排沙比为出入库水量系数与出入库含沙量系数的乘积。2021—2120 年乌东德水库、白鹤滩水库、溪洛渡水库、向家坝水库年均入库含沙量分别为 0.34、0.37、0.25、0.01 kg/m³。利用梯级水库库区含沙量表征水库拦沙能力,出库含沙量与库区含沙量正相关,因此库区含沙量越大出库含沙量越大,水库排沙比越大:

$$S_{r,it} \propto S_{out,it}$$

(8)

$$\frac{S_{r,it}}{S_{in,it}} = \frac{W_{S,it} / V_{e,it}}{W_{S,it} / Q_{in,it}} = \frac{Q_{in,it}}{V_{e,it}}$$

(9)

式中: $S_{r,it}$ 为库区含沙量。由于库区含沙量与入库含沙量的比值与出入库含沙量系数为正相关关系,通过化简得到出入库含沙量系数的关键影响因子为水库滞留时间,滞留时间越大,水库对入库水流的拦蓄作用越大,水库排沙比越小。由图 5 可知,2021—2120 年乌东德水库、白鹤滩水库、溪洛渡水库、向家坝水库年均滞留时间分别为 0.048、0.147、0.082、0.038。结合梯级水库年均排沙比变化过程验证滞留时间为控制变量的合理性,Siyami 经验公式与一维水沙模型的水库排沙比计算结果表明,乌东德水库与向家坝水库的滞留时间均明显小于中间两级水库,而两水库排沙比大于中间两级水库,说明水库排沙比经验公式中水库排沙比与滞留时间存在稳定的量化关系,具备相应的理论依据。

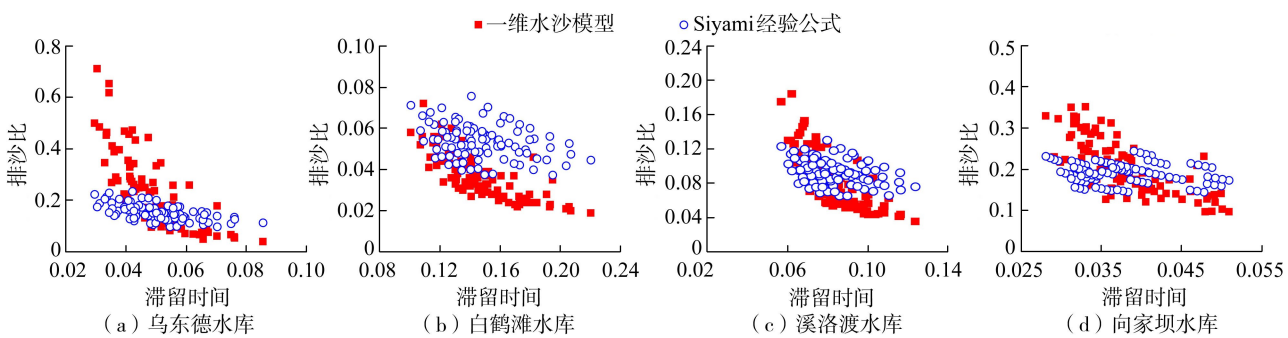


图 5 排沙比与滞留时间关系

Fig. 5 Relationship between sediment discharge ratio and retention time

3.3 Siyami 经验公式修正

结合水库运行方式可知,多年尺度下出入库流量系数接近于 1,因此两种水库排沙比计算结果的差异来自出入库含沙量系数。水库排沙比 Siyami 经验公式假设年内出入库水沙过程存在一致性,即出入库含沙量系数与出入库流量系数同步变化;而一维水沙模型则基于梯级水库的年内坝前水位变化、水沙输移规律计算年排沙比,考虑到了汛期与非汛期坝前水位变化对出入库流量系数、含沙量系数一致性变化的影响。利用水

库排沙比修正系数,改进金沙江下游梯级水库排沙比 Siyami 经验公式:

$$\eta_{m,i} = k_1 \eta_{f,i}$$

(10)

式中: $\eta_{m,i}$ 为一维水沙模型计算的水库 i 在第 t 年的排沙比; $\eta_{f,i}$ 为 Siyami 经验公式计算的水库 i 在第 t 年的水库排沙比; k_1 为水库排沙比修正系数。将一维水沙模型计算的水库排沙比作为基准值,改进现有水库排沙比 Siyami 经验公式。对比分析水库排沙比修正系数与各影响因素的量化关系,发现修正系数与水库排沙比基准值显著相关,两者量化关系如图 6 所示。金沙江下游梯级水库排沙比修正系数与排沙比基准值满足幂函数关系:

$$k_1 = a\eta_{m,i}^b$$

(11)

式中: a 、 b 分别为幂函数系数、指数。图 6 中水库排沙比修正系数随水库排沙比基准值增大而增大,说明当水库实际排沙比较大时 Siyami 经验公式计算排沙比偏小,并且随着水库逐步趋于冲淤平衡,水库排沙比增加会导致两种计算结果的差异性变大。式(11)构建了水库排沙比修正系数的自适应模型,解释了水库淤积对年排沙比经验公式计算准确性的影响,即随着运行时间增加水库逐步趋于冲淤平衡状态,水库排沙比修正系数为增加趋势。

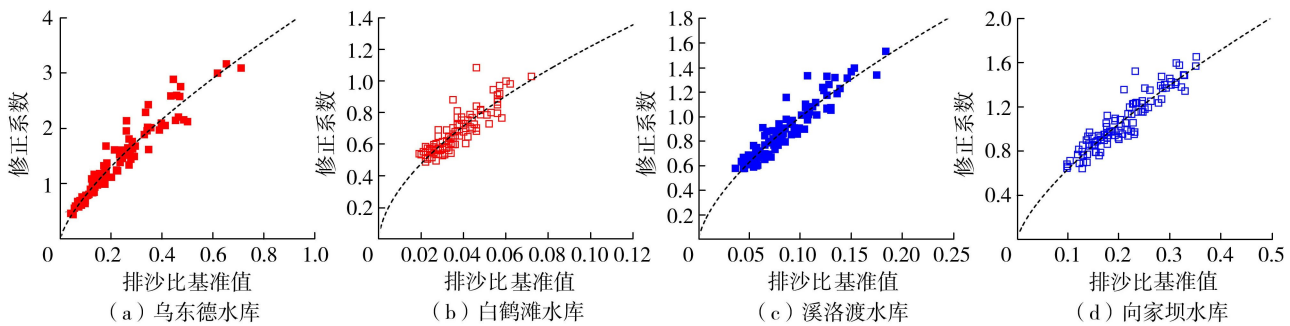


图 6 排沙比修正系数与排沙比基准值的关系

Fig. 6 Relationship between correction coefficient and benchmark value of sediment discharge ratio

运用式(11)分别拟合金沙江下游梯级水库排沙比修正系数的相关参数,结果见表 1。金沙江下游梯级水库排沙比修正系数公式的拟合优度 R^2 分别为 0.95、0.96、0.87、0.86,说明公式精度较高。

联合式(10)(11),得到水库年排沙比出入库含沙量修正系数 a 的自适应模型。

$$\eta_{m,i} = (a\eta_{f,i})^{1/(1-b)}$$

(12)

结合式(6)推导水库排沙比 Siyami 经验公式的修正形式:

$$\eta_{ii} = (a - ae^{-0.0079Q_{in,i}/V_{e,i}})^{1/(1-b)}$$

(13)

4 结 论

- a. 基于一维水沙模型,2021—2120 年金沙江下游梯级水库累积淤积量为 130.14 亿 t,四库总库容淤损率为 25.79%,其中乌东德水库年均淤积量 3712.30 万 t,白鹤滩水库年均淤积量 5434.48 万 t,溪洛渡水库年均淤积量 3630.76 万 t,向家坝水库年均淤积量 356.83 万 t。
- b. 水库排沙比 Siyami 经验公式与一维水沙模型的梯级水库淤积总量计算结果总体保持一致,两者比值为 0.97,说明梯级水库淤积的预测结果相对可靠。随着梯级水库运行时间增加,一维水沙模型计算排沙比的增长速率明显大于经验公式计算结果。
- c. 通过修正出入库含沙量系数修正了的水库排沙比 Siyami 经验公式,修正后公式在金沙江下游梯级水库排沙比的拟合优度为 0.76~0.93,说明修正的梯级水库排沙比公式计算精度较高。

参考文献:

[1] Wang Zhaoyin, Hu Chunhong. Strategies for managing reservoir sedimentation[J]. International Journal of Sediment Research,

2009,24(4):369-384.

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

[3] Yan Haochen,Zhang Xiaofeng,Xu Quanxi. Variation of runoff and sediment inflows to the Three Gorges Reservoir: impact of upstream cascade reservoirs[J]. Journal of Hydrology,2021,603:126875.

[4] 黄德春,朱宇昂,张修忠,等. 基于多理论视角的我国现代化水库运行管理矩阵建设研究[J]. 水利经济,2025,43(3):84-93. (Huang Dechun,Zhu Yuang,Zhang Xiuzhong, et al. Research on the construction of modern reservoir operation and management matrix in China from multiple theoretical perspectives[J]. Journal of Economics of Water Resources,2025,43(3): 84-93. (in Chinese))

[5] Michalec B. Evaluation of an empirical reservoir shape function to define sediment distributions in small reservoirs[J]. Water, 2015,7(8):4409-4426.

[6] 任实,高宇,吕超楠,等. 三峡水库汛期排沙规律研究[J]. 湖泊科学,2024,36(5):1562-1571. (Ren Shi,Gao Yu,Lyu Chaonan,et al. Sediment discharge characteristics of the Three Gorges Reservoir during flood seasons[J]. Journal of Lake Sciences,2024,36(5):1562-1571. (in Chinese))

[7] 郑珊,张晓丽,吴保生,等. 小浪底水库水沙异步运动与排沙比[J]. 泥沙研究,2021,46(6):1-8. (Zheng Shan,Zhang Xiaoli, Wu Baosheng,et al. Asynchronous movement of water-sediment and the sediment delivery ratio of the Xiaolangdi Reservoir[J]. Journal of Sediment Research,2021,46(6):1-8. (in Chinese))

[8] 邓安军,陈建国,胡海华,等. 我国水库淤损情势分析[J]. 水利学报,2022,53(3):325-332. (Deng Anjun,Chen Jianguo,Hu Haihua,et al. Analysis of reservoir siltation in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(3): 325-332. (in Chinese))

[9] Salas J D, Shin H S. Uncertainty analysis of reservoir sedimentation[J]. Journal of Hydraulic Engineering,1999,125(4):339-350.

[10] 张国帅,邓安军,陈建国,等. 金沙江下游水库拦沙效应研究[J]. 泥沙研究,2024,49(5):50-57. (Zhang Guoshuai,Deng Anjun,Chen Jianguo,et al. Study on the sediment interception by reservoirs in the lower Jinsha River Basin[J]. Journal of Sediment Research,2024,49(5):50-57. (in Chinese))

[11] Kondolf G M, Gao Yongxuan, Annandale G W, et al. Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers: Experiences from five continents[J]. Earth's Future,2014,2(5):256-280.

[12] 陈建国,邓安军,胡海华. 水库年平均淤损率影响因素分析[J]. 泥沙研究,2019,44(4):1-5. (Chen Jianguo,Deng Anjun, Hu Haihua. Analysis of factors affecting the annual average deposition rate of reservoirs[J]. Journal of Sediment Research, 2019, 44(4):1-5. (in Chinese))

[13] Huang Yifan, Wang Jinsheng, Yang Mei. Unexpected sedimentation patterns upstream and downstream of the Three Gorges Reservoir: Future risks[J]. International Journal of Sediment Research,2019,34(2):108-117.

[14] Lique C,Canals M,Ludwig W, et al. Sediment discharge of the rivers of Catalonia, NE Spain, and the influence of human impacts[J]. Journal of Hydrology,2009,366(1/2/3/4):76-88.

[15] 陈建国,周文浩,孙高虎. 论黄河小浪底水库拦沙后期的运用及水沙调控[J]. 泥沙研究,2016,41(4):1-8. (Chen Jianguo, Zhou Wenhao,Sun Gaohu. Studies on operation scheme and water-sediment regulation of Xiaolangdi Reservoir[J]. Journal of Sediment Research,2016,41(4):1-8. (in Chinese))

[16] Ren Shi,Zhang Bangwen,Wang Weijie, et al. Sedimentation and its response to management strategies of the Three Gorges Reservoir, Yangtze River, China[J]. Catena,2021,199:105096.

[17] Tang Xiaoya,Tong Sichen,Huang Guoxian, et al. Characteristics of sedimentation and channel adjustment linked to the Three Gorges Reservoir[J]. International Journal of Sediment Research,2021,36(2):177-189.

[18] Kummu M,Lu X X,Wang J J, et al. Basin-wide sediment trapping efficiency of emerging reservoirs along the Mekong[J]. Geomorphology, 2010,119(3/4): 181-197.

[19] 张金良,刘继祥,鲁俊,等. 黄河泥沙工程控制理论与实践[J]. 泥沙研究,2023,48(2):1-8. (Zhang Jinliang,Liu Jixiang,Lu Jun,et al. Theories and practices of sediment engineering control in the Yellow River[J]. Journal of Sediment Research,2023,48 (2):1-8. (in Chinese))

[20] 程亦菲,夏军强,周美蓉,等. 黄河下游不同河段分组悬沙输移对河床冲淤的影响[J]. 水科学进展,2022,33(3):506-517. (Cheng Yifei,Xia Junqiang,Zhou Meirong,et al. Effects of grouped suspended sediment transport on channel evolution in the

Lower Yellow River[J]. *Advances in Water Science*,2022,33(3):506-517. (in Chinese))

[21] Sedláček J,Bábek O,Grygar T M,et al. A closer look at sedimentation processes in two dam reservoirs[J]. *Journal of Hydrology*, 2022,605:127397.

[22] Chen Peng,Deng Jinyun,Tan Guangming,et al. Prediction research on sedimentation balance of Three Gorges Reservoir under new conditions of water and sediment[J]. *Scientific Reports*,2021,11(1):19005.

[23] Yang Yunping,Zheng Jinhai,Zhu Lingling,et al. Influence of the Three Gorges Dam on the transport and sorting of coarse and fine sediments downstream of the dam[J]. *Journal of Hydrology*,2022,615:128654.

[24] 张金良,胡春宏,刘继祥. 多沙河流水库“蓄清调浑”运用方式及其设计技术[J]. *水利学报*,2022,53(1):1-10. (Zhang Jinliang,Hu Chunhong,Liu Jixiang. Operation mode and design technology of “storing clean water and regulating muddy flow” of reservoirs in sediment-laden river[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*,2022,53(1):1-10. (in Chinese))

[25] Moragoda N,Cohen S,Gardner J,et al. Modeling and analysis of sediment trapping efficiency of large dams using remote sensing [J]. *Water Resources Research*,2023,59(6):e2022WR033296.

[26] 黄志鸿,董增川,周涛,等. 面向生态友好的水库群调度模型[J]. *河海大学学报(自然科学版)*,2020,48(3):202-208. (Huang Zhihong,Dong Zengchuan,Zhou Tao,et al. Group operation model for ecological friendly reservoir[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*,2020,48(3):202-208. (in Chinese))

[27] Li Zhe,Lu Lunhui,Lyu Pingyu,et al. Imbalanced stoichiometric reservoir sedimentation regulates methane accumulation in China’s Three Gorges Reservoir[J]. *Water Resources Research*,2020,56(9):e2019WR026447.

[28] 张金良. 多沙河流水库淤积形态与库容分布耦合设计[J]. *水利水电科技进展*,2024,44(4):45-50. (Zhang Jinliang. Coupling design for sedimentation pattern and storage capacity distribution of reservoirs in sediment-laden rivers[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*,2024,44(4):45-50. (in Chinese))

[29] Zhang Guoshuai,Deng Anjun,Lu Qin,et al. Analyzing the adjustment mechanism of daily sediment content under large reservoir operations[J]. *Science of the Total Environment*,2024,947:174729.

[30] Tan Guangming,Chen Peng,Deng Jinyun,et al. Review and improvement of conventional models for reservoir sediment trapping efficiency[J]. *Heliyon*,2019,5(9):e02458.

[31] Siyam A M,Kantoush S A, Saad A S. Development of a computational procedure for optimum sediment removal: application to case of roseires hydropower intakes[J]. *FES Journal of Engineering Sciences*,2021,10(1):28-36.

[32] Zhang Guoshuai,Deng Anjun,Chen Jianguo,et al. Impacts of climate change and human activities on sediment load in Longchuan River Basin, China[J]. *Journal of Hydrology*,2024,51:101613.

(收稿日期:2024 - 10 - 18 编辑:刘晓艳)

(上接第 59 页)

[29] 俞亮亮,陈可锋,陆培东,等. 海平面上升背景下辐射沙脊风暴潮增水研究[J]. *水利水运工程学报*,2014(6):52-57. (Yu Liangliang,Chen Kefeng,Lu Peidong,et al. A study of storm surge in radial sand ridges under sea level rising [J]. *Journal of Waterway and Harbor Engineering*,2014(6):52-57. (in Chinese))

[30] Huang Mingfeng,Wang Qing,Liu Maofeng,et al. Increasing typhoon impact and economic losses due to anthropogenic warming in Southeast China[J]. *Scientific Reports*,2022,12(1):14048.

[31] 张蔚,严以新,郑金海,等. 珠江三角洲年际潮差长期变化趋势[J]. *水科学进展*,2010,21(1):77-83. (Zhang Wei,Yan Yixin,Zheng Jinhai,et al. Interannual tidal range trend in Pearl River Delta [J]. *Advances in Water Science*,2010,21(1):77-83. (in Chinese))

[32] 谢平,陈广才,雷红富. 西北江三角洲马口站和三水站水文泥沙序列变异分析[J]. *水电能源科学*,2006,24(3):18-22. (Xie Ping,Chen Guangcai,Lei Hongfu. Variation analysis of hydrological and sediment series in North River and West River Delta:case study of Makou Station and Sanshui Station [J]. *Water Power and Energy Science*,2006,24(3):18-22. (in Chinese))

[33] 乔煜,季小梅,张蔚. 台风事件下的雨潮复合灾害风险研究[J]. *地理科学进展*,2023,42(6):1153-1161. (Qiao Yu, Ji Xiaomei,Zhang Wei. Compound flood risk of rainfall and storm surges during typhoon events [J]. *Progress in Geography*,2023, 42(6):1153-1161. (in Chinese))

[34] 袁竹,高亮,张文生,等. 风暴潮与极端暴雨叠加作用下九龙半岛内涝防控方法[J]. *水资源保护*,2024,40(4):56-64. (Yuan Zhu,Gao Liang,Zhang Wensheng,et al. Waterlogging prevention and control methods in Kowloon Peninsula under superimposed effect of storm surge and extreme rainstorm[J]. *Water Resources Protection*,2024,40(4):56-64. (in Chinese))

(收稿日期:2025 - 01 - 09 编辑:刘晓艳)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.03.010

基于组合赋权-云模型的溃坝生命损失风险评价

程 井¹,向思瑶¹,周 伟²,何子瑶³

(1. 河海大学水利水电学院; 2. 武汉大学水利水电学院; 3. 南方电网储能股份有限公司)

摘要: 针对传统溃坝生命损失评估中层次分析法赋权主观性强、生命损失风险时空分布研究不足以及风险指标具有较大模糊性和随机性的问题,提出了一种基于组合赋权-云模型的溃坝生命损失风险评价方法。该方法综合考虑各类影响因素,构建溃坝生命损失评价指标等级划分标准,基于溃坝洪水演进结果构建下游淹没区的单元人口分布模型,综合 G1 法-熵权法组合赋权方法确定的指标权重及云模型得到的各单元风险隶属度,实现溃坝过程中不同时空单元的风险动态评估,通过计算生命损失值判定水库溃坝的总体生命损失风险等级。实例验证结果表明:G1 法-熵权法组合赋权方法融合了洪水演进过程中的数据变化,能有效平衡溃坝生命损失风险评价中相关指标的主客观权重;组合赋权-云模型方法能有效处理风险评估过程中的随机性和模糊性问题,实现溃坝过程的动态风险评估,更符合洪水演进的实际过程,能更准确地反映溃坝初期洪水对受灾群体风险的影响。

关键词: 溃坝; 生命损失; 风险评价; 组合赋权; 云模型

Risk assessment of life loss in dam breach based on combined weighting-cloud model

Cheng Jing¹, Xiang Siyao¹, Zhou Wei², He Ziyao³

(1. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University;
2. School of Water Resources and Hydropower Engineering, Wuhan University;
3. China Southern Power Grid Energy Storage Co., Ltd.)

Abstract: To address the problems of strong subjectivity in weighting by the analytic hierarchy process and insufficient research on the spatiotemporal distribution of life loss risks in traditional dam breach life loss assessment, as well as the high fuzziness and randomness of risk indicators, a risk assessment method for dam breach life loss based on a combined weighting-cloud model was proposed. This method comprehensively considered various influencing factors, established a grading standard for dam breach life loss assessment indicators, and constructed a unit population distribution model for the downstream flooded area based on dam breach flood routing results. By integrating the indicator weights determined by the combined G1-entropy weight method with the risk membership degree of each unit obtained from the cloud model, dynamic risk assessment of different spatiotemporal units during the dam breach process was achieved. The overall life loss risk level of the reservoir dam breach was determined by calculating the life loss value. The case study results demonstrate that the combined G1-entropy weight method integrates data changes during flood routing and effectively balances the subjective and objective weights of relevant indicators in dam breach life loss risk assessment; the combined weighting-cloud model method can effectively handle the randomness and fuzziness issues in the risk assessment process, achieve dynamic risk assessment of the dam breach process, better conform to the actual flood routing process, and more accurately reflect the impact of the flood on the affected population during the initial stage of the dam breach.

Key words: dam breach; life loss; risk assessment; combined weighting; cloud model

水库大坝一旦溃决将产生严重后果^[1],溃坝生命损失是指因大坝溃决所引发的洪水及其次生灾害所造成的人口损失,是大坝溃决后果中最严重的损失形式。因此,开展溃坝生命损失风险评价具有重要意义,不仅有助于水库的安全管理,还能为应急预案的制定提供科学依据^[2]。

国外对溃坝生命损失的研究较早^[3-5],但研究成果是基于国外溃坝资料统计得到的,不适用于我国的大坝情况。近年来,国内学者也开展了大量关于溃坝生命损失的研究:周克发等^[6]依据我国的溃坝资料,研究了各类影响因素对风险人口死亡率的影响程度,构建了符合我国国情的溃坝生命损失评价模型;Li 等^[7]通

过专家打分法和云改进熵权法,建立了溃坝风险影响因子权重计算模型;葛巍等^[8]将层次分析法与贝叶斯网络相结合,从指标权重和概率的角度评价溃坝生命损失风险。这些方法充分考虑了生命损失的影响因素,但它们在指标权重上大多依赖主观赋权,忽略了指标信息的客观性;同时,许多因素具有明显的空间变异性,其时空分布特征直接影响风险的时空演变规律,而目前关于影响因素时空变化规律的研究相对较少。

溃坝生命损失影响因素的不确定性对评价结果的影响较为突出,为此 Zhu 等^[9]通过改进差分进化算法,提出了一种基于模糊聚类迭代法的溃坝生命损失评价模型;Ge 等^[10]引入区间理论分析生命损失,通过多个溃坝试验验证了方法的准确性;Yin 等^[11]运用模糊理论对生命损失的影响因素进行了量化,结合随机森林模型提出了一种新算法。云模型是一种以模糊数学与概率论为基础的数学模型,由李德毅等^[12]提出,目前已在风险评价^[13]、安全管理^[14-15]、智能算法^[16]等多个领域得到广泛应用,在处理模糊性和随机性方面表现优异。

本文基于洪水演进过程,采用组合赋权法对风险指标进行主客观动态赋权,利用云模型描述风险评价过程中的模糊性和随机性,实现指标权重的动态化,揭示下游风险的时空分布规律,最终通过计算生命损失值判定水库溃坝生命损失的风险等级。

1 研究方法

1.1 组合赋权-云模型评价模型

1.1.1 组合赋权

1.1.1.1 G1 法确定主客观权重

G1 法又称序关系分析法,是一种改进的层次分析法,它通过对评价指标进行排序并比较相邻指标的相对重要性确定权重,可有效避免层次分析法中复杂的判断矩阵一致性检验工作^[17]。具体计算步骤:①确定序关系,将评价指标 $X_j(j=1,2,\cdots,m;m$ 为评价指标的总数)按重要性从高到低进行排序($X_1>X_2>\cdots>X_m$);②邀请专家对相邻指标的重要性程度进行比较,指标重要性程度赋值见表 1;③计算最不重要指标的权重,并递推计算其他指标的权重:

$$w'_j=\left(1+\sum_{j=2}^m\prod_{p=j}^mr_p\right)^{-1}\tag{1}$$

$$w'_{j-1}=r_jw'_j\tag{2}$$

式中: w'_j 为指标 X_j 的主观权重; r_j 为指标 X_{j-1} 与指标 X_j 的重要性程度之比。

1.1.1.2 熵权法确定客观权重

熵权法是依据指标变异性大小客观确定权重的方法。该方法通过计算各指标信息熵量化其离散程度,进而确定权重,可有效避免主观赋权带来的偏差^[18-19]。核心思想为:指标离散程度越大,数据差异越显著,所提供信息量越多,对应熵值越小,权重越高。计算步骤如下:①对原始数据集进行极差标准化处理;②根据式(3)(4)计算各指标的比重和熵值;③根据熵值计算各指标的客观权重(式(5))。

$$p_{ij}=x'_{ij}/\sum_{i=1}^nx'_{ij}\tag{3}$$

$$e_j=-\frac{1}{\ln n}\sum_{i=1}^np_{ij}\ln p_{ij}\tag{4}$$

$$w''_j=(1-e_j)/\sum_{j=1}^m(1-e_j)\tag{5}$$

式中: p_{ij} 为指标 X_j 下评价对象 i 的比重; x'_{ij} 为评价对象 i 的指标 X_j 标准化处理后的数据; n 为评价对象总数; e_j 为指标 X_j 的熵值, $e_j\in[0,1]$; w''_j 为指标 X_j 的客观权重。

1.1.1.3 组合赋权

将计算得到的主观权重和客观权重进行线性组合:

$$w_j=\lambda w'_j+(1-\lambda)w''_j\tag{6}$$

表 1 r_j 赋值及其定性描述

Table 1 Assignment of r_j and its qualitative description

r_j 赋值	定性描述
1.0	指标 X_{j-1} 与指标 X_j 具有相同的重要性
1.2	指标 X_{j-1} 比指标 X_j 稍微重要
1.4	指标 X_{j-1} 比指标 X_j 明显重要
1.6	指标 X_{j-1} 比指标 X_j 强烈重要
1.8	指标 X_{j-1} 比指标 X_j 极端重要

式中: w_j 为指标 X_j 的组合权重; λ 为主观权重系数,建议取值范围为 0.5~0.8,本文取 $\lambda=0.5$ 。

1.1.2 云模型理论

云模型是一种能够实现定性概念与定量数据相互转换的有效工具,基本原理:设定量论域 $U=\{x\}$ 为一个数值集合, C 为 U 上的定性概念;若定量值 x 是 C 的一次随机实现,且随机数 x 的分布具有稳定倾向,则 x 对于 C 的隶属度 $\mu(x) \in [0,1]$ 。每个 x 称为一个云滴,所有云滴在论域 U 中的分布构成隶属云。

云模型通过 3 个数字特征(期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e)表征事物的不确定性。 E_x 表示定性概念在论域中的中心值, E_n 表示定性概念的模糊程度, H_e 表示 E_n 的不确定性,反映了云滴的离散程度。云模型通过云发生器实现,正向云发生器是从定性转换为定量的过程,基于数字特征值随机生成云滴,从而在定性信息中获取定量数值的分布规律。云滴生成步骤如下:①生成以 E_n 为期望、 H_e^2 为方差的正态随机数 $E_{n,i}$;②生成以 E_x 为期望、 $E_{n,i}^2$ 为方差的正态随机数 x_i ;③根据式(7)计算隶属度 $\mu(x_i)$,可得到一个云滴 $(x_i, \mu(x_i))$;④重复上述步骤,即可生成 N 个云滴。

$$\mu(x_i) = \exp\left[-\frac{(x_i - E_x)^2}{2E_{n,i}^2}\right]$$

(7)

在溃坝生命损失风险评价中,下游淹没区的风险等级是一个定性概念,且评价过程受多种不确定因素影响。因此,本文采用云模型将评价中的模糊性和随机性转化为隶属度这一量化指标,并将下游淹没区划分为多个单元,通过分析下游淹没区所有单元,揭示溃坝生命损失风险的时空分布规律。

1.1.3 单元风险评价

根据式(8)计算下游淹没区单元的隶属度矩阵,结合组合权重,得到单元的风险评价结果,根据隶属度最大原则,即可得到单元的风险评价等级(式(9))。

$$U = W\mu = (w_1, w_2, \dots, w_j) \begin{bmatrix} \mu_{11} & \cdots & \mu_{1l} \\ \vdots & & \vdots \\ \mu_{j1} & \cdots & \mu_{jl} \end{bmatrix}$$

(8)

$$L = \operatorname{argmax}\{U_1, U_2, \dots, U_l\}$$

(9)

式中: U 为单元风险评价结果; W 为指标权重; μ 为单元隶属度矩阵, μ_{jl} 为指标 X_j 对评价等级 l 的隶属度; U_l 为单元对评价等级 l 的综合隶属度; L 为单元风险评价等级。

1.2 生命损失估算

参考周克发等^[6,20]的研究,对生命损失估算公式进行修改,将权重系数改为洪水演进过程中不同时刻的组合赋权系数:

$$L_{OL} = P_{AR} f \alpha \beta$$

(10)

其中

$$\alpha = w_j \varepsilon$$

式中: L_{OL} 为生命损失人数; P_{AR} 为风险人口数; f 为风险人口死亡率,取值参考文献[6]; α 为灾害严重性程度系数; β 为修正系数, $\beta=1.4$; ε 为影响因素对风险人口死亡率的影响程度,取值参考文献[6]。

1.3 洪水演进原理

HEC-RAS(hydrologic engineering center-river analysis system)是由美国陆军工程兵团水文工程中心研发的专业水力模拟软件,具有较高计算精度和良好的 GIS 兼容性,目前广泛应用于水利工程设计、溃坝风险评估、洪泛区淹没分析等领域。HEC-RAS 的二维水动力学模型基于简化的 Navier-Stokes 方程^[21],能够有效模拟复杂地形条件下的洪水演进过程。

2 溃坝生命损失风险评价指标体系

2.1 生命损失评价指标及等级划分

溃坝生命损失的形成受到多种非线性相关因素的共同影响,现有研究通常将这些影响因素分为直接与间接两类^[6,20]。基于生命损失形成机理及现有评价模型的参数体系,选取 8 个影响因素作为溃坝生命损失评价指标,包括 4 个直接因素(风险人口数、警报时间、洪水严重性、理解程度)、4 个间接因素(风险人口组成、洪水到达时间、距坝距离和下游坡降)。

参考相关研究^[22-23],本文将评价指标划分为 5 个等级(表 2):轻微(Ⅰ级)、一般(Ⅱ级)、中等(Ⅲ级)、严重(Ⅳ级)及极其严重(Ⅴ级)。具体划分方法:定量指标如风险人口数、洪水严重性等,结合实际工程数据及相关研究确定分级阈值;定性指标如理解程度、风险人口组成等,根据分级描述进行 0~100 赋值,再按区间划分等级。

表 2 溃坝生命损失评价指标等级划分

Table 2 Grading of assessment indicators for dam breach life loss

等级	风险人口数/ (人/10 ⁴ km ²)	警报时间/h	洪水严重性/ (m ² /s)	理解程度	风险人口组成	洪水到达时间	距坝距离/km	下游坡降/(°)
Ⅰ	0~<0.5	1.0~3.0	0~<0.5	0~<25(极明确)	80~100	0~<25(上午)	50~100	0~<5
Ⅱ	0.5~<1.0	0.75~<1.00	0.5~<4.6	25~<45(明确)	60~<80	25~<45(正午)	20~<50	5~<10
Ⅲ	1.0~<1.5	0.50~<0.75	4.6~<12	45~<65(一般)	40~<60	45~<65(下午)	10~<20	10~<15
Ⅳ	1.5~<2.0	0.25~<0.50	12~<15	65~<85(模糊)	20~<40	65~<85(夜晚)	5~<10	15~<30
Ⅴ	2.0~6.0	0~<0.25	15~45	85~100(极模糊)	0~<20	85~100(凌晨)	0~<5	30~90

2.2 评价指标云模型

确定评价指标及其分级标准后,可将各指标的等级集视为多个闭区间,从而求解其云模型的数字特征值。为提高评价方法的区分精度,设定 E_n 和 H_e 为线性相关(式(11))。随后,利用正向云发生器生成各评价指标的云模型,如图 1 所示。

$$\begin{cases} E_x = (S_{\max} + S_{\min})/2 \\ E_n = (S_{\max} - S_{\min})/3 \\ H_e = \delta E_n \end{cases} \tag{11}$$

式中: $S_{\max}$ 、 $S_{\min}$ 分别为某等级标准区间的上限值和下限值; δ 取 0.1^[24]。

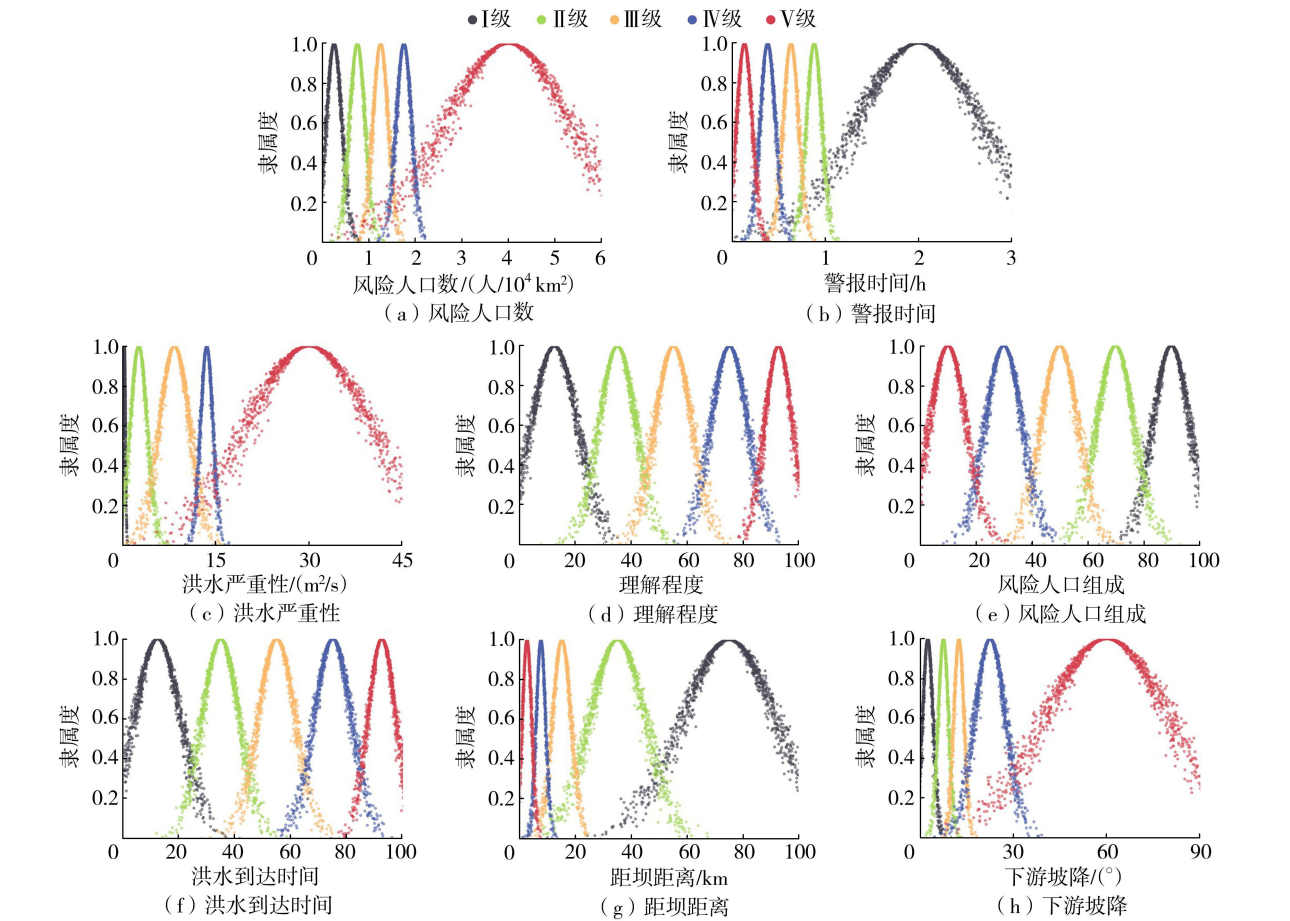


图 1 各评价指标的云模型

Fig. 1 Cloud models of each assessment indicator

3 实例验证

3.1 工程概况

YS 水库为小(1)型水库,位于贵州省六盘水市钟山区,坝址以上集雨面积为 17.03 km²。水库枢纽由大坝、溢洪道、放水涵洞等组成。大坝为黏土斜墙坝,坝顶高程为 1 827.7 m,最大坝高 22.7 m,坝顶长度 228.5 m,坝顶宽 6.0 m。水库总库容 633 万 m³,设计洪水位($P=2\%$) 1 526.63 m,校核洪水位($P=0.1\%$) 1 827 m,正常蓄水位 1 826 m。

3.2 溃坝洪水演进模型构建

利用 HEC-RAS 软件构建 YS 水库溃坝洪水演进模型。图 2 为 YS 水库数字高程数据(DEM,1:2 000),图 3 为研究区 GlobeLand30 土地利用类型,依照曼宁系数表对地表糙率赋值,其中水体糙率取 0.035,林地糙率取 0.2,草地糙率取 0.035,耕地取糙率 0.04,人造地表糙率取 0.03。水库初始条件取校核洪水位为起溃水位,坝址以下采用干燥初始条件。上游边界条件取水库校核洪水标准下的入库洪水过程线,下游边界条件设为自由出流边界,模拟泄水建筑物泄洪能力不足和校核洪水位最不利条件下导致水库漫顶溃坝的情形。计算得到溃坝洪水严重性和洪水到达时间如图 4、图 5 所示。

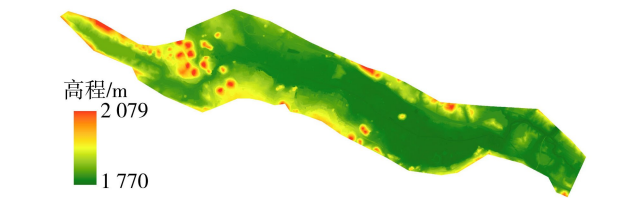


图 2 YS 水库 DEM 建模范围

Fig. 2 DEM modeling scope of YS reservoir



图 3 YS 水库土地利用类型

Fig. 3 Land use types of YS reservoir

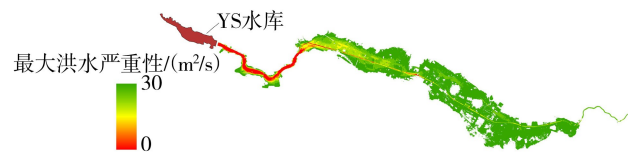


图 4 溃坝最大洪水严重性

Fig. 4 Maximum flood severity of dam breach

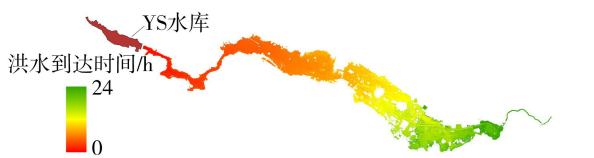


图 5 溃坝洪水到达时间

Fig. 5 Arrival time of dam breach flood

3.3 风险评价

3.3.1 单元信息

基于洪水演进结果确定研究范围,并建立空间地理信息单元,单元尺寸为 10 m×10 m。各单元的 8 个评价指标数据的赋值如下:单元风险人口数基于 2020 年第七次人口普查数据,行政区划统计到第 4 级(乡镇级),在计算人口密度的基础上,结合研究区居民的分布情况,为每个单元赋值,研究区单元人口分布如图 6 所示。单元警报时间为洪水到达时间与警报通知时间的差值,警报通知时间取 10 min^[25]。单元的洪水严重性和洪水到达时间由洪水演进模型得出。单元理解程度以六盘水市钟山区人口受教育程度比例为依据,随机抽样赋值,钟山区人口大学:高中:初中:小学:文盲的比例为 0.173:0.141:0.287:0.252:0.147。单元人口组成以六盘水市钟山区青年人口比例(65.45%)为期望,按正态分布原则生成随机数。单元距坝距离为各单元中心到大坝坝轴线的距离,单元下游坡降由 DEM 数字高程数据通过空间分析提取。

3.3.2 权重计算

G1 法计算主观权重,邀请专家对评价指标进行序关系排序和重要程度赋值,相邻指标重要程度及指标主观权重见表 3。同时,结合洪水演进的动态过程,利用熵权法计算得到各洪水历时评价指标的客观权重(表 4)。主观权重是基于专家经验赋予不同指标相对稳定的优先级,其权重分布较为均衡;而客观权重则依



图 6 研究区人口分布

Fig. 6 Population distribution in study area

据洪水演进中指标的实时波动性进行动态调整,其中风险人口数和洪水严重性的权重随洪水历时变化明显。因此,有必要结合主客观权重之间的差异,以实现专家经验与工程数据之间的平衡。

表 3 G1 法重要程度赋值及主观权重

Table 3 Importance degree assignment and subjective weights of G1 method					
指标	r_j	主观权重	指标	r_j	主观权重
风险人口数		0.154	风险人口组成	1.40	0.105
警报时间	1.00	0.154	洪水到达时间	1.00	0.105
洪水严重性	1.05	0.145	距坝距离	1.00	0.105
理解程度	1.00	0.145	下游坡降	1.20	0.087

表 4 熵权法得到的各洪水历时评价指标的客观权重

Table 4 Objective weights of assessment indicators under different flood durations obtained by entropy weight method								
洪水历时/h	风险人口数	警报时间	洪水严重性	理解程度	风险人口组成	洪水到达时间	距坝距离	下游坡降
0.75	0.674	0.013	0.145	0.039	0.010	0.014	0.038	0.067
1.00	0.621	0.026	0.165	0.041	0.013	0.026	0.048	0.060
1.50	0.383	0.063	0.232	0.062	0.019	0.064	0.084	0.093
2.00	0.323	0.041	0.268	0.082	0.020	0.041	0.115	0.110
4.00	0.275	0.134	0.292	0.082	0.017	0.000	0.089	0.111
6.00	0.264	0.121	0.337	0.073	0.017	0.002	0.081	0.105
12.00	0.249	0.114	0.374	0.069	0.016	0.002	0.076	0.100
24.00	0.245	0.100	0.429	0.060	0.013	0.019	0.048	0.086

由式(6)得到各洪水历时下评价指标的组合权重(表 5)。结果显示,洪水历时为 0~2 h,风险人口数的组合权重占主导地位,该时间段以人口暴露风险为核心;洪水历时为 2~24 h,洪水严重性的组合权重逐渐增大,其他指标组合权重趋于平稳。整个过程中,风险人口数和洪水严重性是影响生命损失的两个主导因素。其中,风险人口数组合权重在溃坝初期达到最大值 0.414,随后逐渐下降,至 24 h 时降至 0.199,表明溃坝初期,人口的空间分布对生命损失具有决定性作用,而随着时间推移,其影响逐渐减弱。洪水严重性的组合权重则呈现相反趋势,从 0.75 h 的 0.145 持续上升至 24 h 的 0.288,表明随着洪水的传播,水力参数如水深、流速的威胁性增强。警报时间和理解程度的组合权重波动较小,均呈现先增加后减弱的趋势,其余指标的组合权重普遍较低。

表 5 各洪水历时下评价指标的组合权重

Table 5 Combined weights of assessment indicators under different flood durations								
洪水历时/h	风险人口数	警报时间	洪水严重性	理解程度	风险人口组成	洪水到达时间	距坝距离	下游坡降
0.75	0.414	0.083	0.145	0.092	0.057	0.059	0.071	0.079
1.00	0.387	0.090	0.156	0.094	0.059	0.065	0.076	0.073
1.50	0.268	0.108	0.189	0.104	0.062	0.084	0.094	0.091
2.00	0.238	0.097	0.207	0.114	0.062	0.073	0.110	0.099
4.00	0.214	0.144	0.219	0.114	0.061	0.052	0.097	0.099
6.00	0.209	0.137	0.242	0.109	0.061	0.053	0.093	0.096
12.00	0.201	0.134	0.260	0.107	0.060	0.053	0.090	0.095
24.00	0.199	0.127	0.288	0.103	0.059	0.062	0.076	0.086

3.3.3 综合评价结果

通过计算各单元各评价指标的隶属度矩阵,并与对应洪水历时的指标组合权重相乘,得到各单元的综合隶属度,取最大隶属度为单元的风险等级。为方便理解,以洪水历时 1.50 h 的某单元数据为例,来说明单元风险等级的计算过程。该单元的评价指标数据及其对应的等级隶属度见表 6,结合该洪水历时的指标权重,计算得到 $U_I = 0.079$ 、 $U_{II} = 0.111$ 、 $U_{III} = 0.118$ 、 $U_{IV} = 0.152$ 、 $U_V = 0.312$,得出 $U_V > U_{IV} > U_{III} > U_{II} > U_I$,故该单元的风险等级为 V 级。同理对各洪水历时各单元的指标数据进行计算,可得到各洪水历时溃坝下游整体单元的评价结果。考虑到篇幅问题以及洪水历时 6h 后风险分布变化不大,选取 4 个典型洪水历时的风险等级云图进行展示,如图 7 所示。不同洪水历时下风险等级的频数变化如图 8 所示。

表 6 洪水历时 1.50 h 某单元评价指标隶属度结果

Table 6 Membership degree results of assessment indicators for a certain unit at flood duration of 1.50 h

评价指标	单位	数值	隶属度				
			μ_I	μ_{II}	μ_{III}	μ_{IV}	μ_V
风险人口数	人/10 ⁴ km ²	2.00	0.000	0.000	0.000	0.325	0.325
警报时间	h	0.83	0.216	0.882	0.044	0.000	0.000
洪水严重性	m ² /s	12.01	0.000	0.000	0.322	0.332	0.198
理解程度		99.00	0.000	0.000	0.000	0.002	0.430
风险人口组成		53.92	0.000	0.054	0.841	0.002	0.000
洪水到达时间		97.86	0.000	0.000	0.000	0.003	0.563
距坝距离	km	2.64	0.000	0.005	0.001	0.014	0.996
下游坡降	(°)	4.15	0.614	0.132	0.000	0.001	0.020

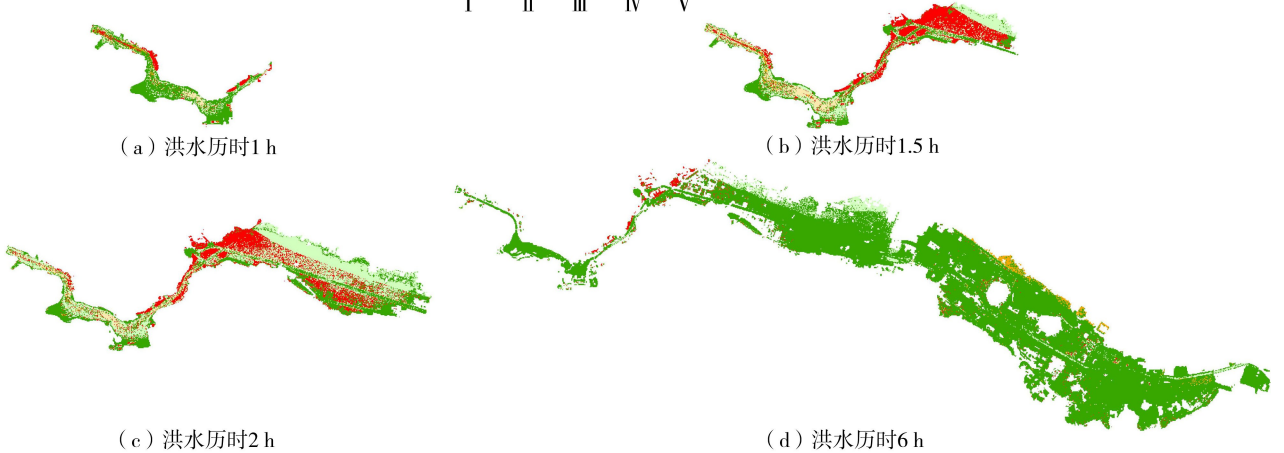
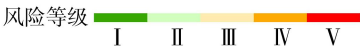


图 7 各典型洪水历时溃坝下游的风险等级云图

Fig. 7 Risk level cloud maps for downstream area of dam breach under typical flood durations

洪水历时为 0~6h,受灾单元总数呈现快速增长趋势,在 6h 和 12h 达到峰值,随后在 24h 略有下降。下游风险的时空演变规律主要为:①洪水历时为 0~2h,高风险区域不断扩大,且随着时间推移,高风险区逐渐向下游居民聚集区扩散;V 级高风险单元数量急速增加,在 2 h 时达到峰值,占比达 24.47%;②洪水历时为 2~4 h,高风险区域的范围开始缩小,V 级高风险单元减少,而 I 级低风险单元大幅增加;③洪水历时为 4~24 h,风险格局逐渐趋于稳定,大部分区域为低风险区,只有少部分人口密集区域仍然为高风险区;尽管 I 级低风险单元在 24 h 时有所减少,但其占比达到了峰值 90.93%。

根据式(10)计算各时刻各单元的生命损失,并与周克发等^[6,20]的估算模型进行对比,最终得到的溃坝生命损失结果(表 7)。本文方法与其他两种方法的计算结果整体趋势一致,各洪水历时的生命损失估算值差异较小,表明本文方法是可靠的。此外,本文方法考虑了不同洪水历时下各评价指标数据的动态变化,更符合洪水演进的实际过程,从而能更准确反映溃坝初期洪水对受灾群体风险的影响。

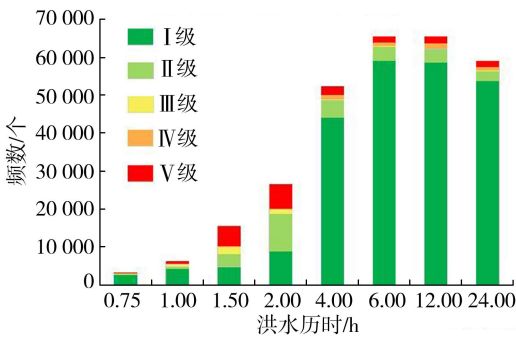


图 8 不同洪水历时下风险等级的频数变化

Fig. 8 Frequency variation of risk levels under different flood durations

表 7 溃坝生命损失估算结果对比

Table 7 Comparison of estimation results for dam breach life loss

洪水历时/h	生命损失/人		
	本文方法	周克发等 ^[6]	吴欢强等 ^[20]
0.75	3	3	2
1.00	10	9	8
1.50	62	59	54
2.00	78	75	68
4.00	92	91	84
6.00	101	103	94
12.00	103	106	97
24.00	107	112	103

根据 SL/T 829—2024《水库大坝风险等级划分与评估导则》^[26],水库大坝生命损失风险从高到低分为极高风险、高风险、中风险、低风险共 4 级。本文采用风险矩阵法评估大坝运行期内的风险,该方法综合考虑溃坝可能性和溃坝后果严重性。在溃坝可能性方面,YS 水库工程整体结构安全,水库抗洪能力满足要求,工程渗流现状整体安全,水库运行管理良好,因此溃坝可能性评定为“基本满足安全要求”,等级为 2 级^[26]。在溃坝后果严重性方面,YS 水库可能导致的生命损失超过 100 人,生命损失严重性评定为“灾难性”,等级为 S5^[26]。根据风险矩阵,判定 YS 水库生命风险为高风险。结合 YS 水库所处城市的地理位置,该风险评估结果符合客观实际。

4 结 语

G1 法-熵权法组合赋权法融合了洪水演进过程中的数据变化,能有效平衡溃坝生命损失风险评价中相关指标的主客观权重。权重结果表明,在溃坝洪水演进过程中,风险人口数和洪水严重性指标的权重贡献最为显著;风险人口数指标的权重在溃坝初期达到峰值 0.414 后呈单调递减趋势,而洪水严重性指标的权重则随时间推移从 0.145 逐渐增加至 0.288,其余指标的权重波动较小。组合赋权-云模型方法能有效处理风险评估过程中的随机性和模糊性问题,实现了溃坝过程的动态风险评估,揭示了 YS 水库溃坝下游风险的时空分布规律:洪水历时 0~2 h,高风险区域不断扩大,主要分布于人口密集地区;洪水历时 2~4 h,高风险区域范围缩小;洪水历时 4~24 h,风险格局逐渐趋于稳定,大部分地区处于低风险区。YS 水库溃坝生命损失约为 107 人,与传统计算方法相比,本文方法融入客观数据来评估指标权重,突出了洪水演进对生命损失的动态影响。风险矩阵法评估表明:YS 水库溃坝可能性等级为 2 级,溃坝后果严重性等级为 S5,综合评估生命风险等级为高风险,需优先采取风险防控措施。

参考文献:

[1] 陈云,王义俊,郑霞忠,等. 融合案例挖掘与贝叶斯网络的溃坝事故致因风险分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024,52(4):13-21. (Chen Yun, Wang Yijun, Zheng Xiazhong, et al. Risk analysis of dam break accident combining case mining and Bayesian network[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024,52(4):13-21. (in Chinese))

[2] 黄德春,朱宇昂,张修忠,等. 基于多理论视角的我国现代化水库运行管理矩阵建设研究[J]. 水利经济,2025,43(3):84-93. (Huang Dechun, Zhu Yuang, Zhang Xiuzhong, et al. Research on the construction of modern reservoir operation and management matrix in China from multiple theoretical perspectives[J]. Journal of Economics of Water Resources,2025,43(3):84-93. (in Chinese))

[3] Brown C A, Graham W J. Assessing the threat to life from dam failure[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1988,24(6):1303-1309.

[4] Dekay M L, McClelland G H. Predicting loss of life in cases of dam failure and flash flood[J]. Risk Analysis,1993,13(2):193-205.

[5] Graham W J. A procedure for estimating loss of life caused by dam failure[J]. Sedimentation & River Hydraulics,1999,6(5):21-43.

[6] 周克发,李雷,盛金保. 我国溃坝生命损失评价模型初步研究[J]. 安全与环境学报,2007(3):145-149. (Zhou Kefa, Li Lei, Sheng Jinbao. Evaluation model of loss of life due to dam breach in China[J]. Journal of Safety and Environment,2007(3):145-149. (in Chinese))

[7] Li Zongkun, Li Wei, Ge Wei. Weight analysis of influencing factors of dam break risk consequences[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences,2018,18(12):3355-3362.

[8] 葛巍,焦余铁,洪辛茜,等. 基于 AHP-BN 法的溃坝生命损失风险评价[J]. 郑州大学学报(工学版),2021,42(3):8-12. (Ge Wei, Jiao Yutie, Hong Xinqian, et al. Risk assessment of life loss caused by dam breach based on AHP-BN method[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science),2021,42(3):8-12. (in Chinese))

[9] Zhu Yantao, Niu Xinqiang, Gu Chongshi, et al. A fuzzy clustering logic life loss risk evaluation model for dam-break floods[J]. Complexity,2021,2021:7093256.

[10] Ge Wei, Wang Xiuwei, Li Zongkun, et al. Interval analysis of the loss of life caused by dam failure[J]. Journal of Water Resources Planning and Management,2021,147(1):04020098.

[11] Yin Qiaogang, Li Yanlong, Zhang Ye, et al. Assessment of loss of life caused by dam failure based on fuzzy theory and hybrid

random forest model[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment,2024,38(9):3619-3637.

[12] 李德毅,孟海军,史雪梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展,1995,32(6):15-20. (Li Deyi,Meng Haijun,Shi Xuemei. Membership clouds and membership cloud generators[J]. Journal of Computer Research and Development,1995,32(6):15-20. (in Chinese))

[13] 康玲,廖武丰,周丽伟,等. 耦合高斯-极值分布与云模型的防洪调度预案风险分析方法[J]. 水利学报,2025,56(3):309-316. (Kang Ling,Liao Wufeng,Zhou Liwei,et al. A method coupled Gaussian-Extreme distribution with Cloud models for risk analysis of flood control operational scheme[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2025,56(3):309-316. (in Chinese))

[14] 王媛,张志慧,任杰,等. 基于动态权重-云模型的大型渡槽安全综合评价[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):56-63. (Wang Yuan,Zhang Zhihui,Ren Jie,et al. Comprehensive evaluation of large-scale aqueduct safety based on dynamic weight-cloud model[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2023,51(2):56-63. (in Chinese))

[15] 周兰庭,郭枫,王浩. 土石坝运行安全评价的改进组合赋权-云模型[J]. 水利水电科技进展,2024,44(6):86-92. (Zhou Lanting,Guo Feng,Wang Hao. Improved combination weighting-cloud model for operation safety evaluation of earth-rockfill dams[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(6):86-92. (in Chinese))

[16] 左锋琴,张达敏,邓佳欣,等. 全局搜索和云模型动态扰动的鱼鹰优化算法[J]. 计算机工程与设计,2025,46(4):966-973. (Zuo Fengqin,Zhang Damin,Deng Jiaxin,et al. Osprey optimization algorithm based on global search and dynamic disturbance of cloud model[J]. Computer Engineering and Design,2025,46(4):966-973. (in Chinese))

[17] 孙斌,李浩,毛占利,等. 基于序关系分析法的大型综合体火灾风险评估[J]. 中国安全科学学报,2025,35(2):81-88. (Sun Bin,Li Hao,Mao Zhanli,et al. Fire risk assessment of large complex based on order relation analysis method[J]. China Safety Science Journal,2025,35(2):81-88. (in Chinese))

[18] 黄莉,张祎喆,万旭哲,等. 多元型复合灾害系统适应性评估:以粤港澳大湾区为例[J/OL]. 河海大学学报(自然科学版). 2025-02-05. (Huang Li,Zhang Yizhe,Wan Xuzhe,et al. Adaptive evaluation of multivariate compound disaster systems;a case study of the Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay area[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences). 2025-02-05. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1117.TV.20250205.1544.032>. (in Chinese))

[19] 张晓峰,石永杰,刘俊,等. 基于 AHP-熵权法的望虞河西岸圩区活水调度方案多目标优选[J]. 水利水电科技进展,2024,44(3):80-87. (Zhang Xiaofeng,Shi Yongjie,Liu Jun,et al. Multi-objective optimization of flowing water dispatch schemes in western polder area of Wangyu River based on AHP-entropy weight method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(3):80-87. (in Chinese))

[20] 吴欢强,傅琼华,董建良. 我国溃坝生命损失估算方法探讨[J]. 中国水利,2010(8):24-26. (Wu Huanqiang,Fu Qionghua,Dong Jianliang. Discussion on the methods of estimating loss of life in dam failure in China[J]. China Water Resources,2010(8):24-26. (in Chinese))

[21] 张玉涛,白静,陈振宇,等. HEC-RAS 模型原理及应用研究进展[J]. 环境工程,2023,41(增刊 2):233-237. (Zhang Yutao,Bai Jing,Chen Zhenyu,et al. A review of the principle and application of HEC-RAS model[J]. Environmental Engineering,2023,41(S2):233-237. (in Chinese))

[22] 姬艳婷. 基于云物元法的溃坝后果综合评价[D]. 郑州:郑州大学,2020.

[23] 殷乔刚. 基于机器学习与灰色-可变模糊耦合方法的溃坝后果评价研究[D]. 西安:西安理工大学,2022.

[24] 魏博文,黄海鹏,徐镇凯. 基于云模型和组合赋权的岩体质量二维评价模型[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(增刊 1):3092-3099. (Wei Bowen,Huang Haipeng,Xu Zhenkai. Two-dimensional evaluation model of rock mass based on combination weighting and cloud model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2016,35(S1):3092-3099. (in Chinese))

[25] 焦余铁. 基于洪水演进和风险人口避难模拟的溃坝生命损失评估[D]. 郑州:郑州大学,2021.

[26] SL/T 829—2024 水库大坝风险等级划分与评估导则[S].

(收稿日期:2025-05-14 编辑:刘晓艳)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.03.011

输水工程实时水量调控的机理模型与数据模型对比研究

黄宇杰^{1,2}, 俞晓东^{1,2}, 汪怡然^{1,2}, 石林^{1,2}, 张健^{1,2}

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室; 2. 河海大学水利水电学院)

摘要: 结合某实际调水工程,建立了基于水力学原理的机理模型并率定了水力参数,根据系统布置参数、上游水库水位、沿线管道实测压力和流量、调流阀实测流量及开度等数据,建立了 BP 神经网络数据模型,并采用 GA 算法优化初始权值、偏置以提高数据模型精度;对比分析了两种模型计算得到的调流阀目标开度数据,并给出了两种模型的适用条件。结果表明:输入数据与训练数据的余弦相似度较高(0.95 以上)时,数据模型的平均误差为 0.58%,较机理模型降低了 0.11 个百分点,最大误差降低了 0.46 个百分点;然而余弦相似度小于 0.95 时,数据模型的最大误差可达 9.02%,机理模型平均误差不超过 1.13%,数据模型依赖于数据,在高余弦相似度条件下的计算速度和精度较高。

关键词: 长距离输水工程;实时水量调控;余弦相似度;GABP 神经网络

Comparative study on mechanistic model and data model for real-time water flow regulation of water diversion project

Huang Yujie^{1,2}, Yu Xiaodong^{1,2}, Wang Yiran^{1,2}, Shi Lin^{1,2}, Zhang Jian^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University;

2. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University)

Abstract: For an actual water diversion project, a mechanistic model based on hydraulic principles was established, and hydraulic parameters were calibrated. Based on data such as system layout parameters, upstream reservoir's water level, measured pressure and flow rate along the pipeline, and measured flow rate and opening of the regulating valve, a BP neural network data model was established, and GA was used to optimize the initial weights and biases to improve the accuracy of the data model. The target opening data of the regulating valve calculated by the two models were comparatively analyzed, and the applicable conditions of the two models were proposed. The results indicate that when the cosine similarity between the input data and the training data is high (≥ 0.95), the average error of the data model is 0.58%, representing a reduction of 0.11 percentage points compared with that of the mechanistic model, and the maximum error is reduced by 0.46 percentage points; however, when the cosine similarity is less than 0.95, the maximum error of the data model can reach 9.02%, while the average error of the mechanistic model does not exceed 1.13%. The data model depends on data and has high calculation speed and accuracy under conditions of high cosine similarity.

Key words: long-distance water diversion project; real-time water flow regulation; cosine similarity; GABP neural network

长距离输水工程是实现水资源合理配置、解决其时空分配不均问题的重要措施。当前,随着输水支线增多和用水需求变化,运行工况愈加复杂,长距离输水工程急需智能化提高调控水平^[1-2],而智慧输水调度是其智慧化的核心业务^[3],调控目标是水量,操作对象是调流阀。目前大型长距离调水工程部分实现了全线监控、远程操作,能够使用人工经验调节和基于流量的 PID 自动调节实现流量控制^[4]。但由于长距离输水工程的多支线特点,支线流量变化互相影响,在出现大流量变动时,这种调控方法在实时性、精准度、智能化方面仍有不足。为实现精准调控,需要建立输水管网仿真计算模型^[5],目前的建模类型主要有机理模型和数据模型两类。机理模型方面:Zhang 等^[6]通过供水管网实测压力监测点信息,简化管道结构并率定水力参数后建立了较为准确的水力模型;Lu 等^[7]通过混沌优化算法、遗传算法等校正节点流量和管道摩擦系数,建立

基金项目: 国家自然科学基金项目(52179062);水灾害防御全国重点实验室开放基金项目(2024490811)

作者简介: 黄宇杰(2001—),男,硕士研究生,主要从事输水系统过渡过程研究。E-mail:hyj1554776417@126.com

通信作者: 俞晓东(1985—),男,教授,博士,主要从事输水系统过渡过程研究。E-mail:yuxiaodong_851@hhu.edu.cn

了安徽省马鞍山市供水管网动态模型;信昆仑等^[8]通过全局灵敏度分析法选取供水管网中管道摩阻灵敏度较大的管道进行参数校核,并采用精英型非支配排序的多目标优化算法求解,在满足精度需求的前提下提高了校核效率。也有学者采用商业软件建立机理模型:Abdelbaki 等^[9]通过地理信息软件 Mapinfo GIS 8.0 与 EPANET2.0 水力建模耦合的方式改善供水管网管理,并在阿尔及利亚取得了良好的应用效果;付强等^[10]采用 Flowmaster 软件,给出了管道、闸阀等元件的建模过程并探究了不同阀开度对供水管网优化性能的影响。随着大数据挖掘与机器学习算法的发展,目前也有许多学者利用新算法解决水力仿真建模问题:俞亭超等^[11]使用支持向量机建立管网状态估计和测压点压力模型;刘宪亮等^[12]提出了一种基于 WOA-LSTM 模型的智慧水力学建模方法,并利用该方法建模预测了南水北调中线工程的节制闸参数。由此可见,目前国内外在长距离调水工程运行仿真领域已取得诸多研究成果,但大多面向具体工程开发专用仿真算法与系统,通用性不足。实际工程应用中,基于机理模型的仿真需完成输水系统管网拓扑结构化、水力参数率定等关键步骤,普遍存在工程基础数据难以精准获取、水力参数难以有效率定等共性难题。尤其当系统内压力监测设备存在安装高程偏差或缺失时^[13],无法准确计算监测点总水头,导致基于水头差与流量关系率定管道糙率的传统方法不再适用。而基于神经网络算法的数据模型能够有效解决机理模型建模难度大的问题^[14],但该类模型仅能拟合训练样本区间内的参数特征,难以全面反映输水系统整体运行状态,且对训练集以外的工况模拟精度不稳定、泛化能力有限。

针对机理模型参数率定困难、数据模型泛化性能不足的双重问题,本文结合实际工程案例,对基于水力学原理的机理模型与基于遗传算法(genetic algorithm,GA)优化的 BP 神经网络(GABP 神经网络)数据模型开展对比计算,分析两种模型在不同输入条件下的误差演变规律,旨在为长距离调水系统实现更高效、精准的水量调度与运行控制提供理论依据与方法支撑。

1 研究流程和方法

1.1 研究流程

基于已建长距离输水工程实际运行监测数据,通过数据清洗与稳态数据识别完成数据预处理;在此基础上分别构建机理模型与数据模型,采用未参与建模的实测数据作为预测样本,利用所建两种模型对调度关键参数进行模拟预测,对比分析模型的预测精度与可靠性。研究流程如图 1 所示。

1.2 工程数据采集

1.2.1 工程地理信息

某长距离输水工程输水线路总长 154.6 km,运行期间采用重力流方式供水。该段全部为管道,其中主干线长 74.5 km,支线长 80.1 km。主干线为双管供水,管径范围为 2DN2200~2DN1400,沿线向 A、B、C、D、E 这 5 条支线分水,各支线分别为对应同编号水厂前的输水线路(图 2)。鉴于研究时段 F 支线监测数据不完整,因此只研究 A~E 支线。支线也基本采用双管供水,管径范围为 2DN1400~2DN600。各支线供水管末端水厂前均设置 2 个调流阀,工程输水系统结构如图 2 所示(圆圈数字代表管段号),管网分段信息见表 1。

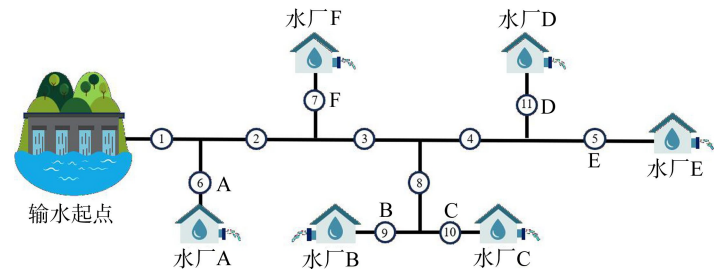


图 2 某工程输水系统结构

Fig.2 Structure of water diversion system for a certain project

1.2.2 运行监测数据处理

计算数据取自工程运行实测的上边界水位、总流入流量、支线分水流量、支线调流阀前后水头、支线调流

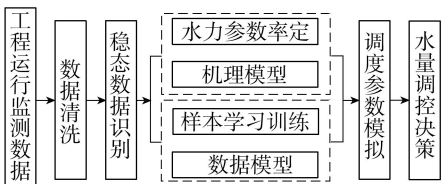


图 1 研究流程

Fig.1 Research process

表 1 工程管段信息

Table 1 Pipeline section information of project

管段号	D/m	L/m	管段号	D/m	L/m
①	2.2	15403	⑦	0.6	1004
②	2.2	4508	⑧	1.2	6744
③	2.0	18848	⑨	0.8	1849
④	1.8	19385	⑩	0.9	14002
⑤	1.4	17370	⑪	1.4	3833
⑥	1.0	15449			

注:D 为管径,L 为管段长。

阀开度。根据各数据当前时刻数值与前一时刻数值相差不超过 1% 为原则筛选稳态数据;删除重复和缺漏数据后,采取拉依达准则剔除异常值,共获得数据样本 1 768 组。

1.3 机理模型构建

1.3.1 水力学原理

本文水量调控机理模型主要涉及恒定流计算,圆管水头损失 h 为^[15]:

$$h = h_f + h_j = \frac{v^2}{C^2 R} L + \sum \zeta \frac{v^2}{2g}$$
 (1)

式中: h_f 为沿程水头损失; h_j 为过阀局部水头损失; v 为平均水流速度; R 为水力半径; C 为谢才系数,采用曼宁公式 $C=R^{1/6}/n$ 计算; ζ 为局部水头损失系数; g 为重力加速度,取 9.81 m/s^2 ; n 为管道糙率,从水力计算手册^[16] 查得或率定修正获得。

调流阀开度计算需先经全线水力模拟得到阀门前后压差,由此确定过阀局部水头损失;再基于阀门开度与损失系数的特性曲线进行插值计算,获取相应损失系数 ζ ^[17]:

$$\zeta = 2g\Delta h A^2 / Q^2$$
 (2)

式中: Δh 为调流阀前后水头差; Q 为调流阀过流量; A 为调流阀过流面积。

1.3.2 模型建立

依据管道拓扑关系,建立包含水源、节点、管道、水厂的关系模型,通过水力学原理计算沿线水头损失,得到系统每一处的水头值。输入的边界条件为水源地水位、出水口(水厂)水头以及调流阀启用状态,输入的需求目标为各水厂流量需求,模型输出为调流阀开度。机理模型的程序计算采用 Python 编程实现。

1.3.3 模型校正

模型校正包括管道糙率率定以及调流阀开度-流阻系数关系曲线率定。管道糙率对机理模型精度有较大影响,而其实测值通常与经验值有一定误差^[18],因此需要对管道糙率进行率定^[19]。本文采用最小二乘法拟合压力计表压差与流量关系,以此计算管段水头损失系数,由式(1)(2)计算管道糙率。根据率定后管道糙率计算的干线总水头与实测值对比如图 3 所示,计算值与实测值较为吻合,率定结果较好。根据工程运行实测数据,调流阀开度-流阻系数曲线率定的结果如图 4 所示(阀门编号按水厂编号-管编号形式,顺水流方向左侧管道编号为 1,右侧为 2),流阻系数采用对数坐标,率定后的曲线符合实际工程中小开度调节能力强,大开度调节能力弱的特性。

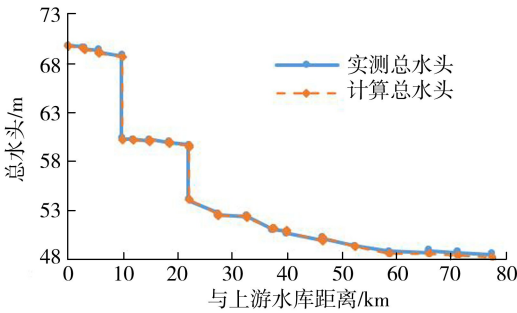


图 3 率定后干线总水头与实测值对比

Fig. 3 Comparison between total head of main line after calibration and measured values

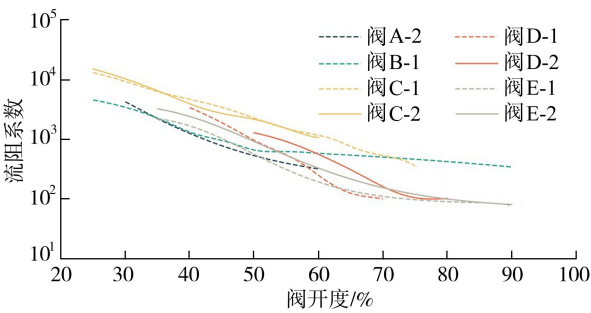


图 4 调流阀开度-流阻系数曲线率定结果

Fig. 4 Calibration results of opening and flow resistance curves for regulating valve

1.4 数据模型构建

1.4.1 GABP 神经网络原理

BP 神经网络的网络初始权值、偏置对结果具有较大影响,因此有一定的优化空间。GA 具有很好的全局搜索能力,不易于陷入局部最优解,因此采用 GA^[20-21] 对 BP 神经网络初始参数进行优化。GA 优化的 BP 神经网络(GABP 神经网络)的计算流程如图 5 所示。

1.4.2 神经网络建立

为避免不同数据大小对训练结果产生影响,先对数据进行归一化处理,然后以图 2 所示工程中 A、B、C、D、E 5 条支线的调流阀开度为输出目标,分别为各调流阀构建 BP 神经网络模型^[22]。输水系统稳态下,调流

阀开度与系统边界条件、支线目标流量等关键因素密切相关。对于 BP 神经网络,隐含层节点数量直接影响模型整体性能:节点数过少时,网络难以充分拟合复杂非线性关系;节点数过多则易增大模型不稳定性,引发过拟合问题,进而降低模型泛化能力。实际应用中,通常可采用经验公式初步确定隐含层节点数量:

$$n_1 = \sqrt{n_2 + m} + a \tag{3}$$

式中: n_1 为隐含层节点数量; n_2 为输入层节点数量; m 为输出层节点数量; a 为 1~10 的整数。

因此构建的神经网络输入层为 32 个节点,分别为上游水位(1 个节点)、总输入流量(1 个节点)、调流阀后控制水头(10 个节点)、支线目标流量(10 个节点)、调流阀启用状态(0/1 表示,10 个节点)。输出层为 1 个节点,即调流阀开度。根据式(3)确定的隐含层节点数量为 15 个。通过模型训练模拟计算不同边界条件与目标流量下所需的阀开度。最终构建的神经网络表达式为:

$$y = \sum_{j=1}^{15} w_j \varphi \left(\sum_{i=1}^{32} w_{ij} x_i + \theta_j \right) + b \tag{4}$$

其中

$$\varphi(x) = \frac{2}{1 + e^{-2x}} - 1$$

式中: w_j 为隐含层节点 j 到输出层的权重; φ 为输入层到隐含层的激活函数; x_i 为输入层节点 i 输入; w_{ij} 为输入层节点 i 到隐含层节点 j 的权重; θ_j 为隐含层节点 j 偏置; b 为隐含层到输出层偏置。遗传算法参数设置如下:种群大小为 50,迭代次数为 10,适应度函数为 BP 神经网络测试集 MSE,选择方式为轮盘赌,变异概率为 0.05,染色体长度为 $(32+1) \times 15 + (15+1) \times 1 = 511$ 。

1.4.3 神经网络训练

构建的模型训练目标函数为均方误差(MSE)。训练的神经网络模型可能会产生过拟合现象,具体表现为对输入数据内的噪声进行拟合而导致模型复杂程度高、稳定性差。为防止这一现象采用 L2 正则化并结合 L1 正则化提高模型精度。

2 模型对比分析

采用工程 313 条运行数据作为测试集,将输入值归一化后,计算每条数据的输入向量(32 个分量)与训练集内输入数据的余弦相似度,并取其最大值作为指标绘图,结果如图 6 所示。在样本序号 275 之前,测试集与训练集的余弦相似度较高,均保持在 0.95 以上;而样本序号 275 之后,余弦相似度显著下降至 0.74 左右。主要原因:样本序号 275 后受需水量变化影响,水厂 E 运行流量增大至原流量的 1.3 倍。在测试集上对比两种模型预测结果的准确性,计算结果如图 7 所示。

由图 7 可知,数据模型和机理模型样本序号 275 之前与实测数据在数据值和趋势上较为吻合,样本序号 275 之后,机理模型的结果准确性比数据模型更好。样本序号 275 前,数据模型平均误差为 0.58%,比机理模型低 0.11 个百分点,最大误差为 2.53%,比机理模型低 0.46 个百分点,误差小于 1% 的数据占比为 73.3%,比机理模型高 6.38 个百分点。样本序号 275 之后,机理模型与数据模型的预测准确性均出现下降。数据模型平均误差增大了 1.85 个百分点,达到 2.43%,最大误差增大了 6.49 个百分点,达到 9.02%;机理模型平均误差增大 0.44 个百分点,达到 1.13%,最大误差增大 1.25 个百分点。

结合测试集与训练集输入相似度分析可知:当测试数据与训练数据相似度较高时,数据模型与机理模型

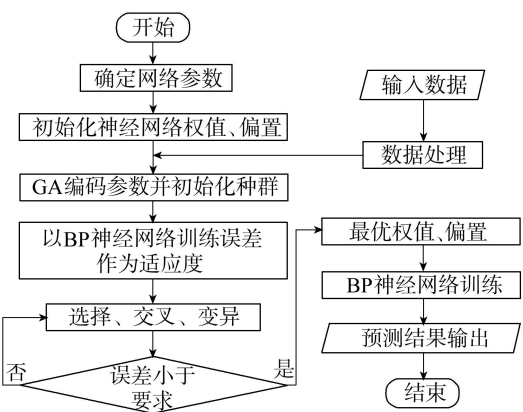


图 5 GABP 神经网络计算流程
Fig.5 Calculation process of GABP neural network

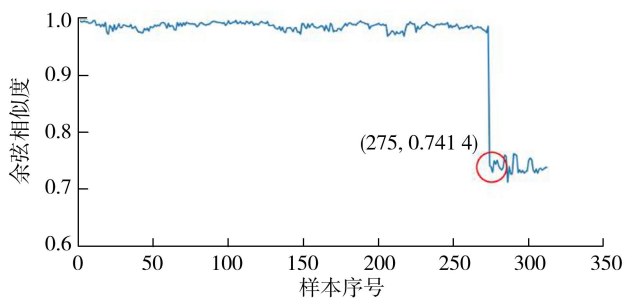


图 6 测试集与训练集余弦相似度
Fig.6 Cosine similarity between test set and training set

均能较为准确地得到目标流量下的需求开度,且数据模型误差更小、预测精度更高;而当测试数据超出原有样本工况范围时,两种模型精度均有所下降,但机理模型仍具备较高的参考价值,数据模型则基本失去参考意义。因此,可将输入数据与训练(率定)数据的余弦相似度作为判别依据:当余弦相似度较高(0.95 以上)时,优先采用数据模型,可实现更精准的水量调控;当相似度较低时,采用机理模型可直接给出决策参考,无需逐步试算调节阀开度,有利于实现工况的快速切换。

3 结 语

在建模的难易度方面:数据模型仅需对实测数据进行训练即可得出参考开度,其时间和建模成本较低;机理模型需要经历工程数据整理、节点关系分析、水力参数率定等步骤,实际工程中存在工程数据缺失或错误、水力参数难以率定等问题,对专业知识要求较高。在模型参考性方面:在测试数据与训练数据相似度较高的情况下,两种模型模拟预测精度较高,平均误差接近,且数据模型的精度略高(平均误差为 0.58%,最大误差为 2.53%),这是由于机理模型的率定存在一些不确定因素。而在测试数据与训练数据相似度较低的情况下,机理模型误差虽然增大,但仍然具有较高的精度,而数据模型误差较大。采用输入数据与训练(率定)数据的余弦相似度作为模型切换指标。当相似度较高,采用数据模型可以提高计算速度以及精度;当前期缺少数据或者数据相似度较低,采用机理模型也可以得到系统调节目标的参考值。

参考文献:

[1] 蒋云钟,冶运涛,赵红莉,等. 智慧水利解析[J]. 水利学报,2021,52(11):1355-1368. (Jiang Yunzhong, Ye Yuntao, Zhao Hongli, et al. Analysis of smart water conservancy [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52 (11): 1355-1368. (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] 王济干,和梦思. 基于共识模型和前景理论的输水工程运行安全风险评价[J]. 水利经济,2022,40(1):71-78. (Wang Jigan, He Mengsi. Risk assessment of operation safety of water conveyance projects based on consensus model and prospect theory [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2022, 40 (1): 71-78. (in Chinese))

[4] 邵奇,梁永图,田中山. 基于模糊 PID 的长输管道调节阀压力控制系统研究与仿真[J]. 油气田地面工程,2023,42(12):1-7. (Shao Qi, Liang Yongtu, Tian Zhongshan. Research and simulation of pressure control system for regulating valves in long-distance pipelines based on fuzzy PID [J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2023, 42 (12): 1-7. (in Chinese))

[5] 赵勇,解建仓,马斌. 基于系统仿真实理论的南水北调东线水量调度[J]. 水利学报,2002,33(11):38-43. (Zhao Yong, Xie Jiancang, Ma Bin. Water dispatch of east-route of South-to-North Water Transfer Project based on system simulation method [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33 (11): 38-43. (in Chinese))

[6] Zhang Xin, Zhang Kun, Wu Ruiying. Research on hydraulic model establishment of water supply network [J]. Advanced Materials Research, 2015, 1073-1076; 1027-1030.

[7] Lu Hai, Wang Jianhui, Lin Yingzi. Dynamic modeling of water supply network based on hybrid optimization algorithm [J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2015, 24 (3): 712-722.

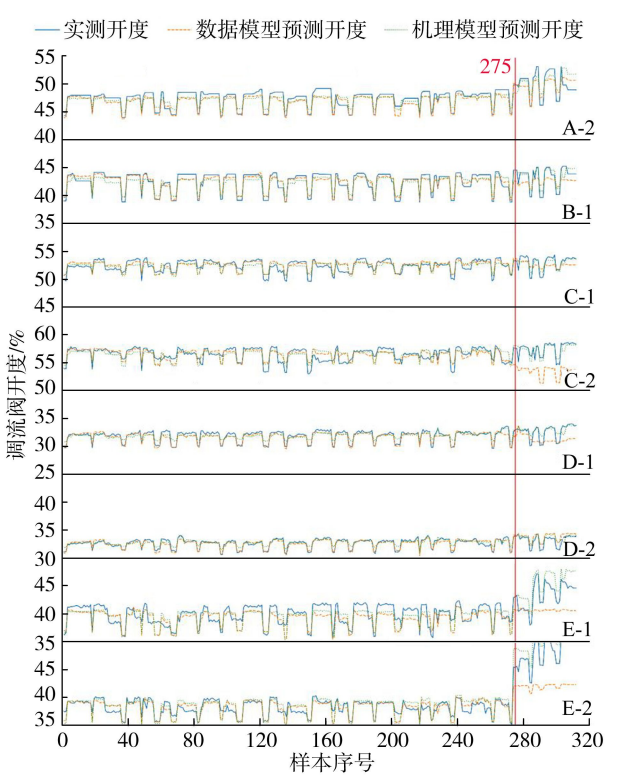


图 7 数据、机理模型预测开度结果对比
Fig. 7 Comparison of predicted opening results between data model and mechanistic model

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.03.012

渗流-盐侵耦合作用下水泥砂浆力学性能 酸蚀劣化规律

张延贺¹, 徐力群^{1,2}, 赵邵峰¹, 陆誉婷³, 李 凌^{1,4}, 栗宏飞⁵, 倪 勇¹

(1. 河海大学水利水电学院; 2. 南京现代综合交通实验室; 3. 中交水运规划设计院有限公司;
4. 宁波市水利水电规划设计研究院有限公司; 5. 西安市市政建设(集团)有限公司)

摘要: 为探究渗流-盐侵耦合作用下水泥砂浆力学性能酸蚀劣化规律,开展了不同酸性环境(pH=7、3、1)Na₂SO₄ 溶液及渗流作用下水泥砂浆侵蚀试验、单轴压缩试验和劈裂抗拉试验,揭示了渗流-盐侵耦合作用下水泥砂浆在不同酸度条件中的力学性能劣化机理,建立了水泥砂浆力学性能劣化分析模型。结果表明:pH 为 7 和 3 时水泥砂浆试样抗压强度和抗拉强度随侵蚀历时先增大后减小,侵蚀历时为 60、45 d 时,达到最大值,分别为 39.33、3.12 MPa 和 36.71、2.86 MPa;pH 为 1 时,水泥砂浆试样抗压强度和抗拉强度减小,其最大值分别为 31.00 和 2.30 MPa;侵蚀溶液酸度越大,水泥砂浆抗压强度与抗拉强度最大值越小,力学性能劣化效应越显著;渗流-盐侵耦合作用下,随酸度增大,水泥砂浆由主要发生溶出性侵蚀和硫酸盐侵蚀耦合作用转为酸性侵蚀为主导;渗流-盐侵耦合作用下水泥砂浆强度损伤系数与侵蚀历时呈现良好的二次函数关系,且抗拉强度与抗压强度之间具有线性相关性。

关键词: 水泥砂浆;渗流-盐侵;酸度;复合侵蚀;微观结构;强度损伤

Acid corrosion-induced deterioration law of mechanical properties of cement mortar under coupled seepage and salt attack

Zhang Yanhe¹, Xu Liqun^{1,2}, Zhao Shaofeng¹, Lu Yuting³, Li Ling^{1,4}, Li Hongfei⁵, Ni Yong¹

(1. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University;
2. Nanjing Modern Multimodal Transportation Laboratory; 3. Water Transportation Consultants Co., Ltd.;
4. Ningbo Water Conservancy & Hydropower Planning and Design Institute Co., Ltd.;
5. Xi'an Municipal Construction (Group) Co., Ltd.)

Abstract: To investigate the acid corrosion-induced deterioration law of mechanical properties of cement mortar under coupled seepage and salt attack, cement mortar erosion tests, uniaxial compression tests, and splitting tensile tests were carried out under different acidic conditions (pH=7, 3, and 1) in Na₂SO₄ solution with seepage. The deterioration mechanism of the mechanical properties of cement mortar under the coupled seepage and salt attack under different acidity conditions was revealed, and a deterioration analysis model for the mechanical properties of cement mortar was established. The results show that at pH of 7 and 3, the compressive strength and tensile strength of cement mortar specimens initially increase and then decrease with increasing erosion duration, reaching their peak values at 60 d and 45 d, respectively. Specifically, the peak compressive strength and tensile strengths are 39.33 MPa and 3.12 MPa at pH of 7, as well as 36.71 MPa and 2.86 MPa at pH of 3. In contrast, at a pH of 1, the compressive strength and tensile strength of the cement mortar specimens decrease, with their maximum values being 31.00 MPa and 2.30 MPa, respectively. A higher acidity of the erosion solution indicates a lower peak compressive strength and tensile strength of cement mortar and a more pronounced deterioration effect of mechanical properties. Under coupled seepage and salt attack, as acidity increases, the deterioration of cement mortar shifts from being dominated by the coupled action of leaching erosion and sulfate attack to being dominated by acid erosion. Under the coupled seepage and salt attack, the strength damage coefficient of cement mortar exhibits a good quadratic function relationship with erosion duration, and there is a linear correlation between tensile strength and compressive strength.

Key words: cement mortar; seepage and salt attack; acidity; compound erosion; microstructure; intensity damage

水泥砂浆作为常用工程材料,广泛应用于压力隧洞、防渗帷幕及固结灌浆等工程结构中。我国南方及西南地区部分地下水泥砂浆构筑物与水电工程场地,受环境有机质降解影响,存在厌氧菌分解腐殖质的现象,该过程会释放大量二氧化碳。当水体中二氧化碳质量浓度超过 60 mg/L 时,地下水将呈现酸性特征,进而对水泥砂浆结构产生侵蚀劣化与损伤破坏^[1]。长期服役于水环境中的水泥砂浆易发生溶蚀现象,水泥水化产物氢氧化钙(CH)与水化硅酸钙(C-S-H)发生分解,导致材料力学性能劣化^[2-4],而渗流作用会进一步加剧溶蚀进程。同时,水环境中的硫酸根离子侵入水泥砂浆内部,引发材料内部微裂缝萌生与扩展^[5-7]。在不同酸度条件下,渗流与硫酸盐侵蚀的耦合作用^[8]将显著改变水泥砂浆力学特性,进而影响水泥砂浆结构的长期稳定性与运行安全性。

在酸性硫酸钠溶液侵蚀下,水泥砂浆主要发生溶出性侵蚀与硫酸盐膨胀侵蚀^[9],且不同酸度环境对硫酸盐侵蚀进程及水泥砂浆力学性能演化具有显著影响,侵蚀后期力学性能劣化程度随酸度升高而加剧。此外,水泥砂浆长期与水体接触,除发生表面溶蚀外,还会在渗流场作用下产生显著的渗透溶蚀。因此,渗流作用对水泥砂浆劣化的影响不可忽视,部分重力坝^[10-12]、地下压力隧洞^[13-15]及排水廊道^[16]等工程结构均因渗透溶蚀效应出现严重损伤破坏。在渗流作用下,水泥砂浆中 CH 与 C-S-H 分解产生的钙离子会随水流不断迁移析出^[17];而在硫酸盐侵蚀作用下,硫酸根离子与钙离子反应生成膨胀性侵蚀产物^[18-19]。在渗流-盐侵耦合环境中,渗流一方面加速钙离子运移,另一方面会降低孔隙溶液中可参与硫酸盐反应的钙离子含量。目前,渗流作用对硫酸盐侵蚀进程是否存在抑制效应仍有待进一步明确,不同酸度条件下渗流与硫酸盐耦合侵蚀机理亟须深入研究。

针对渗流-盐侵耦合作用下水泥砂浆力学性能的酸蚀劣化问题,本文采用室内试验与机理分析相结合的方法,研究不同酸度环境中水泥砂浆在耦合作用下的表观形貌、抗压强度及抗拉强度劣化规律,探讨其力学性能劣化机理,建立不同酸度条件下水泥砂浆强度损伤系数随侵蚀时间的演化模型,并分析抗压与抗拉强度间的相关关系,以期复杂水环境下水泥砂浆构筑物的长期服役性能评估提供理论依据。

1 试验概况

1.1 水泥砂浆试样制备

水泥砂浆试样为 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 立方体,其水泥、砂子、水的质量比为 1 : 3 : 0.5。水泥选用南京龙潭镇 P · O 42.5 普通硅酸盐水泥,其 CaO、SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、MgO、其他组分的质量分数分别为 65.5%、21.1%、5.2%、4.1%、1.1%、3.0%,砂子选用平均细度模数为 2.75 的天然河砂,试验用水选用蒸馏水。按照 SL/T 352—2020《水工混凝土试验规程》搅拌水泥砂浆,倒入试样模具内并置于振动机上振捣抹平,静置 24 h 后脱模,按照标准养护条件养护 28 d,水泥砂浆试样制备过程如图 1 所示。

1.2 试验设备

水泥砂浆试样所受的渗流-盐侵耦合作用,通过专用渗流装置实现,该装置可使试样一侧维持稳定水压,驱动侵蚀溶液持续渗透并作用于水泥砂浆试样,从而模拟实际工程中的渗流-盐侵耦合作用环境。渗流装置主要包括水压控制系统、连接系统和渗透系统三部分(图 1),可通过调节水压控制系统与渗透系统之间的高差改变水泥砂浆试样一侧的水头值。水压控制系统用于存储侵蚀溶液,底部有阀门开关可以控制侵蚀溶液流出,连接系统通过软管连接水压控制系统与多个渗透系统,以便多个试样同时开展试验。渗透系统中放入试样,试样四周使用土工乳胶膜和环氧密封胶进行防渗密封处理,限定渗流通道由试样顶部流向底部,减少侵蚀溶液从四周流失,维持高水力梯度。试验过程中定期监测渗出液 pH、电导率及钙离子含量变化,结果显示渗出液 pH 随侵蚀进行逐步上升并趋于稳定,钙离子含量显著提高,表明水泥砂浆内部 CH 与 C-S-H 凝胶持续溶出。

1.3 试验方案

试验方案见表 1,侵蚀溶液的 pH 通过添加浓 H₂SO₄ 调节,共设计 4 种侵蚀溶液,分别是 pH 为 7 的蒸馏水与 pH 为 7、3、1 的 1 mol/L Na₂SO₄ 溶液。将养护好的水泥砂浆试样放入渗透系统中,水压控制系统与渗透系统保持高差 4.0 m^[20],在高水力梯度下对试样开展不同酸度的侵蚀试验。侵蚀 0、5、15、30、45、60、90、120、150 d 后分别取出试样进行单轴压缩试验和劈裂抗拉试验,并取每组 3 个试样的试验数据平均值进行分析。

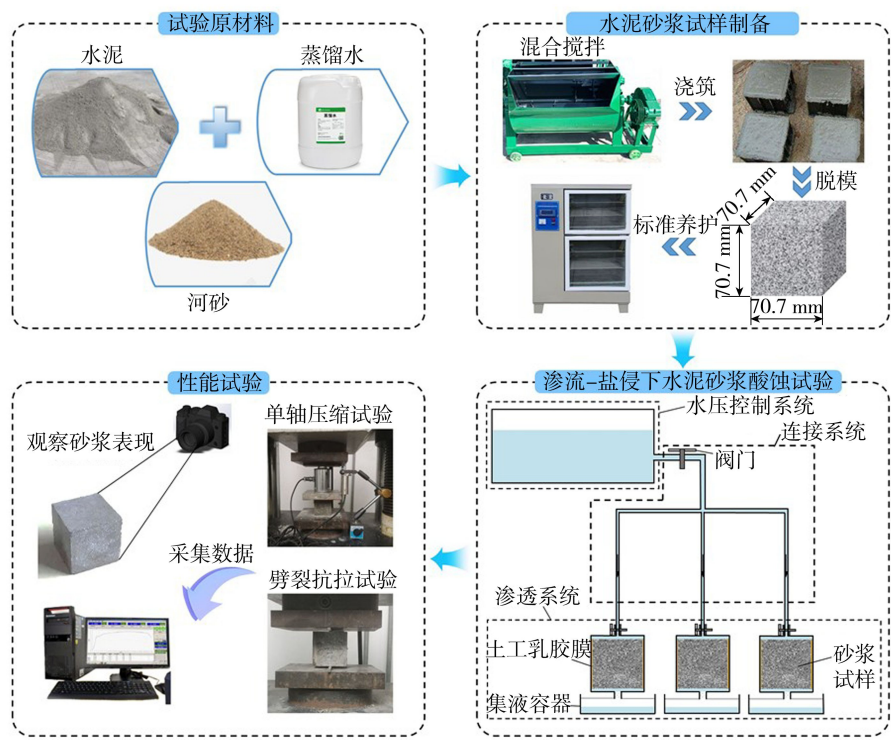


图 1 试验流程及渗流装置

Fig.1 Test flow and seepage device

表 1 试验方案

Table 1 Experimental programs

方案编号	水头/m	pH	侵蚀溶液	侵蚀历时/d	试样分组
1	4	7	蒸馏水	0、5、15、30、45、 60、90、120、150	单轴压缩试样和劈裂抗拉试样均分为 9 组,每组各 3 个
2	4	7	1 mol/L Na ₂ SO ₄ 溶液		
3	4	3			
4	4	1			
5	0	7	蒸馏水		
6	0	7	1 mol/L Na ₂ SO ₄ 溶液		
7	0	3			
8	0	1			

为对比有无渗流作用对不同酸度下硫酸盐侵蚀的水泥砂浆性能劣化的影响,对水泥砂浆开展无渗流作用侵蚀试验,侵蚀溶液与检测内容同渗流作用下的试验方案一致。将养护好的水泥砂浆试样浸入侵蚀溶液中,每 30 d 更换一次溶液,保证 pH 与硫酸盐浓度稳定,水泥砂浆试样与侵蚀溶液的体积比约为 1 : 50,任意两个试样之间的距离均大于 10.0 cm。在侵蚀过程中,试样所有表面均能接触到侵蚀溶液。

2 试验结果与分析

2.1 表观形态

侵蚀历时 30、60、120 d 的水泥砂浆试样表观形态如图 2 所示,蒸馏水工况下有无渗流作用对试样表观形态影响区别不大,仅在渗流作用下侵蚀历时为 120 d 的试样表面出现砂化,主要是水泥反应生成的胶凝材料 CH 和 C-S-H 溶解,水泥生成物有一定程度的脱落,出现砂化现象。

当侵蚀历时为 120 d,渗流作用下 pH 分别为 7、3、1 的 Na₂SO₄ 溶液侵蚀的试样表面分别出现砂化、棱角脱落和大孔洞现象,表明在硫酸盐侵蚀下,随着酸度增大,表观形态劣化愈加严重。其中 pH 为 1 的强酸环境下,渗流与无渗流工况试样表面均出现明显的褐色析出物,该沉淀物为水泥中铁相组分溶出后,在试样局部微环境 pH 回升条件下生成的 Fe(OH)₃ 沉淀物。相同侵蚀龄期下,渗流-盐侵耦合作用工况试样表面剥落面积较无渗流工况提高约 20%~40%,pH 为 1 时两者差异最为显著。在强酸条件下,水泥砂浆主要发生酸

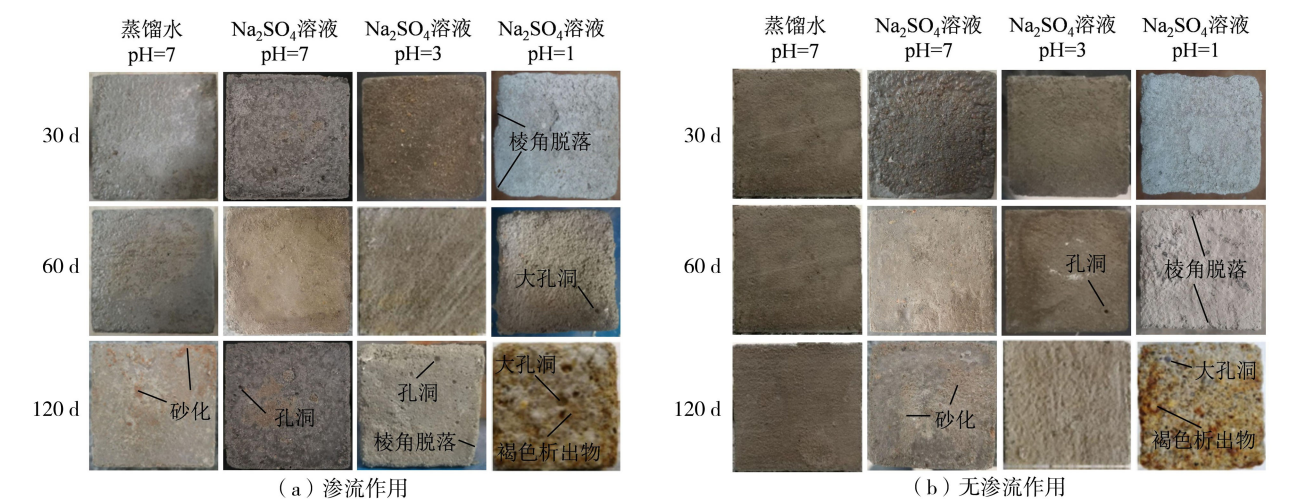


图 2 不同侵蚀条件下水泥砂浆试样不同历时性表现形态图

Fig. 2 Time-dependent apparent morphology of cement mortar specimens under different erosion conditions
性侵蚀,且渗流作用加速了CH和C-S-H分解速率,因此,渗流-盐侵耦合作用下的水泥砂浆表面形态劣化效应相比无渗流的硫酸盐作用下更加严重。

2.2 抗压强度

不同工况下水泥砂浆抗压强度历时变化如图 3 所示,试样初始抗压强度为 31.00 MPa。蒸馏水侵蚀下,试样抗压强度均随侵蚀历时增加先增大后趋于稳定,渗流作用的试样抗压强度增长主要发生在前 60 d,无渗流作用的试样抗压强度增长主要发生在前 90 d,渗流作用下水泥砂浆试样水化速率更快,从而提高了试样抗压强度。

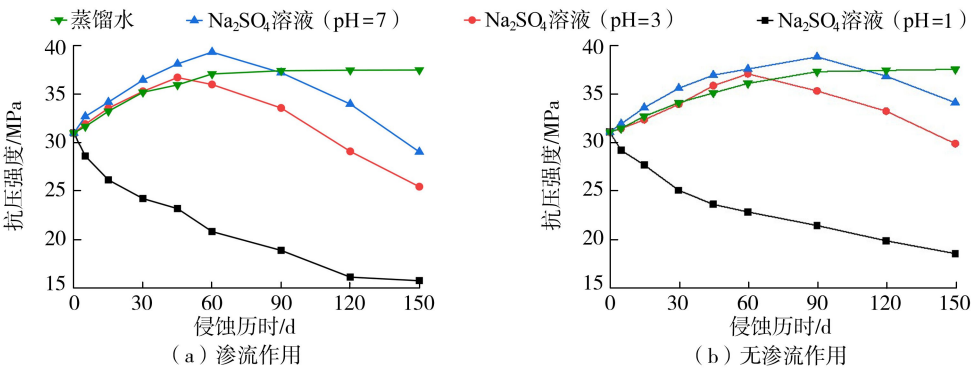


图 3 不同侵蚀条件下试样抗压强度历时变化

Fig. 3 Time-dependent variation of compressive strength of specimens under different erosion conditions
在 pH 为 7 和 3 的 Na₂SO₄ 溶液侵蚀下,随着侵蚀历时增加,试样的抗压强度先增大后减小,渗流作用的试样分别在 60、45 d 抗压强度达到最大值 39.33、36.71 MPa,无渗流作用的试样分别在 90、60 d 抗压强度达到最大值 38.68、36.97 MPa。在侵蚀前期硫酸盐侵蚀占主导地位,硫酸根离子与水泥水化产物生成的石膏晶体使试样密实度增大,试样的抗压强度整体呈上升状态,渗流作用下试样相比无渗流作用下试样的抗压强度最大值提前约 15~30 d,渗流作用加速了硫酸盐侵蚀速率。随着侵蚀历时增加,硫酸盐侵蚀产物堆积膨胀至裂缝发育扩张,溶出性侵蚀与硫酸盐膨胀侵蚀损伤效果叠加使抗压强度急剧减小。

在 pH 为 1 的 Na₂SO₄ 溶液侵蚀下,试样的抗压强度随侵蚀历时增加而减小,渗流作用和无渗流作用的试样抗压强度分别在 150 d 降低至 15.79 MPa 和 18.55 MPa,分别为初始抗压强度的 51%和 60%。试样主要受到酸性侵蚀,抗压强度持续减小,且未出现增长阶段。渗流作用下 pH 分别为 7、3、1 的 Na₂SO₄ 溶液侵蚀的试样抗压强度最大值分别为 39.33、36.71、31.00 MPa,随着酸度的增大,抗压强度最大值逐渐降低,单轴抗压性能劣化现象逐渐严重。

2.3 抗拉强度

不同工况下试样抗拉强度历时变化如图 4 所示,试样初始抗拉强度为 2.30 MPa,各工况下试样抗拉强

度随侵蚀历时的劣化规律基本和抗压强度一致。蒸馏水工况下,试样抗拉强度均随侵蚀历时增加先增大后趋于稳定,且渗流作用的试样抗拉强度增长主要发生时间比无渗流作用的提前约 30 d。

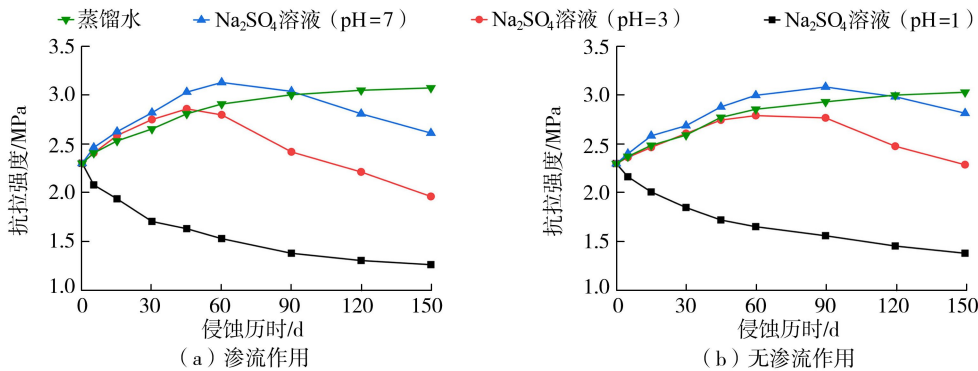


图 4 不同侵蚀条件下试样抗拉强度历时变化

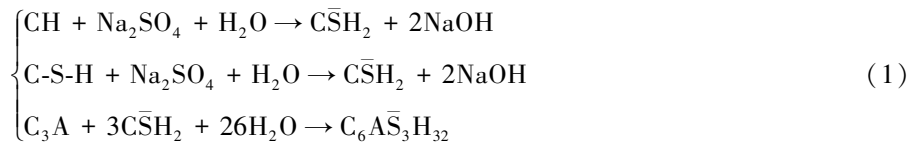
Fig. 4 Time-dependent variation of tensile strength of specimens under different erosion conditions

pH 为 7、3 的 Na_2SO_4 溶液侵蚀条件下,抗拉强度随侵蚀历时增加先增大后减小,渗流作用的试样分别在 60 d 和 45 d 抗拉强度达到最大值 3.12 MPa 和 2.86 MPa,无渗流作用的试样分别在 90 d 和 60 d 抗拉强度达到最大值 3.08 MPa 和 2.79 MPa,渗流作用的试样相比无渗流作用的试样抗拉强度最大值提前约 15~30 d。pH 为 1 的 Na_2SO_4 溶液侵蚀条件下,抗拉强度随侵蚀历时增加而减小,渗流作用和无渗流作用的试样抗拉强度分别在 150 d 降低至 1.26 MPa 和 1.38 MPa,分别为初始抗拉强度的 55% 和 60%,渗流作用的试样相比无渗流作用的试样抗拉强度衰减速度更快。渗流作用下 pH 分别为 7、3、1 的 Na_2SO_4 溶液侵蚀的试样抗拉强度最大值分别为 3.12、2.86、2.30 MPa,渗流-盐侵耦合作用下随着酸度的增大,抗拉强度最大值逐渐降低,劈裂抗拉性能劣化现象逐渐严重。

3 水泥砂浆力学性能劣化机理

渗流-盐侵耦合作用下水泥砂浆在不同酸度条件下的力学性能呈现出不同的变化趋势,结合试验强度变化规律,从化学反应与微观层面对试样的劣化机理进行分析。水灰比为 0.5 的水泥砂浆材料经过 28 d 养护后水化程度范围为 70%~75%,养护 180 d 后水化程度范围为 75%~80%^[21]。水泥在水化过程中,生成胶凝材料 CH 与 C-S-H,将会提升水泥砂浆材料的力学性能,且渗流作用会加速水化过程,这与蒸馏水工况下有无渗流作用的水泥砂浆试样的抗压强度与抗拉强度均随侵蚀历时增加先增大后趋于稳定、渗流作用的试样抗压强度与抗拉强度增长速率比无渗流作用的试样抗压强度与抗拉强度增长速率更快的趋势一致。

渗流-盐侵耦合作用下水泥砂浆侵蚀示意图如图 5 所示,当试样处于 pH 为 7 的 Na_2SO_4 溶液环境时,水泥砂浆以溶出性侵蚀和硫酸盐侵蚀为主。试验结果表明,该工况下试样抗压、抗拉强度均呈现先增大后减小的规律,并在 60 d 达到峰值,这与微观机理相吻合。侵蚀前期,渗流作用加速水分渗透并与水泥生成水化产物 C-S-H 凝胶和 CH 晶体,从而填充缝隙;且部分胶凝物质 CH 与 C-S-H 分解产生的钙离子会同硫酸根离子结合生成难溶性膨胀产物石膏,石膏又与铝酸钙盐等物质发生反应生成难溶性膨胀产物钙矾石,其主要的化学反应式见式(1)。孔隙被水化产物和膨胀产物填充,试样结构逐渐致密,力学性能增强,这解释了 pH 为 7 条件下,水泥砂浆试样抗压强度与抗拉强度在侵蚀前期随侵蚀历时增加而增大。



式中: $\text{C}\bar{\text{S}}\text{H}_2$ 为石膏; C_3A 为水化铝酸三钙; $\text{C}_6\text{A}\bar{\text{S}}_3\text{H}_{32}$ 为钙矾石 AFt。

当试样内部孔隙被生成的膨胀性产物填充至一定程度时,孔隙壁将承受膨胀应力;当该膨胀应力超过材料自身强度极限时,孔隙壁发生破坏,膨胀应力得以释放,进而导致孔隙扩展增大、内部裂缝进一步发育延伸。在渗流作用下,裂缝表面与 Na_2SO_4 侵蚀溶液的物质交换速率加快,局部始终维持稳定的浓度梯度,使得钙离子持续被化学反应消耗。为补充孔隙溶液中的钙离子,水泥砂浆内部的 CH 与 C-S-H 相不断溶解,这一

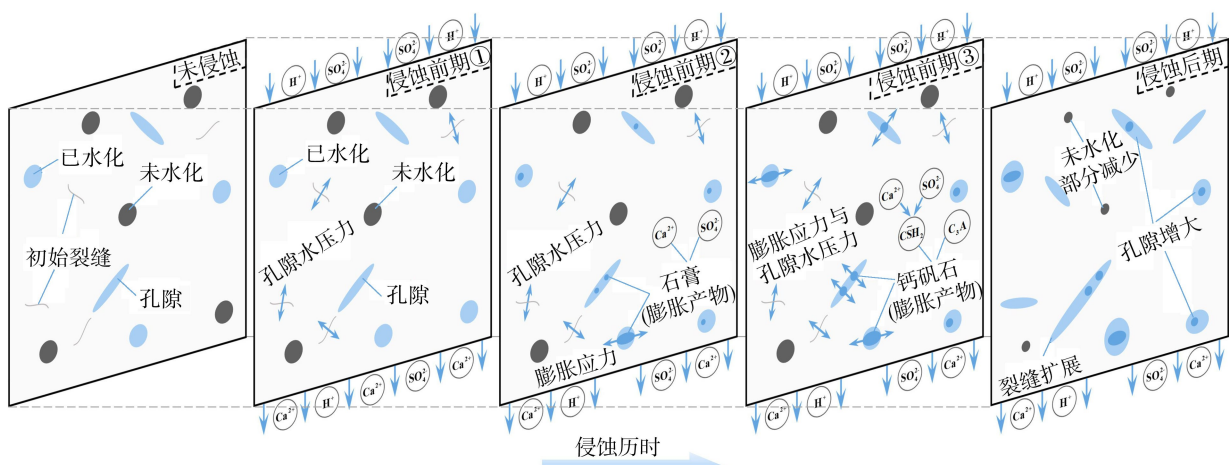
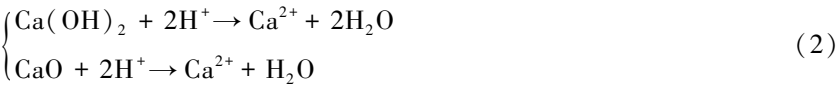


图 5 渗流-盐侵耦合作用下水泥砂浆侵蚀示意图

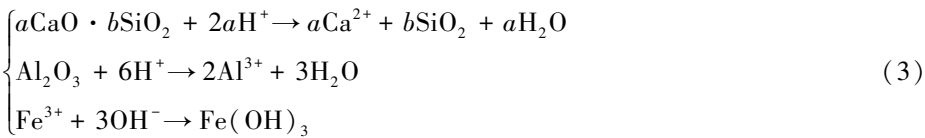
Fig. 5 Schematic diagram of cement mortar erosion under coupled seepage and salt attack

过程会加速裂缝的扩展与贯通,最终形成更大规模的贯通裂缝。与此同时,上述侵蚀过程会显著降低水泥砂浆内部的黏结性能,进一步加剧试样力学强度的劣化速率。

当试样处于 pH 为 3 的 Na_2SO_4 溶液环境时,水泥砂浆主要发生硫酸盐侵蚀和酸性侵蚀。该工况下试样强度同样先增大后减小,但峰值时间提前至 45 d,且后期劣化速率更快。侵蚀前期,试样内部水化产物 CH 和 CaO 易与 H^+ 发生式(2)的化学反应,生成易溶于水的矿物,但 H^+ 对初始裂缝和孔隙的影响程度小于硫酸盐侵蚀和水化作用,硫酸盐侵蚀反应生成的石膏、钙矾石等难溶性膨胀产物填充试样内部孔隙,且渗流作用下水分加速渗透并与水泥生成水化产物 C-S-H 凝胶和 CH 晶体填充缝隙,试样变得更加密实,力学性能增强。随着侵蚀时间增长,酸性侵蚀逐步加剧,膨胀产物开裂与溶蚀损伤叠加,裂缝扩展速率加快,使得强度峰值较 pH 为 7 工况提前 15 d 出现,且后期下降更为明显,与试验得到的强度演化规律相符。



当试样处于 pH 为 1 的 Na_2SO_4 溶液环境时,由于 H^+ 浓度很大,一直处于酸性侵蚀阶段,CH 和 C-S-H 的分解反应对水泥砂浆的影响占据主要地位,进行式(3)的化学反应,生成物大部分为可溶于水的盐,对水泥砂浆微观结构骨架形成破坏。在渗流作用下,试样内部结构持续松散、孔隙骨架破坏加剧,表层砂浆脱落、骨料外露,力学性能持续下降,150 d 时抗压、抗拉强度较初始值分别下降 49.06% 和 45.22%,与强酸主导下的快速劣化机理完全一致。且反应生成的 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 沉淀物附着在试样表面使其外观呈红褐色。



式中: a 、 b 为系数。

不同酸度条件下渗流-盐侵耦合作用下水泥砂浆会受到溶出性侵蚀与硫酸盐膨胀侵蚀,随侵蚀溶液酸度增大,逐渐由溶出性溶蚀与硫酸盐膨胀侵蚀耦合作用转为酸性侵蚀为主,水泥砂浆力学性能劣化效应逐渐严重,与不同 pH 工况下的强度试验结果相印证。

4 力学性能劣化分析模型

4.1 力学性能损伤系数劣化模型

为定量表征水泥砂浆试样力学性能劣化程度,分别以抗压强度、抗拉强度相对初始强度的衰减比例定义抗压强度损伤系数 K_c 、抗拉强度损伤系数 K_t (式(4)),可反映水泥砂浆在不同侵蚀条件下力学性能劣化程度:

$$K_c = f_c / f_{c0} \quad K_t = f_t / f_{t0} \quad (4)$$

式中： f_c 、 f_t 分别为水泥砂浆试样的抗压强度、抗拉强度； f_{c0} 、 f_{t0} 分别为水泥砂浆试样的初始抗压强度、初始抗拉强度。

分析试验数据的残差,将超出置信区间的点视为离群数据并去除。采用二次函数对有无渗流作用下试样抗压、抗拉强度损伤系数随侵蚀历时的演化规律进行拟合,构建相应的力学性能损伤系数劣化模型,模型公式与决定系数 R^2 如图 6 所示。各工况下模型 R^2 均大于 0.84,相关性较好,表明二次函数能较好地捕获 150 d 内的抗压、抗拉强度损伤系数变化趋势。

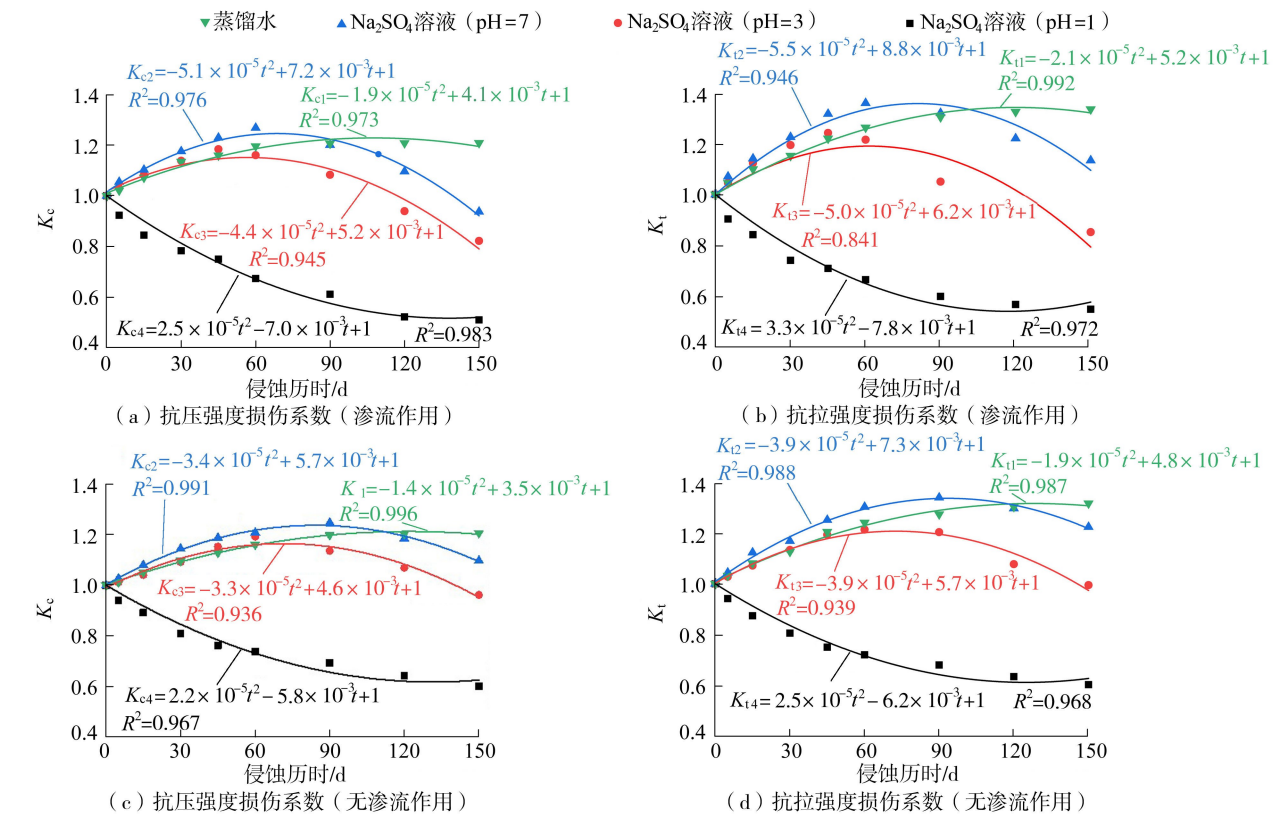


图 6 水泥砂浆强度损伤系数拟合曲线

Fig. 6 Fitted curves of strength damage coefficient of cement mortar

pH 为 7 蒸馏水工况下,损伤系数整体稳定,曲线呈先缓慢上升后小幅缓慢下降的特征。强度损伤系数前期上升主要是由于蒸馏水环境中无外部侵蚀性离子,试样内部水泥熟料可在渗流水环境下继续发生水化反应,生成 C-S-H 凝胶与 CH 晶体填充内部孔隙,使基体密实度与力学性能小幅提升;后期因少量水化产物轻微溶出,导致强度略有减小。与之相比,盐溶液侵蚀工况劣化更为显著,渗流作用和无渗流作用下 pH 为 7、3 工况的抗压、抗拉强度损伤系数均先增大后减小,pH 为 1 条件的抗压强度和抗拉强度损伤系数均持续减小。

根据二次函数建立的力学性能损伤系数劣化模型,渗流作用下 pH 为 7、3 条件的抗压强度分别在 141、118 d 降低至初始抗压强度,抗拉强度分别在 160、124 d 降低至初始抗拉强度;无渗流作用下 pH 为 7、3 条件的抗压强度分别在 167、139 d 降低至初始抗压强度,抗拉强度分别在 187、146 d 降低至初始抗拉强度。侵蚀溶液的酸度越大,水泥砂浆试样的抗压强度和抗拉强度损伤越快,且随后的强度随侵蚀历时增加逐渐降低。在相同的酸度条件下,渗流作用下水泥砂浆抗压强度和抗拉强度降低至初始抗压强度和抗拉强度的时间比无渗流作用下提前约 20~30 d,渗流作用加剧了水泥砂浆试样的劣化程度,该时间可为受渗流-盐侵耦合作用的水泥砂浆材料服役时间提供参考。

4.2 抗压强度与抗拉强度相关性分析

由图 3 和图 4 可知,渗流-盐侵耦合作用下水泥砂浆在不同酸度条件中抗拉强度与抗压强度变化规律大体一致,不同酸度的 Na₂SO₄ 溶液侵蚀下水泥砂浆抗压强度与抗拉强度的相关关系曲线如图 7 所示。由图 7 可知,不同酸度的 Na₂SO₄ 溶液侵蚀下水泥砂浆试样抗压强度和抗拉强度之间存在着良好的相关性,通过回归

分析得到了线性拟合关系式 $f_t = \alpha f_c$,其关系式 R^2 均大于 0.90,拟合效果较好,验证了线性拟合关系式 $f_t = \alpha f_c$ 的准确性与在不同酸度下的适用性。

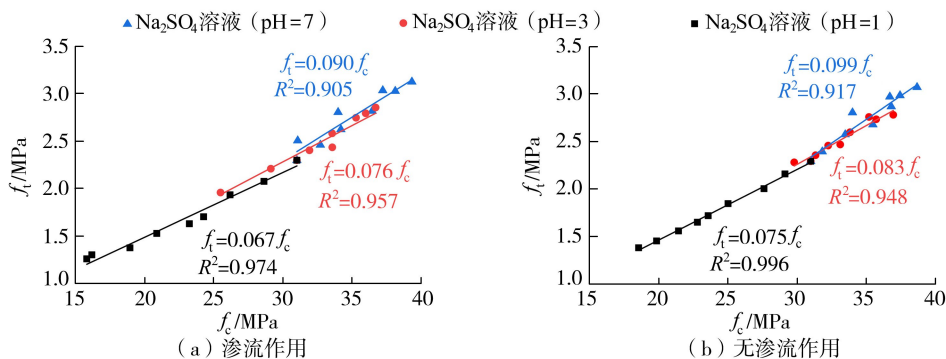


图 7 水泥砂浆抗拉强度与抗压强度关系曲线

Fig. 7 Relationship curve between tensile strength and compressive strength of cement mortar

不同工况下线性拟合关系式 $f_t = \alpha f_c$ 中的 α 略有差异,渗流作用和无渗流作用下水泥砂浆的 α 均随侵蚀溶液酸度的增大而减小,如图 8 所示,表明酸度的增大对水泥砂浆的抗压强度影响更为敏感,导致水泥砂浆抗压强度的劣化效应更加显著。在相同的酸度条件下,渗流作用的线性拟合关系式系数 α 比无渗流作用的小,说明渗流作用下水泥砂浆的抗压强度劣化速率更快。

5 结 论

a. pH 为 7、3 的 Na_2SO_4 溶液侵蚀下水泥砂浆抗压强度和抗拉强度均先增大后减小,侵蚀历时为 60、45 d 时,达到最大值,分别为 39.33、3.12 MPa 和 36.71、2.86 MPa;pH 为 1 的 Na_2SO_4 溶液侵蚀下水泥砂浆抗压强度和抗拉强度减小,其最大值分别为 31.00、2.30 MPa,较其他两种溶液环境下劣化程度明显增大,在 150 d 时其抗压强度和抗拉强度较初始状态分别减小 49.06% 和 45.22%。随着酸度增大,水泥砂浆抗压强度与抗拉强度最大值逐渐减小,力学性能劣化效应增强。

b. pH 为 7、3 的 Na_2SO_4 溶液环境中,侵蚀前期,水化产物和侵蚀产物填充砂浆试样内部孔隙,其密实度增大,抗压强度和抗拉强度提高;侵蚀后期,大量侵蚀产物堆积膨胀至裂缝发育扩张,在渗流作用下裂缝会更快地扩展、贯通,形成更大的裂缝,试样抗压强度和抗拉强度急剧减小。pH 为 1 的 Na_2SO_4 溶液环境中,砂浆一直处于酸性侵蚀阶段,生成物大部分为可溶于水的盐,对砂浆微观结构骨架形成破坏,在渗流作用下,试样结构松散加剧、表层砂浆脱落且骨料外露,力学性能持续下降。渗流-盐侵耦合作用下,随侵蚀溶液酸度增大,水泥砂浆由主要发生溶出性侵蚀和硫酸盐侵蚀耦合作用转为酸性侵蚀为主导。

c. 不同酸度条件下水泥砂浆试样抗压强度与抗拉强度的损伤系数和侵蚀历时之间的关系可用二次函数较好地描述;不同酸度条件下水泥砂浆试样抗拉强度与抗压强度之间的相互关系可用数学模型 $f_t = \alpha f_c$ 准确表征,可为酸性硫酸盐-渗流耦合环境下水泥砂浆力学性能劣化分析及耐久性评估提供参考。

参考文献:

[1] 甘磊,沈振中,徐力群,等. 不同 pH 值硫酸盐侵蚀下水泥砂浆断裂韧度[J]. 应用基础与工程科学学报,2023,31(3):690-702. (Gan Lei, Shen Zhenzhong, Xu Liqun, et al. Fracture toughness of cement mortar under sulfate attack with different pH values[J]. Journal of Basic Science and Engineering,2023,31(3):690-702. (in Chinese))

[2] Phung Q, Maes N, Jacques D, et al. Investigation of the changes in microstructure and transport properties of leached cement pastes accounting for mix composition[J]. Cement and Concrete Research,2016,79:217-234.

[3] 赵邵峰,徐力群,张宏伟,等. 考虑坝基防渗体渗透溶蚀效应的特高土心墙堆石坝服役年限可靠性分析[J]. 水利学报,2024,55(11):1391-1403. (Zhao Shaofeng, Xu Liqun, Zhang Hongwei, et al. Reliability analysis of service life for ultra-high core-wall rockfill dam considering the seepage-dissolution effect of dam foundation impervious structure[J]. Journal of Hydraulic

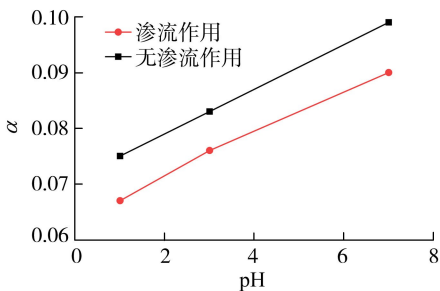


图 8 系数 α 随 pH 变化曲线

Fig. 8 Variation of coefficient α with pH

Engineering,2024,55(11):1391-1403. (in Chinese))

[4] 吴佳雯,王少伟,刘毅,等. 冻融溶蚀耦合作用下混凝土劣化机理及预测模型[J]. 水利水电科技进展,2025,45(6):53-60. (Wu Jiawen,Wang Shaowei,Liu Yi,et al. Mechanism and prediction model of concrete deterioration under coupled freeze-thaw and leaching action[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2025,45(6):53-60. (in Chinese))

[5] Yu Xiaotong,Zhu Yuwen,Liao Yingdi,et al. Study of the evolution of properties of mortar under sulfate attack at different concentrations[J]. Advances in Cement Research,2016,28(10):617-629.

[6] 张卫兵,李晓,雷过,等. 冻融-干湿循环下硫酸盐渍土的微观孔隙研究[J]. 地下空间与工程学报,2023,19(2):465-473. (Zhang Weibing,Li Xiao,Lei Guo,et al. Study of microscopic pores in sulfate saline soils under freeze-thaw-dry-wet cycles[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2023,19(2):465-473. (in Chinese))

[7] 曾涛,刘亮,丁金华,等. 渗流溶蚀作用下盐渍土变形特性与微观结构[J]. 水利水电科技进展,2025,45(6):61-67. (Zeng Tao,Liu Liang,Ding Jinhua,et al. Deformation characteristics and microstructure of saline soil under seepage dissolution effects [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2025,45(6):61-67. (in Chinese))

[8] 刘子铭,熊锐,关博文,等. 不同 pH 值条件下水泥砂浆硫酸盐侵蚀损伤评价[J]. 硅酸盐通报,2016,35(7):2247-2253. (Liu Ziming,Xiong Rui,Guan Bowen,et al. Damage evaluation of sulfate erosion to cement mortar under different pH-value conditions[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2016,35(7):2247-2253. (in Chinese))

[9] Ragoug R,Metalssi O,Barberon F,et al. Durability of cement pastes exposed to external sulfate attack and leaching:Physical and chemical aspects[J]. Cement and Concrete Research,2019,116:134-145.

[10] 王少伟,包腾飞. 渗透溶蚀对高混凝土坝长期变形影响的数值分析[J]. 长江科学院院报,2020,37(6):62-69. (Wang Shaowei,Bao Tengfei. Numerical analysis on influence of leakage dissolution on long-term deformation of high concrete dam[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute,2020,37(6):62-69. (in Chinese))

[11] 曾奕滔,沈振中,甘磊,等. 弯应力作用下混凝土结构水力劈裂试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(1):72-77. (Zeng Yitao,Shen Zhenzhong,Gan Lei,et al. Experimental study on the hydraulic fracture of concrete structure under bending stress[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2018,46(1):72-77. (in Chinese))

[12] 齐翠阁,邱莉婷,马福恒,等. 大坝混凝土非连续变形的并发多尺度区域分解法[J]. 水利水运工程学报,2023(2):121-128. (Qi Cuige,Qiu Liting, Ma Fuheng, et al. Concurrent multi-scale domain decomposition simulation of discontinuous deformation of dam concrete[J]. Hydro-Science and Engineering,2023(2):121-128. (in Chinese))

[13] Li Chen,Wu Mengxue,Chen Qing,et al. Chemical and mineralogical alterations of concrete subjected to chemical attacks in complex underground tunnel environments during 20-36 years[J]. Cement and Concrete Composites,2018,86:139-159.

[14] Ye Fei,He Biao,Tian Chongming,et al. Influence of sodium aluminate on calcium leaching of shotcrete in tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2021,117:104156.

[15] Zhang Ziwei,Li Guoxin,Zhang Ge,et al. Influence of liquid accelerators on shotcrete in karst area tunnels[J]. Case Studies in Construction Materials,2022,16:e01002.

[16] 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))

[17] 徐力群,赵邵峰,沈振中,等. 特高土心墙堆石坝坝基防渗体渗流-溶蚀特征研究[J]. 水利学报,2023,54(8):942-954. (Xu Liqun,Zhao Shaofeng,Shen Zhenzhong,et al. Seepage and dissolution analyses for impervious structure of dam foundation in super-high rockfill dams with soil core[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2023,54(8):942-954. (in Chinese))

[18] Zhou Changlin,Zhu Zheming,Wang Zhihong,et al. Deterioration of concrete fracture toughness and elastic modulus under simulated acid-sulfate environment[J]. Construction and Building Materials,2018,176:490-499.

[19] 郭文华,吴彪,陈定市. 多因素耦合的混凝土结构硫酸盐传输多尺度模拟分析[J]. 中南大学学报(自然科学版),2024,55(4):1374-1387. (Guo Wenhua,Wu Biao,Chen Dingshi. Multi-scale simulation analysis of sulfate transport in concrete structures coupled with multiple factors[J]. Journal of Central South University(Science and Technology),2024,55(4):1374-1387. (in Chinese))

[20] Xu Liqun,Zhao Shaofeng,Zhang Hongwei,et al. Hydraulic fracturing in cement mortar subjected to seepage-sulfate coupled attack under varying pH levels[J]. Construction and Building Materials,2024,449:138325.

[21] Chen Xudong,Wu Shenxin. Influence of water-to-cement ratio and curing period on pore structure of cement mortar[J]. Construction and Building Materials,2013,38:804-812.

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.03.013

河道型水库支流库湾流速和水温对整流幕设置响应的数值模拟

龚轶青¹, 洪浩², 顾家丞², 毛劲乔¹, 张培培¹

(1. 河海大学水利水电学院; 2. 中国长江电力股份有限公司)

摘要: 为了研究整流幕不同设置条件对河道型水库支流库湾水华关键驱动因子的影响,采用数值模拟方法,以三峡支流库湾香溪河为例,通过构建三维水动力和水温模型,模拟对比了整流幕设置前后以及不同设置位置和淹没水深条件下支流库湾流场和水温特性的变化特征。结果表明:整流幕对水流有明显的阻隔作用,整流幕设置断面处的上层水体会出现水团混合现象,其上游侧的水温降低,同时水温分层现象减弱;整流幕不同设置位置条件下,支流库湾中层水体受整流幕影响较明显,其流速变化高于上层和下层水体,且整流幕设置位置越靠近库湾上游,对河口处水体流速的影响越显著,而整流幕对水温的影响效果则与设置位置关联性不大;整流幕断面的各层温差平均值随着淹没水深的增加而增大,且上层水温变幅最大,水温变化的水深范围也随淹没水深的增加而增大,可达到全垂向断面水温降低的效果。

关键词: 整流幕; 水库库湾; 流速; 水温; 设置位置; 淹没水深; 香溪河

Numerical simulation of response of flow velocity and water temperature in tributary bay of river-type reservoirs to installation of rectification curtains

Gong Yiqing¹, Hong Hao², Gu Jiacheng², Mao Jingqiao¹, Zhang Peipei¹

(1. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University; 2. China Yangtze Power Co., Ltd.)

Abstract: To investigate the impact of different installation conditions of rectification curtains on the crucial driving factors of algal blooms in the tributary bay of a river-type reservoir, numerical simulation methods were used. By taking the Xiangxi River, a tributary bay of the Three Gorges Reservoir, as an example, a three-dimensional hydrodynamic and water temperature model was constructed to simulate and compare the changes in flow field and water temperature characteristics of the tributary bay under conditions before and after the installation of a rectification curtain, as well as under different installation positions and submerged depths. The results indicate that the rectification curtain has a significant blocking effect on water flow. Water mass mixing occurs at the upper layer at the section where the rectification curtain is installed, resulting in a decrease in water temperature on the upstream side and a reduction in water temperature stratification. Under different installation positions of the rectification curtain, the flow velocity in the middle layer of the water body changes more significantly as affected by the rectification curtain than that in the surface and the lower layers. Furthermore, when the rectification curtain is installed closer to the upstream of the tributary bay, the influence on flow velocity at the estuary is more significant. However, the effect of the rectification curtain on water temperature has little correlation with its installation position. The average temperature difference across different layers at the rectification curtain section increases with increasing submerged depth. The upper layer exhibits the largest water temperature variation. The depth range of water temperature change also expands with increasing submerged depth, ultimately achieving a reduction in water temperature across the entire vertical section.

Key words: rectification curtain; tributary bay of reservoir; flow velocity; water temperature; installation position; submerged depth; Xiangxi River

水利工程在发挥巨大综合效益的同时,其建设运行后可能带来的水生态环境问题也日益受到重视^[1-4]。与天然河道相比,水库支流库湾水动力特性复杂,可能出现水温分层现象,藻类物质也容易聚集在水体上层形成水华^[5-8]。水华暴发受到藻类本身生理特性、水体营养盐浓度、气象条件、水动力条件等诸多环境因素的

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3202602);中央高校基本科研业务费专项资金项目(B240201103);中国长江电力股份有限公司科研项目(Z242302063)

作者简介: 龚轶青(1992—),男,助理研究员,博士,主要从事生态水力学研究。E-mail: yqgong@hhu.edu.cn

通信作者: 张培培(1990—),女,副教授,博士,主要从事水利工程生态效应与调控研究。E-mail: zhangpei@hhu.edu.cn

影响,其中水体的水动力特征和水温分层特性是水库支流库湾水华的关键驱动因子^[9-13]。整流幕是一种基于上层流场调控的物理控藻工程设施,通过改变局部水动力条件、水体混合及分层结构,可抑制藻类聚集和水华暴发,在大型水库库区水华防控中具有较强的应用前景。20 世纪 90 年代,Asaeda 等^[14-15]将整流幕应用于日本的 Terauchi 水库以解决水体富营养化问题,结果表明整流幕设置对水库的控藻效果较明显;而 Priyantha 等^[16]通过水库生态系统模型模拟研究证明,整流幕不同垂向淹没水深会影响下游区域的叶绿素浓度^[15]。另有研究发现,整流幕防控水华的能力受库区水动力条件影响,整流幕设置位置不同对水库水华的防控能力也不相同^[17-18]。近年来,整流幕防控水华方面的研究在国内也日益受到关注,关于整流幕治理甲藻水华的数值模型模拟研究表明,在水库设置整流幕后,水域内叶绿素浓度峰值较设置前明显下降^[19],这为防治淡水甲藻水华提供了新的思路^[20-21]。目前国内外对整流幕抑制库湾水华的作用机理了解仍不够系统和深入^[22],已有研究多侧重于通过数值模型对水库水质及水华状况进行模拟预测,而对整流幕影响下区域水动力条件、水温变化特征,以及不同设置参数对库湾水华抑制效果影响的研究仍相对不足^[23-25]。本文针对典型河道型水库支流库湾香溪河,探究整流幕影响下支流库湾水动力特征和水温分层结构的变化情况,以期为基于整流幕防控水华提供理论支撑和技术参考。

1 研究数据与方法

1.1 研究区概况

香溪河是三峡水库湖北库区的最大支流,同时也是距离三峡大坝最近的一条支流(图 1),受三峡水库蓄泄调度影响较为明显。香溪河全长 97.3 km,河道宽度介于 180~400 m 之间,河口距三峡大坝 34.5 km,流域面积为 3 099 km²,属于山区季节性河流,年径流量为 19.56 亿 m³。2003 年三峡水库蓄水后,由于长江回流顶托作用,自香溪河河口至峡口镇形成库湾,回水区汛期最大流速在 0.13 m/s 以内,水流速度变慢,回水区的河流水文水动力状况发生明显改变。当支流库湾的过水面积变大时,库湾内的水体流速就会减缓,甚至处于准静止的状态,并且支流库湾与长江干流的水体交换能力也会随之减弱,再加上库湾沿岸分布着许多工矿企业(如黄磷厂),富磷泥沙随着地表径流流入水体,为库湾输送了丰富的营养盐,导致大量的营养盐在库湾中富集,导致水环境严重恶化。整流幕是河道型库湾水华防控的一种设施,适用于香溪河这类狭长型河流,尤其适用于水深较大、流速缓慢的河道、水库,对河宽无严格限制。整流幕可以根据水面水位变化垂向移动,也可以设置为不同的淹没水深(水面到整流幕底边的深度)。整流幕可以长期固定,也可以短期设置,在有通航要求的河段,还可以做成分段升降式,以减少对航运的影响。

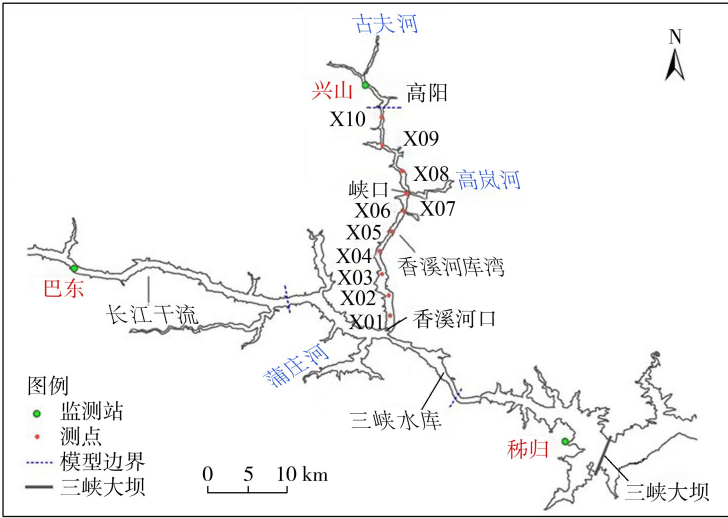


图 1 香溪河库湾位置及观测站点

Fig.1 Location and observation stations of Xiangxi River reservoir bay

1.2 数学模型构建

1.2.1 区域网格与边界设置

本文所构建的三维水动力模型基于纳维-斯托克斯方程(N-S 方程),将水体视为不可压缩流体,引入

Boussinesq 假定,考虑温度的影响以及常温常压和重力场下的变密度流问题。瞬时参数包括压力和速度均满足 N-S 方程,将该瞬时参数分解为时间平均值和脉动值,基于 N-S 方程取时间平均后得到用均值表示的湍流运动方程式,即雷诺方程。水动力模型主要参数取值如下:水平涡黏系数为 $1\text{m}^2/\text{s}$,垂向涡黏系数为 $0.019\text{m}^2/\text{s}$,水平和垂向扩散系数均为 $0.00028\text{m}^2/\text{s}$,水体表面对太阳辐射的吸收率为 0.48 ,水体对太阳辐射的衰减系数为 0.42m^{-1} ,河床糙率为 0.024 ,水面风拖拽力系数为 $(0.49+0.536w)\times 10^{-3}$,其中 w 为水面风速。

在香溪河库湾三维水动力和水温模拟中,计算区域选取如下:①自上游高阳镇起到香溪河口为香溪河库湾段,总计算长度约 32km ,高岚河支流汇入以源项考虑;②考虑长江对香溪河的影响,自香溪河口口至上游共选取 24km 江段作为库区主流计算区域,具体见图 1。香溪河库湾及库区主流长江段的计算网格划分如图 2 所示,其中香溪河段网格数为 $415(\text{纵向})\times 9(\text{横向})$,顺水流方向的网格尺寸最小为 25m ,最大达 65m ,而垂直于水流方向的网格尺寸最小为 20m ,最大为 50m ;长江段网格数为 $321(\text{纵向})\times 9(\text{横向})$,顺水流方向的网格尺寸最小为 25m ,最大可达 120m ,垂直于水流方向的网格尺寸最小为 20m ,最大为 100m 。计算网格的正交系数范围在 $0.01\sim 0.05$ 之间。垂向上,香溪河库湾水动力模型分为 10 层,为了方便分析模型模拟结果,选取 10 个测点($X01\sim X10$)进行数据观测和分析。整流幕平面沿垂直于水流方向的计算网格线布置,即整流幕用与网格纵向重合的不透水层模拟。由于河道型水库是狭长形状,大多数情况下河道横断面的网格线近似为直线,而且整流幕一般采用柔性的不透水材料,因此也可以将整流幕设置为与横截面网格线一致。

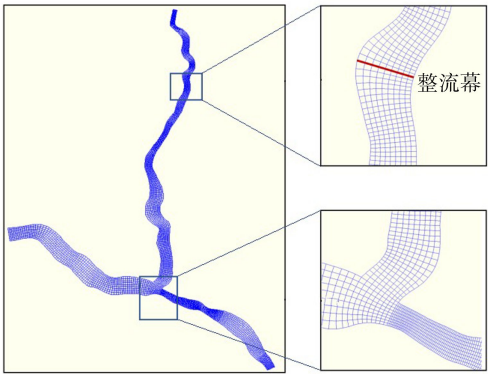


图 2 计算区域平面网格
Fig. 2 Planar grid of computational domain

香溪河和长江的上游入流选取流量边界、下游出流选取水位边界条件。水体自由表面考虑大气层的热交换和风引起的切应力。模型启动条件采用水温和水位的平均值,水温 12°C ,水位 170m 。为了尽量消除模型初始启动条件的影响,在流体力学模拟开始之前,使用从冷启动(零速度)开始的 30d 初步运行结果作为实际模型计算的初始条件。

1.2.2 模型率定与验证

1.2.2.1 水动力模型

香溪河库湾三维水动力模型的率定以 2005 年 2 月 22 日至 5 月 1 日香溪河口(即测点 $X0$)水位和平均流速的实测资料为基础,确定水动力模型的主要相关参数取值,并基于 2007 年 2 月 25 日至 5 月 1 日香溪河 $X0$ 测点的实测数据对水动力模型进行验证,结果如图 3 所示。可以看出,香溪河河口处的水位和流速模

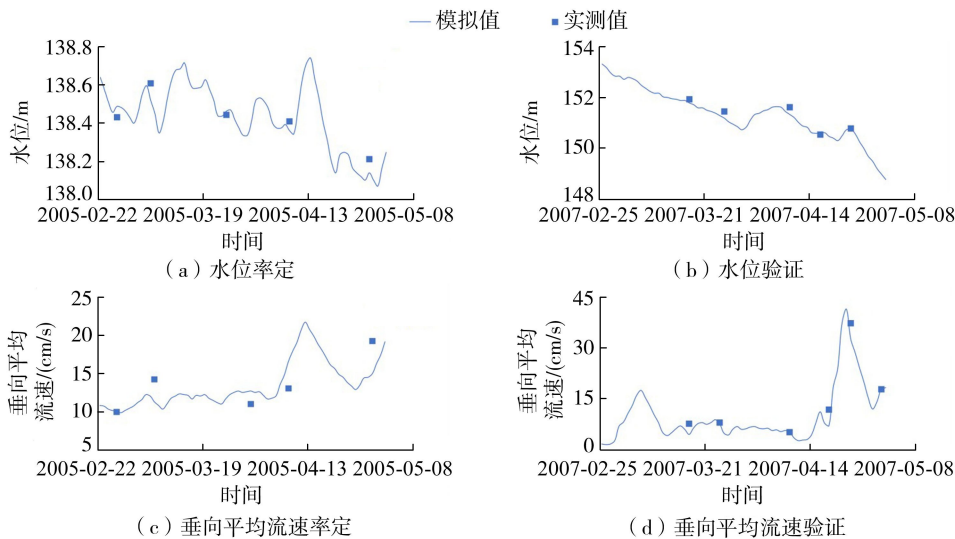


图 3 模型率定和验证结果

Fig. 3 Results of model calibration and validation

拟值与实测值基本一致,水位和流速随时间的变化趋势也相同,表明所构建的三维水动力模型可用于香溪河库湾水动力模拟研究。

香溪河库湾三维水动力模型模拟的 2009 年枯水补偿期(1 月 20 日)、汛前消落期(4 月 8 日)、汛期防洪期(7 月 5 日)和汛末蓄水期(10 月 8 日)等不同时期库湾深泓线的流速分布如图 4 所示。从图 4 可以看出,整体而言,香溪河库湾的上层和下层水体流速大于中层水体流速,在三峡水库的汛前消落期和汛末蓄水期,由于三峡水库的水动力变化较为剧烈,香溪河与三峡水库交汇的河口处流速也较大。根据龙良红等^[2]对香溪河库湾水动力的研究,香溪河上游来流大多数时段以底部顺坡的形式流向干流,在三峡水库泄水期和蓄水期,干流倒灌水流从库湾中上层流向支流上游,而支流上游来流从下层以顺坡异重流的形式流向干流,存在显著的分层异重流现象,这也从另一个角度说明本文建立的三维水动力模型对香溪河库湾垂向流速模拟的合理性。

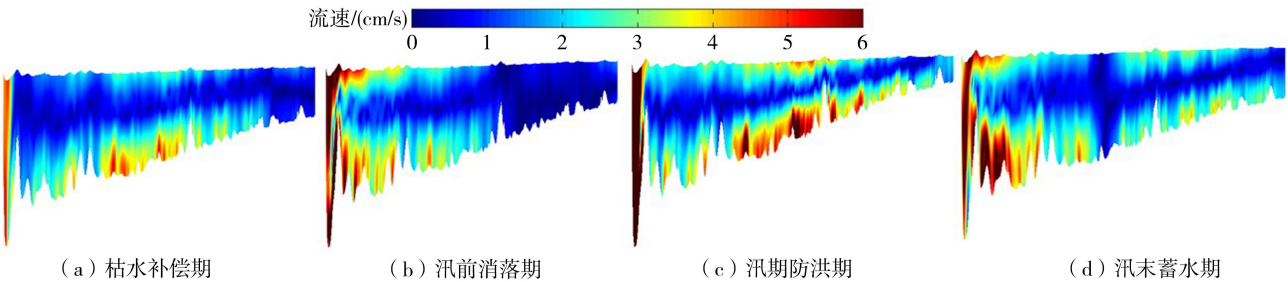


图 4 不同时期深泓线流速分布

Fig. 4 Flow velocity distribution along thalweg at different periods

1.2.2.2 水温模型

以 2007 年 4 月 1 日至 6 月 31 日香溪河库湾测点水温实测数据^[26]为基础,对比模型的上层水温分布和水温垂向分布的模拟结果。从图 5 可以看出,模拟水温与实测水温^[27]整体变化趋势一致,模拟结果可较为准确地捕捉到水温的变动过程以及上下层的水温差,尽管部分时段存在误差,但误差范围较小,可满足后续数值模拟计算需求。

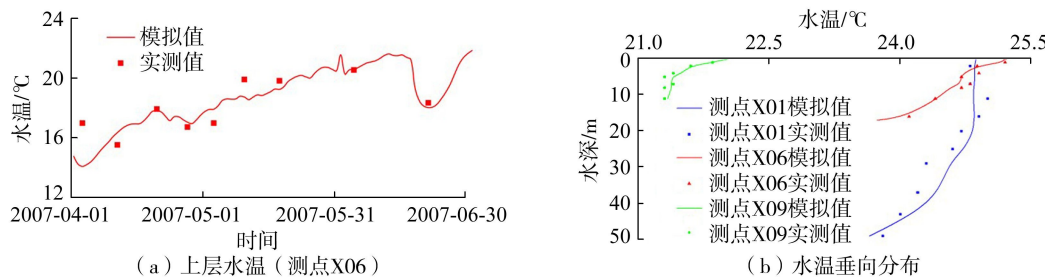


图 5 不同测点水温模拟值与实测值对比

Fig. 5 Comparison between simulated and measured water temperatures at different monitoring points

1.3 整流幕设置

为分析整流幕对香溪河库湾水动力和水温的影响,结合香溪河不同位置监测断面(图 1)的实测数据^[13]模拟分析不同整流幕设置条件下库湾水动力和水温条件的变化特征。如图 6 所示,整流幕垂直设置在水体上层,顶部与水面齐平,设置位置分别在香溪河库湾的下游测点 X02、中游测点 X04、上游测点 X08 处,在每一个监测断面处设置不同淹没水深的整流幕,分别为 1/10 河道水深(淹没水深 1)、2/10 河道水深(淹没水深 2)和 3/10 河道水深(淹没水深 3)。

2 整流幕设置位置的影响

2.1 对流场的影响

模型边界数据基于 2009 年 4 月 8 日的实测数据,整流幕设置前后及不同设置位置时香溪河库湾的流场计算结果如图 7(图中▼表示整流幕的设置位置)和图 8 所示,其中流速方向均以指向香溪河下游为正。可

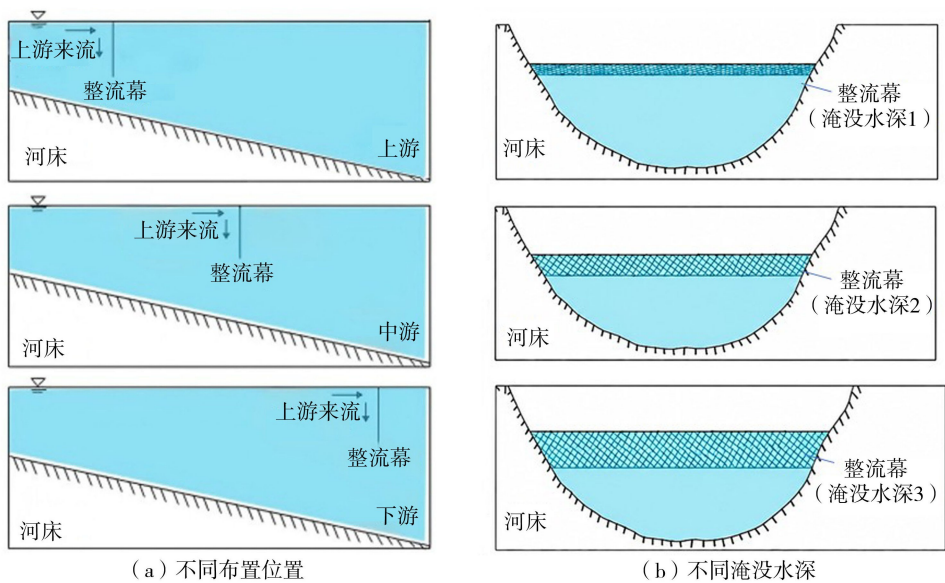


图 6 不同整流幕设置条件示意图
Fig. 6 Different installation conditions of rectification curtain

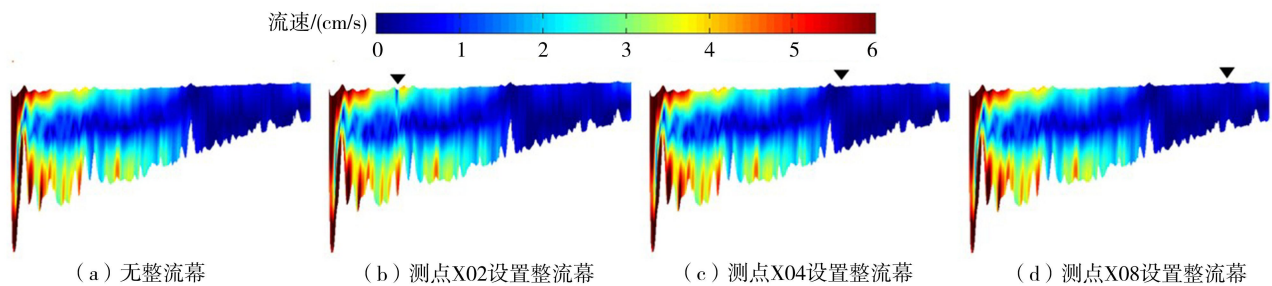


图 7 不同整流幕设置位置下深泓线流速分布
Fig. 7 Flow velocity distribution along thalweg under different installation positions of rectification curtain

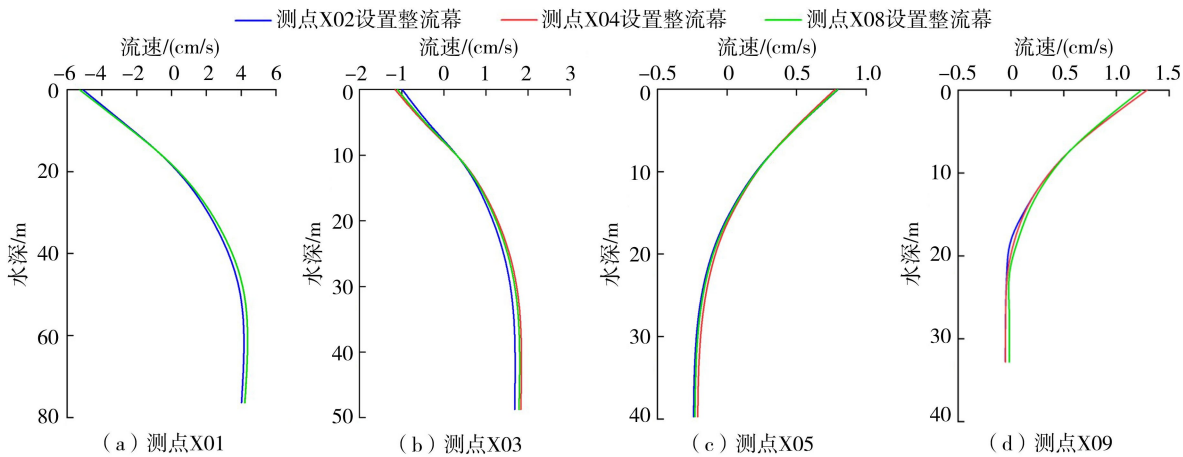


图 8 不同整流幕设置位置下的垂向流速分布
Fig. 8 Vertical flow velocity distribution under different installation positions of rectification curtain

以看出,香溪河库湾水体的流速受整流幕设置位置的影响不大,随着水深的增加,中层水体的流速逐渐增大,流速在中层水体达到最大值,沿程测点 X01、X03、X05 和 X09 的水体最大流速分别为 4.3、1.8、0.2、0.1 cm/s。香溪河库湾下层水体的流速与上层水体的流速一致,受整流幕的设置位置影响不大,并且整流幕设置位置越靠近上游区域,河口处的最大流速越大,水体掺混效果越明显。

分析其原因,未设置整流幕时,由于温度分层及分层异重流的存在,香溪河库区水体流速分布不均匀,且受长江干流的顶托作用,香溪河库湾形成一定范围的回水区,使得上游流速缓慢。设置整流幕后,由于上层

水体行泄通道被阻隔,整流幕断面处的水体流速显著降低。以 X02 断面为例,未设置整流幕时其上下游流速均大于 2 cm/s,而设置整流幕后,该断面处流速降低到基本静止状态。而整流幕以下,由于过流面积减小,水体流速相应增大,从而形成一段相对高速的流动区,局部流速最高可达到 5.1 cm/s。由图 7 可以看出,香溪河河口长江干流区域的水体从上层倒灌进入香溪河库湾,下层的水体从香溪河库湾流入长江干流;香溪河上游区域的水体通过上层流入再由下层水体回流,产生下层水体从进水口流出的现象,但其流速较小。结合香溪河库湾水体流场特点可知:①整流幕设置在下游测点 X02 处时,上层上游来流在整流幕断面附近流向下游,与低温水掺混;下游长江河口的倒灌水流在整流幕断面附近向上流动,与上层水体掺混后流回下游,部分水体则流向下游,与低温水掺混。②整流幕设置在中游测点 X04 处时,整流幕断面上游侧水体上层会出现水团混合现象,并且上游来流在整流幕断面附近向水体下层流动,并与下层水体掺混流向下游;整流幕下游侧来自长江河口的部分中层倒灌水流在整流幕断面附近向水体上层移动,并流回下游,整流幕下游侧上层倒灌水流向水体下层流动,并与下层上游来流掺混流向下游。③整流幕设置在上游测点 X08 处时,整流幕断面上、下游侧的水体上层均出现了水团混合现象,上游来流在整流幕附近向水体下层流动,而下游侧水流在整流幕附近向水体上层流动,最终流回下游。这样的流场特征使香溪河库湾上层和下层水体的流速在不同位置较为均匀,受整流幕的设置位置影响不大;而中层水体由于掺混作用流速增大,且随着水深的增加,水体掺混更为剧烈,流速逐渐增大。

综上所述,整流幕的设置对水流有明显的阻隔作用,整流幕设置断面处的水体上层会出现水团混合现象,并且上游来流在其断面附近流向下游,与低温水掺混,下游河口的倒灌水流或流向下游,与低温水掺混,或向上层流动,与上层水体掺混后再流回下游。整流幕设置位置对香溪河库湾水体流速影响不大,而设置位置越靠近香溪河上游区域对河口处水体流速影响越大。设置整流幕的 3 个典型断面中,X08 断面各层流速差平均值最大,即越靠近香溪河库湾上游,各层水体的流速变幅越大,水体掺混效果越明显,整流幕对水体流速的影响越显著。

2.2 对水温的影响

由图 9 和图 10 可以看出,设置整流幕后,整流幕断面上游侧的水温降低,上层尤其明显,同时上游侧的水温分层现象减弱,分层水体深度较下游侧明显减小,甚至会出现水温分层消失的现象。香溪河库湾下游 X02 断面,上层水深 8 m 范围内水温有明显降低,断面各层温差平均值为 0.012℃,中游 X04 断面各层温差平均值为 0.024℃,上游 X08 断面各层温差平均值为 0.046℃。通过对比整流幕分别设置在香溪河库湾上、中、下游时不同水库调度时期沿程不同测点的水温垂向分布发现,不同整流幕设置位置时水体水温垂向分布基本相同(图 10)。这是因为设置整流幕后,水体上层水流在整流幕断面附近流向下游,与下层低温水掺混,使整流幕断面上游侧的水温降低,上层尤其明显,同时上游侧的水温分层现象减弱甚至消失。由于是采用淹没水深 1 的整流幕比较整流幕设置位置的影响,整流幕淹没水深较小,对整个库湾水体的影响不大,所以除上层水体外其他各层的水温变化不大。而水体水温垂向分布与整流幕在库湾的设置位置关联性也不明显。

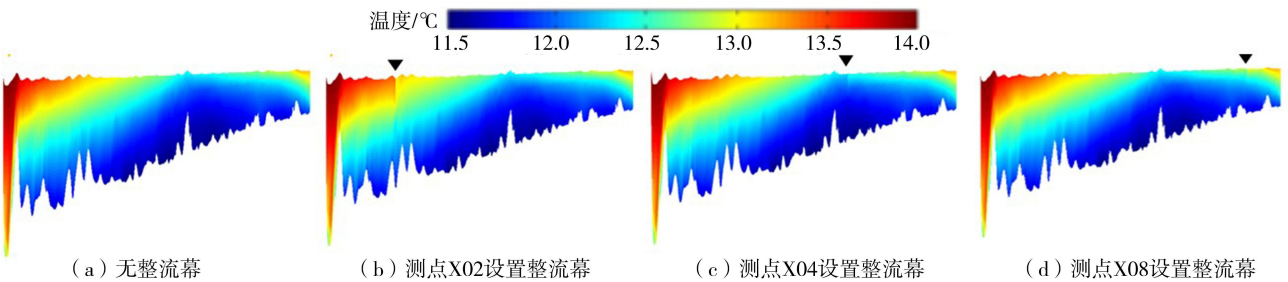


图 9 不同整流幕设置位置下深泓线上的温度分布

Fig. 9 Temperature distribution along thalweg under different installation positions of rectification curtain

3 整流幕淹没水深的影响

3.1 对流场的影响

由图 11~13 可以看出,当整流幕设置在香溪河库湾下游(断面 X02 处)时,整流幕下游侧(测点 X01)由于香溪河河口处长江干流的水体从上层倒灌进入香溪河库湾,下层的水体从香溪河库湾流入长江干流,受到

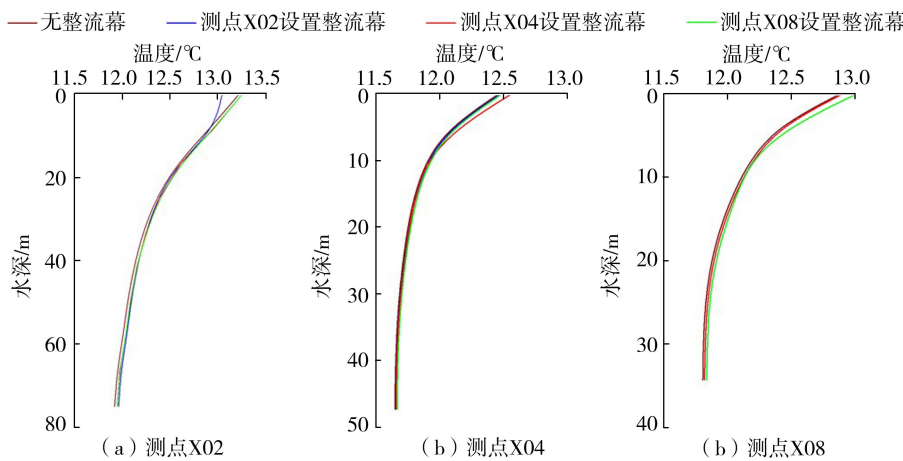


图 10 不同整流幕设置位置下的水温垂向分布

Fig. 10 Vertical water temperature distribution under different installation positions of rectification curtain

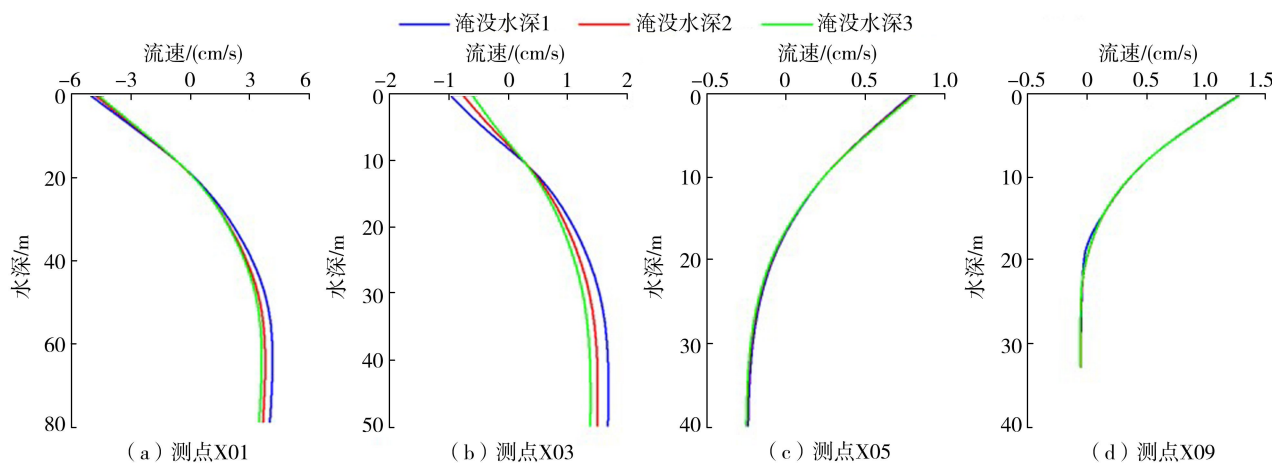


图 11 测点 X02 设置整流幕时的垂向流速分布

Fig. 11 Vertical flow velocity distribution at monitoring point X02 when rectification curtain is installed

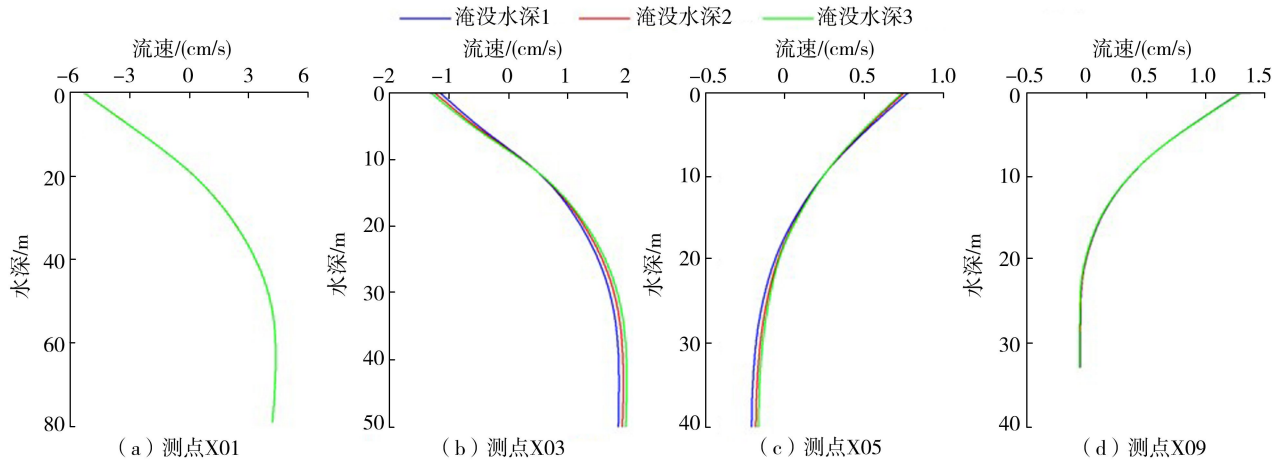


图 12 测点 X04 设置整流幕时的垂向流速分布

Fig. 12 Vertical flow velocity distribution at monitoring point X04 when rectification curtain is installed

整流幕的拦截,水体流速随着整流幕淹没水深的增加而减小;整流幕上游侧(测点 X05 和 X09)下层的水体直接从库湾上游流入长江干流,因此水体流速随着整流幕淹没水深的增加而减小。当整流幕设置在香溪河库湾中游(测点 X04 处)时,整流幕下游侧(测点 X03)水体流速随着整流幕淹没水深的增加而增大,整流幕上游侧(测点 X05)的水体流速则随着整流幕淹没水深的增加而减小。当整流幕设置在香溪河库湾上游(测点 X08 处)时,整流幕下游侧(测点 X05)水体垂向流速随着整流幕淹没水深的增加而增大;整流幕上游侧

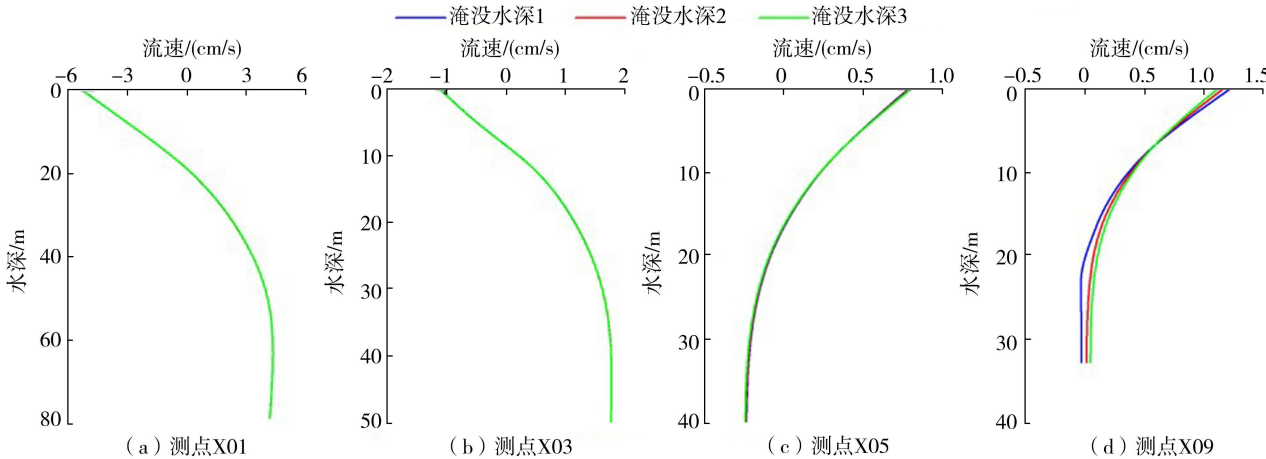


图 13 测点 X08 设置整流幕时的垂向流速分布

Fig. 13 Vertical flow velocity distribution at monitoring point X08 when rectification curtain is installed

(测点 X09) 上层的水体流速随整流幕淹没水深的增加而减小, 中下层的水体流速随着整流幕淹没水深的增加而增大。

3.2 对水温的影响

为更好地分析整流幕不同设置条件对香溪河库湾水温的影响, 模拟了整流幕不同设置位置和淹没深度下香溪河库湾水温的全年变化过程, 结果如图 14 所示。相比不设置整流幕的情况, 香溪河库湾下游测点 X02 分别设置淹没水深 1、2、3 的整流幕后, 全年分别有 230、278、228 d 水温降低, 均为汛前消落期(4—6 月)逐日温差平均值(整流幕设置前后每日水温变化的平均值)最大, 当设置淹没水深 1、2 的整流幕时, 汛末蓄水期(10—12 月)逐日温差平均值最小, 当设置淹没水深 3 的整流幕时, 枯水补偿期(1—3 月)逐日温差平均值最小。中游测点 X04 设置淹没水深 1、2、3 的整流幕后, 全年分别有 303、325、327 d 水温降低, 均为汛期防洪期(7—9 月)逐日温差平均值最大, 汛末蓄水期最小。上游测点 X08 分别设置淹没水深 1、2、3 的整流幕后, 全年分别有 176、175、162 d 水温降低, 均为汛期防洪期逐日温差平均值最大、枯水补偿期最小。从不同条件下香溪河库湾逐日温差平均值可以看出, 相比不设置整流幕的情况, 整流幕设置位置越靠近香溪河库湾的上游, 逐日温差平均值越大, 整流幕对水温的影响越明显; 在同一个断面处, 整流幕淹没水深越大, 逐日温差平均值就越大, 并且汛前消落期和汛期防洪期整流幕对水温的影响较明显, 水温变幅较大, 尤其是汛期防洪期。

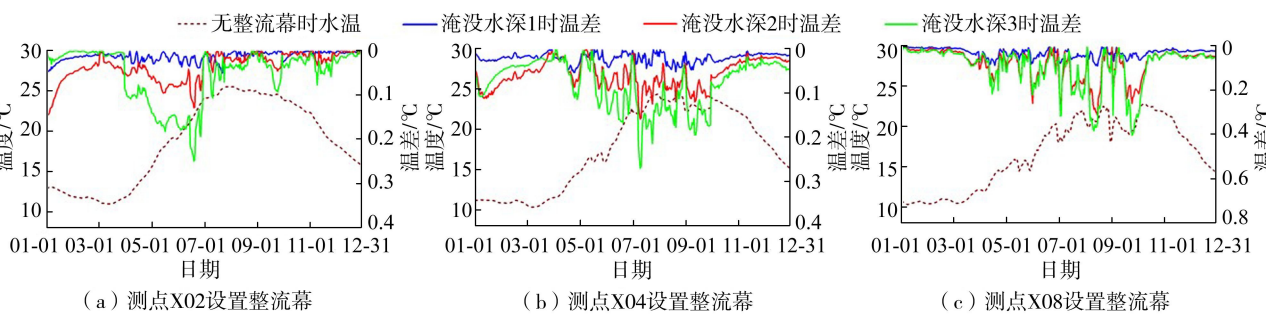


图 14 不同设置条件下香溪河库湾 2009 年水温变化过程

Fig. 14 Water temperature variation process of Xiangxi River reservoir bay in 2009 under different installation conditions

香溪河库湾下游测点 X02 设置淹没水深 1 的整流幕后, 全年降温时段集中在 1—3 月、8 月中下旬、9 月中下旬和 10—12 月; 设置淹没水深 2 的整流幕后, 全年降温时段集中在 1—9 月和 12 月; 设置淹没水深 3 的整流幕后, 全年降温时段集中在 2—3 月和 4 月中下旬至 9 月。中游测点 X04 设置整流幕后, 全年降温时段集中在 1—3 月和 5 月中下旬至 12 月。上游测点 X08 设置整流幕后, 全年降温时段集中在 7—12 月。整体来看, 设置整流幕后降温时段主要集中在汛前消落期和汛期防洪期。

选取 2009 年 7 月 5 日(汛期防洪期)为代表分析整流幕淹没水深对香溪河库湾水温垂向分布的影响, 结果如图 15 所示。相比不设置整流幕的情况, 香溪河库湾下游测点 X02 设置淹没水深 1 的整流幕时上层

6.8 m 水深范围内水温降低,设置淹没水深 2、3 的整流幕时上层 13.6 m 水深范围内水温降低,3 种整流幕淹没水深下断面各层温差平均值均在 0.01℃ 左右,均为上层 6 m 水深范围内水温变幅最大,分别高于 0.04、0.05、0.05℃;中游测点 X04 分别设置淹没水深 1、2、3 的整流幕时上层 11.2、18.7、22.5 m 水深范围内水温降低,3 种整流幕淹没水深下断面各层温差平均值分别为 0.06、0.07、0.09℃,均为上层 4 m 水深范围内水温变幅最大,分别高于 0.23、0.31、0.37℃;上游测点 X08 在 3 种淹没水深下基本全断面降温,各层温差平均值分别为 0.07、0.25、0.38℃,均为上层 7 m 水深范围内水温变幅最大,分别高于 0.3、0.8、1.1℃。

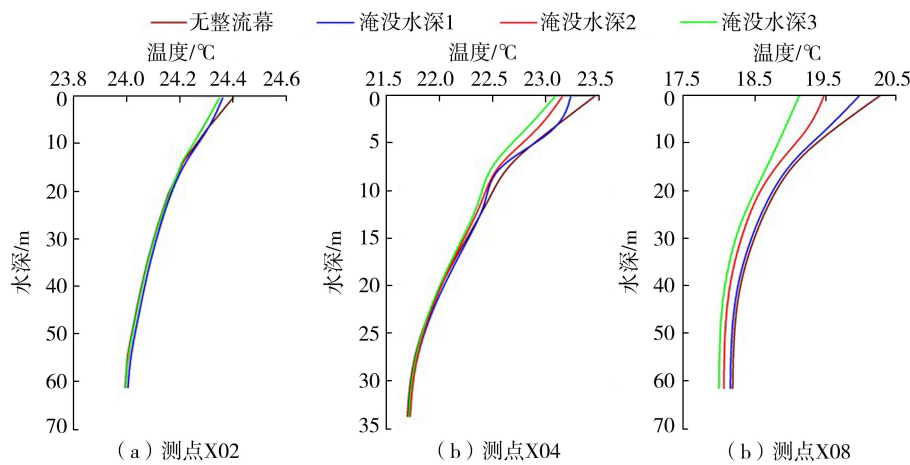


图 15 不同整流幕淹没水深下的水温垂向分布

Fig. 15 Vertical water temperature distribution at different submerged depths of rectification curtain

综上所述,整流幕对断面水温影响明显,整流幕淹没水深越深,断面各层温差平均值越大,除上层水温变幅较大外,中层和下层水温变幅基本相同,3 个典型观测断面中,上游测点 X08 断面各层温差平均值最大,即越靠近库湾上游,整流幕对水温的影响越明显。这是因为整流幕阻隔了上下游水体的流动,断面上层的水体向下层掺混,使上层高温水的温度降低,整流幕淹没水深越深,水体向下层流动的距离越远,掺混越剧烈,因而断面各层温差越大。上游断面由于水动力较弱,设置整流幕后增加了水体的垂向紊动,这一变化对于上游断面原先近似静止的水体影响可能就更为显著,因而越靠近库湾上游,整流幕对水温的影响越明显。

4 结 论

- a. 整流幕对水流有明显的阻隔作用,整流幕设置断面处的水体上层会出现水团混合现象,并且上游来流在其断面附近被迫流向下层,与低温水掺混,下游河口的倒灌水流或流向下层,与低温水掺混,或向上层流动,与上层水体掺混后再流回下游。整流幕设置后其上游侧的水温降低,上层尤其明显,同时水温分层现象减弱,甚至会出现水温分层消失的现象。
- b. 整流幕设置位置对香溪河库湾中层水体影响较明显,其流速变化高于上层和下层水体,设置位置越靠近香溪河上游区域水体流速变化越大,并且其断面处各层平均流速差也越大。整流幕阻断了水体上层,使上层温度较高的水体与下层水体进行置换,整流幕的设置位置影响置换水体的体积和置换时间的长短,但对香溪河库湾的水温垂向分布特征影响较小。
- c. 随着整流幕淹没水深的增加,在整流幕设置断面的下游侧,由于整流幕减小了过水区域的面积,水体流速增大;在整流幕设置断面的上游侧,由于整流幕对水流的阻隔作用,水体流速随着整流幕淹没水深的增加而减小。整流幕断面的各层温差平均值随着淹没水深的增加而增大,且在汛期防洪期最明显,上层水温变幅最大,其他各层水温变幅大致相同。

参考文献:

[1] 戴会超,毛劲乔,蒋定国. 大型水利水电工程水沙生态环境调控研究进展[J]. 水利水电技术(中英文),2023,54(5):118-125. (Dai Huichao,Mao Jinqiao,Jiang Dingguo. Research progress of water-sediment and ecological environment control of large hydropower projects[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2023,54(5):118-125. (in Chinese))

[2] 龙良红,黄宇擎,徐慧,等. 近 20 年来三峡水库水动力特性及其水环境效应研究:回顾与展望[J]. 湖泊科学,2023,35(2):

383-397. (Long Lianghong, Huang Yubo, Xu Hui, et al. Research on hydrodynamic characteristics and its water eco-environment effects in Three Gorges Reservoir in recent 20 years: review and prospect[J]. Journal of Lake Sciences, 2023, 35(2): 383-397. (in Chinese))

[3] 纪道斌, 成再强, 龙良红, 等. 三峡水库不同运行期库首水温分层特性及生态效应[J]. 水资源保护, 2022, 38(3): 34-42. (Ji Daobin, Cheng Zaiqiang, Long Lianghong, et al. Characteristics of thermal stratification in head area of Three Gorges Reservoir and ecological effects in different operation periods[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3): 34-42. (in Chinese))

[4] 尚淑丽, 顾正华, 曹晓萌. 水利工程生态环境效应研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34(1): 14-19. (Shang Shuli, Gu Zhenghua, Cao Xiaomeng. Review of research on ecological and environmental effects of water conservancy projects[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(1): 14-19. (in Chinese))

[5] Li Yuanyi, Sun Jian, Lin Binliang, et al. Thermal-hydrodynamic circulations and water fluxes in a tributary bay of the Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Hydrology, 2020, 585: 124319.

[6] Long Lianghong, Chen Peng, Xu Hui, et al. Recent changes of the thermal structure in Three Gorges Reservoir, China and its impact on algal bloom in tributary bays[J]. Ecological Indicators, 2022, 144: 109465.

[7] 徐慧, 龙良红, 纪道斌, 等. 三峡水库泄水-蓄水过程香溪河库湾水流振荡特性[J]. 水科学进展, 2022, 33(2): 264-273. (Xu Hui, Long Lianghong, Ji Daobin, et al. Study on characteristic of the flow oscillation in release and filling periods in the Xiangxi tributary of Three Gorges Reservoir[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(2): 264-273. (in Chinese))

[8] 肖洋, 姚晨欣, 张涛涛, 等. 交汇区水流结构对水温分布特征的影响机理[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(2): 1-11. (Xiao Yang, Yao Chenxin, Zhang Taotao, et al. Influence mechanisms of flow structure on water temperature distribution characteristics in junction areas[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(2): 1-11. (in Chinese))

[9] 金晓龙, 邓学良, 戴睿, 等. 基于多源数据的巢湖蓝藻水华时空分布及驱动因素分析[J]. 环境科学, 2024, 45(5): 2694-2706. (Jin Xiaolong, Deng Xueliang, Dai Rui, et al. Analysis of the spatiotemporal distribution of algal blooms and its driving factors in Chaohu lake based on multi-source datasets[J]. Environmental Science, 2024, 45(5): 2694-2706. (in Chinese))

[10] 胡莲, 郑志伟, 杨志, 等. 三峡水库小江回水区水华暴发期浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 湖泊科学, 2024, 36(4): 1025-1035. (Hu Lian, Zheng Zhiwei, Yang Zhi, et al. Community structure of phytoplankton in different water layers and its relationship with environmental factors during the period of algal bloom in Xiaojiang River backwater area of Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Lake Sciences, 2024, 36(4): 1025-1035. (in Chinese))

[11] 温成成, 黄廷林, 孔昌昊, 等. 北方富营养分层型水库藻类季节性暴发机制及其阈值分析[J]. 环境科学, 2023, 44(3): 1452-1464. (Wen Chengcheng, Huang Tinglin, Kong Changhao, et al. Analysis of mechanism and start-up thresholds of seasonal algal blooms in a northern eutrophic stratified reservoir[J]. Environmental Science, 2023, 44(3): 1452-1464. (in Chinese))

[12] 田晶, 郭生练, 王俊, 等. 汉江中下游干流水华关键环境因子识别及阈值分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(5): 196-203. (Tian Jing, Guo Shenglian, Wang Jun, et al. Identification and threshold analysis of key factors of algal bloom in middle and lower reaches of the Hanjiang River[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(5): 196-203. (in Chinese))

[13] 吴娟, 朱跃龙, 金松, 等. 三种机器学习模型在太湖藻华面积预测中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(6): 542-551. (Wu Juan, Zhu Yuelong, Jin Song, et al. Area prediction of cyanobacterial blooms based on three machine learning methods in Taihu Lake[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(6): 542-551. (in Chinese))

[14] Asaeda T, Pham H S, Priyantha D G N, et al. Control of algal blooms in reservoirs with a curtain; a numerical analysis[J]. Ecological Engineering, 2001, 16(3): 395-404.

[15] Asaeda T, Priyantha D G N, Saitoh S, et al. A new technique for controlling algal blooms in the withdrawal zone of reservoirs using vertical curtains[J]. Ecological Engineering, 1996, 7(2): 95-104.

[16] Priyantha D G N, Asaeda T, Saitoh S, et al. Modelling effects of curtain method on algal blooming in reservoirs[J]. Ecological Modelling, 1997, 98(2/3): 89-104.

[17] Chung S W, Lee H, Jung Y. The effect of hydrodynamic flow regimes on the algal bloom in a monomitic reservoir[J]. Water Science & Technology, 2008, 58(6): 1291-1298.

[18] Lee H S, Chung S W, Choi J K, et al. Feasibility of curtain weir installation for water quality management in Daechong Reservoir[J]. Desalination and Water Treatment, 2010, 19(1/2/3): 164-172.

[19] 文刚, 王茹, 温成成, 等. 淡水甲藻水华形成原因及原位控制研究进展[J]. 中国环境科学, 2023, 43(5): 2239-2253. (Wen Gang, Wang Ru, Wen Chengcheng, et al. A review on the formation mechanism and in-situ control of freshwater dinoflagellate bloom[J]. China Environmental Science, 2023, 43(5): 2239-2253. (in Chinese))

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.03.014

高水头闸门水封密封有效性试验研究

陈吉丰¹, 黎军杰², 沈燕萍¹, 胡坚柯¹, 董依培¹, 姜青林², 郭建斌²

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司; 2. 河海大学电气与动力工程学院)

摘要: 针对高水头闸门水封密封有效性受材料衰减效应影响面临较大不确定性的问题,通过橡胶水封的本构特性试验,分析了橡胶材料的应力松弛、滞回效应与塑性变形等衰减特征和时变规律,结合水封填充狭隙空间的密封机理,建立了密封力学模型,明确并试验验证了水封可靠密封的约束条件。结果表明:压缩率是影响高水头闸门水封密封有效性的关键要素,其中压缩率小于25%的水封密封有效性与压缩率呈现良好的正相关性,而压缩率大于25%的水封密封有效性与压缩率呈现显著的负相关性;建立的密封有效性约束条件与极限承压试验结果吻合较好,可为高水头闸门的可靠密封提供重要的参考依据。

关键词: 高水头闸门; 橡胶水封; 密封有效性; 应力松弛; 滞回效应; 塑性变形

Experimental study on sealing effectiveness of water seals for high-head gates

Chen Jifeng¹, Li Junjie², Shen Yanping¹, Hu Jianke¹, Dong Yipei¹, Jiang Qinglin², Guo Jianbin²

(1. POWERCHINA Huadong Engineering Corporation Limited; 2. School of Electrical and Power Engineering, Hohai University)

Abstract: Given the significant uncertainty in the sealing effectiveness of water seals for high-head gates caused by material attenuation effects, the attenuation characteristics (including stress relaxation, hysteresis effect, and plastic deformation) and time-varying laws of rubber materials were analyzed through constitutive characteristic tests of rubber water seals. A mechanical model for sealing was established by integrating the sealing mechanism of water seals filling the narrow gap space, and the constraint conditions for reliable sealing of water seals were clarified and experimentally verified. The results indicate that the compression ratio is a key factor affecting the sealing effectiveness of water seals for high-head gates; specifically, the sealing effectiveness of water seals with a compression ratio of less than 25% shows a good positive correlation with the compression ratio, whereas that of water seals with a compression ratio of greater than 25% shows a significant negative correlation with the compression ratio. The established constraint conditions for sealing effectiveness agree well with the ultimate pressure-bearing test results, which can provide an important reference for the reliable sealing of high-head gates.

Key words: high-head gate; rubber water seal; sealing effectiveness; stress relaxation; hysteresis effect; plastic deformation

受橡胶材料应力松弛、滞回效应与塑性变形等衰减效应影响^[1-3],高水头闸门水封密封有效性面临较大的不确定性,极易诱发工程病害的发生和发展^[4-5]。例如:庆云闸闸门水封泄漏曾导致水工建筑物出现明显水激振动病害,相关研究表明,闸门在复杂水动力作用下易产生流激振动,并进一步威胁结构安全^[6];三峡工程冲沙底孔闸门水封的密封有效性完全依靠人工经验,密封的不确定性导致泄漏经常发生,除了引起水能损失外还造成受力构件产生严重腐蚀病害^[7],工程养护和运行面临困难。近年来我国抽水蓄能电站大规模建设^[8-9],也使得高水头闸门保有量快速增长,加强对水封密封有效性的研究,对于工程安全运行具有重要的现实意义。

李斌等^[10]等通过单轴拉伸和应力松弛试验,建立了氟橡胶的超弹性和黏弹性本构模型,为橡胶密封性能分析与安全评价提供了依据。李昕龙等^[11]等通过高应变速率压缩试验研究了金属橡胶的动态压缩力学特性,为其在高速冲击防护领域的应用提供了依据。Zheng等^[12]基于试验研究成果建立了高温下压缩封隔器橡胶密封性能评价系统,为封隔器设计优化提供了依据。本文对高水头闸门水封应力松弛、滞回效应与塑性变形等材料衰减因素开展本构特性试验,明确和验证橡胶水封对狭隙空间的填充性能,从而更好掌握橡胶水封密封的极限承压性能和工作状态,以为高水头闸门水封的密封有效性提供参考。

1 力学模型

1.1 密封有效性的力学表现

闸门止水结构由底板、压板、螺栓和橡胶水封构成,如图 1(a)所示。由于机加工制造精度的限制,工件接触表面呈现凹凸不平的狭隙微观特征,因此闸门水封的密封性主要取决于其对接触界面狭隙的压密填充能力^[13]。

闸门止水结构的密封机理如图 1(b)所示,在力学承载条件中表现为橡胶水封对狭隙空间填充的张紧应力(P')必须大于狭隙空间密封水体对橡胶水封的顶托作用力(P_h),否则狭隙空间的密封水体将顶开橡胶水封与接触面的局部黏合区域,引发泄漏。因此,橡胶水封的密封有效性需要重点考虑橡胶水封的材料力学本构特性,以及这一力学本构特性对狭隙空间填充的张紧应力的复合影响。

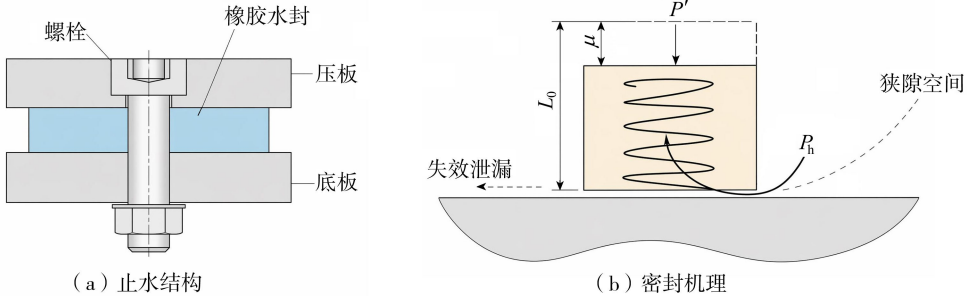


图 1 闸门止水结构与密封机理

Fig. 1 Gate water stop structure and sealing mechanism

1.2 橡胶材料的力学本构特性

橡胶材料的种类繁多,本文将橡胶水封材料简化为各向同性、均匀变形的 Mooney-Rivlin 材料物理模型讨论^[14],该模型的力学本构关系如式(1)所示,基于该模型,可进一步分析橡胶水封在压缩变形过程中对狭隙空间的填充受力特性。

$$\begin{cases} W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + \frac{1}{d}(J - 1)^2 \\ P = \frac{\partial W}{\partial I_1} \frac{\partial I_1}{\partial \varepsilon} + \frac{\partial W}{\partial I_2} \frac{\partial I_2}{\partial \varepsilon} \\ I_1 = \varepsilon^2 + 2\varepsilon^{-1} + 2 \\ I_2 = \varepsilon^2 + \varepsilon^{-2} + 4 \end{cases} \quad (1)$$

式中: W 为橡胶水封应变能密度函数; C_{10} 、 C_{01} 为 Mooney-Rivlin 模型的材料常数,由试验测得; I_1 、 I_2 分别为第一和第二应变张量的惯性不变量; d 为不可压缩参数; J 为体积比,橡胶水封取 1; P 为橡胶水封材料的固有张紧应力(即理论值); ε 为橡胶水封的压缩率, $\varepsilon = \eta/L_0$,其中 η 为橡胶水封压缩量, L_0 为橡胶水封的初始厚度,如图 1(b)所示。

1.3 水封密封的力学约束条件

橡胶水封分子链具有滑移和重排的特点,因此橡胶水封的力学响应具有明显的几何非线性、材料非线性和边界非线性特征^[15-16]。按照前述密封有效性的力学行为,橡胶水封的本构特性在工程中表现为固有张紧应力随着时间、压缩率、材料类别等多要素关联的函数或过程,呈现为考虑应力松弛、滞回效应与塑性变形等衰减效应影响和承载性能互馈的力学模型系统,其力学模型如图 2 所示。

按图 2 所示模型框架,水封密封有效性力学模型包含 3 层信息:第 1 层为时间、压缩率、材料类别等多要素节点;第 2 层为应力松弛、滞回效应与塑性变形等衰减效应影响;第 3 层为时效、聚合运算,主要纳入材料衰减因素,以及几何、材料和边界影响等多要素节点信息,明确橡胶水封对狭隙空间填充的张紧应力,最后形成水封密封有效性力学约束条件:

$$\begin{cases} P' = \lambda(\varepsilon, t)(P - \psi(\varepsilon, t)) \\ P' \geq P_h \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\lambda(\varepsilon, t)$ 为材料应力松弛效应的修正系数,表现为张紧应力的时效性衰减特性; $\psi(\varepsilon, t)$ 为材料本构特性

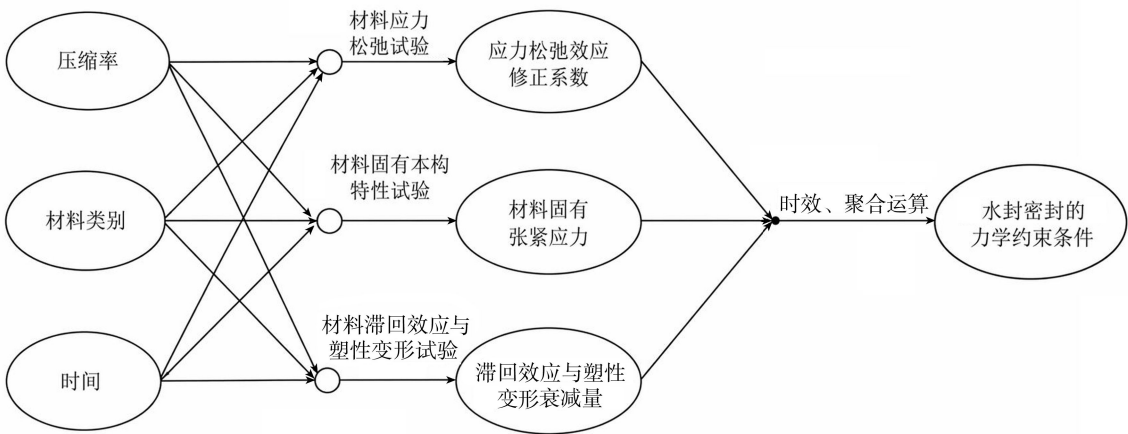


图 2 水封密封有效力学模型

Fig. 2 Mechanical model for sealing effectiveness of water seal

因滞回效应与塑性变形引起的衰减量。

2 本构特性试验

选择工程常用的 SF7774 水封材料按 GB/T 2941-2025《橡胶 物理试验方法试样制备和调节通用程序》的规定制备橡胶水封试件,分别开展试件压缩性能的应力松弛试验、滞回效应与塑性变形试验。

试验通过螺母螺杆加力装置对试件进行夹持压缩,控制试件压缩率,并通过拉压传感器实测试件的张紧应力,以掌握橡胶水封的应力松弛、滞回效应与塑性变形等衰减效应因素的影响水平,为橡胶水封的密封有效性研究提供参考数据和验证方法。试验流程如图 3 所示。

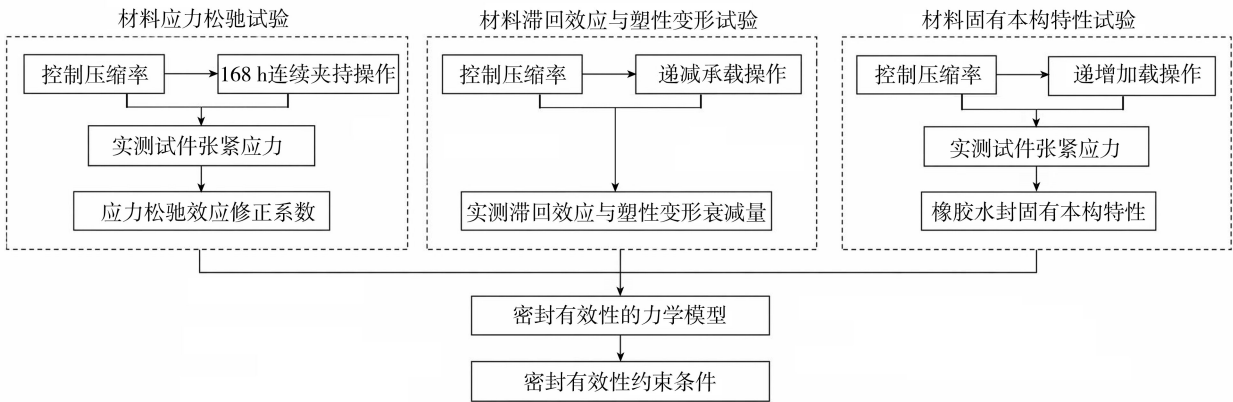


图 3 水封材料本构特性试验流程

Fig. 3 Test process for constitutive characteristics of water seal material

2.1 应力松弛试验

对试件夹持压缩,并控制压缩率为 10%、15%、20%、25%、30%,分别开展 168 h 连续试验,实测试件的张紧应力,得到橡胶水封试件的应力松弛时效特性曲线如图 4(a) 所示,水封材料应力松弛效应显著,与材料的压缩率正相关,并随时间呈先快后缓、最终趋于稳定的衰减特性。

2.2 滞回效应与塑性变形试验

对试件采取递减承载操作,并控制试件的压缩率开展试验。考虑压缩率小于 15% 的试件滞回效应与塑性变形微弱(小于 1%),以及压缩率大于 30% 的试件易发生材料特性破坏,仅记录压缩率介于 15%~30% 区间的滞回效应与塑性变形衰减量。试验得到的水封试件滞回效应与塑性变形的关联特性曲线如图 4(b) 所示,试件滞回效应与塑性变形的衰减量随压缩率增大而快速增强,并且压缩率介于 25%~30% 区间的衰减量呈现急剧增大特征,表明水封密封有效性显著减弱。

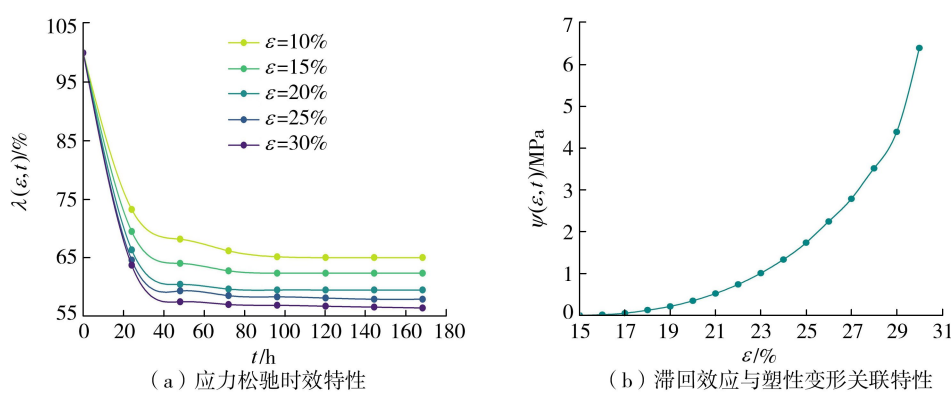


图4 水封材料的衰减效应

Fig.4 Attenuation effect of water seal material

2.3 约束条件

- a. 对初出厂的水封试件进行递增加载操作,并控制试件的压缩率,实测试件的固有张紧应力,结果如图5所示。
- b. 拟合试件的实测固有张紧应力值,得到橡胶水封固本构特性关系曲线 ϵ - P ,如图5所示。根据密封有效性的力学模型,按照式(2)扣减应力松弛、滞回效应与塑性变形等衰减效应影响,得到密封有效性约束条件 ϵ - P' ,如图5所示。
- c. 图5表明,密封有效性约束条件曲线表征了水封密封的极限承压性能,因此控制压缩率是保障水封密封有效性的关键因素。
- d. 图5表明, ϵ - P' 与 ϵ - P 之间的区域表征水封密封性能的衰减劣化情况。其中压缩率在 0%~15% 区间的衰减劣化情况微弱,呈现为橡胶水封的高效密封有效性;压缩率在 15%~25% 区间的衰减劣化情况逐渐显现,密封有效性约束条件随压缩率增长呈现正相关特性,并逐渐趋缓;压缩率在 25%~30% 区间的衰减劣化情况显著,密封有效性约束条件随压缩率增长呈现急剧衰减特性。因此,橡胶水封的密封有效性必须兼顾材料应力松弛、滞回效应与塑性变形等材料衰减效应影响,从而更好地掌握水封密封的极限承压性能和工作状态,为高水头闸门安全运行提供关键技术保障。

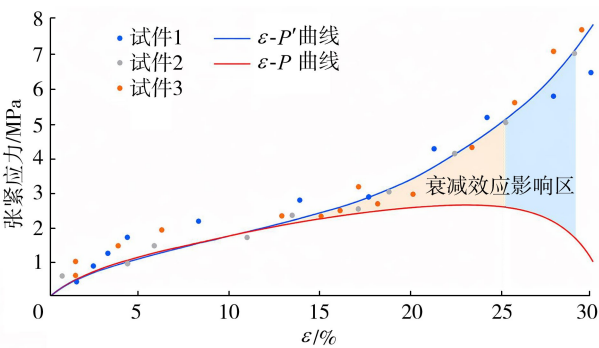


图5 水封材料固本构特性与密封有效性约束条件

Fig.5 Inherent constitutive characteristics of water seal material and constraint conditions for sealing effectiveness

3 有效性验证

参考某抽水蓄能电站发电洞工作闸门的设计方案,采用专门试验装置(图6(a)(b))开展水封密封有效



图6 水封密封有效性验证试验

Fig.6 Verification test for sealing effectiveness of water seal

性验证试验。对不同压缩率(5%、10%、15%、17%、20%、25%、27%、30%)的 8 组橡胶水封,按密封有效性约束条件(图 5 中 ε - P' 曲线)明确试验水压,并按试验水压的 50%、70%、80%、90%、95%、100% 逐级施加,观测水封密封的极限承压($P_{\max}$),结果见图 6(c)。

根据试验测得的极限承压数据,拟合得到橡胶水封承压的关联特性 ε - $P_{\max}$ 曲线,并与密封有效性约束条件对比,如果如图 6(c)所示。图 6(c)表明:①通过力学模型模拟得到的密封有效性约束条件,较好预测了水封密封的极限承压性能,为水封密封有效性的预测提供了参考依据;②相对于实际观测的密封极限承压,根据水封密封的约束条件模拟计算得到的张紧应力明显偏小,该模型预测水封密封有效性偏于保守;③压缩率在 0%~25% 区间的水封密封有效性与压缩率呈现良好的正相关性,表现为提高压缩率才能确保密封的极限承压性能;而压缩率在 25%~30% 区间的水封密封有效性与压缩率呈现负相关性,提高压缩率反而导致密封极限承压性能快速下降。

4 结 论

- a. 橡胶水封压缩率在 0%~25% 区间的水封密封有效性与压缩率呈现良好的正相关性,但压缩率大于 25% 的水封密封有效性与压缩率呈现显著的负相关性。因此,控制压缩率是保障水封密封有效性的关键因素。
- b. 基于力学模型建立的密封有效性约束条件与极限承压试验结果吻合较好,可用于评估水封密封的极限承压边界和工作状态,为高水头闸门水封密封有效性评价提供参考。
- c. 水工闸门的密封设计必须综合考虑橡胶材料的应力松弛、滞回效应及塑性变形等材料衰减因素,确保橡胶水封在极限承压下的密封性能,从而为高水头闸门的安全运行提供关键的技术保障。

参考文献:

[1] 王珏,郑赞,汪振宁,等. 基于 Burgers 黏弹性模型的 P 型橡胶水封长期服役止水密封性仿真[J]. 中国农村水利水电,2023 (12):266-272. (Wang Jue,Zheng Yun,Wang Zhenning,et al. Sealing performance of P-type rubber water seals based on burgers viscoelastic model in the long-term service simulation [J]. China Rural Water and Hydropower, 2023 (12): 266-272. (in Chinese))

[2] 王银龙,李钊,李子然,等. 未硫化橡胶黏弹塑性本构模型及有限元实现[J]. 上海交通大学学报,2023,57(8):1086-1095. (Wang Yinlong, Li Zhao, Li Ziran, et al. A visco-elastoplastic constitutive model of uncured rubber and its finite element implementation [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2023, 57 (8): 1086-1095. (in Chinese))

[3] Leng D X, Huang C, Xu K, et al. Experimental mechanics and numerical prediction on stress relaxation and unrecoverable damage characteristics of rubber materials [J]. Polymer Testing, 2021, 98: 107183.

[4] 马斌,郭乙良. 水工闸门振动研究现状及发展趋势[J]. 水利水运工程学报,2019(2):55-64. (Ma Bin, Guo Yiliang. Current research status and development trend of hydraulic gate vibration [J]. Hydro-Science and Engineering, 2019 (2): 55-64. (in Chinese))

[5] 王延召,徐国宾. 平面闸门爬行振动物理模型试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(5):37-44. (Wang Yanzhao, Xu Guobin. Experimental study on physical model of slip-stick vibration of plane gate [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52 (5): 37-44. (in Chinese))

[6] 彭思贤,赵兰浩,毛佳. 大宽高比弧形钢闸门流激振动数值分析[J]. 水利水电科技进展,2022,42(3):90-96. (Peng Sixian, Zhao Lanhao, Mao Jia. Numerical analysis of flow-induced vibration of a steel radial gate with large width to height ratio [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42 (3): 90-96. (in Chinese))

[7] 郭建斌,孙鹏,陈吉丰,等. 闸门受蚀构件的力学性能衰减特性[J]. 腐蚀与防护,2023,44(4):113-118. (Guo Jianbin, Sun Peng, Chen Jifeng, et al. Mechanical property attenuation characteristics of corroded components of gates [J]. Corrosion & Protection, 2023, 44 (4): 113-118. (in Chinese))

[8] 韩冬,任伟楠,周力,等. 中国抽水蓄能发展形势和展望[J]. 人民长江,2024,55(11):39-45. (Han Dong, Ren Weinan, Zhou Li, et al. Development status and outlook of pumped storage hydropower in China [J]. Yangtze River, 2024, 55 (11): 39-45. (in Chinese))

[9] 李晓超,周叶,李尚奇,等. 抽水蓄能电站在电网系统占比影响研究[J]. 人民长江,2025,56(增刊 1):284-289. (Li Xiaochao, Zhou Ye, Li Shangqi, et al. Research on the influence of installed capacity of pumped storage power station on the

proportion of power system[J]. Yangtze River,2025,56(S1):284-289. (in Chinese))

[10] 李斌,于富盛,郑旭,等. 高温下橡胶应力松弛行为对封隔器密封性能的影响研究[J]. 应用力学学报,2020,37(5):2153-2159. (Li Bin,Yu Fusheng,Zheng Xu,et al. Effects of rubber stress relaxation on packer sealing performance at high temperature [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics,2020,37(5):2153-2159. (in Chinese))

[11] 李昕龙,原霞,王玉帅,等. 高速冲击下金属橡胶动态力学特性研究[J]. 兵器装备工程学报,2024,45(3):265-273. (Li Xinlong,Yuan Xia,Wang Yushuai,et al. Research on dynamic mechanical properties of metal rubber under high-speed impact [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering,2024,45(3):265-273. (in Chinese))

[12] Zheng Xu,Li Bin,Fei Gensheng. Evaluation of sealing performance of a compression packer at high temperature[J]. Science Progress,2022,105(1):1-24.

[13] 田宇. 压力容器吊装孔密封结构的泄漏机理研究与仿真分析[D]. 武汉:华中科技大学,2021.

[14] 陈凯杰,邱中辉,陈蔚芳,等. 丁腈橡胶大应变率范围本构模型建立[J]. 热能动力工程,2024,39(8):183-192. (Chen Kaijie,Qiu Zhonghui,Chen Weifang,et al. Establishment of constitutive model of nitrile butadiene rubber over a wide strain rate range[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2024,39(8):183-192. (in Chinese))

[15] 宋义虎,李承宇. 橡胶复合材料的 Mullins 效应[J]. 工程塑料应用,2024,52(6):70-81. (Song Yihu,Li Chengyu. Mullins effect of rubber composites[J]. Engineering Plastics Applications,2024,52(6):70-81. (in Chinese))

[16] 王婷婷,吴尚,徐帅帅,等. 模拟研究橡胶的压缩永久变形[J]. 安徽大学学报(自然科学版),2024,48(6):70-77. (Wang Tingting,Wu Shang,Xu Shuashuai,et al. Simulated study of compression permanent deformation of rubber[J]. Journal of Anhui University (Natural Science Edition),2024,48(6):70-77. (in Chinese))

(收稿日期:2025-01-14 编辑:熊水斌)

+++++

(上接第110页)

[20] 黄茁,曹小欢. 大型水库局部藻华控制技术探讨[J]. 人民长江,2009,40(7):27-29. (Huang Zhuo,Cao Xiaohuan. Discussion on algae bloom control in local area of large reservoir[J]. Yangtze River,2009,40(7):27-29. (in Chinese))

[21] 张琪,缪荣丽,刘国祥,等. 淡水甲藻水华研究综述[J]. 水生生物学报,2012,36(2):352-360. (Zhang Qi,Miao Rongli,Liu Guoxiang,et al. The review of the studies on freshwater dinoflagellate bloom[J]. Acta Hydrobiologica Sinica,2012,36(2):352-360. (in Chinese))

[22] 邢领航,贺蔚,张健,等. 隔水幕分层取水研究进展及应用现状[J]. 长江科学院院报,2020,37(3):18-25. (Xing Linghang,He Wei,Zhang Jian,et al. Present research and application of temperature-control curtain in stratified reservoir[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2020,37(3):18-25. (in Chinese))

[23] 贺蔚. 深水水库隔水幕布改善出库水温效果及受力机理研究[D]. 天津:天津大学,2017.

[24] 王鸿洋,杨霞,马骏,等. 三峡水库汛期中小洪水调度对支流水华的影响[J]. 水力发电学报,2021,40(7):61-72. (Wang Hongyang,Yang Xia,Ma Jun,et al. Influence of regulating small and medium floods on algal blooms in tributaries of Three Gorges Reservoir in flood season[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2021,40(7):61-72. (in Chinese))

[25] 啜明英,马骏,刘德富,等. 整流幕对香溪河库湾水温特性影响数值模拟[J]. 长江流域资源与环境,2018,27(9):2101-2112. (Chuo Mingying,Ma Jun,Liu Defu,et al. Numerical simulation of the influence of curtain weirs on characteristics of water temperature in Xiangxi Bay[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2018,27(9):2101-2112. (in Chinese))

[26] 刘德富,黄钰铃,纪道斌,等. 三峡水库支流水华与生态调度[M]. 北京:中国水利水电出版社,2013.

[27] 刘流. 三峡水库支流库湾水温分层及其对水华的影响[D]. 宜昌:三峡大学,2012.

(收稿日期:2025-01-03 编辑:熊水斌)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.03.015

非均质岩溶含水层电阻率层析扫描探测试验研究

张 斌¹, 梁 越¹, 王平义¹, 代 磊¹, 张宏杰¹, 许 彬¹, 夏日风¹, 孙志伟²

(1. 重庆交通大学国家内河航道整治工程技术研究中心; 2. 中交长江建设发展集团有限公司)

摘要: 为探究电阻率层析扫描技术对非均质岩溶管道的刻画能力,开展了不同边界布置和激发源条件下的非均质岩溶含水层探测室内模型试验。试验结果表明:相对于绝缘边界的探测模式,采用受控的电势边界条件作为层析扫描探测的反演约束条件可有效降低估计参数的不确定性;随着电势边界数量的增加,电阻率层析扫描对非均质岩溶管道的刻画精度逐渐提高;相较于恒流激发源模式,恒压激发源模式具有更高的成像精度和反演确定性,但其估计的电导率偏高;基于连续线性估计算法的电阻率层析扫描技术可有效刻画岩溶含水层电导率分布的非均质特性。

关键词: 岩溶含水层; 非均质; 电阻率层析扫描; 反演分析; 室内模型试验

Experimental study on electrical resistivity tomography detection of heterogeneous karst aquifers

Zhang Bin¹, Liang Yue¹, Wang Pingyi¹, Dai Lei¹, Zhang Hongjie¹, Xu Bin¹, Xia Rifeng¹, Sun Zhiwei²

(1. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University;

2. CCCC Yangtze River Construction and Development Group Co., Ltd.)

Abstract: To investigate the capability of electrical resistivity tomography for characterizing heterogeneous karst conduits, laboratory model tests on the detection of heterogeneous karst aquifers were conducted under different boundary layouts and excitation source conditions. The experimental results indicate that compared to the observation mode with insulated boundaries, using controlled electrical potential boundary conditions as inversion constraints for electrical resistivity tomography detection can effectively reduce the uncertainty of estimated parameters. With the increase in the number of electrical potential boundaries, the characterization accuracy of electrical resistivity tomography for heterogeneous karst conduits gradually improves. Compared to the mode with constant current excitation sources, the mode with constant voltage excitation sources has higher imaging accuracy and inversion certainty, but the estimated conductivity is relatively high. The electrical resistivity tomography technique based on a successive linear estimation algorithm can effectively characterize the heterogeneous characteristics of the conductivity distribution in karst aquifers.

Key words: karst aquifer; heterogeneity; electrical resistivity tomography; inversion analysis; laboratory model test

我国是世界上岩溶分布面积最广的国家之一,达 340 万 km²,约占国土总面积的三分之一,我国的西南地区更是世界上连片分布面积最大的岩溶区^[1-2]。由于岩溶含水层包含大量分布极不均匀的溶孔、溶洞、溶蚀裂隙网络结构,其水力特性具有强烈的非均质性^[3-7],因此岩溶结构在工程建设中常被视为不良地质条件,裂隙溶洞的发育往往会导致地基承载力下降^[2,8]。此外,隧道、洞库等地下工程在施工过程中穿越岩溶发育地区时往往会面临较高的涌水突泥风险,给工程安全带来巨大的风险^[9-11]。随着我国西南地区水利、交通等基础设施建设的持续推进,对复杂岩溶含水层非均质特征的精确刻画技术需求也将日益迫切。

地球物理探测方法,如地震勘探、电磁勘探、电法勘探等,凭借其无损、高效、覆盖面广等优势,在岩溶含水层探测中得到了广泛应用^[12-13]。其中电阻率层析成像技术由于具有相对较低的成本和便捷可靠性等优势,被广泛用于岩溶等不良地质结构的探测刻画^[5,14-16]。胡富彭等^[4,17-18]通过数值模拟系统分析了电阻率层析成像典型装置的灵敏度和分辨率,并探究了伪影分布规律。刘征宇等^[19]通过构建形态约束,提高了电阻

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52379097);重庆市水利科技重点项目(CQSLK-2024005);重庆市建设科技计划项目(城科学 2025 第 2 号);广西科技计划项目(桂科 AA23062023)

作者简介: 张斌(1996—),男,博士研究生,主要从事含水层参数反演研究。E-mail:zbin196@163.com

通信作者: 梁越(1985—),男,教授,博士,主要从事水利工程灾害形成机理及防治研究。E-mail:liangyue2560@163.com

率层析成像对岩溶孤石异常地质边界或界面的识别能力。吴泽宇等^[15]使用电阻抗层析成像技术对比了 Tikhonov 正则化和稀疏正则化方法对地下溶洞的刻画识别效果。此外,电阻率层析成像技术也被应用于桩基、防渗墙、坝基等场地结构地下岩溶探测识别^[8-9,12,20]。

除了电性参数,渗透系数、储水系数等水力参数作为直接表征含水层渗透特性的指标,常被用作反演重构的目标参数来获得岩溶含水层空间结构特征^[11,13,21-22]。近年来,一些学者借鉴和发展了医学计算机断层成像概念,提出了一种适用于含水层空间参数测试的水力层析扫描方法^[22-24],其基本原理是通过观测含水层空间抽注水过程中的流量及水头响应,基于地下水渗流理论,通过连续线性估计(successive linear estimator, SLE)算法对含水层渗透系数和储水系数进行反演成像^[25]。Mohammadi 等^[22]通过室内砂箱试验,采用水力层析扫描技术探究了其对不同岩溶管道结构的刻画能力;Wang 等^[1]探究了水力层析扫描技术在隧道溶洞和裂隙中的识别能力。进一步地,Zha 等^[24]基于地质统计学理论,通过引入先验地质信息,利用水力层析扫描技术实现了野外大尺度裂隙场地的含水层刻画。然而,现场抽水试验的技术成本与时间成本相对较高,为此 Yeh 等^[26]进一步提出了基于 SLE 算法的电阻率层析扫描方法,Xu 等^[25]通过砂箱试验验证了其在刻画含水层非均质性中的可靠性,Liang 等^[27]进一步采用该方法成功刻画了黄土边坡的水分入渗过程。

然而,基于 SLE 算法的电阻率层析扫描技术对于具有强非均质性的岩溶含水层的刻画性能尚不明确,而现有电阻率层析成像方法多采用四极或三极观测装置,对电极利用效率不高,其反演算法多以正则化算法为主,难以准确表征空间电场响应与参数的非线性关系,对于准确刻画岩溶结构仍面临较大挑战。针对上述问题,本文采用基于 SLE 算法的层析扫描技术,开展不同边界和激发源条件下的岩溶含水层探测试验,旨在探索其对复杂岩溶含水层的刻画效果。

1 基于 SLE 算法的电阻率层析扫描理论

在传统电阻率层析成像反演中,通常需要通过装置系数计算视电阻率;随后基于初始模型进行正演模拟,预测视电阻率,并与实测数据对比,通过优化算法调整模型参数,最小化两者差异。通过反复迭代,直至收敛,最终得到地下介质的电阻率参数分布。而基于 SLE 算法的电阻率层析扫描方法无需计算装置系数,探测过程中只需监测空间激发源电极处的电势或电流强度,以及观测电极处的电势响应。该方法将电导率参数视为符合地质统计学理论的空间随机分布变量,迭代过程中通过灵敏度矩阵来描述电压与电导率之间的非线性关系^[27],并利用参数之间的协相关关系对后验参数进行更新,最终获得与观测响应差异最小的电导率估计场。对稳定的空间点源电场,SLE 算法具有如下的迭代格式^[26]:

$$\boldsymbol{u}_{\text{e},r+1} = \boldsymbol{u}_{\text{e},r} + \boldsymbol{w}_r^T (\boldsymbol{d}_{\text{obs}} - \boldsymbol{d}_r) \tag{1}$$

式中: $\boldsymbol{u}_{\text{e},r+1}$ 、 $\boldsymbol{u}_{\text{e},r}$ 分别为待估计的电导率参数向量在第 $r+1$ 、 r 次迭代的条件估计值,当 $r=0$ 时参数来源于先验资料,如已知的地质勘探信息、非均质特性等; $\boldsymbol{w}$ 为权重矩阵; $\boldsymbol{d}_{\text{obs}}$ 为观测电势响应值; $\boldsymbol{d}_r$ 为空间稳定点源电场模拟电势值。条件估计值 $\boldsymbol{u}_{\text{e}}$ 在每个迭代步骤由 $\boldsymbol{d}_{\text{obs}}$ 与 $\boldsymbol{d}_r$ 的差异进行调整,权重矩阵 $\boldsymbol{w}$ 计算公式为:

$$[\boldsymbol{R}_{\text{dd}} + \lambda \text{diag}(\boldsymbol{R}_{\text{dd}})] \boldsymbol{w} = \boldsymbol{R}_{\text{du}} \tag{2}$$

式中: $\boldsymbol{R}_{\text{dd}}$ 为观测电势之间的协方差矩阵; $\boldsymbol{R}_{\text{du}}$ 为观测电势与估计电导率参数之间的协方差矩阵; λ 为 Levenberg-Marquardt 算法动态乘子。协方差采用一阶随机分析结合由伴随方程计算的敏感度得到:

$$\boldsymbol{R}_{\text{dd},r} = \boldsymbol{J}_{\text{du},r} \boldsymbol{R}_{\text{uu},r} \boldsymbol{J}_{\text{du},r}^T \tag{3}$$

$$\boldsymbol{R}_{\text{du},r} = \boldsymbol{J}_{\text{du},r} \boldsymbol{R}_{\text{uu},r} \tag{4}$$

式中: $\boldsymbol{J}_{\text{du}}$ 为观测数据对电导率参数变化的敏感度矩阵; $\boldsymbol{R}_{\text{uu}}$ 为电导率的自相关协方差矩阵;下标 r 表示第 r 次迭代。协方差矩阵 $\boldsymbol{R}_{\text{dd}}$ 在 $r=0$ 时由先验地质信息给出,随后每次迭代按照下式逐步更新:

$$\boldsymbol{R}_{\text{uu},r+1} = \boldsymbol{R}_{\text{uu},r} - \boldsymbol{w}_r^T \boldsymbol{R}_{\text{du},r} \tag{5}$$

重复上述过程直至 SLE 迭代收敛。通常采用以下标准来评估收敛性:连续两次迭代估计电导率场的空间方差变化小于指定容差,或者连续两次迭代模拟电位的变化低于给定阈值^[25]。当满足任意一个标准时,认为估计是最优的,迭代过程终止。最终的估计精度可由观测电势与模拟电势的平均绝对误差、均方误差和决定系数(R^2)来评价。

2 岩溶含水层模型及试验设计

2.1 岩溶含水层模型设计

岩溶含水层在地下水流的长期作用下逐渐溶蚀形成微孔、裂隙、导管、溶洞,导致岩溶区水力参数分布不均,表现出较强的非均质性。在岩溶结构中,分支导管结构(BCP)是最常见的岩溶通道结构,在已知的岩溶管道结构中占比超过一半。基于上述背景,在长 120 cm、宽 20 cm、高 70 cm 的亚克力箱体中构建了包含典型分支导管结构的岩溶含水层,模型示意图如图 1(a)所示。含水层长宽高分别为 100、20、70 cm,其基岩采用 600 目石膏粉与水充分搅拌混合后浇筑凝固而成。岩溶管道采用直径约为 5 cm 的卵石填充而成,以确保充水后管道与基岩之间的导电性差异,同时保证含水层整体稳定、不塌陷变形。浇筑完成的含水层正面如图 1(b)所示,通道的平均迂曲度和通道密度比分别为 1.03 和 31.10%。用于电阻率层析扫描探测的 70 个铜电极均匀布置在含水层背面,电极直径为 5 mm,长度为 20 cm,电极间距均为 10 cm,位于最外侧的电极与含水层边缘间距均为 5 cm。对于穿越亚克力箱体的电极区段,采用热缩绝缘管包裹密封,以降低边界效应的影响。电极头部与导线相接后引出至探测系统主机,含水层背面电极及接线如图 1(c)所示。为了探究边界条件设置对刻画精度的影响,参考 Xu 等^[25,27]的研究,浇筑的过程中在含水层中部($z=10\text{ cm}$)的上下左右四周与亚克力板接触的界面处分别预置了 4 段导电铜线。对于超过边界部分的导线采用热缩绝缘管密封后引出备用。含水层两侧设置有长度为 10 cm 的水槽,含水层与水槽之间通过开孔的亚克力薄板隔开,以确保水流能顺利进入模拟岩溶管道。试验中,箱体两侧水位始终保持在与含水层顶部相同的高度。

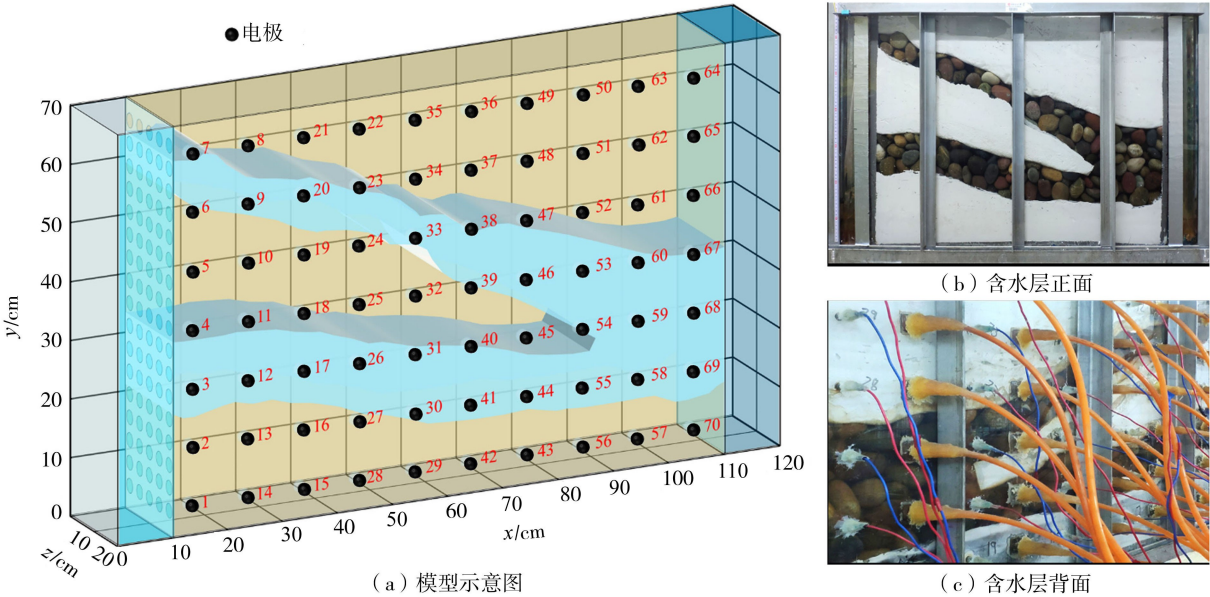


图 1 岩溶含水层物理模型
Fig.1 Karst aquifer physical model

2.2 试验设计与数据采集

与传统跨孔(井间)电阻率层析成像的四极探测模式不同,本文试验中的电阻率层析扫描采用类似于动点源的二极观测装置,探测过程中在选定的电极处施加激发源,同时将其余电极视为观测电极采集电势响应。通过持续观测不同位置激发源电极激励时的一系列电势响应数据,从而实现电阻率层析扫描快速探测。在本文试验中,根据不同的工况依次将含水层边界处引出的铜线连接至激发源的负极,以构建可控的电势边界。试验中激发源的数量固定为 8 个,分别位于编号为 9、13、23、27、44、48、58、62 的电极处。激发源的供电时长与断供时长固定为 1 s,占空比为 50%。为分别探究激发源和边界条件的影响,共设置了 8 组试验工况。其中工况 S1~S4 采用 0.01 A 的恒流电源作为激发源,工况 S5~S8 采用 24 V 的恒压电源作为激发源。具体地,对于设置为绝缘条件的边界,四周引出的导线悬空,而设置为固定电势的边界则将其引出的导线连接至激发源负极。各工况参数设置如表 1 所示。试验所需的电流和电势数据由中地装(重庆)地质仪器有限公司开发的 DUK-2B 电法仪改进而来的三维层析扫描成像探测设备采集得到。

2.3 数值模型

根据图 1 的含水层物理模型建立了如图 2 所示的电阻率层析扫描反演模型。模型长 100 cm、宽 70 cm，由边长为 2.5 cm 的正方形单元网格构成。整个模型包含 1 120 个单元网格和 1 189 个节点。模型内部位于节点处的白色圆圈为电极位置,其编号与物理模型含水层中的电极编号一致。已有研究表明,初始电导率分布、方差以及相关尺度等先验信息是层析扫描反演过程中的软约束,随着观测数据的引入,先验参数的约束作用会逐渐降低,故而先验信息的初始猜想值只需取值在合理范围内即可^[24,26]。鉴于此,反演模型的电导率初始分布设置为电导率 $\sigma=0.005\text{ S/m}$ 的均质场,方差为 $0.0001\text{ S}^2/\text{m}^2$,模型在 x 和 y 方向上的相关尺度分别为 20 cm 和 14 cm。为了避免反演过程中出现负值,初始电势设置为 0.01 V ^[21]。数值模型四周的边界条件设置与表 1 中各工况试验采用的边界条件一致。

3 试验结果与分析

3.1 不同工况刻画效果对比

将室内岩溶含水层中采用层析扫描探测模式得到的各工况数据代入层析扫描数值模型中,得到的反演结果如图 3 所示(图例中不同颜色代表的电导率值采用指数分布)。为了便于对比各工况的通道刻画效果,图 3 中采用黑色虚线对实际通道的轮廓进行了标注。总体上,无论采用恒流还是恒压激发源,在仅有右边界一个电势边界的工况 S1 与 S5 中,层析扫描的反演效果较差。在工况 S1 中,仅刻画出了上侧管道的小部分区域,整个岩溶通道轮廓模糊不清,难以辨别。工况 S5 中岩溶管道位置处则表现为断续的高电导率分布区域,虽然可以大致判别岩溶管道的位置,但仍难以达到识别岩溶管道轮廓走向的目的。随着所采用的电势边界数量的增加,层析扫描反演得到的电导率场中的岩溶管道轮廓的清晰度逐渐提高。而相较于采用恒压源的工况,基于恒流源探测数据反演得到的岩溶通道轮廓更为平滑。在工况 S1~S4 中,反演得到的电导率在

表 1 试验工况及参数设置

Table 1 Experimental conditions and parameter settings

工况	激发源	上边界	下边界	左边界	右边界
S1	恒流(0.01 A)	绝缘	绝缘	绝缘	电势
S2	恒流(0.01 A)	绝缘	绝缘	电势	电势
S3	恒流(0.01 A)	电势	绝缘	电势	电势
S4	恒流(0.01 A)	电势	电势	电势	电势
S5	恒压(24 V)	绝缘	绝缘	绝缘	电势
S6	恒压(24 V)	绝缘	绝缘	电势	电势
S7	恒压(24 V)	电势	绝缘	电势	电势
S8	恒压(24 V)	电势	电势	电势	电势

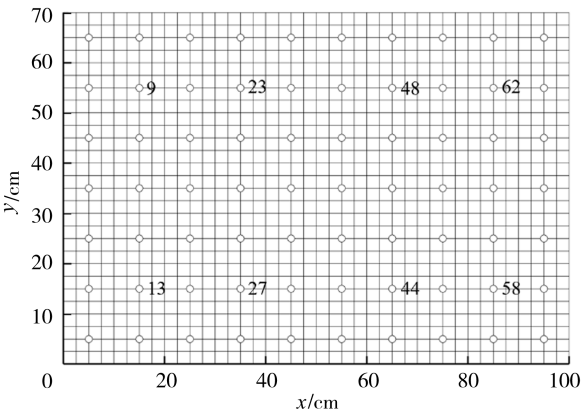


图 2 电阻率层析扫描反演模型

Fig.2 Electrical resistivity tomography inversion model

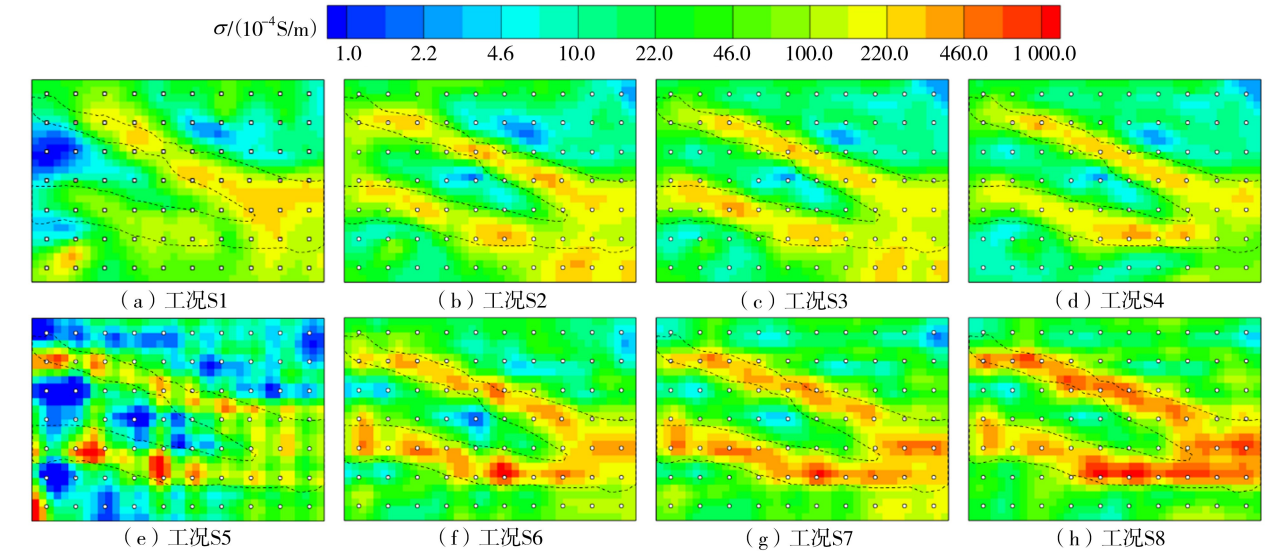


图 3 各工况的电导率反演结果

Fig.3 Inversion results of conductivity for different conditions

0.000 1~0.041 2 S/m 之间,而工况 S5~S8 在 0.000 1~0.141 7 S/m 之间。采用恒压源的试验工况中层析扫描反演得到的电导率水平要高于恒流源工况,且这种差异在具有高电导率的岩溶管道部位更为显著。此外,采用恒压源作为激发源时,电势边界数量为 2 的工况 S6 对岩溶管道的刻画性能优于 4 条边都为受控电势边界的工况 S4。

为了进一步对比各工况的反演效果,图 4 给出了基于层析扫描反演的电导率场正演计算得到的各电极位置处模拟电势与试验得到的观测电势散点图,其中蓝色散点代表电势点,黑色虚线为 45 度斜线,红色实线为观测电势与模拟电势散点的线性拟合趋势线;各工况的平均绝对误差、均方误差和 R^2 如表 2 所示。在工况 S1 中,模拟电势和观测电势的一致性最差,其 R^2 仅有 0.889,同时具有最大的截距和最小的斜率。在采用恒流源的工况中,随着所采用受控电势边界数量的增加, R^2 逐渐增大,由工况 S1 的 0.889 增大至工况 S4 的 0.981,同时其斜率由 0.812 增大至 0.972。而在采用恒压源的工况中,随着采用的电势边界数量的增加, R^2 由工况 S5 的 0.979 增大至工况 S7 的 0.993。观测电势与模拟电势拟合斜率在 0.951~0.966 之间,而截距由工况 S5 的 0.299 降低至工况 S8 的 0.001。在估计精度指标方面,平均绝对误差和均方误差最小的均为工况 S4,分别是 0.015 V 和 0.000 5 V²;而工况 S5 的平均绝对误差和均方误差均最大,分别为 0.606 V 和 0.656 3 V²。

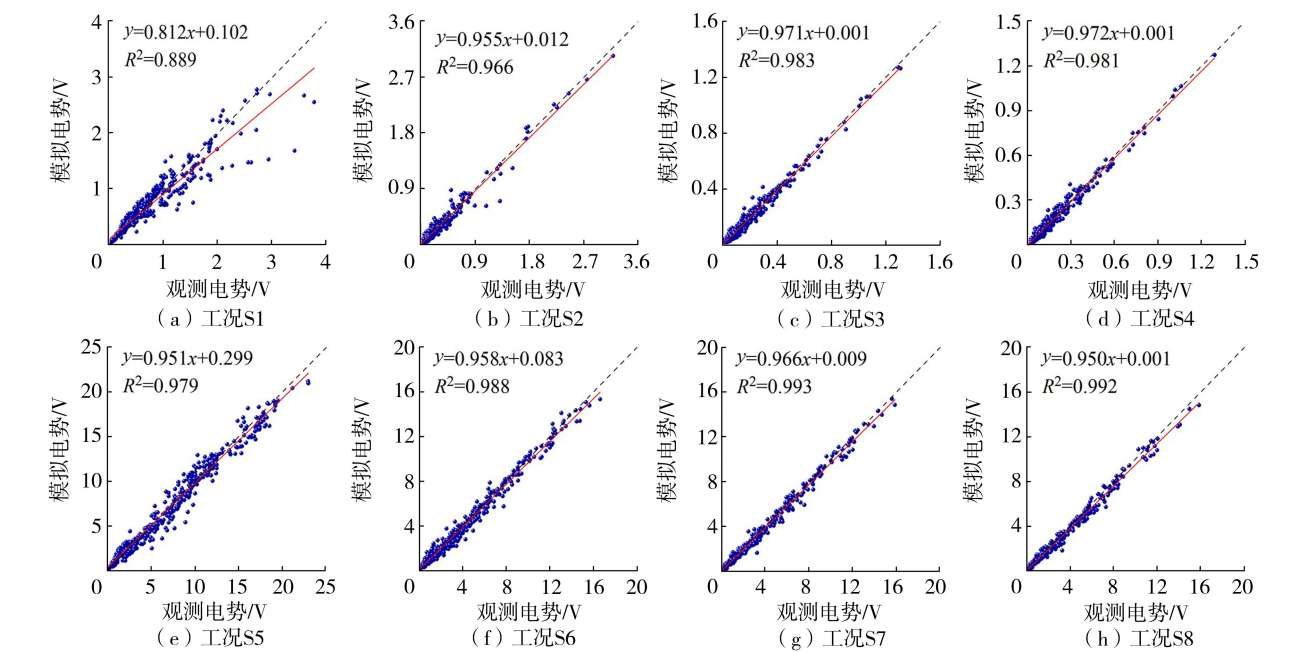


图 4 各工况的模拟电势与观测电势散点图

Fig. 4 Scatter plot of simulated and observed electrical potentials for different conditions

对比分析表明,采用恒压源的工况其绝对误差和均方误差水平均相对较高。此外,对比各工况的电势可发现,采用恒流源的工况电势要显著低于采用恒压源工况,这表明采用恒压源开展电阻率层析扫描时观测电势响应更为显著。此外,对于工况 S3、S4、S6、S7、S8,模拟电势与观测电势数据点总体分布在 45 度线附近,这表明来自 SLE 的估计值是最佳无偏的,即采用层析扫描技术反演得到的含水层电导率分布整体上与实际岩溶含水层是高度相似的。基于观测电势与模拟电势计算得到的反演精度评价指标分布规律与图 3 中的电导率反演结果基本一致。综合反演效果及指标分

表 2 各工况的电势反演精度评价指标			
Table 2 Evaluation indicators of electrical potential inversion accuracy for different conditions			
工况	平均绝对误差/V	均方误差/V ²	R ²
S1	0.115	0.041 2	0.889
S2	0.037	0.003 9	0.966
S3	0.016	0.000 6	0.983
S4	0.015	0.000 5	0.981
S5	0.606	0.656 3	0.979
S6	0.289	0.165 3	0.988
S7	0.192	0.091 0	0.993
S8	0.195	0.094 7	0.991

析表明,在采用两侧固定电势边界的条件下,电阻率层析扫描技术已基本可以实现对岩溶管道的高解析度刻画。

3.2 不同工况下的误差对比

为了深入对比分析各工况的反演误差与估计的不确定性,绘制了工况 S1~S8 估计电导率自然对数的残余方差(以下简称“残余方差”)如图 5 所示。在采用恒流源的工况 S1~S4 中,残余方差在 0.171~1.266 之间,模型四周存在较高的残余方差分布区域,特别是采用绝缘边界条件的边界周围,估计的电导率存在较高的不确定性。随着电势边界数量的增加,边界处带状的高残余方差区域逐渐转为团状的高不确定性区域。而在四周均为电势边界的工况 S4 中,高残余方差区域主要集中分布在模型的 4 个角落处。相比之下,采用恒压源工况的残余方差水平与工况 S1~S4 相比更低,整体上在 0.114~0.489 之间。在工况 S5 中,高不确定性区域主要集中在左侧区域的顶部和底部;在工况 S6~S8 中,随着电势边界数量的增加,模型整体的残余方差呈现出逐渐增大的趋势,高不确定性区域主要呈带状分布集中在模型 4 个角落的电极周围,而非边界区域。其原因可能是在采用电势边界后,位于边缘电极处的电势梯度增大,使得采集得到的电势与总体水平存在较大差异,进而导致估计的不确定性增大。此外,在工况 S5~S8 中,激发源所处的电极区域均具有较低的不确定性,表明增加刺激源数量有助于改善岩溶含水层的层析扫描刻画精度。

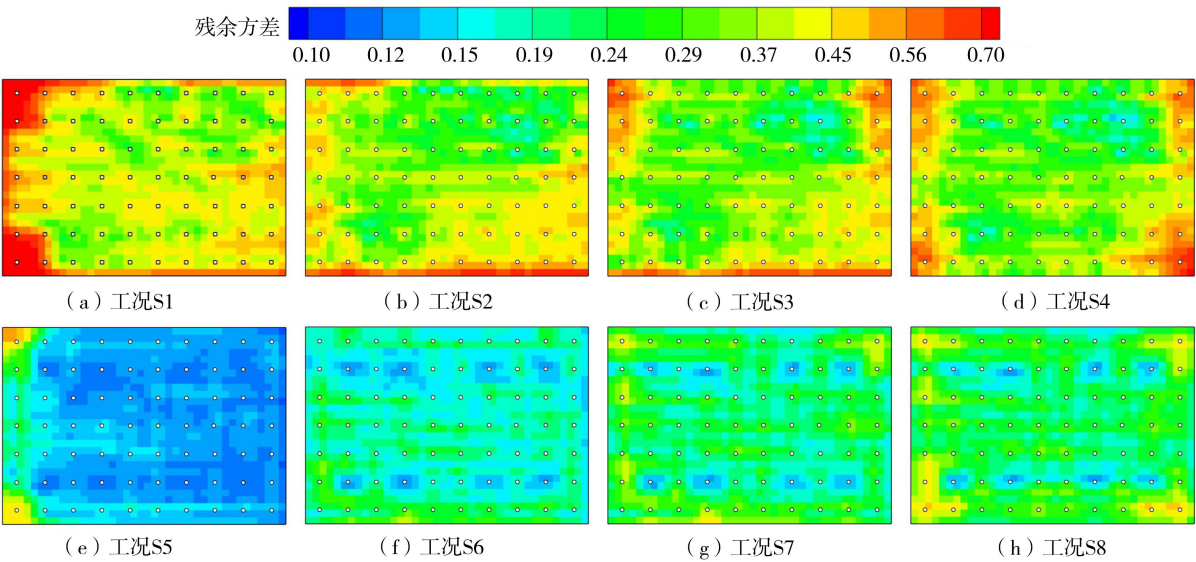


图 5 各工况迭代收敛时的残余方差分布

Fig. 5 Distribution of residual variance at iteration convergence for different conditions

图 6 给出了不同工况中估计电导率和残余方差的下四分位数(Q1)、均值和上四分位数(Q3)。随着电势边界数量的增加,采用恒流源工况的电导率均值由工况 S1 的 0.0073 S/m 增大至工况 S2 的 0.0083 S/m,而后逐渐降低至工况 S4 的 0.0066 S/m。工况 S1~S4 电导率的上四分位数变化规律与电导率均值类似,均呈现出先增大后减小的趋势,而其残余方差的下四分位数、均值和上四分位数均随着电势边界数量的增加而减小。采用恒压源工况的电导率均值则呈现出相反的趋势,由工况 S5 的 0.0076 S/m 增大至工况 8 的 0.0152 S/m。工况 S5~S8 中的其余统计指标均呈现出与电导率均值相同的增大趋势,其电导率和残余方差的变化规律与图 3 和图 5 一致。对比分析表明,与采用恒压源的工况相比,采用恒流源时层析扫描反演的残余方差相对更高,具有相对较大的不确定性,而采用恒压源的层析扫描探测模式则会得到相对较高的反演估计值。

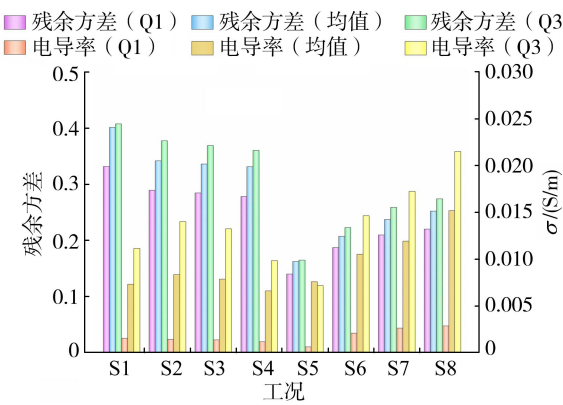


图 6 估计电导率和残余方差的特征统计值

Fig. 6 Characteristic statistical values of estimated conductivity and residual variance

4 结 论

- a. 基于 SLE 算法的电阻率层析扫描技术可以有效刻画岩溶含水层电导率分布的非均质特性。相对于绝缘边界,在探测数据采集和反演模型中采用受控的电势边界有助于降低反演的不确定性,且层析扫描成像的分辨率随着电势边界数量的增加而逐渐提高。
- b. 无论采用恒流源或是恒压源作为激发源,在模型两侧采用固定电势边界作为层析扫描反演约束条件已基本可以实现岩溶管道的刻画。与采用恒流源的探测模式相比,以恒压源作为激发源的探测模式反演得到的电导率偏大,但其对岩溶管道的刻画分辨率更高,同时具有较高的确定性。

参考文献:

[1] Wang Xintong,Xu Zhenhao,Hu Jie. A new attempt for the detection of potential water-bearing structures in tunnels via hydraulic tomography:the first numerical investigation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2023,135:105034.

[2] 王薇,邓小虎,金聪,等. 电磁波 CT 揭露重大工程岩溶发育特征:以某地铁岩溶勘察为例[J]. 科学技术与工程,2020,20(34):13977-13982. (Wang Wei,Deng Xiaohu,Jin Cong,et al. The characteristics of karst development in major projects revealed by electromagnetic wave computed tomography;a case for karst investigation of a metro[J]. Science Technology and Engineering,2020,20(34):13977-13982. (in Chinese))

[3] Ringel L M,Illman W A,Bayer P. Recent developments,challenges,and future research directions in tomographic characterization of fractured aquifers[J]. Journal of Hydrology,2024,631:130709.

[4] 胡富彭,欧元超,付茂如. 不同充填介质下的溶洞跨孔电阻率 CT 探查数值模拟[J]. 中国岩溶,2019,38(5):766-773. (Hu Fupeng,Ou Yuanchao,Fu Maoru. Study on numerical simulation of karst cross-hole resistivity CT exploration at cave with different filling media[J]. Carsologica Sinica,2019,38(5):766-773. (in Chinese))

[5] Zhang Jian,Sirieux C,Genty D,et al. Imaging hydrological dynamics in karst unsaturated zones by time-lapse electrical resistivity tomography[J]. Science of the Total Environment,2024,907:168037.

[6] 代方园,高扬,宿庆伟,等. 瞬变电磁与跨孔 CT 成像探测岩溶分布及形态特征的应用:以山东省济南地区为例[J]. 中国岩溶,2022,41(2):308-317. (Dai Fangyuan,Gao Yang,Su Qingwei,et al. Application of transient electromagnetism and cross-hole CT imaging to detect karst distribution and morphological characteristics;a case study of Jinan,Shandong Province[J]. Carsologica Sinica,2022,41(2):308-317. (in Chinese))

[7] 陶小虎,赵坚,陈孝兵,等. 岩溶含水层水流模型研究进展[J]. 水利水电科技进展,2014,34(2):76-84. (Tao Xiaohu,Zhao Jian,Chen Xiaobing,et al. Research progress in numerical models for water flow in karst aquifer[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2014,34(2):76-84. (in Chinese))

[8] 张邦,张场,周杰. 大直径桩端岩溶三维高精度成像方法[J]. 应用声学,2024,43(5):1060-1069. (Zhang Bang,Zhang Yang,Zhou Jie. Three dimensional high precision imaging method of karst below large diameter pile[J]. Journal of Applied Acoustics,2024,43(5):1060-1069. (in Chinese))

[9] Ma Lei,Sun Xiaofan,Qian Jiazhong,et al. Identification of high-permeability and water-rich zones in a fractured karst water source area based on the hydraulic tomography method[J]. Journal of Hydrology,2024,629:130648.

[10] 罗术,金俊俊,甄大勇,等. 基于数值模拟分析的弹性波 CT 岩溶探测能力研究与应用[J]. 工程地球物理学报,2023,20(3):330-336. (Luo Shu,Jin Junjun,Zhen Dayong,et al. Application of the elastic wave tomography in karst exploration[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics,2023,20(3):330-336. (in Chinese))

[11] 陈亚洲,董维红. 利用示踪试验时间-浓度曲线分析岩溶管道结构特征[J]. 水文地质工程地质,2022,49(1):41-47. (Chen Yazhou,Dong Weihong. Analysis of structural characteristics of karst conduit by time-concentration curve of tracer test[J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2022,49(1):41-47. (in Chinese))

[12] Torrese P. Investigating karst aquifers:using pseudo 3-D electrical resistivity tomography to identify major karst features[J]. Journal of Hydrology,2020,580:124257.

[13] 仇文岗,孟凡胜,何昌杰,等. 岩溶区空间变异性边坡建筑荷载作用下稳定分析[J]. 防灾减灾工程学报,2023,43(2):316-323. (Zhang Wengang,Meng Fansheng,He Changjie,et al. Stability analysis of slope with spatial variability in karst area under building load[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering,2023,43(2):316-323. (in Chinese))

[14] 陈亮,颜书法,万昱. 跨孔电法探测地下连续墙渗漏隐患的应用研究[J]. 岩土工程学报,2023,45(8):1605-1614. (Chen Liang,Yan Shufa,Wan Yu. Application of cross-hole electrical method to detection of the hidden leakage of diaphragm walls[J].

Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2023,45(8):1605-1614. (in Chinese))

[15] 吴泽宇,刘祚秋,汪利. 电阻抗成像探测地下溶洞的几种方法[J]. 中山大学学报(自然科学版),2022,61(2):100-105. (Wu Zeyu,Liu Zuoqiu,Wang Li. Electrical impedance imaging for cavity detection[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni,2022,61(2):100-105. (in Chinese))

[16] 刘晓,彭友文,袁志辉,等. 高密度电法在堤坝渗漏监测中的模拟及应用[J]. 水利水电科技进展,2021,41(5):71-75. (Liu Xiao,Peng Youwen,Yuan Zhihui,et al. Modeling and application of high-density electrical method in dam leakage monitoring [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2021,41(5):71-75. (in Chinese))

[17] 付强,李士强,闫孝姮,等. 三维跨孔电阻率 CT 观测电极序列优化及必然伪影分布规律总结[J]. 地球物理学进展,2023,38(5):2263-2275. (Fu Qiang,Li Shiqiang,Yan Xiaoheng,et al. Optimization of the observation electrode array and summary of the distribution law of inevitable artifacts for 3D cross-hole resistivity CT[J]. Progress in Geophysics,2023,38(5):2263-2275. (in Chinese))

[18] 蒋林城,肖宏跃,丁尚见,等. 跨孔电阻率法装置灵敏度分析及分辨率讨论[J]. 地球物理学进展,2018,33(2):815-822. (Jiang Lincheng,Xiao Hongyue,Ding Shangjian,et al. Analysis of sensitivity of arrays and resolution discussion of cross-hole resistivity method[J]. Progress in Geophysics,2018,33(2):815-822. (in Chinese))

[19] 刘征宇,庞永昊,王传武,等. 基于不完整边界先验信息的跨孔电阻率 CT 反演方法研究[J]. 岩土工程学报,2019,41(6):1124-1132. (Liu Zhengyu,Pang Yonghao,Wang Chuanwu,et al. Cross-hole resistivity inversion method constrained by prior information of incomplete boundary[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2019,41(6):1124-1132. (in Chinese))

[20] 张文俊,李术才,苏茂鑫,等. 基于井间电阻率成像的城市地铁溶洞探测方法[J]. 山东大学学报(工学版),2014,44(3):75-82. (Zhang Wenjun,Li Shucai,Su Maoxin,et al. Detection method of karst caves in city subway based on the cross-hole resistivity tomography[J]. Journal of Shandong University (Engineering science),2014,44(3):75-82. (in Chinese))

[21] 薛佩佩,文章,梁杏. 地质统计学在含水层参数空间变异研究中的应用进展与发展趋势[J]. 地质科技通报,2022,41(1):209-222. (Xue Peipei,Wen Zhang,Liang Xing. Application and development trend of geostatistics in the research of spatial variation of aquifer parameters[J]. Bulletin of Geological Science and Technology,2022,41(1):209-222. (in Chinese))

[22] Mohammadi Z,Illman W A. Detection of karst conduit patterns via hydraulic tomography;a synthetic inverse modeling study[J]. Journal of Hydrology,2019,572:131-147.

[23] 张海发,马士谦,梁越,等. 基于电阻率层析扫描的水下抛石体内部空洞探测[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(4):123-128. (Zhang Haifa,Ma Shiqian,Liang Yue,et al. Internal cavity detection of underwater riprap based on resistivity tomography[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(4):123-128. (in Chinese))

[24] Zha Yuanyuan,Yeh T C J,Illman W A,et al. Incorporating geologic information into hydraulic tomography;a general framework based on geostatistical approach[J]. Water Resources Research,2017,53(4):2850-2876.

[25] Xu Dong,Sun Ronglin,Yeh T C J,et al. Mapping soil layers using electrical resistivity tomography and validation;sandbox experiments[J]. Journal of Hydrology,2019,575:523-536.

[26] Yeh T C J,Liu Shuyun,Glass R J,et al. A geostatistically based inverse model for electrical resistivity surveys and its applications to vadose zone hydrology[J]. Water Resources Research,2002,38(12):1278.

[27] Liang Yue,Xia Rifeng,Yeh T C J,et al. Characterizing preferential infiltration of loess using geostatistical electrical resistivity tomography[J]. Engineering Geology,2024,340:107692.

(收稿日期:2025-02-17 编辑:熊水斌)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.03.016

拉应力作用下水工混凝土抗盐冻性能试验研究

詹韵泓¹, 钱文勋¹, 石勇刚², 葛津宇¹, 徐 菲¹

(1. 南京水利科学研究院材料结构研究所; 2. 湖北水总水利水电建设股份有限公司)

摘要: 为探明拉应力对水工混凝土抗盐冻性能的影响,在 0%、30%、50% 极限抗拉应力作用下开展了抗盐冻试验,分析了质量损失、动弹性模量衰减和氯离子扩散规律,并结合孔结构演化揭示了水工混凝土损伤机理。结果表明:拉应力显著加速了混凝土劣化的进程,在 50% 极限抗拉应力作用下,200 次冻融循环后低含气量混凝土试件的质量损失率增长了 21.7%,相对动弹性模量降低了 35.5%,氯离子扩散系数最高提升了 47.0%;拉应力诱导的微裂纹显著增大了孔径并加强了孔隙连通性;虽然提高含气量可减缓盐冻破坏,但高含气量混凝土中有害孔占比较高,叠加拉应力作用可能影响混凝土的耐久性。

关键词: 水工混凝土;拉应力;抗冻性能;离子侵蚀;孔结构;耐久性

Experimental study on salt-freeze resistance of hydraulic concrete under tensile stress

Zhan Yunhong¹, Qian Wenxun¹, Shi Yonggang², Ge Jinyu¹, Xu Fei¹

(1. Materials & Structural Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute;
2. Hubei Shuizong Water Resources & Hydropower Construction Co., Limited)

Abstract: To investigate the influence of tensile stress on the salt-freeze resistance of hydraulic concrete, salt-freeze tests were conducted under ultimate tensile stresses of 0%, 30%, and 50%. The mass loss, attenuation of dynamic elastic modulus, and chloride ion diffusion laws were analyzed, and the damage mechanism was revealed in combination with pore structure evolution. The results indicate that tensile stress significantly accelerates the deterioration process of concrete. Under ultimate tensile stress of 50%, after 200 freeze-thaw cycles, the mass loss rate of low-air-content concrete specimens increases by 21.7%; the relative dynamic elastic modulus decreases by 35.5%, and the chloride ion diffusion coefficient increases by up to 47.0%. Microcracks induced by tensile stress significantly enlarge the pore size and enhance the pore connectivity. Although increasing the air content can mitigate salt-freeze damage, the proportion of harmful pores in high-air-content concrete is relatively high, and the superimposed effect of tensile stress may affect the durability of concrete.

Key words: hydraulic concrete; tensile stress; frost resistance; ion corrosion; pore structure; durability

我国北方盐碱地区的水工混凝土结构长期服役于盐类侵蚀、频繁冻融与持续荷载等多因素耦合的严苛环境中,尤其闸门结构、溢洪道工作桥、边墩接头等水工建筑物的受约束部位,由于长期处于受拉状态,显著加剧了混凝土结构耐久性失效的风险^[1-4]。

针对盐蚀、冻融和持续荷载对水工混凝土的耦合劣化机制研究多关注双因素组合作用,并已形成了相对成熟的理论体系:冻融-盐蚀耦合作用下,盐分在结冰-融化循环中参与结晶析出与相变反应,诱发反复的结晶膨胀与溶解破坏,易导致混凝土内部微裂纹的萌生与扩展,特别是在孔隙结构疏松区域,显著加速水泥基体结构的劣化^[5-6];冻融-荷载耦合作用下,外加拉应力显著削弱混凝土抵抗冰胀破坏的能力,促使微裂纹形成与贯通,同时冰压作用引发的裂缝扩展效应被进一步强化,加速了结构力学性能与耐久性的同步衰退,外加压应力则在一定程度上可缓解冻融损伤^[7-8];盐蚀-荷载耦合作用下,拉应力显著提升了氯离子的渗透性与表层富集程度,使腐蚀介质更易在应力集中区域累积,叠加微裂纹对传输通道的放大效应,进一步加剧界面反应与离子迁移过程,提高了混凝土劣化速率^[9-10]。

对于冻融-盐蚀-荷载三因素的耦合劣化作用,曹银等^[11]研究发现,在弯拉荷载-冻融循环-氯盐侵蚀耦合

基金项目: 国家自然科学基金项目(52379130);南京水利科学研究院研究生学位论文创新基金项目(Yy425004)

作者简介: 詹韵泓(2000—),女,硕士研究生,主要从事水工材料研究。E-mail:18850608618@163.com

通信作者: 钱文勋(1977—),男,正高级工程师,博士,主要从事水工材料研究。E-mail:wxqian@nhri.cn

作用下,混凝土结构主要表现为表层剥落型破坏,弯拉荷载明显加剧了结构的劣化,甚至诱发结构出现脆性断裂;张云清等^[12]则通过受弯构件在氯盐环境中冻融循环后的静载试验,系统揭示了盐冻损伤对构件弯曲刚度与极限承载力的显著影响。Yang 等^[13]进一步指出,在冻融-盐蚀-疲劳荷载的联合作用下,混凝土内部微裂缝的贯通显著促进了氯离子迁移,并伴随水化产物减少及盐类结晶生成,导致动弹性模量衰减、质量损失加剧。然而,现有三因素耦合的研究主要见于三因素耦合作用下混凝土宏观服役性能的衰减响应规律,并且多采用单一冻融介质或简化荷载边界条件,在微观劣化机制方面,鲜有关于微裂纹演化、孔隙结构劣化与宏观力学性能衰退之间的定量耦合关系的研究成果,难以满足复杂环境下水工混凝土耐久性预测的需求。

为此,本文以连云港新沂河入海口枢纽工程闸门张拉边界结构的水工混凝土为研究对象,通过构建受控拉应力加载体系,并引入模拟沿海与盐碱地区服役环境的氯盐-硫酸盐复合冻融介质,系统开展 0%、30%、50% 极限抗拉应力作用下的冻融循环试验。通过质量损失率、动弹性模量与氯离子扩散系数的同步测试,并结合硬化气孔分析与汞孔径分析等试验,探索拉应力-盐冻耦合作用下混凝土微裂纹演化、孔隙结构劣化与力学性能衰退之间的耦合路径,并建立了宏观性能与微观结构参数之间的半定量关联关系。此外,本文还进一步考察了不同含气量条件下混凝土在拉应力-盐冻耦合作用中的性能响应差异,揭示含气量对孔隙演化与耐久性退化的调控机制。通过深入阐明拉应力-盐冻耦合作用下的混凝土劣化机制,可为水工混凝土结构的抗盐冻性能评估与耐久服役年限预测提供重要的试验依据。

1 试验方法

1.1 试验材料及配合比

- a. 水泥:选用 P · O 42.5 普通硅酸盐水泥,化学成分中, SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO、MgO、SO₃ 的质量分数分别为 24.99%、8.93%、4.97%、51.07%、3.28% 和 2.22%,烧失量(950℃)为 4.54%。
- b. 粉煤灰:符合 II 级灰标准,含水率为 0.2%,密度为 2.31 g/cm³,细度为 10.8%,需水量比为 96%,烧失量为 1.6%,活性指数为 74.1%。
- c. 矿粉:符合 S95 级标准,含水率为 0.07%,密度为 2.91 g/cm³,比表面积为 436 m²/kg,流动度比为 100%,7、28 d 活性指数分别为 78% 和 105%。
- d. 其他材料:细骨料采用河砂,细度模数为 2.3;粗骨料采用二级配人工碎石,粒径分别为 5~16 mm 的小石和 16~31.5 mm 的中石;拌合水为南京当地自来水;减水剂采用聚羧酸系高性能减水剂,减水率为 27.8%,含气量为 3.7%;引气剂采用松香类引气剂,减水率为 6.8%,含气量为 5.5%。
- e. 配合比:由于同配合比混凝土强度随含气量的增加而降低,为降低抗压强度对试验的影响,对不同含气量的混凝土水灰比进行微调,混凝土配合比见表 1。新拌混凝土的工作性能及标准养护 28 d 后试件的抗压强度和极限拉伸强度试验结果见表 2。

表 1 混凝土样品配合比

Table 1 Mixture proportions of concrete samples

试样 编号	原材料用量/(kg/m ³)							
	水	水泥	矿粉	粉煤灰	砂	小石	中石	减水剂
X-1	158	236	119	40	693	465	696	5.93
X-2	155	239	120	40	671	463	693	5.97
X-3	152	240	120	40	632	462	692	6.00

表 2 混凝土工作性能及 28 d 抗拉压强度

Table 2 Workability and 28 d tensile and compressive strengths of concrete

试样编号	坍落度/mm	含气量/%	抗压强度/MPa	极限拉伸强度/MPa
X-1	215	3.6	47.9	4.53
X-2	210	5.1	41.5	4.79
X-3	210	6.2	38.2	4.31

1.2 拉应力加载装置及拉应力试验设计

为分析拉应力与氯盐-硫酸盐耦合作用下的混凝土抗冻性能,设置了如图 1 所示的拉应力加载装置,其具体实现方法为:混凝土冻融试件成型制作时,在试件两端预埋螺纹钢筋,通过自制的应力架张拉钢筋与螺

栓控制拉应力的加载数值。

根据混凝土结构实际服役状态及裂缝发展临界值设定拉力荷载分别为 0%、30%、50%的极限抗拉应力,其中 0%的工况作为对照组,代表材料在无外力影响下的抗盐冻性能;30%极限抗拉应力模拟混凝土结构在长期服役阶段所承受的典型工作应力水平,已有研究^[14]指出,30%左右的极限抗拉应力为拉应力-裂缝发展区的上限,混凝土尚处于未开裂阶段;50%极限抗拉应力接近材料裂缝初始扩展的临界状态,属于应力敏感区,能够表征混凝土耐久性能的劣化临界状态,该应力水平通常用于研究结构在边缘服役状态下的性能演化。

施加 30%的极限抗拉应力时,X-1、X-2、X-3 试件的轴拉强度分别为 1.36、1.44、1.29 MPa,施加 50%的极限抗拉应力时分别为 2.27、2.40、2.16 MPa。

为维持拉应力稳定性,试件端部预埋的螺纹钢筋与自制钢架加载装置紧固连接,使用万能试验机加载完成后,拴紧高强螺栓。在 200 次冻融循环试验周期内,试样与加载钢架作为整体被一同放入冻融循环试验机中,试件两端始终与刚性拉杆保持固定连接。每 50 个循环取样检测,检查并加强螺栓的锚固后再进行下一轮冻融循环试验。

冻融介质采用模拟海洋和盐碱地区环境的 3.5%氯化钠与 5%硫酸镁的混合溶液。

1.3 质量损失率和相对动弹性模量分析

按照 SL/T 352—2020《水工混凝土试验规程》中快冻法测定混凝土的抗冻性能。每冻融循环 50 次后取出试件,测试其质量和动弹性模量,并计算质量损失率和相对动弹性模量。

1.4 氯离子侵蚀试验

参照 SL/T 352—2020《水工混凝土试验规程》,对样品中水溶性氯离子含量进行测试。每组有一个试件除了一个 100 mm×400 mm 的侧面供外界盐离子侵蚀外,其余 5 个表面均用环氧树脂封住。在经历 200 次冻融循环试验后,取距离混凝土表面 10、20、30、40、50 mm 处的混凝土砂浆粉末样品,滴定 AgNO₃ 溶液测定混凝土砂浆中水溶性氯离子含量。

1.5 硬化混凝土气孔结构分析

将混凝土试件切割为 100 mm×100 mm×15 mm 的薄片,对截面处进行精磨、研磨以及抛光后,用黑墨水涂黑观测面,待干燥后用 5 000 目白色硅微粉填充气泡。处理好的试样参照 ASTM C457 *Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete*,采用 RapidAir-457 硬化混凝土气孔分析仪进行硬化混凝土气孔结构参数测定,测定硬化混凝土中气泡的数量、大小和间距,计算混凝土的含气量、气泡比表面积以及气泡间距系数等参数。

1.6 压汞试验

压汞试验(MIP)被广泛用来测定水泥基材料的孔径参数,例如孔隙率和孔径分布等。在试件冻融循环 200 次后破碎至 5 mm 碎块进行压汞试验,压汞试验中的压力由下式转换为等效孔径:

$$D = - \frac{2\gamma \cos\theta}{P}$$

(1)

式中: D 为等效孔径,μm; γ 为表面张力,mN/m; θ 为汞与孔隙表面的润湿角,(°); P 为毛细管压力,MPa。

采用 Quantachrome 公司生产的 PoroMaster-GT-60 压汞仪测定混凝土中的砂浆孔结构参数,其中低压范围 1.5~350 kPa,高压范围 140~420 MPa,可测量直径在 0.003 5~400 μm 范围内变化的孔容。试验结果参数包括总孔隙率、最可几孔径等。

2 结果与分析

2.1 质量损失率和相对动弹性模量

冻融循环后质量损失率的变化规律见图 2,可见拉应力加剧了混凝土的质量损失,其影响随拉应力的提

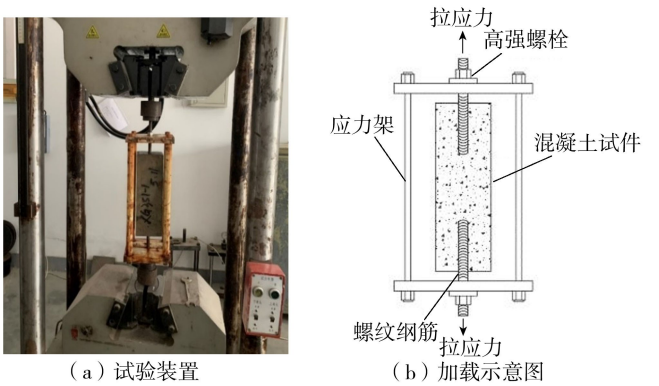


图 1 拉应力加载装置
Fig. 1 Tensile stress loading device

高而增强。在 200 次冻融循环后,含气量 3.6% 的 X-1 试件在 50% 极限抗拉应力作用下质量损失率高达 2.02%,显著高于未受拉应力作用试件的 1.66%,其质量损失率增长了 21.7%;含气量为 6.2% 的 X-3 试件在 50% 极限抗拉应力作用下的质量损失率为 1.53%,而未受拉应力作用的试件为 1.23%,其质量损失率增长了 24.4%。拉应力可能通过双重机制加速损伤进程:一是在拉应力耦合盐冻作用下,表层砂浆的化学侵蚀与结晶压力增大,导致冻融的剥落速率提升;二是持续的拉应力作用扩展了水进入混凝土内部的通道,放大孔隙水的结冰应力,导致混凝土内部质量损失随着拉应力水平的提高而增长。

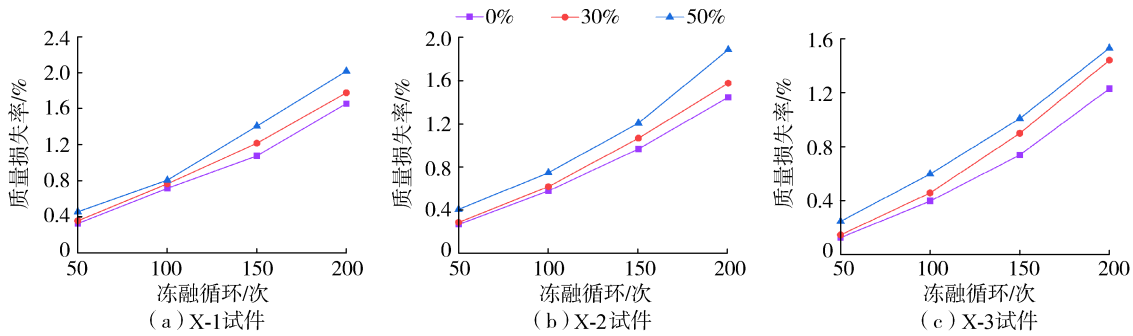


图2 不同极限抗拉应力作用下的质量损失率

Fig. 2 Mass loss rate under different ultimate tensile stresses

冻融循环后相对动弹性模量的变化规律见图 3,在拉应力作用下,混凝土试件的相对动弹性模量在冻融循环 100 次后明显加快。当冻融循环次数到达 200 次时,未受拉应力的 X-1、X-2、X-3 试件相对动弹性模量分别为 84.8%、86.1%、91.5%,而在 50% 极限抗拉应力作用下,其相对动弹性模量降低至 54.7%、59.8%、64.8%,分别降低了 35.5%、30.5%、29.2%,含气量较低的 X-1 和 X-2 试件达到了破坏的标准。产生上述现象的原因,是拉应力使混凝土内部产生微裂纹并使孔隙逐渐贯通,从而削弱了混凝土骨架结构的承载能力。同时,在这种状态下,孔隙压力也更容易引发应力集中现象,加速动弹性模量的衰减。提高含气量可有效分散应力集中和阻断裂缝扩展路径,在一定程度上缓解拉应力对混凝土力学性能造成的破坏,使混凝土在冻融循环和拉应力的多重作用下,保持更为稳定的力学性能。

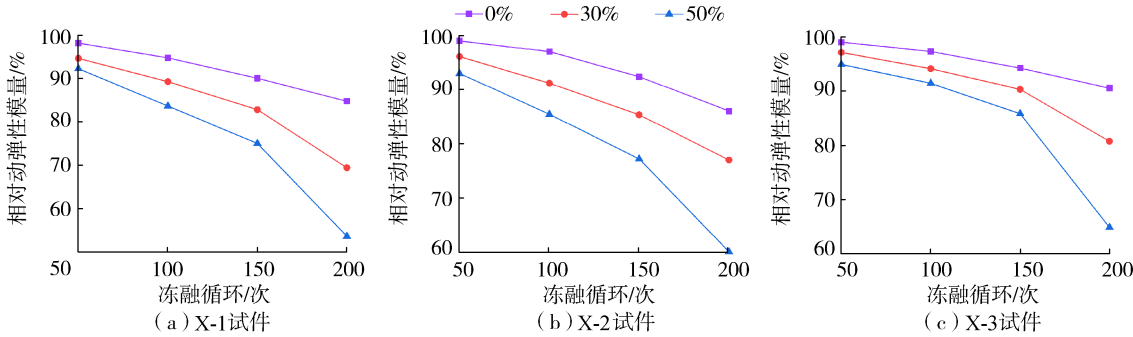


图3 不同极限抗拉应力作用下的相对动弹性模量

Fig. 3 Relative dynamic elastic modulus under different ultimate tensile stresses

2.2 氯离子侵蚀试验

2.2.1 水溶性氯离子含量测试

在经过 200 次冻融循环后,取距离混凝土表面 10、20、30、40、50 mm 处混凝土砂浆粉末样品进行水溶性氯离子含量(质量分数)试验,试验结果如图 4 所示。由图 4 可见,经过 200 次冻融循环后,拉应力显著加剧了混凝土中氯离子的渗透深度与累积。无拉应力作用时,氯离子富集于混凝土表层 0~10 mm 区域,该深度 X-1 试件氯离子含量为 0.289%,而在深度 40~50 mm 时骤降至 0.003%;然而,在施加 50% 的极限抗拉应力后,表层 0~10 mm 区域氯离子含量达到了 0.409%,且渗透深度超过 40 mm 时含量仍然有 0.009%。

拉应力的作用在 20~30 mm 关键层尤为显著,对混凝土的材料性能影响深远。在该深度区域 X-1 试件的氯离子含量从无拉应力作用时的 0.015% 增加至 50% 极限抗拉应力作用下的 0.062%,增长幅度超过 313%。这表明拉应力诱导的微裂纹有效缩短了离子的扩散路径,为氯离子提供了快速渗透通道。

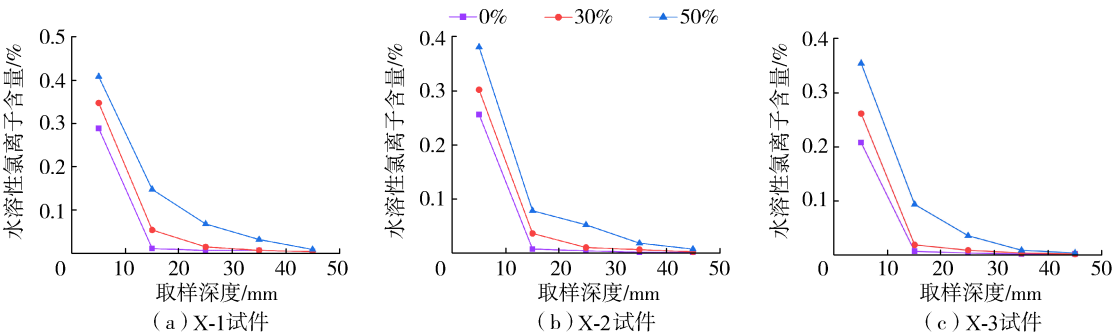


图 4 不同极限抗拉应力作用下的水溶性氯离子含量

Fig. 4 Water-soluble chloride ion content under different ultimate tensile stresses

尽管提高含气量对氯离子扩散有抑制作用,但拉应力对混凝土抗离子侵蚀性能的削弱依然突出。以 X-3 试件为例,在 50%极限抗拉应力作用下,深度为 40~50 mm 处的氯离子含量为 0.005%,相较于 X-1 降低 44.4%。然而,与 X-3 试件无拉应力作用时相比,同深度 40~50 mm 处的氯离子含量仍增长 1.5 倍,说明拉应力对钢筋混凝土耐久性的破坏性影响超过提高含气量所带来的防护效果。

2.2.2 氯离子扩散系数

在进行冻融循环试验时,混凝土试件处于被浸没于试件盒内的状态,此时外界的氯离子在混凝土内部的迁移方式,主要还是以扩散作用的形式呈现,这一扩散过程可以运用 Fick 第二定律来描述^[15]。罗大明等^[16-17]研究表明,混凝土试件承受拉应力荷载时,需采用氯离子扩散系数经验公式进行计算:

$$K_1 = K_2 + A_1\sigma + A_2\sigma^2 \tag{2}$$

式中: K_1 、 K_2 分别为有、无拉应力作用下的氯离子有效扩散系数; σ 为名义拉应力; A_1 、 A_2 为经验系数,取 -0.012 50 和 0.208 20。

试验中每 50 次冻融循环时间约为 8 d,因此 200 次冻融循环的测试时间为 32 d,根据前期测得的水溶性氯离子含量,计算得到在 0%、30%、50% 极限抗拉应力作用下, X-1 试件的氯离子扩散系数分别为 2.225×10^{-11} 、 2.293×10^{-11} 、 3.271×10^{-11} m^2/s , X-2 试件分别为 2.091×10^{-11} 、 2.521×10^{-11} 、 3.208×10^{-11} m^2/s , X-3 试件分别为 2.076×10^{-11} 、 2.408×10^{-11} 、 3.059×10^{-11} m^2/s 。

相同配合比条件下,混凝土的氯离子扩散系数随拉应力水平的提高而增大,低含气量混凝土的扩散系数增幅更为明显。例如, X-1 试件在 50%极限抗拉应力作用下,扩散系数达到 3.271×10^{-11} m^2/s ,较无拉应力作用时增大了 47.0%。相比之下,高含气量混凝土因内部存在大量微气孔,初始氯离子扩散系数较低,随拉应力升高的幅度较小。在同等条件下, X-3 试件的扩散系数为 3.059×10^{-11} m^2/s ,为 X-1 的 93.5%。这一现象表明,拉应力使混凝土内部产生的裂纹和孔隙为氯离子提供了迁移通道;而高含气量混凝土的气孔结构可在一定程度上缓冲拉应力引发的劣化现象。

2.3 硬化混凝土气孔参数分析

依据 SL/T 352—2020《水工混凝土试验规程》,采用 RapidAir-457 硬化混凝土气孔分析仪对经历 200 次冻融循环后的低含气量试件 X-1 和高含气量试件 X-3 进行硬化气孔参数测试,结果见表 3。

表 3 硬化混凝土气孔参数测试结果

Table 3 Test results of pore parameters of hardened concrete

试件编号	极限抗拉应力水平/%	含气量/%	气泡平均弦长/mm	气泡比表面积/(mm^2/mm^3)	气泡间距系数/mm
X-1	0	5.0	126.7	26.675	0.188
	30	5.1	128.9	26.720	0.179
	50	5.6	143.2	29.460	0.172
X-3	0	7.2	182.2	27.835	0.142
	30	7.5	189.8	31.105	0.126
	50	7.8	198.7	31.750	0.122

由表 3 可见,拉应力对混凝土气孔参数影响显著,主要体现为含气量增加、气泡平均弦长变长、气泡比表面积增大与气泡间距系数减小。其原因是拉应力作用促使混凝土内部产生更多微裂纹和微孔隙,增加了气

泡总表面积;同时,新产生的微孔隙填充于气泡周围,使气泡间距系数减小^[18]。

根据静水压理论,混凝土在冰冻过程中由于孔隙液结冰体积膨胀,迫使未结冰的孔溶液克服黏滞阻力向外迁移渗透,从而形成静水压力对混凝土造成应力破坏^[19]。因此,静水压力随孔隙液流程长度的增加而增大,当静水压力超过混凝土的抗拉强度时即会对混凝土造成破坏。通过引气剂引入气泡后,混凝土中气泡间距系数减小,这些相互独立且封闭的气泡缩短了未结冰孔隙液的迁移渗透流程,因此产生的静水压力变小,从而提高混凝土的抗冻性能。但在拉应力的作用下,气泡间距系数的减小可能伴随着混凝土内部微裂纹的产生扩展和大孔径气泡数量的增加,耦合特殊的盐碱地环境,反而降低了材料的耐久性。

2.4 压汞试验

混凝土孔结构特征是其抗冻耐久性的关键控制因素。随着拉应力水平和含气量的提升,混凝土试件的孔隙率也逐步提升,在 0%、30%、50% 极限抗拉应力作用下, X-1 试件孔隙率分别为 8.61%、10.83%、13.20%, X-3 试件分别为 9.65%、11.64%、14.99%。

根据孔径(d)对耐久性的影响机制,Zhang 等^[20]按照孔径将孔隙划分为无害孔($<20\text{ nm}$)、少害孔($20\sim <50\text{ nm}$)、有害孔($50\sim <200\text{ nm}$)和多害孔($\geq 200\text{ nm}$),其中有害孔与多害孔会显著加剧混凝土试件的冻融损伤。X-1 和 X-3 试件经 200 次冻融循环后在不同拉应力作用下的孔隙分布特征见图 5。随着拉应力水平从 0% 提升至极限抗拉应力的 50%,混凝土试件大于 50 nm 孔径的孔隙占比显著增加。此外,各试件的最可几孔径随拉应力水平的提高而增大,X-1 试件在 0%、30%、50% 极限抗拉应力作用下的最可几孔径分别为 9.95、20.12、78.34 nm, X-3 试件分别为 11.23、67.56、182.35 nm,表明拉应力驱动微小孔隙的形成,孔径分布向更大尺寸方向发展,增加有害孔和多害孔的占比。

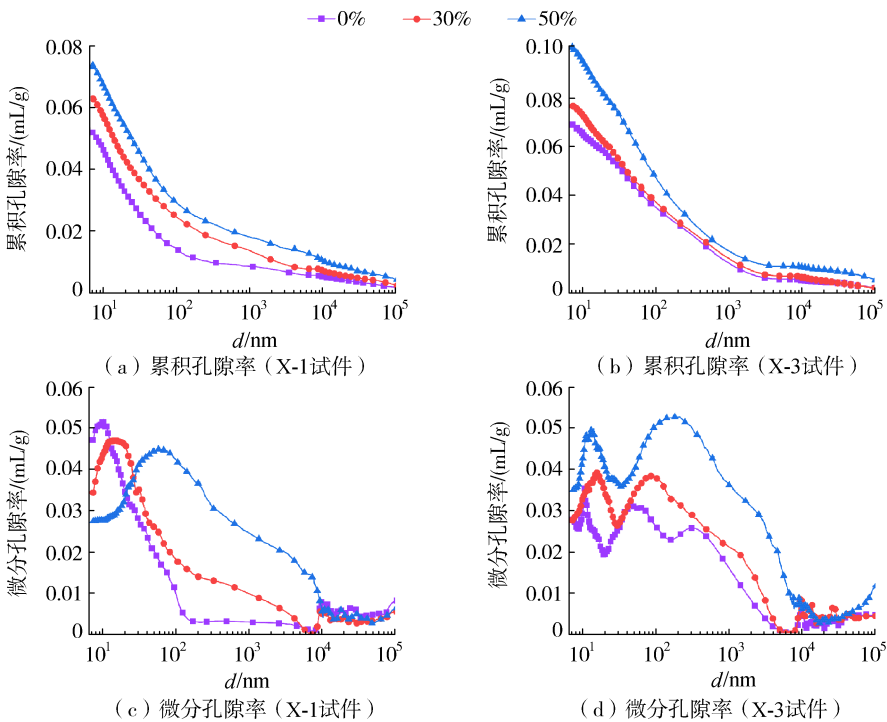


图 5 不同极限抗拉应力作用下的孔结构测试结果

Fig. 5 Pore structure test results under different ultimate tensile stresses

由表 4 可见,高含气量混凝土中有害孔和多害孔占比相对偏高,但其抗冻性能并未出现显著下降。含气量高的混凝土含有大量孔径在 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以上的微小气孔,在压汞试验中被计入多害孔的范畴。这些气孔的存在一定程度上优化了孔径分布,有利于混凝土抗冻性能的提升,为冻融循环时产生的孔隙压力提供了缓冲空间,吸收部分冻胀压力,从而降低混凝土的微观破坏风险。然而,拉应力的施加显著改变了这一趋势,其通过加剧孔隙的连通性与融合进程,增大了混凝土的总孔隙率和最可几孔径,孔结构的劣化降低了混凝土的抗离子渗透能力和抗冻性能。

表 4 不同极限抗拉应力作用下的孔径占比

Table 4 Proportion of pore sizes under different ultimate tensile stresses

试件编号	极限抗拉应力 水平/%	不同孔径的占比/%			
		<20 nm	20~<50 nm	50~<200 nm	≥200 nm
X-1	0	43.3	24.7	15.1	16.9
	30	41.7	24.4	15.0	18.9
	50	34.9	27.2	18.0	19.9
X-2	0	32.9	18.6	20.0	28.5
	30	31.0	17.8	19.1	32.1
	50	26.1	13.2	23.5	37.2

2.5 混凝土宏观关联分析

混凝土的宏观力学性能退化与其微观孔结构变化存在密切的耦合关系。质量损失率随孔隙率升高而增大,孔隙率越高,外界水分越易于进入混凝土内部,在冻融作用下产生更高的冻胀压力,加剧表层材料的剥落破坏。当超过 50 nm 的孔径占比增大时,质量损失趋势更为显著,表明较大孔隙对混凝土抗冻性能影响更为关键。

动弹性模量的损失也与孔结构参数密切相关。气泡间距系数减小使孔隙更密集,最可几孔径和平均孔径的增大则显著削弱孔隙骨架结构的承载能力,导致动弹性模量加速劣化;同时,多害孔占比升高进一步加剧了动弹性模量的劣化。拉应力的引入显著加剧了这一趋势:一方面促进了微裂纹的产生与贯通,另一方面扩大孔径增强孔隙的连通性,从而进一步降低了混凝土的结构完整性与力学性能。

为明确混凝土宏观性能与微观孔结构指标间的关系,本文对相对动弹性模量损失率和质量损失率等宏观指标与气泡间距系数、最可几孔径、总孔隙率等微观参数进行了对比分析,结果表明,这些参数之间存在明显的对应关系。以 X-1 试件为例,在 50%极限抗拉应力作用下,相对动弹性模量较无拉应力作用时降低了 46.3%,对应最可几孔径从 9.95 nm 增大至 78.34 nm,总孔隙率提高了 53.2%,气泡间距系数降低了 8.5%;而 X-3 试件在相同拉应力水平下,相对动弹性模量降低了 32.2%,最可几孔径从 11.23 nm 增大至 182.35 nm,总孔隙率提高了 55.4%,气泡间距系数降低了 14%。上述结果进一步证实,最可几孔径与相对动弹性模量的损失率呈显著正相关关系,而气泡间距系数则与质量损失率呈负相关关系。进一步分析发现,相对动弹性模量的损失率与最可几孔径的关系呈现出近似对数增长特征,即当孔径超过 50 nm 后,对力学性能的影响呈显著放大趋势;气泡间距系数每降低 0.01 mm,相对动弹性模量平均下降 5%~8%,表明较小的气泡间距对裂缝扩展具有一定的缓冲效应。此外,总孔隙率每增大 1%,质量损失率平均提高 0.1%~0.2%,说明孔隙连通性的增强会提高混凝土渗透性,从而加速其劣化。

综上,混凝土的抗盐冻性能与微观孔隙结构密切相关,通过最可几孔径与气泡间距系数的变化能够有效预测拉应力-盐冻耦合作用下混凝土的宏观力学性能衰退趋势。

3 结 论

a. 拉应力对混凝土的抗冻性能有显著的负面影响。随着拉应力水平的提升,混凝土在冻融循环中的质量损失率和动弹性模量损失呈现加速上升趋势。经 200 次冻融循环后,在 50%极限抗拉应力作用下,含气量为 3.6%的 X-1 试件较无拉应力作用时质量损失率增长了 21.7%,相对动弹性模量降低了 35.5%;含气量为 6.2%的 X-3 试件对应指标也分别增长了 24.4%和降低了 29.2%。此外,拉应力作用还通过诱导内部微裂纹形成与扩展,加速了氯离子的渗透和冻胀破坏,导致混凝土抗冻性能下降;拉应力作用会加快氯离子迁移,200 次冻融循环后氯离子扩散系数最高提升 47.0%。

b. 拉应力可使混凝土的微观孔隙结构发生明显劣化。在 50%极限抗拉应力作用下,X-1 和 X-3 两组试件的气孔间距系数较无拉应力作用时显著降低;含气量、气泡平均弦长、气泡比表面积等指标皆呈上升趋势,其中大孔径孔隙占比显著提升,导致混凝土的总孔隙率和最可几孔径相应增大,拉应力加速了孔结构的劣化。

c. 拉应力作用下含气量提升对混凝土抗冻性能的优化与潜在风险并存。尽管含气量优化了孔径分布,提升了抗冻性能,但高含气量混凝土的有害孔和多害孔占比相对偏高,在 50%极限抗拉应力作用下,这两类孔隙占比甚至突破 60%。在长期拉应力与冻融耦合作用下,混凝土内部孔隙的连通性与融合现象显著加剧,其耐久性因此遭受严重威胁,说明在混凝土抗冻配合比设计中,应综合考虑含气量调控与拉应力水平控

制,以实现抗冻性能与耐久性的优化。

参考文献:

- [1] 苏安双,王宇,石北啸,等.冻融循环条件下粗粒料变形特性试验研究[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(6):61-66. (Su Anshuang, Wang Yu, Shi Beixiao, et al. Experimental study on deformation characteristics of coarse aggregates under freeze-thaw cycling conditions[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(6): 61-66. (in Chinese))
- [2] 胡成,翁兴中,朱懋江,等.纤维网格布表层强化混凝土抗冻性能[J].河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):84-92. (Hu Cheng, Weng Xingzhong, Zhu Maojiang, et al. Frost resistance performance of surface reinforced concrete with fiber mesh [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(1): 84-92. (in Chinese))
- [3] 吴佳雯,王少伟,刘毅,等.冻融溶蚀耦合作用下混凝土劣化机理及预测模型[J].水利水电科技进展,2025,45(6):53-60. (Wu Jiawen, Wang Shaowei, Liu Yi, et al. Mechanism and prediction model of concrete deterioration under coupled freeze-thaw and leaching action[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(6): 53-60. (in Chinese))
- [4] 蒋林华,闫菁怡,杨国辉,等.复杂条件下水工混凝土研究进展[J].水利水电科技进展,2025,45(5):81-88. (Jiang Linhua, Yan Jingyi, Yang Guohui, et al. Research progress on hydraulic concrete under complex conditions[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(5): 81-88. (in Chinese))
- [5] Ma Farong, Zhang Yunsheng, Qiao Hongxia, et al. Analysis of damage models and mechanisms of mechanical sand concrete under composite salt freeze-thaw cycles[J]. Construction and Building Materials, 2024, 429: 136311.
- [6] Xiao Qianhui, Cao Zhiyuan, Guan Xiao, et al. Damage to recycled concrete with different aggregate substitution rates from the coupled action of freeze-thaw cycles and sulfate attack[J]. Construction and Building Materials, 2019, 221: 74-83.
- [7] 王学军.不同应力水平作用下混凝土碳化及抗冻性能研究[J].新型建筑材料,2017,44(11):44-47. (Wang Xuejun. Study on carbonization and frost resistance of concrete under different stress levels[J]. New Building Materials, 2017, 44(11): 44-47. (in Chinese))
- [8] 陈雨唐,缪凡璠,唐晨,等.冻融循环与持续荷载共同作用下FRP片材-混凝土界面黏结性能的退化行为[J].河海大学学报(自然科学版),2019,47(5):468-476. (Chen Yutang, Miao Fanfan, Tang Chen, et al. Bond performance degradation behavior of FRP laminate-to-concrete interface under combined effects of freeze-thaw cycling and sustained loading[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(5): 468-476. (in Chinese))
- [9] 徐港,龚朝,刘俊,等.混凝土抗水冻融和抗盐冻融循环作用的相关性[J].建筑材料学报,2020,23(3):552-556. (Xu Gang, Gong Chao, Liu Jun, et al. Correlation between water freeze-thaw resistance and salt freeze-thaw resistance of concrete[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(3): 552-556. (in Chinese))
- [10] 胡大琳,徐怀存,张航,等.初始弯曲应力对冻融-碳化后钢筋混凝土梁承载力影响分析[J].长安大学学报(自然科学版),2020,40(5):38-47. (Hu Dalin, Xu Huaicun, Zhang Hang, et al. Analysis on influence of initial bending stress on bearing capacity of reinforced concrete beam after freeze-thaw carbonization[J]. Journal of Changan University (Natural Science Edition) 2020, 40(5): 38-47. (in Chinese))
- [11] 曹银,王玲,王振地,等.弯拉荷载-冻融循环-氯盐侵蚀作用下混凝土的劣化[J].建筑材料学报,2016,19(5):821-825. (Cao Yin, Wang Ling, Wang Zhendi, et al. Deterioration of concrete caused by freeze-thaw cycles combined with chloride attack under flexural load[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(5): 821-825. (in Chinese))
- [12] 张云清,余红发,孙伟,等.盐冻作用下混凝土受弯构件承载力的计算[J].材料科学与工程学报,2014,32(1):29-34. (Zhang Yunqing, Yu Hongfa, Sun Wei, et al. Calculation of the capacity of concrete flexural members under salt freezing[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2014, 32(1): 29-34. (in Chinese))
- [13] Yang Siqi, Zhang Jiawen, Zhang Weijie, et al. Study on the evolution mechanism of concrete properties under the coupled effects of freeze-thaw cycle, chloride salt and fatigue loading[J]. Frontiers in Physics, 2025, 13: 1623258.
- [14] Sun W, Zhang Y M, Yan H D, et al. Damage and its restraint of concrete with different strength grades under double damage factors[J]. Cement and Concrete Composites, 1999, 21(5/6): 439-442.
- [15] Zhang Junzhi, Zhao Jing, Zhang Yurong, et al. Instantaneous chloride diffusion coefficient and its time dependency of concrete exposed to a marine tidal environment[J]. Construction and Building Materials, 2018, 167: 225-234.
- [16] 罗大明,牛荻涛,苏丽.荷载与环境共同作用下混凝土耐久性研究进展[J].工程力学,2019,36(1):1-14. (Luo Daming, Niu Ditao, Su Li. Research progress on durability of stressed concrete under environment actions[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(1): 1-14. (in Chinese))
- [17] 于丽波,蒋林华,储洪强,等.混凝土中结合氯离子研究综述[J].科学技术与工程,2020,20(9):3387-3393. (Yu Libo,

Jiang Linhua, Chu Hongqiang, et al. Review of researches on binding chloride ions in concrete [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(9): 3387-3393. (in Chinese))

[18] 黄守刚,陈进杰,王建西,等. 多孔玄武岩骨料轨枕用混凝土的制备及其硬化后的微结构[J]. 材料导报, 2020, 34(24): 24045-24054. (Huang Shougang, Chen Jinjie, Wang Jianxi, et al. Preparation of porous basalt aggregate concrete for railway sleepers and its microstructure[J]. Materials Reports, 2020, 34(24): 24045-24054. (in Chinese))

[19] 汪林萍,杨全兵. NaCl-MgCl₂ 复合除冰盐对混凝土盐冻破坏的影响及其作用机理[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(2): 129-136. (Wang Linping, Yang Quanbing. Effect and mechanism of NaCl-MgCl₂ compounded deicing salt on the salt-frost scaling of concrete[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(2): 129-136. (in Chinese))

[20] Zhang Ai, Yang Wencui, Ge Yong, et al. Effect of nanomaterials on the mechanical properties and microstructure of cement mortar under low air pressure curing[J]. Construction and Building Materials, 2020, 249: 118787.

(收稿日期: 2025-06-19 编辑: 熊水斌)

(上接第 91 页)

[8] 信昆仑,詹书俊,陶涛,等. 基于灵敏度分析的供水管网模型多目标校核[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(5): 736-739. (Xin Kunlun, Zhan Shujun, Tao Tao, et al. Multi objective calibration of hydraulic model in water distribution network based on sensitivity analysis[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(5): 736-739. (in Chinese))

[9] Abdelbaki C, Bendaib M M, Benziada S, et al. Management of a water distribution network by coupling GIS and hydraulic modeling: a case study of Chetouane in Algeria[J]. Applied Water Science, 2017, 7(3): 1561-1567.

[10] 付强,余健恩,闫强,等. 基于 Flowmaster 的不同阀门开度对供水管网优化[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(3): 266-270. (Fu Qiang, Yu Jianen, Yan Qiang, et al. Flowmaster-based optimization study of water supply pipe network with different valve openings[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2020, 38(3): 266-270. (in Chinese))

[11] 俞亭超,张土乔,吕谋. 基于 SVM 的管网状态估计模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(9): 1205-1208. (Yu Tingchao, Zhang Tujiao, Lyu Mou. State estimation model of water distribution network based on SVM[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(9): 1205-1208. (in Chinese))

[12] 刘宪亮,许新勇,陈晓楠,等. 基于智慧水力学的长距离调水工程调度参数预测方法研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2024, 45(3): 18-25. (Liu Xianliang, Xu Xinyong, Chen Xiaonan, et al. Research on scheduling parameter prediction method of long-distance water transfer project based on intelligent hydraulics[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2024, 45(3): 18-25. (in Chinese))

[13] Lu Mengyao, Xu Guitao, Liu Xiaolian. Research on detection and restoration methods of basic operation data for inter-basin water diversion projects[J]. Applied Sciences, 2023, 13(21): 11726.

[14] Shi Lin, Zhang Jian, Yu Xiaodong, et al. Artificial neural network-based water distribution scheme in real-time in long-distance water supply systems[J]. AQUA-Water Infrastructure, Ecosystems and Society, 2024, 73(8): 1611-1620.

[15] 赵振兴,何建京. 水力学[M]. 2 版. 北京:清华大学出版社, 2010.

[16] 李炜. 水力计算手册[M]. 2 版. 北京:中国水利水电出版社, 2006.

[17] Shi Lin, Zhang Jian, Yu Xiaodong, et al. Water hammer protection for diversion systems in front of pumps in long-distance water supply projects[J]. Water Science and Engineering, 2023, 16(2): 211-218.

[18] 郭永鑫,郭新蕾,杨鹏志,等. 管道水力摩阻系数的敏感性分析[J]. 水利学报, 2019, 50(8): 1021-1028. (Guo Yongxin, Guo Xinlei, Yang Pengzhi, et al. Sensitivity analysis of the hydraulic conveyance coefficients of pipes[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(8): 1021-1028. (in Chinese))

[19] Shi Lin, Zhang Jian, Yu Xiaodong, et al. Calibration of roughness coefficient for long-distance water supply systems with multi-branch pipelines[J]. Physics of Fluids, 2024, 36(9): 097162.

[20] 史峰,王辉,郁磊,等. MATLAB 智能算法 30 个案例分析[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2011.

[21] 田正宏,苏伟豪,郑祥,等. 基于 GA-BP 神经网络的碾压混凝土压实度实时评价方法[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(3): 81-86. (Tian Zhenghong, Su Weihao, Zheng Xiang, et al. Real-time evaluation method of compaction degree for roller-compacted concrete based on GA-BP neural network[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(3): 81-86. (in Chinese))

[22] 刘媛媛,刘业森,郑敬伟,等. BP 神经网络和数值模型相结合的城市内涝预测方法研究[J]. 水利学报, 2022, 53(3): 284-295. (Liu Yuanyuan, Liu Yesen, Zheng Jingwei, et al. Intelligent rapid prediction method of urban flooding based on BP neural network and numerical simulation model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(3): 284-295. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-09-02 编辑: 刘晓艳)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.03.017

钢结构模块单元间卡件-螺栓式连接节点力学性能分析

王俊轶¹, 陈志华¹, 郭宁², 刘洋¹, 吕太辉³, 韩树勋³

(1. 天津大学建筑工程学院; 2. 河北浩石集成房屋有限公司; 3. 中铁十六局电气化工程有限公司)

摘要: 为提高钢结构模块单元连接效率, 提出了块单元间的卡件-螺栓式连接节点, 通过建立该节点的有限元模型分析了卡件-螺栓式连接节点构件静力性能、抗震性能及角件与模块钢梁焊接连接面的侧壁厚度(角件侧壁厚)、定位卡件壁厚、模块钢梁壁厚 3 个参数对节点力学性能的影响规律。结果表明: 卡件-螺栓式连接节点构造简单合理, 传力机理明确, 抗震性能良好; 增加模块钢梁壁厚可以在一定程度上提升节点的最大承载力以及整体刚度与耗能能力; 增加定位卡件壁厚可以提高节点的初始刚度但会降低节点的耗能能力, 且定位卡件壁厚过大会降低节点的极限承载力; 增大角件侧壁厚可以提升节点的承载力, 并较大程度上提升节点的耗能能力, 但会削弱节点的刚度。

关键词: 卡件-螺栓式连接节点; 抗震性能; 静力性能; 有限元分析

Analysis of mechanical performance of clamp-bolted connection joints between steel structure module units

Wang Junyi¹, Chen Zhihua¹, Guo Ning², Liu Yang¹, Lyu Taihui³, Han Shuxun³

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University; 2. Hebei Haoshi Integrated Housing Co., Ltd.; 3. China Railway 16th Bureau Electrification Engineering Co., Ltd.)

Abstract: To improve the connection efficiency of steel structure module units, a clamp-bolted connection joint between block units was proposed. A finite element model of the joint was established to analyze the static performance, seismic performance, and the influence laws of three parameters (side wall thickness of the welded connection surface between the corner fitting and the module steel beam (side wall thickness of corner fitting), wall thickness of the positioning clamp, and wall thickness of the module steel beam) on the mechanical performance of the joint. The results show that the clamp-bolted connection joint features a simple and reasonable structure, a clear load-transfer mechanism, and favorable seismic performance; increasing the wall thickness of the module steel beam can improve the maximum bearing capacity, as well as the overall stiffness and energy dissipation capacity of the joint to a certain extent; increasing the wall thickness of the positioning clamp can improve the initial stiffness of the joint but reduces its energy dissipation capacity, and excessive wall thickness of the positioning clamp reduces the ultimate bearing capacity of the joint; increasing the side wall thickness of the corner fitting can improve the bearing capacity of the joint, and greatly enhances its energy dissipation capacity, but weakens the stiffness of the joint.

Key words: clamp-bolted connection joint; seismic performance; static performance; finite element analysis

连接节点是装配式钢结构建筑结构体系中的重要部位, 在结构中起到承受并传递轴力、弯矩和剪力的作用, 与传统钢结构建筑相比, 钢结构模块建筑的连接节点具有“多梁多柱”的特性^[1], 在装配式钢结构体系中, 连接节点的连接方式和性能会直接影响结构的可靠性和安全性以及施工的效率 and 结构的抗震能力。为了进一步促进装配式钢结构的应用, 有必要对钢结构连接节点的力学性能进行研究。

陈志华等^[2]提出了一种由钢筋与 CGM(高强无收缩水泥)灌浆料组成的灌浆插筋式模块钢结构连接节点形式, 并采用试验和理论分析方法对节点柱的轴压性能、轴拉性能和抗弯性能进行了深入研究。张忠豪等^[3]针对钢框架模块间连接节点试件的抗震性能开展了拟静力低周往复加载试验, 研究了节点试件的滞回曲线、骨架曲线、延性、耗能、刚度退化、层间位移角和转动刚度等抗震性能指标, 并对影响节点抗震性能的参

基金项目: 国家自然科学基金项目(52108166); 天津市自然科学基金项目(24JCQNJC01600)

作者简介: 王俊轶(2002—), 男, 硕士研究生, 主要从事模块钢结构研究。E-mail: 1054920633@qq.com

通信作者: 刘洋(1990—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事模块钢结构研究。E-mail: yangliu_0516@tju.edu.cn

数进行了分析。Chen 等^[4]提出了一种箱式模块间的“梁梁”连接节点,通过试验和参数分析研究了模块框架的压缩行为,结果表明梁柱连接的相对刚度主要影响横向平移。王小盾等^[5]提出了一种角件旋转式模块单元间连接节点,并通过静力拉伸试验研究了角件和旋转件在节点受拉时的受力特性以及下角件顶板厚度对节点抗拉承载力的影响,结果表明,下角件顶板厚度是影响节点承载力的重要因素,增加下角件顶板厚度有利于提高节点屈服承载力。Deng 等^[6]提出了一种箱式模块间的铸头-十字板连接节点,并提出了考虑单元间连接约束的柱屈曲长度理论模型,开发了三维非线性有限元模型来模拟铸头-十字板连接的模块柱压缩行为,研究结果表明,樨头对极限载荷和相应的钢柱端部缩短量有重要的影响,其中樨头的长度是最重要的因素。以上模块连接节点均对施工有较高要求,难以在实际工程中实现快速精准的安装。

在保证节点整体刚度的同时提高施工精度,并在施工时能够快速装配,本文中提出了一种模块单元间的卡件-螺栓式连接节点,并通过 Abaqus 有限元软件模拟分析了该节点的静力性能与抗震性能,以期工程应用提供技术参考。

1 卡件-螺栓式连接节点构造

卡件-螺栓式连接节点主要由模块立柱、模块钢梁、连接板、定位卡件、垂直锁件、水平锁件、硬质箱角垫块、角件、盖板、抗剪件等部件组成,如图 1 所示。模块钢梁为长 250 mm、宽 150 mm、厚度 8 mm 的方钢管,模块立柱为长 200 mm、宽 200 mm、厚度 8 mm 的方钢管,材质均为 Q345B 型钢材,二者为结构的主要受力构件。角件材质也是 Q345B 型钢材,底部的圆孔用于安装垂直锁件,侧面的圆孔用于连接相邻模块。连接板上的定位孔和角件以及定位卡件配合用于安装时的定位。框架柱与框架梁分别垂直焊接在角件上。工厂加工阶段,框架柱与框架梁焊接在角件上。施工时,先安装定位下部 2 个模块。同层相邻 2 个模块间预留一定的宽度缝隙,通过螺栓连接下部 2 个模块,然后依次吊装上部 4 个模块,通过梁上的定位卡件与定位孔进行定位,并通过高强螺栓连接相邻模块角件。

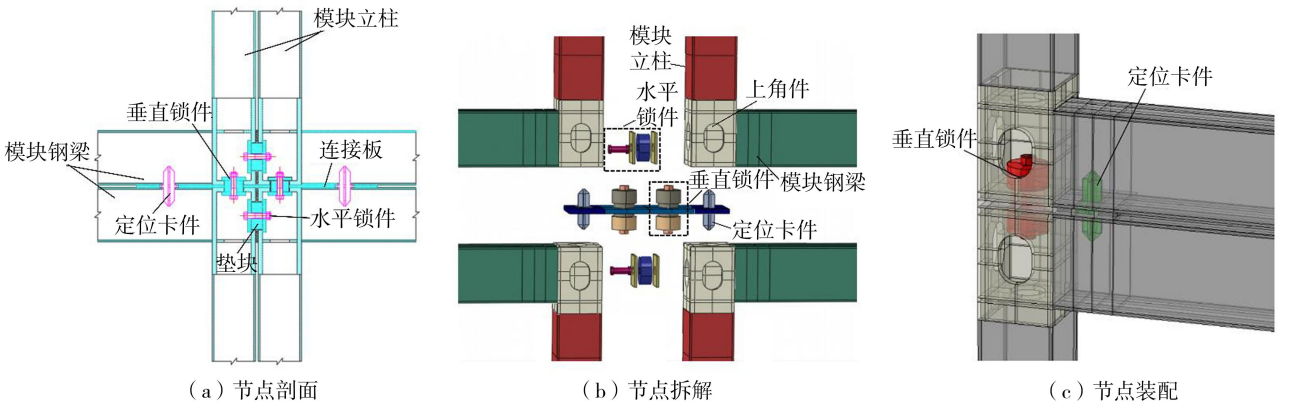


图 1 卡件-螺栓式连接节点示意图

Fig. 1 Schematic diagram of clamp-bolted connection joint

卡件-螺栓式连接节点在传统的螺栓连接节点基础上增设定位卡件、连接板等部件,施工精度与施工速度都有一定的提升。传统螺栓连接在现场施工过程中依赖人工测量,需反复调整,施工精度受工人经验、环境因素影响大,多模块拼接时定位误差逐级累积容易导致最终接口错位,需要后期修正,且在安装过程中定位过程耗时占比较高,整体施工进度受限于单节点调整时间。卡件-螺栓式连接节点吊装时可通过定位卡件辅助进行预定位,确保螺栓可以高效穿过螺栓孔,并且卡件-螺栓式节点允许上层模块在下层初步固定后进行同步调整,有并行施工的可能性。

卡件-螺栓式连接节点已应用于河北浩石模块化办公楼工程。该工程位于天津市宁河区,建筑面积 3 645.23 m²,高 18.75 m,地上 5 层(局部 4 层),无地下室。工程门厅部分结构体系为钢框架结构体系,其余部分为钢模块单元,模块单元共计 68 个,模块单元的边节点和角节点均采用卡件-螺栓式连接节点。卡件-螺栓式连接节点传力路径明确,连接高效可靠,一定程度上提高了模块的装配效率。

2 有限元模型建立

本文采用通用有限元软件 Abaqus(2022)对卡件-螺栓式连接节点进行静力及低周往复荷载下的抗震性能分析。

2.1 参数设计

如表 1 所示,共设计 7 个有限元模型试件,其中试件 S-01 的角件与模块钢梁焊接连接面的侧壁厚度(以下简称“角件侧壁厚”)为 12 mm,定位卡件壁厚为 8 mm,模块钢梁壁厚为 8 mm,梁长为 2 521 mm,柱长为 1 750 mm,其他模型试件在试件 S-01 的基础上分别增大或减小角件侧壁厚、定位卡件壁厚和模块钢梁壁厚。

2.2 模型单元选取及网格划分

本文采用实体 C3D8I 单元建立卡件-螺栓式连接节点的有限元模型,在节点有限元模型建立过程中,不同部件上布置了不同密度的网格:离梁柱端焊接位置 16 mm 范围内,网格尺寸加密为 10 mm;在远离核心区域的部分,梁柱部件的网格则相对稀疏,网格尺寸为 30 mm,如图 2 所示。

表 1 试件参数

Table 1 Specimen parameters

编号	角件侧壁厚/mm	定位卡件壁厚/mm	模块钢梁壁厚/mm
S-01	12	8	8
S-02	20	8	8
S-03	16	8	8
S-04	12	10	8
S-05	12	6	8
S-06	12	8	10
S-07	12	8	12

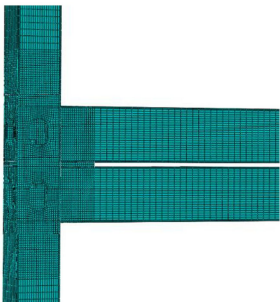


图 2 有限元模型网格划分

Fig.2 Finite element model meshing

2.3 本构关系

有限元模型模拟分析中采用的钢材型号为 Q345B,钢材采用二折线本构模型,杨氏模量为 206 GPa,泊松比取 0.3,密度为 7 800 kg/m³。高强螺栓应力-应变关系采用二折线的理想弹塑性模型来模拟,材料的具体属性指标如下:杨氏模量为 206 GPa,泊松比取 0.3,屈服强度为 900 GPa,极限强度为 1 000 GPa。

2.4 接触设置

部件之间的接触方式可以分为两种,一种是焊接连接,如模块立柱与角件之间的焊接和模块钢梁与角件之间的焊接,两者接触的地方不能产生相对位移;另一种是摩擦接触,如模块钢梁与定位板间的接触,部件之间存在摩擦力但是可以发生相对位移。在有限元分析中,部件之间的焊接接触采用绑定(Tie)方式进行模拟;在模拟部件之间的摩擦接触时,切向摩擦通过 Abaqus 中的罚(Penalty)接触模拟,而法向接触则采用硬接触(Hard Contact)来模拟^[7-11]。本文模型中所有摩擦接触均为钢构件之间的摩擦,考虑到钢材表面进行了除锈处理,摩擦系数设为 0.3。

2.5 边界条件

在设定边界条件之前,需要在梁端和柱端的形心位置处建立参考点,并在这些位置施加耦合约束。根据滞回试验的要求,柱底和柱顶的约束有所不同^[12-15]。对于柱底,需要约束 x 、 y 、 z 3 个方向上的位移和 x 、 z 方向上的转角,从而限制柱子只能绕 y 轴旋转;而对于柱顶,则需要约束 x 、 y 方向上的位移和 x 、 z 方向上的转角,以确保柱子只能在 z 轴方向移动和绕 y 轴旋转,如图 3 所示。

2.6 荷载施加

本文节点有限元模型施加的荷载可分为高强螺栓的预紧力和节点模块钢梁梁端的往复荷载两组。节点模块钢梁梁端单调与往复加载采用位移控制,在模块钢梁梁端的耦合点处施加 200 mm 单调荷载,进行初步的模拟,进而通过计算得到的荷载-位移曲线,在曲线出现拐点处得到节点的屈服承载力和屈服位移,为后续施加往复荷载时采用的屈服荷载提供参考。往复荷载加载制度如图 4 所示。

2.7 模型验证

为验证构建的有限元模型的准确性,选用 Wang 等^[16]的全尺寸 T 字形节点试件的抗弯性能试验数据进

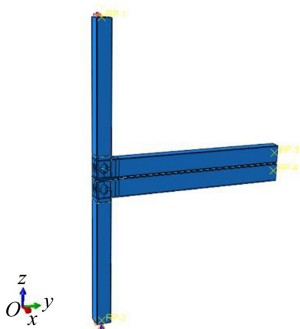


图 3 约束条件设置

Fig. 3 Setting of constraint conditions

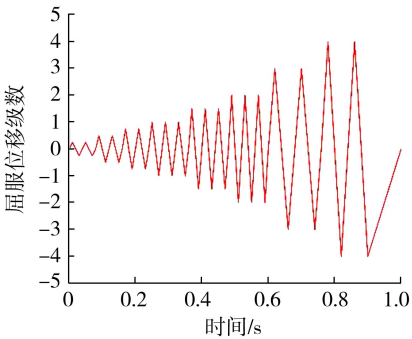


图 4 往复加载制度

Fig. 4 Cyclic loading regime

行验证,试件模块柱为高度 1 400 mm、截面为 200 mm×200 mm×8 mm 的方钢管。地板梁和天花板梁长度均为 1 500 mm,分别为高 200 mm、宽 200 mm、腹板厚 8 mm、翼缘厚 12 mm 的 H 型钢和高 194 mm、宽 150 mm、腹板厚 6 mm、翼缘厚 9 mm 的 H 型钢。上、下模块柱间通过尺寸为 424 mm×212 mm×212 mm 的盒形件进行连接,单元内连接为焊接。T 字形节点试件中的螺栓采用 10.9 级 M24 高强螺栓,在工厂进行连接时先利用扭矩扳手施加 225 kN 的预紧力。参照 Wang 等^[16]的试验建立了有限元模型,有限元模拟的破坏状态应力云图如图 5 所示,试验破坏形态与有限元模拟破坏形态一致,均产生“V”字形变形。节点柱端沿 y 轴负方向的荷载-位移曲线如图 6 所示,试验与有限元模拟的荷载-位移曲线整体趋势吻合较好。试验测得节点初始刚度为 1.66 kN/mm,有限元模拟结果为 1.68 kN/mm,误差约为 1.2%,表明有限元模拟方法较为可靠。

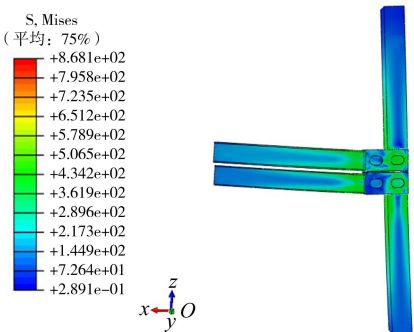


图 5 有限元模拟的破坏状态应力云图(单位:MPa)

Fig. 5 Stress contour of failure state in finite element simulation (unit: MPa)

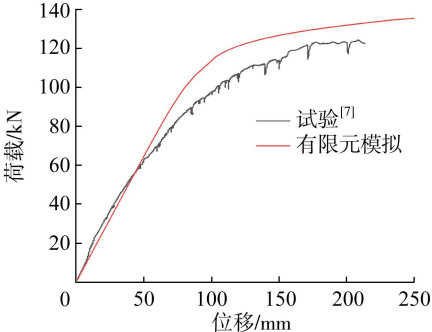


图 6 荷载-位移曲线对比

Fig. 6 Comparison of load-displacement curves

3 结果与分析

3.1 节点抗弯性能

3.1.1 破坏模式

从有限元模拟得到的应力云图(图 7)可以看出,角件、定位板和定位卡件应力较大,有明显的剪切变形。试件最大应力出现在定位卡件与模块钢梁接触面处以及模块钢梁与角件底部连接处,表明定位卡件除了在施工过程中可以起到定位作用外,还可以在节点模块钢梁承受荷载时起到抗剪的效果。定位板在荷载作用下产生弯曲变形,一定程度上起到了提高节点极限承载力和刚度的作用,在极限承载力的作用下模块钢梁与角件的连接区域形成塑性铰时连接板并未出现屈服现象。角件与模块钢梁连接端的侧壁产生了鼓曲变形,模块钢梁底板由于弯曲变形与定位板间出现了缝隙。

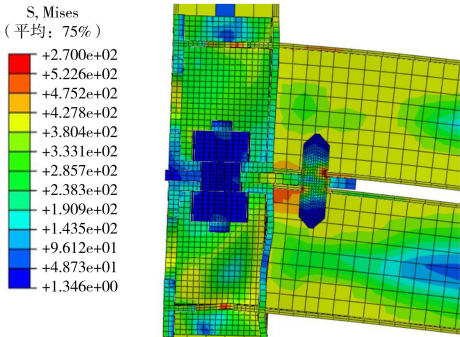


图 7 单调加载的剖面应力云图(单位:MPa)

Fig. 7 Sectional stress contour under monotonic loading (unit: MPa)

3.1.2 荷载-位移曲线

卡件-螺栓式连接节点单调加载的荷载-位移曲线如图 8 所示。模型的初始刚度、屈服荷载和屈服位移的大小通过最远点法^[16-17]来获得,即在构件荷载-位移曲线上,以原点与峰值点连线的平行线与力-变形曲线的切点为屈服点^[16-17]。由图 8 可以看出,节点模型的弹性极限位移为 48 mm,屈服位移为 67 mm。过原点作节点荷载-位移曲线的切线,其斜率即为节点的初始刚度(1.011 kN/mm)。

通过对 7 个试件进行单调加载有限元分析,得到在不同参数条件下单调加载的卡件-螺栓式连接节点荷载-位移曲线如图 9 所示。试件 S01~S07 的刚度分别为 1.011、1.032、0.932、1.000、0.923、1.112、1.080 kN/mm,极限承载力分别为 75.5、81.3、85.2、69.1、82.0、81.4、81.3 kN。由图 9(a)可知,随着角件侧壁厚由 12 mm 增加到 20 mm,节点的刚度稍有下降,极限承载力由 75.5 kN 增大到 85.3 kN,增大了 12.98%,角件侧壁厚增加可以提高节点的极限承载力但会削弱节点的刚度。由图 9(b)可知,当定位卡件壁厚从 6 mm 增加到 10 mm 时,节点的极限承载力由 82.0 kN 降低到 69.1 kN,下降了 15.73%,因此在进行节点设计时不应将定位卡件壁厚设计得过大。由图 9(c)可知,随着模块钢梁壁厚从 8 mm 增加到 12 mm,节点的刚度有一定的提升,极限承载力从 75.5 kN 增大到 81.4 kN,增大了 7.81%,因此节点设计时,在保证经济性以及“强柱弱梁”条件的情况下,可以增加模块钢梁壁厚进而增加节点的承载力。

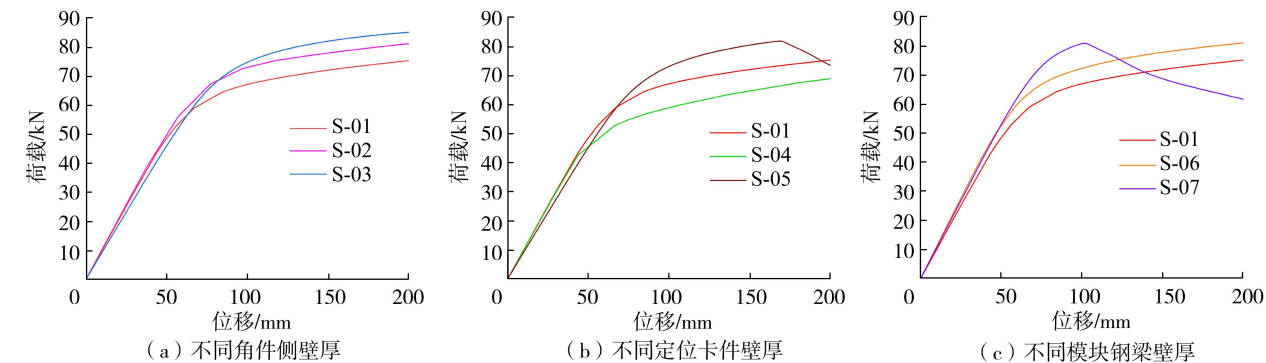


图 9 不同参数条件下单调加载的荷载-位移曲线对比

Fig. 9 Comparison of load-displacement curves under monotonic loading with different parameters

3.2 节点抗震性能

3.2.1 滞回曲线

卡件-螺栓式连接节点的荷载-位移滞回曲线如图 10 所示,加载开始时,由于位移较小,节点变形呈弹性状态,滞回曲线几乎重合,并没有产生由于塑性变形而形成的滞回环。随着荷载位移的持续增大,节点开始产生塑性变形,滞回曲线形成的滞回环包围的面积进一步增大,节点的耗能能力越来越强。节点的滞回曲线比较稳定,基本为梭形,捏拢效应较小,表现出良好的延性与变形能力。

3.2.2 骨架曲线

卡件-螺栓式连接节点的力学性能指标如表 2 所示,7 个试件均满足 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》的要求。卡件-螺栓式连接节点骨架曲线如图 11 所示,左右两端对称性良好,梁端位移在 100 mm 以内时,节点整体大致处于弹性状态,在梁端位移 100~200 mm 之间节点构件产生较大的弹塑性变形,延性系数介于 1.92~1.16 之间,平均值为 1.47。

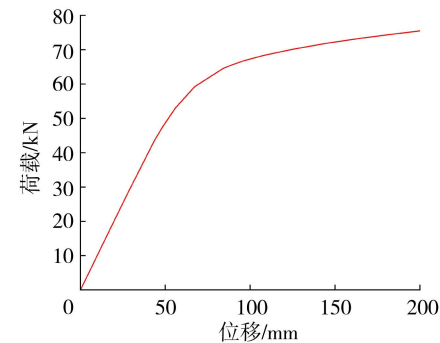


图 8 单调加载的荷载-位移曲线

Fig. 8 Load-displacement curves under monotonic loading

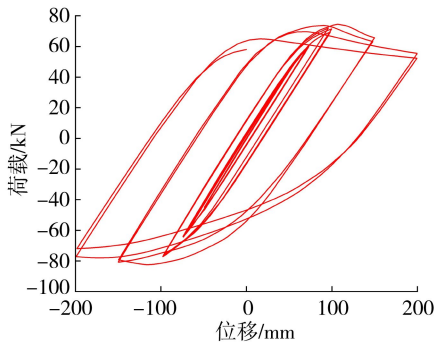


图 10 荷载-位移滞回曲线

Fig. 10 Load-displacement hysteretic curves

表 2 不同试件力学性能指标

Table 2 Mechanical performance indexes of different specimens

试件编号	初始刚度/(kN/mm)	正向峰值荷载/kN	负向峰值荷载/kN	平均峰值荷载/kN	承载力变化/%	延性系数
S-01	0.912	74.540	82.450	78.490		1.92
S-02	1.014	81.317	87.579	84.448	7.60	1.18
S-03	0.913	82.120	78.990	80.560	2.60	1.62
S-04	1.020	77.529	79.829	78.679	0.24	1.16
S-05	0.902	75.090	82.190	78.640	0.19	1.57
S-06	1.126	85.990	82.167	84.059	7.09	1.22
S-07	0.948	78.830	78.780	78.810	0.40	1.65

3.2.3 刚度退化曲线

卡件-螺栓式连接节点的刚度退化曲线对比如图 12 所示。除试件 S-06 外,其他试件的刚度退化趋势大致相同,在荷载施加的过程中,刚度退化曲线大致经历了曲线呈平直状态的刚度退化弹性阶段和曲线呈下降状态的刚度退化阶段。提升定位卡件壁厚会使得节点构件的初始刚度稍有提升,若继续增大则对初始刚度影响不大。节点试件整体刚度在一定范围内随着模块钢梁壁厚的增大而增大,而若继续增大模块钢梁壁厚则会导致模块钢柱在加载过程中先产生破坏,因此对节点的刚度提升不大。角件侧壁厚对节点的承载力与刚度具有一定的影响,在进行节点设计时,可以适当增加角件侧壁厚进而增加节点的承载力和刚度。

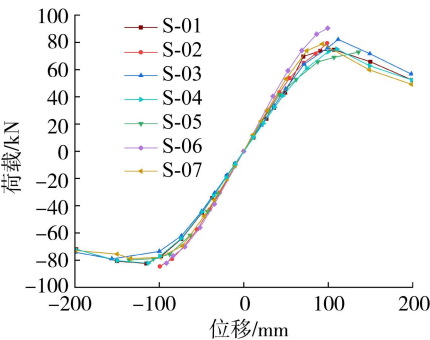


图 11 不同试件骨架曲线对比

Fig. 11 Comparison of skeleton curves of different specimens

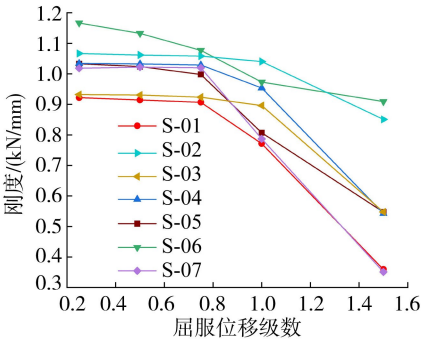


图 12 不同试件刚度退化曲线对比

Fig. 12 Comparison of stiffness degradation curves of different specimens

3.2.4 耗能能力

试件 S01~S07 的等效黏滞阻尼系数分别为 0.272、0.092、0.315、0.114、0.358、0.092、0.388,可以看出试件 S-01 与试件 S-03 的等效黏滞阻尼系数远大于试件 S-02,说明角件侧壁厚增大会在一定程度上提高节点的耗能能力,但持续增大后则会使得耗能能力降低。试件 S-01 与试件 S-05 的等效黏滞阻尼系数均远大于试件 S-04,说明加大定位卡件壁厚会降低节点的耗能能力。试件 S-07 的等效黏滞阻尼系数较试件 S-01 高出了 42.65%,说明提高模块钢梁壁厚可以使得节点的耗能能力有较大提升。

4 结 论

- a. 增加模块钢梁壁厚可以在一定程度上提升卡件-螺栓式连接节点的最大承载力以及整体刚度与耗能能力。
- b. 增加定位卡件壁厚可以提高卡件-螺栓式连接节点的初始刚度但会降低节点的耗能能力,且定位卡件壁厚过大会降低节点的极限承载力。
- c. 增大角件侧壁厚可以提升卡件-螺栓式连接节点的承载力,并较大程度上提升节点的耗能能力,但会削弱节点的刚度。

参考文献:

[1] 刘洋. 角件旋转式节点连接的柱承重型钢模块结构抗震性能研究[D]. 天津:天津大学,2021.
[2] 陈志华,孟凡贵,刘红波,等. 灌浆插筋式模块钢结构连接节点力学性能试验研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技

术版),2024,57(3):311-320. (Chen Zhihua,Meng Fangui,Liu Hongbo,et al. Experimental research on mechanical properties of grout-reinforced connections in modular steel structures[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology),2024,57(3):311-320. (in Chinese))

[3] 张忠豪,王燕,安琦,等. 模块化钢框架模块间内套筒连接节点抗震性能试验研究[J]. 建筑钢结构进展,2024,26(5):1-11. (Zhang Zhonghao,Wang Yan,An Qi,et al. Seismic performance test on inner sleeve splicing joints between modules of modular steel frame[J]. Progress in Steel Building Structures,2024,26(5):1-11. (in Chinese))

[4] Chen Zhihua,Liu Jiadi,Yu Yujie. Experimental study on interior connections in modular steel buildings[J]. Engineering Structures,2017,147:625-638.

[5] 王小盾,丛子怡,刘佳迪. 角件旋转式模块单元连接节点抗拉性能研究[J]. 建筑结构,2021,51(13):93-101. (Wang Xiaodun,Cong Ziyi,Liu Jiadi. Study on the tensile behavior of rotary inter-module connection joint[J]. Building Structure,2021,51(13):93-101. (in Chinese))

[6] Deng Enfeng,Yan Jiabao,Ding Yang,et al. Analytical and numerical studies on steel columns with novel connections in modular construction[J]. International Journal of Steel Structure,2017,17(4):1613-1626.

[7] 韩弘烨. 低多层模块化钢结构全螺栓连接节点力学性能研究[D]. 天津:天津大学,2020.

[8] 丁阳,邓恩峰,宗亮,等. 模块化钢结构建筑连接节点研究进展[J]. 建筑结构学报,2019,40(3):33-40. (Ding Yang,Deng Enfeng,Zong Liang,et al. State-of-the-art on connection in modular steel construction[J]. Journal of Building Structures,2019,40(3):33-40. (in Chinese))

[9] 李豫明. 模块化钢结构单边螺栓连接节点力学性能研究[D]. 天津:天津大学,2018.

[10] 邓恩峰,宗亮,丁阳. 集成模块钢结构螺栓-封板节点有限元分析[C]//中国钢结构协会结构稳定与疲劳分会. 中国钢结构协会结构稳定与疲劳分会第16届(ISSF-2018)学术交流会暨教学研讨会论文集. 北京:中国钢结构协会结构稳定与疲劳分会,2018:470-476.

[11] 邓恩峰,宗亮,丁阳. 钢结构集成模块建筑新型节点力学性能研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2018,51(7):702-710. (Deng Enfeng,Zong Liang,Ding Yang. Mechanical properties of innovative connection for integrated modular steel construction[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology),2018,51(7):702-710. (in Chinese))

[12] 王腾基,苏雷,周林禄,等. 地震与波浪联合作用下重力式沉箱码头动力响应分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(2):98-106. (Wang Tengji,Su Lei,Zhou Linlu,et al. Dynamic response analysis of gravity caisson wharf under the joint action of earthquake and wave[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025,53(2):98-106. (in Chinese))

[13] 韦芳芳,林澳庆,赵有正,等. 基于机器学习的简支梁式渡槽结构地震响应与易损性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(3):101-108. (Wei Fangfang,Lin Aoqing,Zhao Youzheng,et al. Seismic response and vulnerability analysis of simply supported beam aqueduct structure based on machine learning method[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025,53(3):101-108. (in Chinese))

[14] 方有珍,赵帅领,徐飞,等. BRS板部分自复位连接新型卷边PEC柱-钢梁组合框架边节点抗震机理试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(4):309-316. (Fang Youzhen,Zhao Shuailing,Xu Fei,et al. Experimental study on seismic mechanism of new PEC column-steel beam joint with partial self-centering BRS connection[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2017,45(4):309-316. (in Chinese))

[15] 夏逸鸣,吴胜兴,曲卓杰. 钢框架实际作用与其等效节点荷载的比较分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2003,31(4):432-435. (Xia Yiming,Wu Shengxing,Qu Zhuojie. Comparative analysis of steel frames under real and equivalent nodal loads[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2003,31(4):432-435. (in Chinese))

[16] Wang Xiaodun,Lu Guannan,Liu Yang,et al. Lateral stiffness of modular steel joint with semi-rigid bolted intra-module connection[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 97:110668.

[17] 冯鹏,强翰霖,叶列平. 材料、构件、结构的“屈服点”定义与讨论[J]. 工程力学,2017,34(3):36-46. (Feng Peng,Qiang Hanlin,Ye Lieping. Discussion and definition on yield points of materials, members and structures[J]. Engineering Mechanics, 2017,34(3):36-46. (in Chinese))

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.03.018

基于随机森林算法的台风风场经验参数优化

时健^{1,2}, 孙海飞^{1,2}, 刘威^{1,2}, 张弛^{1,3}, 李元^{1,3}

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院; 2. 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室;
3. 河海大学水灾害防御全国重点实验室)

摘要: 针对 Holland 台风风场模型计算中最大风速半径和 Holland- B 参数难确定、经验依赖性强的问题,结合卫星遥感反演数据机器学习模型数据集,利用随机森林算法对 Holland 台风风场的最大风速半径以及 Holland- B 参数计算方法进行优化,并将优化后参数化台风风场模型风速与实测风速进行了对比验证,比较了算法优化参数值与经验公式计算值的精度差异。结果表明:优化后的两个台风经验参数与验证集数据拟合性较好,平均误差均小于 4%,相较传统经验公式预测精度提升约 50%;基于随机森林算法可快速、有效获取参数化台风风场模型经验参数,风速模拟误差在 7% 以内,提高了参数化台风风场模型模拟风速的精确性和稳定性,可为台风数值模拟提供新的技术途径。

关键词: 机器学习; 随机森林算法; 台风风场模型; 最大风速半径; Holland- B 参数

Optimization of empirical parameters for typhoon wind field based on random forest algorithm

Shi Jian^{1,2}, Sun Haifei^{1,2}, Liu Wei^{1,2}, Zhang Chi^{1,3}, Li Yuan^{1,3}

(1. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University;
2. Key Laboratory of Coastal Disaster and Protection, Ministry of Education, Hohai University;
3. State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University)

Abstract: To address the problems of difficulty in determination and strong experience dependence of the radius of maximum wind speed and Holland- B parameter in the calculation of the Holland typhoon wind field model, the calculation methods of the radius of maximum wind speed and Holland- B parameter of the Holland typhoon wind field were optimized using the random forest algorithm, combined with the dataset of the machine learning model of satellite remote sensing inversion data. Furthermore, the wind speed of the parametric typhoon wind field model with optimized parameters was compared and verified with the measured wind speed, and the accuracy difference between the parameter values optimized by the algorithm and those calculated by empirical formulas was compared. The results indicate that the two optimized empirical parameters of typhoons fit well with the validation set data; the average errors are both less than 4%, and the prediction accuracy increases by about 50% compared with traditional empirical formulas. Based on the random forest algorithm, the empirical parameters of the parametric typhoon wind field model can be obtained quickly and effectively, and the simulated wind speed error is within 7%. This improves the accuracy and stability of the simulated wind speed of the parametric typhoon wind field model and provides a new technical approach for typhoon numerical simulation.

Key words: machine learning; random forest algorithm; typhoon wind field model; radius of maximum wind speed; Holland- B parameter

随着全球气候的变化,海平面上升速率加快,极端台风事件的强度与频次也呈显著增长趋势^[1-4]。台风灾害引发重大人员伤亡与巨额经济损失,给人类社会的生产生活带来了极大的威胁和挑战^[5-6],同时对区域经济社会平稳发展造成严重的冲击。开展精准、高效的台风风场特性研究,对于工程结构抗风设计、区域防灾减灾规划与决策具有重要的理论价值与工程实际意义。

参数化台风风场模型是进行台风风场研究的重要组成部分,其中参数化梯度风场模型模拟通常分为两类:①根据风廓线经验函数,通过最大风速推算整个风场风速^[7-8];②基于气压分布模型,求解梯度平衡方程从而计算风速^[9-10]。

1980 年以来, Holland^[10] 在 Schloemer^[11] 建立的指数气压分布模型的基础上引入了径向气压分布参数 B

(Holland- B 参数),使模型能够更准确地模拟台风的风速分布和特征。在实际工程应用中,各国学者普遍采用代表性强、实用性优的最大风速半径和 Holland- B 参数开展台风风场模拟,以期更好地预测台风强度与风场结构特征。Vickery 等^[12]研究表明,参数化台风风场模型模拟的风速与最大风速半径密切相关,同时指出,台风最大风速半径与中心气压差呈负相关关系,与纬度呈正相关关系;Kato^[13]发现了最大风速半径与中心气压间的线性关系,并给出了经验计算公式;雷小途等^[14]基于参数化台风风场模型,探讨了热带气旋尺度(8 级大风圈半径)的估算方案;江志辉^[15]以 LAGFD 模式为基础,对热带气旋中心气压与最大风速半径进行统计,建立了两者的统计关系并检验了其合理性。针对 Holland- B 参数的研究,Zhao 等^[16]对比验证了台风登陆前后 Holland- B 参数的取值,认为中心气压差、最大风速半径与 Holland- B 参数仅存在线性关系;Fang 等^[17-18]却指出 Holland- B 参数与中心气压差、纬度等多个因子之间存在二次拟合关系。

尽管过去几十年有关参数化台风风场模型研究取得了显著进展,然而大多数研究中,多数台风风场构建参数均依赖经验公式求解,而经验公式本身适用性争议较大,鲜有研究密切关注参数化台风风场模型中参数的选择依据与判定标准,模拟风场风速与实测风速存在较大误差。现阶段仍缺乏针对性方法解决具体台风模拟中的参数选择问题,风速模拟的精度有待提高。机器学习算法为解决该问题提供了有效途径,例如,Wei^[19]分别采用 DNN 与 WRF 模型对台风中心气压等关键特征进行训练,模拟对比了 47 场台风的风速,结果表明,两种模型均能较好地展示风速变化趋势,模拟精度良好。在实际应用中,受观测条件与仪器的限制,难以精确获取最大风速半径等参数。Chen 等^[20]通过相关性分析,优化了随机森林算法和 BP 神经网络机器学习参数化台风风场模型的关键输入参数,提高了台风风速的预报精度。

采用机器学习算法预测参数化台风风场模型的参数,不仅在样本分类与特征提取方面具有运算速度及精度优势,还可输出稳定、合理的模型参数,在提升风场模拟精度的同时兼顾物理可解释性。本文基于卫星遥感反演数据机器学习模型(Deep TC Net)数据集,利用随机森林算法对 Holland 参数化台风风场模型的最大风速半径以及 Holland- B 参数进行优化,通过对比优化后的模型模拟风速与实测风速,分析了机器学习算法预测台风风场模型参数值与传统经验公式计算值的差异。

1 台风风场经验参数预测模型

1.1 参数化台风风场模型

基于气压分布的梯度风场可以得到 Holland 台风风场公式^[10]:

$$p_r = p_c + (p_n - p_c)w^{-(R_m/r)^B} \tag{1}$$

$$v_g = \sqrt{\frac{B}{\rho_a} \left(\frac{R_m}{r}\right)^B (p_n - p_c)w^{-(R_m/r)^B} + \left(\frac{rf}{2}\right)^2} - \frac{rf}{2} \tag{2}$$

其中 $f = 2 \times 7.292 \times 0.00001 \sin(\pi\varphi/180.0)$

式中: p_r 为台风气压场气压; p_c 为台风中心气压; p_n 为台风外围气压,取 $p_n = 1013.0 \text{ hPa}$; R_m 为最大风速半径; ρ_a 为空气密度,取 $\rho_a = 1.15 \text{ kg/m}^3$; v_g 为梯度风场风速; f 为科氏力参数,取值随台风中心纬度变化; φ 为台风中心纬度; B 为 Holland- B 参数,决定台风的峰度和强度; r 为距离梯度台风风场中心的距离; w 为权重。

移行风场采用宫崎正卫公式^[21]:

$$\mathbf{v}_t = \exp(-\pi r/500000) \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中: $\mathbf{v}_t$ 为移行风场风速; v_x 、 v_y 分别为台风中心移动速度的正东分量和正北分量。

热带气旋的模型风场由梯度风场及移行风场叠加而得:

$$\mathbf{v}_M = c_1 v_g \begin{bmatrix} -\sin(\theta + \beta) \\ \cos(\theta + \beta) \end{bmatrix} + c_2 \mathbf{v}_t \tag{4}$$

式中: $\mathbf{v}_M$ 为参数化台风风场风速; c_1 、 c_2 为修正系数,根据与实测数据的对比情况进行取值,本文取 $c_1 = 0.8$, $c_2 = 0.5$; β 为梯度风与海面风的夹角,通常为 $20^\circ \sim 30^\circ$,本文取 $\beta = 25^\circ$; θ 为台风中心到目标点的方位角。式(1)~(4)构成参数化台风风场模型。

1.2 基于随机森林算法台风风场经验参数预测模型构建

机器学习算法主要有神经网络、随机森林、支持向量机等算法,其中随机森林算法相较于支持向量

机等方法,具有更好的泛化性能与预报能力。本文采用随机森林算法对构建的参数化台风风场模型关键参数——最大风速半径与 Holland-B 进行优化。

随机森林是由多棵决策树构成的集合,其通过 Bagging(套袋)法从原始数据集中抽取多个样本集,每个样本集均以分类回归树作为子学习器生成组合分类回归器,采用其平均值作为最终结果。相较于单一决策树,随机森林通过构建并融合多棵独立决策树,不仅显著提升了预测精度,还能有效降低单一决策树等高灵活性模型的高方差问题,从而降低了过拟合的风险。

在参数化台风风场模型经验参数的反演优化过程中,随机森林算法相较于传统经验公式具有一定的优势:引入了更多的相关因素,建立了参数化台风风场模型经验参数与多种影响因素之间的关系,能够较快预测参数化台风风场模型经验参数,提高参数反演与台风预报的准确性和可靠性。基于随机森林算法台风风场经验参数预测模型技术路线如图 1 所示,具体步骤如下:

步骤 1 在基于随机森林算法台风风场经验参数预测模型(以下简称随机森林参数预测模型)构建过程中,为了获取最佳的模型性能,采用 k 折交叉验证进行随机森林算法的参数调优。将数据集随机分为 k 个大小相等、互不重叠的子集,在 k 次迭代中,每次都将 $k-1$ 个子集作为训练集用于模型训练,剩余 1 个子集则作为验证集以评估模型性能。由此构建 k 个不同的模型,计算每个模型在对应验证集上的误差,取 k 次误差的平均值作为模型的交叉验证误差,选取误差最小参数组作为随机森林算法的最佳参数。

步骤 2 预处理台风数据,选择最大风速半径与 Holland-B 参数为随机森林参数预测模型的标签。

步骤 3 将 Deep TC Net 数据集划分为 70% 的训练集和 30% 的验证集,考虑到输出参数为最大风速半径及 Holland-B 参数,分别将台风中心的经纬度,台风中心气压及与外围气压的气压差,台风的移动速度、移动方向、最大风速以及作为台风防御参考指标的 7 级风圈半径作为特征输入。

步骤 4 设置已测试的随机森林参数预测模型最佳参数,使用训练集数据训练模型。

步骤 5 调用已训练好的随机森林参数预测模型,根据输入的特征参数输出结果。

步骤 6 结合验证集中数据最大风速半径和 Holland-B 参数值对比输出的相应值,对随机森林参数预测模型进行误差检验,评估其预测效果。

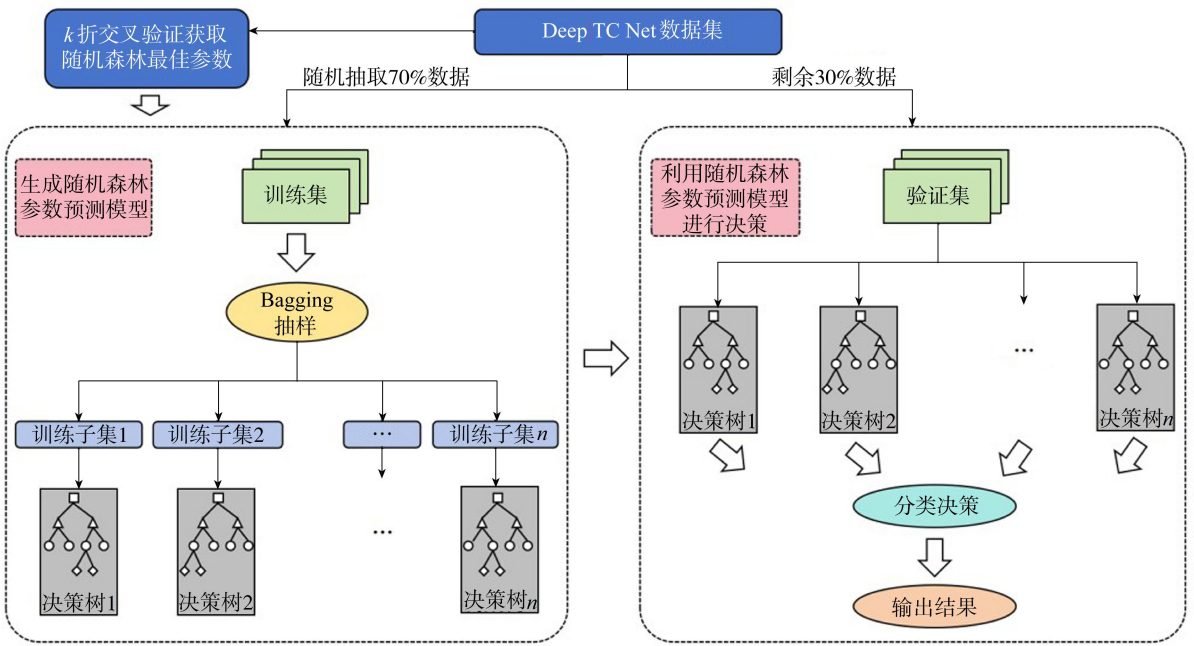


图 1 随机森林参数预测模型技术路线

Fig. 1 Technical roadmap of parameter prediction model based on random forest algorithm

选取估计器数量、决策树最大深度、叶节点最小样本数以及内部节点再划分节点所需最小样本数 4 个算法参数进行调整,建立随机森林参数预测模型。针对随机森林参数预测模型开展模型调优,选取误差最小、性能最高的组合,结果见表 1。

表 1 随机森林算法的最佳参数组合

Table 1 Optimal parameter combinations for random forest algorithm

参数	估计器数量	决策树最大深度	叶节点最小样本数	划分节点所需最小样本数
最大风速半径	1 780	36	1	2
Holland-B 参数	2 850	32	2	2

1.3 训练集和验证集数据

考虑到 CMA、IBTrACS 等数据集缺少历史台风最大风速半径等参数数据,因此构建 Holland 参数化台风风场模型时,需借助其他数据集进行相关研究。Deep TC Net 数据集^[22]包含了 1981—2023 年的台风观测资料,包括台风名称、发生时间、中心经纬度、中心气压、最大风速半径、移动速度、移动方向、最大风速以及 3 种不同风圈的半径。Deep TC Net 数据集与经季后订正的联合台风警报中心的最佳路径数据具有良好的一致性,两者的相关系数为 0.76~0.85。本文使用的训练集及验证集数据(台风最大风速半径、经纬度、中心气压、最大风速、7 级风圈半径等)均来源于该数据集;Holland-B 参数根据梯度风场公式、移行风场公式及 Deep TC Net 数据集其他台风数据反演得出。

1.4 误差分析方法

采用均方根误差(RMSE)、平均百分比误差(MPE)、决定系数(R^2)和纳什效率系数(NSE)评估随机森林参数预测模型性能,以此对随机森林参数预测模型预测精度进行多维度考量。其中 RMSE 可直观反映离散程度, R^2 反映评估回归模型拟合优度及两个变量之间线性关系的强弱,NSE 常用于量化模型(如风速、波浪模型)的预测精度。

2 台风风场经验参数优化

图 2(a)为采用随机森林参数预测模型模拟得到的最大风速半径与验证集数据的对比图,模型运行时间为 3.2 s,预测效率较高。

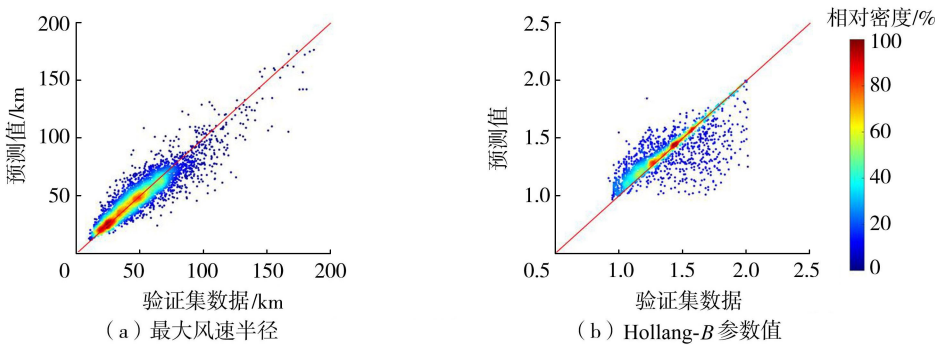


图 2 最大风速半径和 Holland-B 参数预测值与验证集数据对比

Fig. 2 Comparison of predicted values of maximum wind speed and Holland-B parameter with validation set data

由图 2(a)可知,在最大风速半径整个区间,随机森林参数预测模型预测结果与验证集数据整体吻合度较高。具体来看,该模拟值的 RMSE 仅为 9.32 km,NSE 较高,为 0.85,表明模型预测值与验证集数据集中性较好,离散程度较低,对最大风速半径的预测达到了较好水平;MPE 为 3.66%,说明该模型在捕捉数据趋势方面表现良好; R^2 为 0.85,进一步证明随机森林参数预测模型捕捉最大风速半径内在规律的能力较强。

Holland-B 参数值与输入特征参数的内在逻辑更为复杂,模型运行时间较最大风速半径预测略高,为 3.6 s。由图 2(b)可知,随机森林参数预测模型对 Holland-B 参数值预测的 RMSE 仅为 0.13 km,NSE 为 0.73,表明该模型预测值与验证集数据离散程度较小,对 Holland-B 参数具备良好的预测能力。结合 MPE (1.23%)与 R^2 (0.73)综合分析,绝大多数样本的 Holland-B 参数预测值与验证集数据拟合效果较好,说明随机森林参数预测模型能够有效挖掘输入特征与 Holland-B 参数间的内在关联,精准还原 Holland-B 参数的数据变化特征。

3 误差分析验证

3.1 混合风场计算方法

在台风中心附近,参数化台风风场模型能够较好反映台风大风区的风场特征;但在台风外围,因同时受台风及其他天气系统的共同影响,风场风速与参数化台风风场模型模拟风速通常差异较大。为了提升参数化台风风场模型模拟精度,采用指数系数叠加法对参数化台风风场模型模拟风场与再分析风场进行融合:

$$v_c = (1 - w)v_M + wv_Q \tag{5}$$

其中 $w = c^m / (1 + c^m)$ $c = r/nR_m$

式中: v_c 为混合风场风速; v_Q 为背景风场风速,本文选用 ERA5 再分析风场; m 、 n 为经验参数,一般取 $m = 4$, $n = 10$ 。

3.2 实测台风风速验证

采用台风期间 4 场沿岸实测 10 m 高度 10 min 平均风速观测数据进行验证,分别为:①卡努,台风编号 0515,时间 2005 年 9 月 5—13 日;②梅花,台风编号 1109,时间 2011 年 7 月 27 日至 8 月 9 日;③凤凰,台风编号 1416,时间 2014 年 9 月 17—25 日;④山竹,台风编号 1822,时间 2018 年 9 月 7—17 日。基于随机森林参数预测模型建立对应的台风模拟风场,融合背景风场,输出对应台风风速并进行对比。台风测站坐标涵盖四大海域,分别为 W1 江苏吕泗测站(32. 13°N,121. 61°E)、W2 渤海 QF104 浮标(37. 96°N,119. 86°E)、W3 长江口外海 B 浮标(31. 71°N,122. 31°E)和 W4 广东汕头测站(23. 37°N,116. 68°E),每个测站验证一场台风风速,能够较好地反映中国沿岸台风风速特征。测站位置与台风轨迹如图 3 所示。

由图 4 可知,各台风最大风速的模拟值和趋势与实测数据吻合较好。由表 2 可见,混合风场风速 RMSE 最大值为 2. 51 m/s,MPE 均小于 7%,表明随机森林算法优化后的混合风场模拟风速误差较小,随机森林参数预测模型预测参数化台风风场模型参数精度较高。

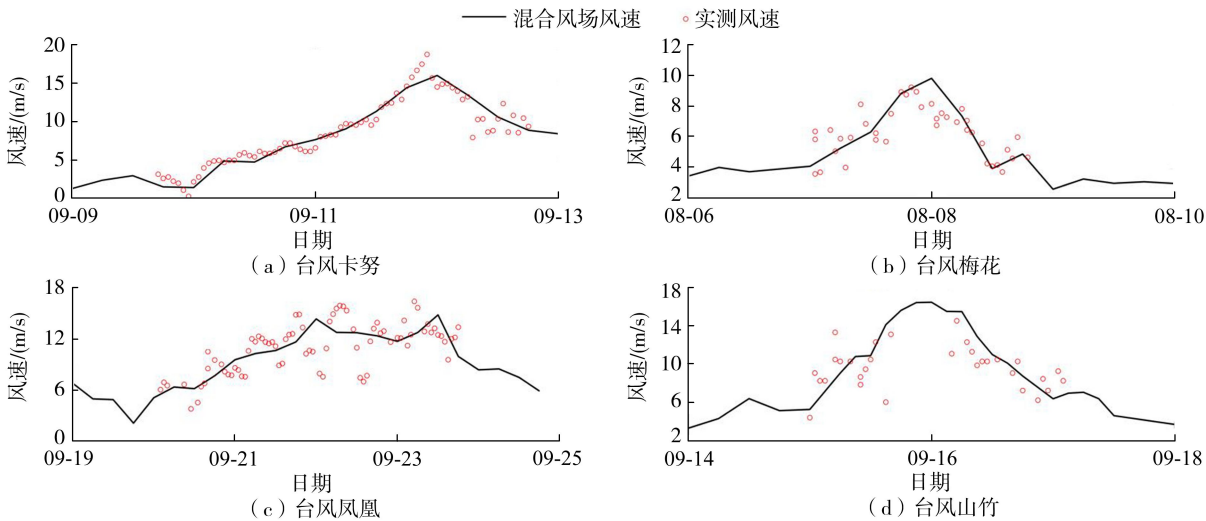


图 4 台风风速对比
Fig. 4 Comparisons of typhoon wind speeds

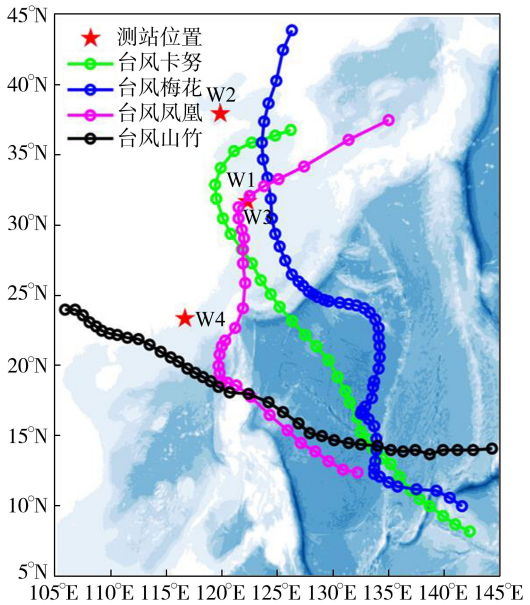


图 3 测站位置与台风轨迹
Fig. 3 Station positions and typhoon tracks

4 讨 论

根据已有研究,最大风速半径可参照台风中心气压、中心气压差、中心所在纬度等参数确定。现有最大风速半径与 Holland-B 参数的经验公式,大多仅考虑参数与其影响因子间的线性关系。然而,线性回归或简单的二次拟合并不能完全解释两个参数的实际变化规律。随机森林算法具备优异的非线性映射能力,可灵活处理非线性变化过程,通过样本训练表征输入变量与输出结果之间的复杂关联关系,适用于构建非线性模型。

4.1 算法优化与经验公式的最大风速半径对比

选取西太平洋海域常用的 4 个最大风速半径经验公式(式(6)~(9)^[12-13,23-24])与随机森林算法训练得到的最大风速半径进行对比,结果见图 5 和表 3。

$$R_m = \exp(3.015 - 6.291 \times 10^{-5} \Delta P^2 + 0.0337 \varphi)$$
 (6)

$$R_m = 51.6 \exp(-0.0223 v_{\max} + 0.0281 \varphi)$$
 (7)

$$R_m = 80 - 0.769(950 - p_c)$$
 (8)

$$R_m = 1.119 \times 10^3 \times (1010 - p_c)^{-0.805}$$
 (9)

式中:Δ*P* 为台风外围气压与中心气压差;*v*_{max} 为该时刻台风最大风速。

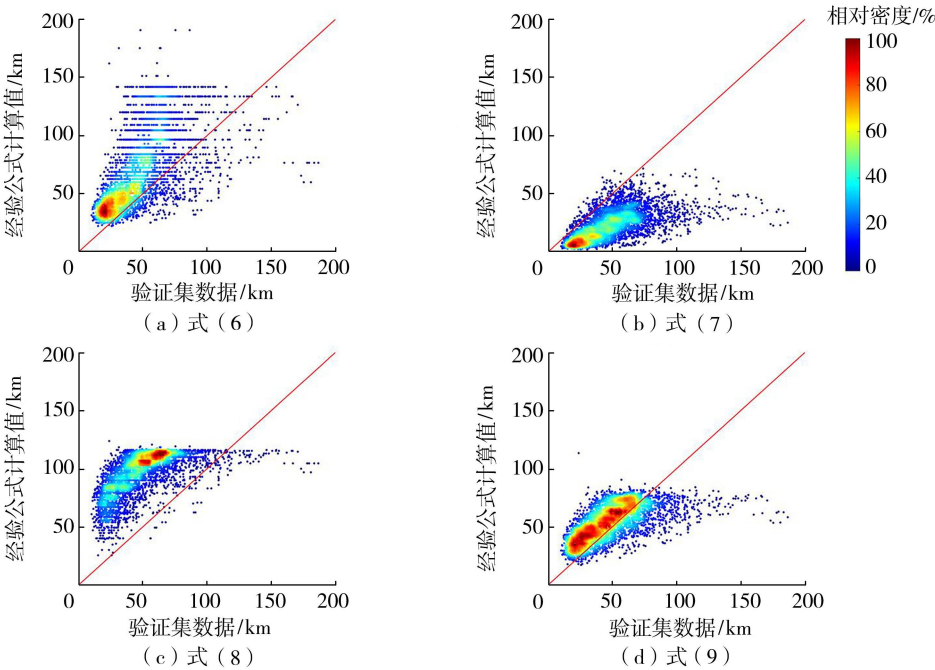


图 5 经验公式计算最大风速半径值与验证集数据对比

Fig. 5 Comparisons of values of radius of maximum wind speed calculated by empirical formula with validation set data

表 3 随机森林算法优化与经验公式的最大风速半径误差对比

算法或经验公式	NSE	<i>R</i> ²	MPE/%	RMSE/km
随机森林算法	0.85	0.85	3.66	9.32
式(6)	-1.24	0.35	59.00	35.90
式(7)	-0.84	0.34	-51.39	32.54
式(8)	-3.31	0.36	128.52	49.77
式(9)	0.34	0.37	24.93	19.45

由图 5、表 3 可以看出,经验公式计算值与验证集数据均有较大误差,散点拟合斜率总体上与直线不符;经验公式的 *R*² 均低于随机森林算法;式(9)的 MPE 与 RMSE 分别为 24.93% 与 19.45 km,仍远高于随机森林算法对应误差。随机森林算法可有效改善经验公式对最大风速半径拟合不足的问题,显著提升最大风速

半径的预测精度。

4.2 算法优化与经验公式的 Holland-B 参数对比

现有研究中,Holland-B 参数通常以台风中心气压、中心气压差、最大风速半径、中心位置纬度、移动速度和中心气压强度变化率等作为主要影响因子。与最大风速半径的经验公式类似,几乎所有 Holland-B 参数经验公式只考虑了 Holland-B 参数与影响因子之间的线性关系,仅少数模型考虑了 Holland-B 参数与台风中心压差之间的二次拟合关系。4 个常用于西太平洋海域的 Holland-B 参数经验公式^[16-18,25]如下:

$$B = \begin{cases} -2.365 + 0.0573\Delta P + 0.0035R_m & (\text{登陆前}) \\ 0.4899 + 0.0178\Delta P & (\text{登陆后}) \end{cases} \tag{10}$$

$$B = 4.1025 \times 10^{-5} \Delta P^2 + 0.0293\Delta P + 0.7959\ln R_m - 4.6010 \tag{11}$$

$$B = 1.2858 + 8.6396 \times 10^{-3} \Delta P - 8.7745 \times 10^{-3} \varphi \tag{12}$$

$$B = -0.19155\Delta P^2 + 0.50523\Delta P + 0.08252 \tag{13}$$

由图 6、表 4 可以看出,对应 Holland-B 参数值误差表,除式(12)外,其余经验公式计算值与验证集数据对应的 NSE 均为较大的负值,整体数据较为发散。式(12)Holland-B 参数值的拟合性较好,但经验公式计算值仍存在不同程度的高估与低估现象;散点拟合有明显分叉,呈现双斜率特征,且其 MPE 与 RMSE 明显大于随机森林算法优化结果。对于 R^2 ,4 个经验公式以式(10)表现最优,为 0.53,但仍低于随机森林算法的 R^2 。MPE 绝对值与 RMSE 均以式(12)为最小,分别为 12.52% 和 0.23,显著高于随机森林算法误差值。可见,随机森林算法可以显著提高 Holland-B 参数的预测准确性,解决了经验公式与 Holland-B 参数间拟合不佳的问题。

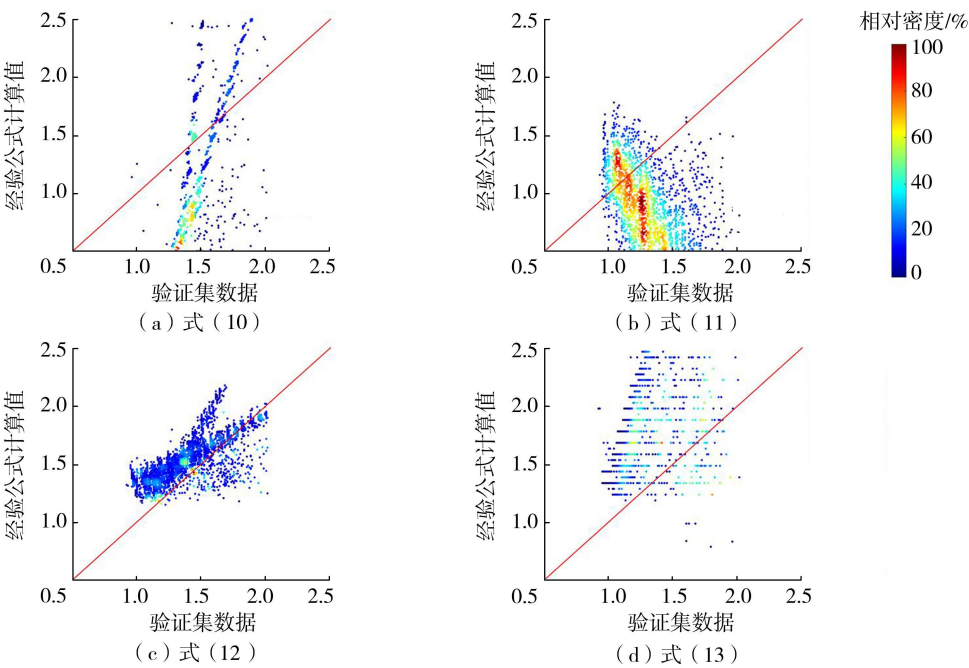


图 6 经验公式计算 Holland-B 参数值与验证集数据对比

Fig.6 Comparisons of values of Holland-B parameter calculated by empirical formula with validation set data

表 4 随机森林算法优化与经验公式的 Holland-B 参数值误差对比

Table 4 Error comparisons of values of Holland-B parameter between optimization by random forest algorithm and empirical formulas

算法或公式	NSE	R^2	MPE/%	RMSE
随机森林	0.73	0.73	1.23	0.13
式(10)	-25.62	0.53	-66.51	1.29
式(11)	-18.55	0.41	-50.00	1.11
式(12)	0.14	0.51	12.52	0.23
式(13)	-33.28	0.52	81.50	1.46

5 结 论

- a. 随机森林算法能够稳定、准确地预测 Holland 参数化台风风场模型最大风速半径和 Holland-B 两个参数值,模型预测时间均小于 4 s。对于最大风速半径优化,随机森林算法得出的 NSE 为 0.85, RMSE 为 9.32 km, MPE 为 3.66%。在对 Holland-B 参数优化时,相较于最大风速半径,二次拟合情况稍差, R^2 为 0.73,预测精度较低;RMSE 和 MPE 优于最大风速半径优化,分别为 0.13、1.23%。与经验公式相比,随机森林算法优化的结果误差更小,拟合情况更优,使用随机森林算法对 Holland-B 参数进行优化的结果较经验公式更为可靠。根据风场最大风速半径和 Holland-B 参数预测值建立的参数化台风风场模型,风速 MPE 在 7%以内, RMSE 均小于 3 m/s,模型可信度较高,模拟风场风速更为精确,为 Holland 台风风场模拟提供了新方法。
- b. 相比于传统的经验公式,随机森林参数预测模型能够输出更为合适的参数值。适用于西太平洋地区的 4 组经验公式对比验证结果表明,各经验公式的计算结果均存在不同程度的高估与低估,整体拟合效果欠佳。相较而言,随机森林算法的计算值误差均小于经验公式计算值,可见机器学习方法可以显著提高台风风场经验参数估计的准确性,解决了经验公式与参数之间拟合不佳的问题,为构建更为合理的参数化台风风场模型提供了新方法。

参考文献:

[1] 陈美香,左常圣,张雯皓,等. 热带太平洋海平面年际和年代际变化研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(3):249-255. (Chen Meixiang,Zuo Changsheng,Zhang Wenhao,et al. Research progress of inter-annual and multi-decadal sea level variability in tropical Pacific Ocean[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2017,45(3):249-255. (in Chinese))

[2] Zheng Jinhai,Wang Jincheng,Zhou Chunyan,et al. Numerical simulation of typhoon-induced storm surge along Jiangsu coast,Part II:calculation of storm surge[J]. Water Science and Engineering,2017,10(1):8-16.

[3] 左军成,左常圣,李娟,等. 近十年我国海平面变化研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版),2015,43(5):442-449. (Zuo Juncheng,Zuo Changsheng,Li Juan,et al. Advances in research on sea level variations in China from 2006 to 2015[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2015,43(5):442-449. (in Chinese))

[4] 高延康,赵钢铁钢,田雨,等. 台风活动对中国沿海地区极端降水的影响[J]. 水科学进展,2023,34(1):1-11. (Gao Yankang,Zhao Tongtiegang,Tian Yu,et al. Effects of typhoon activities on extreme precipitation in coastal areas of China[J]. Advances in Water Science,2023,34(1):1-11. (in Chinese))

[5] 曾照洋,杨芳,吴小明,等. 珠海市横琴岛北部极端风暴与天文大潮不同遭遇情景下洪涝淹没规律研究[J]. 水资源保护,2025,41(4):42-50. (Zeng Zhaoyang,Yang Fang,Wu Xiaoming,et al. Study on the law of flood inundation under different encounter scenarios of extreme storms and astronomical spring tides in the northern part of Hengqin Island,Zhuhai City[J]. Water Resources Protection,2025,41(4):42-50. (in Chinese))

[6] 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))

[7] Jelesnianski C P. A numerical computation of storm tides by a tropical storm impinging on a continental shelf[J]. Monthly Weather Review,1965,93:343-358.

[8] 陈孔沫. 一种计算台风风场的方法[J]. 热带海洋,1994,13(2):41-48. (Chen Kongmo. A computation method for typhoon wind field[J]. Tropic Oceanology,1994,13(2):41-48. (in Chinese))

[9] Myers V A. Maximum hurricane winds[J]. Bulletin of the American Meteorological Society,1957,38:227-228.

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

[11] Schloemer R W. Analysis and synthesis of hurricane wind patterns over Lake Okeechobee, Florida[R]. Washington, D. C.: U. S. Department of Commerce, Weather Bureau,1954.

[12] 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.

[13] Kato F. Study on risk assessment of storm surge flood,technical note of national institute for land and infrastructure management of Japan[R]. Tokyo:National Institute for Land and Infrastructure Management,2005.

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.03.019

淤泥质海岸多要素协同减灾数值模拟研究

岑林^{1,2},倪兴也^{1,2},冯曦^{1,2},陶爱峰^{1,2},郑金海^{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:以淤泥质海岸的两类典型生态友好型消浪要素牡蛎礁和红树林为研究对象,基于非静压波浪 SWASH 模型,对规则波经牡蛎礁、红树林传播演变的水动力特征开展数值模拟,探究不同水位与波浪组合工况下淤泥质海岸单一牡蛎礁、单一红树林及二者协同作用的消浪变化规律。结果表明:牡蛎礁与红树林组合工况可有效提升整体减灾效能,消浪过程呈非线性变化特征;协同消浪工况中红树林对牡蛎礁具有显著增益效应,工程布设可优先提升红树林栽种规模以实现高效减灾;低水位条件下牡蛎礁消浪贡献率可达 50% 以上,高水位时红树林依托冠层结构发挥主导消浪作用,二者梯次配合可实现逐级消能减灾。

关键词:红树林;牡蛎礁;淤泥质海岸;协同减灾;生态减灾;SWASH 模型

Numerical simulation study on multi-factor synergistic disaster reduction on muddy coasts

Cen Lin^{1,2}, Ni Xingye^{1,2}, Feng Xi^{1,2}, Tao Aifeng^{1,2}, Zheng Jinhai^{1,2}

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

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

Abstract: By taking two typical eco-friendly wave-dissipating elements on muddy coasts, namely oyster reefs and mangroves, as research objects, a numerical simulation was conducted on the hydrodynamic characteristics of regular wave propagation and evolution over oyster reefs and mangroves based on the non-hydrostatic wave SWASH model. Furthermore, the wave dissipation variation laws of a single oyster reef, a single mangrove, and their synergy on muddy coasts under different combinations of water levels and waves were explored. The results indicate that the combined condition of oyster reefs and mangroves effectively improves the overall disaster reduction efficiency, and the wave dissipation process exhibits nonlinear variation characteristics. In the synergistic wave dissipation condition, mangroves have a significant enhancement effect on oyster reefs, and engineering layouts can prioritize increasing the planting scale of mangroves to achieve efficient disaster reduction. Under low-water-level conditions, the wave dissipation contribution rate of oyster reefs can reach more than 50%, while at high water levels, mangroves play a dominant role in wave dissipation relying on the canopy structure, and the sequential coordination of the two can achieve progressive energy dissipation and disaster reduction.

Key words: mangrove; oyster reef; muddy coast; synergistic disaster reduction; ecological disaster reduction; SWASH model

全球约有 70% 的海岸线正在经历着不同程度的海岸侵蚀问题^[1]。现有的海岸防御措施主要分为两大类:一类通过修筑人工构筑物削弱近岸波浪的能量^[2];另一类着重修复和创建生态减灾要素,如红树林、珊瑚礁、牡蛎礁等,以及建立后滨沙丘、种植防护林等生态工程,以增强海岸的自然防护能力^[3]。目前,国际上已有大量涉及红树林、珊瑚礁、盐沼等典型滨海生态系统和自然岸线的保护修复应用案例,我国也正在全面推进海洋生态保护修复工作,加快建设“蓝色海湾”“美丽岸滩”^[4-5]。在此背景下,开展红树林与牡蛎礁协同消浪减灾研究是应对海岸带多重风险、践行生态文明建设的科学路径。

在自然生态系统中,水下生物礁构成了海岸带的第一道防御屏障,其中牡蛎礁可净化水质、储存蓝碳、提供鱼类繁殖场并减缓海洋侵蚀,为亚热带海岸线提供天然的保护^[6]。Chowdhury 等^[7-8]的现场试验显示,在适宜的水深环境下,牡蛎礁确实具备潜在的防波堤功能;波浪传播至礁坪边缘时表现出强烈的非线性特征^[9],可有效衰减波能^[10];Morris 等^[11]发现,牡蛎礁的淹没时长与淹没水深是影响其消浪效果的两个关键因素;Tao 等^[12]分析了相对淹没度、相对波峰宽度及牡蛎密度对波浪衰减的影响,研究了牡蛎城堡周围流场的

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3007900)

作者简介:岑林(2002—),女,硕士研究生,主要从事海岸带生态修复和协同减灾研究。E-mail:lin.cen@hhu.edu.cn

通信作者:倪兴也(1988—),男,副教授,博士,主要从事河口海岸水动力研究。E-mail:xingye.ni@hhu.edu.cn

空间变化与湍流动能,揭示了波能衰减机理;洪新等^[13]研究发现,双层牡蛎礁在设计高水位和极端高水位条件下均能有效减少波浪的影响。

近岸植被构成的生态缓冲带可有效衰减波能^[14-15]、适应海平面上升^[16]并减轻波浪对近岸构筑物的冲击^[17]。红树林被认为是保护海岸线,降低侵蚀性海浪、暴雨和海啸等灾害破坏程度的重要生态措施^[18],其通过形态阻力和茎秆运动降低水流速度并耗散波能^[19]。目前关于红树林消浪效果的研究主要聚焦于水深、波高、波周期等水动力要素及高度、密度、刚度、宽度和迎水面面积等植被特性对波浪削减效果的影响^[20-26],且水位位于植被冠层时消波效果较好^[27]。

近年来,牡蛎礁、红树林消浪及海岸生态防护相关研究已从单一植被消浪机制逐步转向多要素协同减灾。将红树林和盐沼植被等典型海岸带生态系统与人工构筑物相结合的复合型生态海岸防护与修复模式,已成为海岸工程与生态保护交叉领域的研究热点^[28-29]。研究表明,将鱼礁系统、系泊浮船或防波堤与红树林组合配置,可促进消减波浪能量并提高红树林的存活率^[30-34]。Liu 等^[35]分析了竹筏、人工礁石、松木桩与生态牡蛎礁的不同组合对红树林幼苗的侵蚀和沉积过程的影响,发现在 5 a 重现期内,竹筏与人工鱼礁和松木桩与生态牡蛎礁的组合表现出显著的抗侵蚀作用。现有研究主要聚焦于多要素减灾的可行性,而针对生态海岸条件下多要素协同减灾的水动力研究,及对协同减灾过程中各要素的贡献与协同机制的讨论尚不充分,基于自然的减灾要素在协同减灾中的作用研究存在明显不足。

本文将牡蛎礁与红树林自海向岸布置,采用 SWASH(simulating waves till shore)模型研究不同潮位及波高组合下牡蛎礁与红树林的协同消浪减灾效果与机制,为海岸生态工程提供针对性的防护对策。

1 非静压波浪 SWASH 模型

1.1 控制方程

SWASH 模型适用于模拟波浪从近海向岸传播的时域演变过程,采用含非静压项的浅水方程作为控制方程,可以有效复现复杂环境下大范围的表面波及浅水流动力过程。SWASH 模型的垂向二维控制方程为:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial wu}{\partial z} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \xi}{\partial x} = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial w^2}{\partial z} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial q}{\partial z} = 0 \tag{3}$$

式中: u 、 w 分别为 x 、 z 方向的速度分量; t 为时间; ρ_0 为流体密度; g 为重力加速度; ξ 为波浪自由面高程; q 为非静水压力。

1.2 边界条件

忽略表面张力时,自由面边界条件为:

$$w|_{z=\xi} = \frac{\partial \xi}{\partial t} + u \frac{\partial \xi}{\partial x} \tag{4}$$

进行底床无渗透近岸地形流体模拟时,底部运动学边界条件为:

$$w|_{z=-d} = -u \frac{\partial d}{\partial x} \tag{5}$$

式中: d 为静水深。

忽略表面张力和黏性效应,自由面压力为常数(通常为大气压),可得自由面的压力边界条件:

$$q|_{z=\xi} = 0 \tag{6}$$

底部边界的垂向流速应满足式(5),水平向流速应满足:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = 0 \tag{7}$$

开边界包括出流边界和入流边界,入流边界条件为速度入口边界条件,结合弱反射边界条件消除二次反射造成的影响:

$$u_b = \pm \sqrt{g/h} (2\xi_b - \xi) \tag{8}$$
$$h = \xi + d$$

其中 u_b 为入流边界流速; ξ_b 为入射波的表面高程。式中正负号取决于入流边界的位置,东、北两个方向为入流边界时取正号,西、南两个方向时取负号。为了更好地消除反射,在出流边界设置海绵层进行消波。

出流边界采用辐射边界条件并结合海绵层消波方法。在满足线性波理论假设时,采用允许长波无反射出流的 Sommerfeld 边界条件:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + c \frac{\partial f}{\partial x} = 0 \tag{9}$$
$$c = \sqrt{gh}$$

其中 f 一般为波面或速度等变量; c 为波速。

陆边界包括固壁边界和动边界两种形式,其中动边界采用干湿网格法处理,最小水深 $h_{\min}$ 由初始条件确定,之后每一时间步均对网格点进行干湿判断:当网格点水深小于 $h_{\min}$ 时,网格判断为干网格;反之判断为湿网格;干网格水深按给定的 $h_{\min}$ 进行修正。

1.3 植被模拟的数学公式

SWASH 模型中植被效应可由莫里森方程确定。莫里森方程是海洋工程与流体力学领域用于计算波浪对海洋平台支柱、桩柱、管道等细长结构物作用力的半经验公式,其单位长度波浪力 $f(z,t)$ 表达式为:

$$f(z,t) = 0.5\rho_0 C_D u(z,t) |u(z,t)| + 0.5\rho_0 C_M A \frac{\partial u(z,t)}{\partial t} \tag{10}$$

式中: C_D 为无量纲拖曳力系数; C_M 为无量纲惯性力系数; A 为植被的截面积,对于圆柱体, $A = \pi D^2/4$; D 为植被的特征直径; $u(z,t)$ 为波浪水质点的水平速度; $\partial u(z,t)/\partial t$ 为波浪水质点的水平加速度。

2 数值模拟试验设置

2.1 SWASH 模型验证

采用 SWASH 模型,以不透水矩形块体概化牡蛎礁,采用植被模型模拟红树林。首先通过复演 Garcia 等^[36]物理模型试验中测点的水位历时曲线,验证 SWASH 模型模拟多孔介质透水消波的可行性。由图 1 可见,对比规则波经过透水堤坝前数值模拟与物理模型模拟的波浪自由面水位,其历时曲线的波峰、波谷存在一定的误差,而透水堤坝后数值模拟值与物理模型模拟值基本吻合。

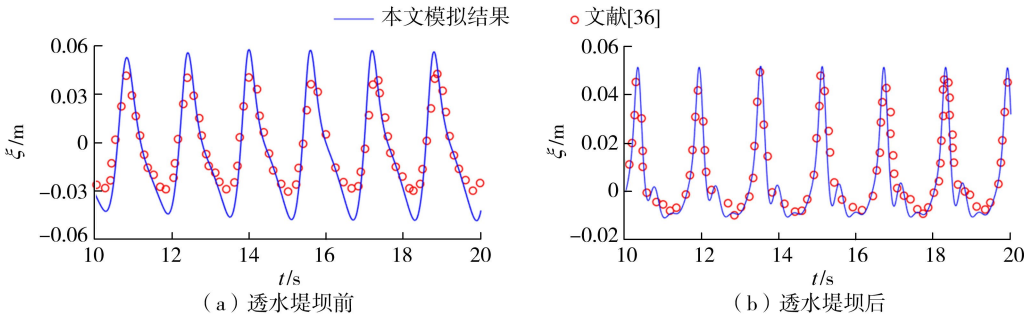


图 1 多孔介质消浪验证结果

Fig. 1 Validation results of wave dissipation by porous media

随后复演 He 等^[37]的物理模型试验,开展考虑红树林根、茎、叶的消波验证。不同水深条件下的拖曳力系数采用 Hu 等^[38]的经验公式计算获得,该经验公式适用于雷诺数 Re 介于 300~4 700 之间。

为较好地模拟根、茎、叶的消浪效果,选取两组植被消浪数值模拟试验工况 A、B,采用密集圆柱模拟红树林的冠层与根部结构,通过调整根、茎、叶 3 层密集圆柱的直径、密度与高度,使其形态及消浪效果与物理模型试验相似。两组工况均为入射波高 $H_0 = 0.05\text{ m}$,周期 $T = 1\text{ s}$,植被密度为 100 株/m^2 ,叶的 C_D 为 4.42,工况 A、B 的 d 分别为 0.25、0.45 m;工况 A 中根、茎的 C_D 分别为 1.70、1.37,工况 B 分别为 1.32、1.19。

图 2 为沿程透射系数 K 随着波浪在植被上传播距离逐步衰减的过程,其中横坐标为沿着植被的距离 x 与波长 L 的比值,工况 A、B 情况下数值模拟与物理模型试验结果吻合良好,表明 SWASH 模型能够较好地模

拟考虑根、茎、叶细节特征的植被消浪过程。

2.2 试验工况设置

本文基于 SWASH 模型构建数值波浪水槽,水槽左侧设置无反射造波边界,右侧边界布设海绵层用于吸收透射波浪。海绵层长度选 L 的 3~5 倍,本文取 9 m。模型垂向采用 4 层分层剖分以获取良好的模拟精度,水平网格尺寸为 0.05 m,计算时间步长取 0.01 s。

根据布拉格共振原理^[39],为取得最大的波浪反射率和最小的波浪透射率,牡蛎礁布设间距取 $0.5L$;综合协同消浪布局要求,牡蛎礁与红树林的间距取 $0.75L$ 。布置 4 排牡蛎礁,红树林植被区总长为 3.0 m,数值模拟试验布置见图 3。按照 1:10 的比例尺,牡蛎礁高度取 0.10 m,宽度取 0.25 m^[40]。

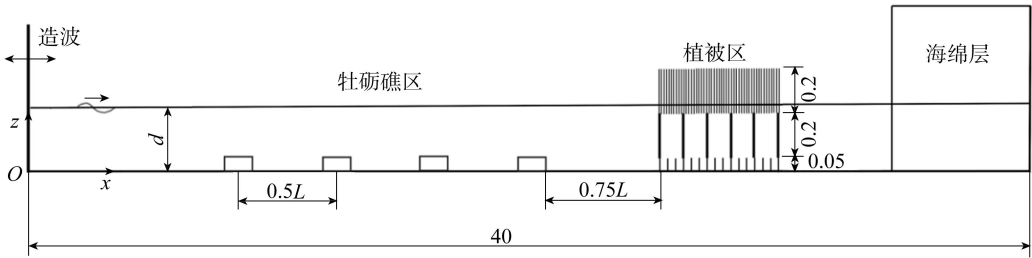


图 3 牡蛎礁与红树林协同消浪数值模拟试验布置(单位:m)

Fig. 3 Layout of numerical simulation test for synergistic wave dissipation by oyster reefs and mangroves (unit: m)

红树科 *Rhizophora* 约占全球红树林分布总量的 90%,是海岸带生态防护与修复工程中应用最为广泛的典型树种。结合典型淤泥质海岸潮位变化范围及红树林植株生长形态特征^[41-42],采用高度为 0.45 m 的红树林作为概化模型。设置红树林密度为 40、60、80 株/ m^2 ,考虑红树林根、茎、叶的不同形态对消浪效果的不同影响,数值模型中将红树林分层概化为密集圆柱体,其中单株红树林的根、茎、冠层的直径分别为 0.006、0.01、0.001 m,高度分别为 0.05、0.20、0.20 m,布设密度分别为 10、1、90 根/株,红树林的拖曳力系数见表 1。为更好地模拟红树林冠层与根系的垂向消浪作用,需考虑垂向阻力。Suzuki 等^[43]研究表明,SWASH 模型模拟试验需要考虑孔隙率和惯性力作用,惯性力附加质量系数取 1。试验工况采用规则波作为入射波,周期为 1.6 s 保持不变,设置 0.05、0.10 m 两种波高,0.20、0.25、0.30、0.35、0.40、0.45 m 共 6 种水深工况,布置工况分为单一牡蛎礁消浪 M1、单一红树林消浪 M2 和牡蛎礁与红树林组合消浪 M1-2,共组合形成 84 组数值模拟试验工况,系统探究牡蛎礁、红树林单独作用及二者协同作用下的消浪减灾规律。

表 1 红树林根、茎、叶的拖曳力系数取值

Table 1 Drag coefficient values of roots, stems, and leaves of mangroves

不同植被 部位	拖曳力系数					
	$d=0.20\text{ m}$		$d=0.35\text{ m}$		$d=0.45\text{ m}$	
	$H_0=0.05\text{ m}$	$H_0=0.10\text{ m}$	$H_0=0.05\text{ m}$	$H_0=0.10\text{ m}$	$H_0=0.05\text{ m}$	$H_0=0.10\text{ m}$
根	1.60	1.26	1.82	1.34	1.93	1.38
茎	1.32	1.15	1.43	1.19	1.48	1.21
叶	4.42	3.58	4.42	4.42	4.42	4.42

2.3 经验公式假设与推导

采用 K 评价不同减灾要素组合方案的减灾效能, K 越小,表示综合减灾性能越好。 K 由减灾要素区域后方的透射波高 H_t 与 H_0 的比值确定:

$$K=H_t/H_0 \tag{11}$$

为探讨各减灾要素在协同减灾中的作用,利用不同的水深、波高、红树林密度下的透射系数数据集,拟合确定理论公式的待定参数,建立组合工况透射系数与各单一减灾要素透射系数的理论公式,比较各减灾要素对应的相关参数,分析量化各减灾要素在协同减灾过程中的贡献权重,并揭示其协同减灾机理。以组合工况

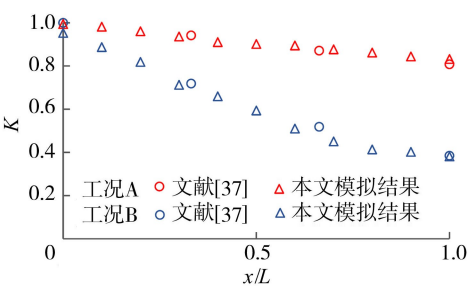


图 2 考虑根、茎、叶的植被消浪验证结果

Fig. 2 Validation results of wave dissipation by vegetation considering roots, stems, and leaves

M1-2 为例,其透射系数 K_{12} 可按式计算:

$$K_{12} = \alpha K_1^\beta K_2^\gamma$$

(12)

式中: K_1 、 K_2 分别为单独布置牡蛎礁和单独布置红树林的透射系数; α 、 β 、 γ 为待定系数,由不同水深、波高和周期条件下得到的透射系数数据集拟合确定。

3 试验结果分析

3.1 牡蛎礁消浪减灾特性

M1 工况下,不同水深和波高组合条件下沿程透射系数变化曲线如图 4 所示。

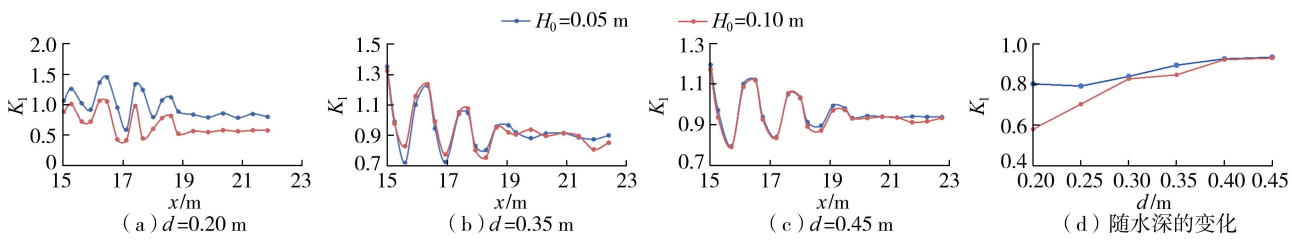


图 4 牡蛎礁沿程透射系数变化

Fig. 4 Variation of transmission coefficient along oyster reef

由图 4(a) 可见, $d=0.20\text{ m}$ 时,波浪在经过前两排牡蛎礁时 K_1 有所增大,在牡蛎礁中间区域前段迅速降低,在下一排牡蛎礁前迅速增大。对比 H_0 分别为 0.05 、 0.10 m 时的 K_1 差值沿程变化, $H_0=0.05\text{ m}$ 时, K_1 普遍较 $H_0=0.10\text{ m}$ 时高出 20% 。

由图 4(b)(c) 可知, $d=0.35$ 、 0.45 m 时,波浪经过单个牡蛎礁和牡蛎礁中间区域前段时 K_1 减小,在下一排牡蛎礁前 K_1 则快速增大,并出现明显波浪壅高现象。两种波高情况对比表明,波浪经过前两座牡蛎礁时沿程 K_1 差异较小;当 d 与牡蛎礁高度之比大于 3 时, H_0 对牡蛎礁沿程 K_1 变化影响微弱。

波浪在经过牡蛎礁过程中, H_1 普遍有明显的下降过程,该过程主要是反射波与入射波叠加作用所致。水深较浅时,受牡蛎礁透水性的影响,波浪发生变形与破碎,致使其沿程 K_1 变化规律与 $d=0.35$ 、 0.45 m 时有所区别。

图 4(d) 为牡蛎礁消浪作用下 K_1 随 d 的变化规律。相同 H_0 时,随着 d 的增大, K_1 普遍呈增大趋势。在 $H_0=0.10\text{ m}$ 、 $d=0.20\text{ m}$ 的工况下,由于波浪在经过牡蛎礁时发生破碎现象,牡蛎礁的消浪作用显著,这一结论与 Tao 等^[12] 的研究结论相似:当相对礁顶高度(水面与礁顶的距离)与 H_0 之比为 1 时,波浪破碎和摩擦耗散共同主导了波浪的衰减; d 由 0.20 m 增大至 0.35 m 时, K_1 迅速增大; d 由 0.35 m 增大至 0.45 m 时, K_1 继续增大但幅度明显放缓。当相对礁顶高度与 H_0 之比大于 2 时,摩擦耗散占主导地位,且随着相对礁体淹没度的增大,摩擦耗散作用逐渐减弱^[44]。因此, K_1 与 d 正相关, d 与牡蛎礁高度的比值较小时, K_1 对 H_0 的敏感性较强, d 与牡蛎礁高度的比值越大, K_1 对 H_0 的敏感性越弱。

3.2 红树林消浪减灾特性

已有研究表明,植被带沿程波高衰减规律与 Dalrymple 幂函数、Kobayashi 指数衰减公式的波高衰减规律较为吻合^[45-46]。波浪与植被结构的相互作用会诱发水体紊动,耗散规则波波浪能量,波高随之降低,且透射系数均随着波浪在植被带传播而呈逐步减小的趋势。本文采用 SWASH 模型,对单株红树林消浪的水动力特性开展研究。

由图 5(a)~(c) 可见,波高越大、植被密度越高,植被带沿程波高衰减效应越显著,且能衰减主要集中于植被带前半段。以 $d=0.35\text{ m}$ 、 $H_0=0.10\text{ m}$ 、红树林密度 $60\text{ 株}/\text{m}^2$ 工况为例,植被带整体消浪率为 53.84% ,其中前半段达 36.67% ,后半段仅为 17.17% ;当 $H_0=0.05\text{ m}$ 时,植被带整体消浪率为 37.64% ,前、后半段分别为 22.55% 与 15.09% 。随着水深增加,红树林植被消浪能力逐步提升,且植被带前半段波高衰减速率明显更大。

图 5(d) 为红树林密度为 40 、 60 、 $80\text{ 株}/\text{m}^2$, $H_0=0.05$ 、 0.10 m 时, K_2 随 d 的变化规律。结果表明:相同水深条件下, K_2 与植被密度、 H_0 均呈负相关关系^[47]。 $H_0=0.05\text{ m}$ 对应的 K_2 较 $H_0=0.10\text{ m}$ 时平均偏高 17.3% ,且 K_2 随着植被密度的增大而减小,其对植被密度的敏感程度受 d 影响。当 d 由茎层抬升至冠层中

心高度时, K_2 对植被密度的敏感性随 d 增加逐渐增强; 当 d 由冠层中心继续上升至冠层顶部时, 该敏感性基本不再随 d 发生明显变化。

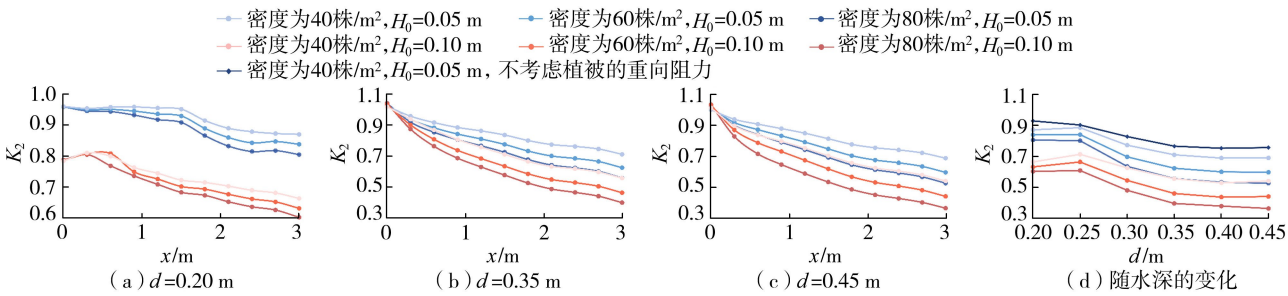


图5 红树林沿程透射系数变化

Fig.5 Variation of transmission coefficient along mangrove

整体来看, K_2 随 d 增大普遍呈现先增大、后减小并逐渐趋于稳定的变化特征。红树林复杂形态对波浪衰减过程影响显著。由于植被消浪时以植被形状阻力能量耗散效应为主导^[48]; $d=0.20\text{ m}$ (淹没度 0.44) 时, 水面低于冠层底部 0.05 m, 波浪仅与茎层产生紊动作用, 由于茎层圆柱体结构密度较小, 能量耗散有限, K_2 偏大; $d=0.25\text{ m}$ 时, 水面与冠层底部齐平, 此时 K_2 受植被密度与 H_0 共同影响, 表现为 H_0 越大、植被密度越小, K_2 反而增大。

设置红树林密度为 40 株/ m^2 、 $H_0=0.05\text{ m}$, 将考虑与不考虑植被垂向阻力的工况进行对比, 结果显示: 不考虑植被垂向阻力时 K_2 普遍较考虑垂向阻力时大 5%, 但在 $d=0.25\text{ m}$ 时二者差值较小, 说明非静压模型在模拟不同密度、不同直径的植被与波浪耦合作用时, 可能会低估植被实际的消浪效能, 而冠层密度越大, 波浪受高密度冠层垂向阻力作用越强, 消浪效果进一步提升; d 由 0.25 m 继续上升时, 波浪全部与冠层接触, 茂密枝叶与树干间的空隙被最小化^[19], K_2 迅速减小; d 介于 0.35~0.45 m 时, K_2 基本趋于稳定; $d=0.45\text{ m}$ 时, 波浪下半部分与冠层接触、上半部分在冠层顶部受界面摩擦作用, 红树林密度越大, 植被冠层与水体的界面摩擦耗能越显著, 同时冠层可促使波浪提前破碎并增强水体紊动, 进一步耗散波浪能量, 因此 K_2 最小值多出现于淹没度趋近于 1 的工况。

3.3 牡蛎礁与红树林协同减灾机制

3.3.1 不同潮位下沿程透射系数变化特性

为探讨牡蛎礁与红树林的协同消浪作用, 试验设置 $d=0.20, 0.35, 0.45\text{ m}$, 红树林密度为 80、60、40 株/ m^2 和 $H_0=0.05, 0.10\text{ m}$ 的 18 组试验工况。

a. 低潮位($d=0.20\text{ m}$)。低潮位条件下, 波浪与牡蛎礁相互作用强烈, 波浪传入红树林消浪区后, 主要与植被茎层产生摩擦耗散作用。图 6(a) 显示, 低潮位时, 波高的改变对沿程波高变化产生显著的影响。牡蛎礁与红树林协同消浪过程中, 波浪在牡蛎礁消浪区的沿程波高变化规律与牡蛎礁单独消浪时的曲线规律一致。由于低潮位水面仅接触植被茎层, 而茎层密度小, 自身反射较弱, 因此红树林密度的改变对牡蛎礁消浪区沿程波高变化的影响十分微弱。受到布拉格共振的影响, 牡蛎礁消浪区内入射波与反射波叠加, 形成沿程波动性透射系数变化曲线。 $H_0=0.05\text{ m}$ 时任意位置的沿程 K_{12} 均大于 $H_0=0.10\text{ m}$ 的工况, 因此在低潮位时, 由于波浪与牡蛎礁相互作用较强, K_{12} 随 H_0 的增大而减小, H_0 越大, 消浪效果越显著。波浪经过红树林消浪区后, $H_0=0.05\text{ m}$ 时沿程波高衰减呈现显著波动性, 且红树林密度越大, K_{12} 越小, 消浪衰减作用越强。

b. 平均潮位($d=0.35\text{ m}$)。平均潮位条件下, 波浪与牡蛎礁接触减弱, 在传播至红树林消浪区时与植被的冠层完全接触。图 6(b) 显示, 平均潮位时, 波高的改变对沿程波高变化影响较低潮位相对微弱。两种波高情况下, 牡蛎礁消浪区的沿程波高变化趋势一致, 红树林消浪区的沿程波高变化趋势也较为相似。波浪在进入红树林消浪区前发生波高壅高现象, 波高越大, 红树林消浪区波浪衰减速率越快, 衰减效应更集中于区域前半段。由于本文所设置的红树林密度较小, 可忽略密集冠层间的遮蔽作用, 因此红树林反射作用较弱, 对牡蛎礁消浪区沿程波高变化影响微弱。红树林密度的变化对植被区沿程波高变化曲线影响显著, 波浪传播至红树林区最前端时, 植被密度的改变对沿程波高变化的影响开始显现, 植被密度越大, 波浪在植被区前端 0.50 m 的衰减越剧烈。随着红树林密度的增大, 对 K_{12} 的抑制存在阈值效应, 因此随着红树林密度的增

大, K_{12} 减小速率减小。

c. 高潮位($d=0.45\text{ m}$)。高潮位条件下,波浪与牡蛎礁接触微弱,在传播至红树林消浪区时与植被的冠层一半接触、一半越过冠层顶部。图 6(c) 显示,波高对牡蛎礁消浪区沿程波高变化影响微弱,且随着 d 增大,布拉格共振作用下的反射减弱,使得牡蛎礁消浪区沿程透射系数变化区间减小。波浪在红树林消浪区前受到植被的反射作用影响,形成较强的波浪壅高,且波浪在传播至牡蛎礁与红树林的间隔段时出现了显著的波动性, H_0 对红树林消浪区的沿程波高变化曲线影响显著, H_0 越大, K_{12} 越小。随着红树林密度的增加, K_{12} 减小速率减小。植被密度改变对沿程波高变化的影响在波浪传播至红树林区时便已显现。

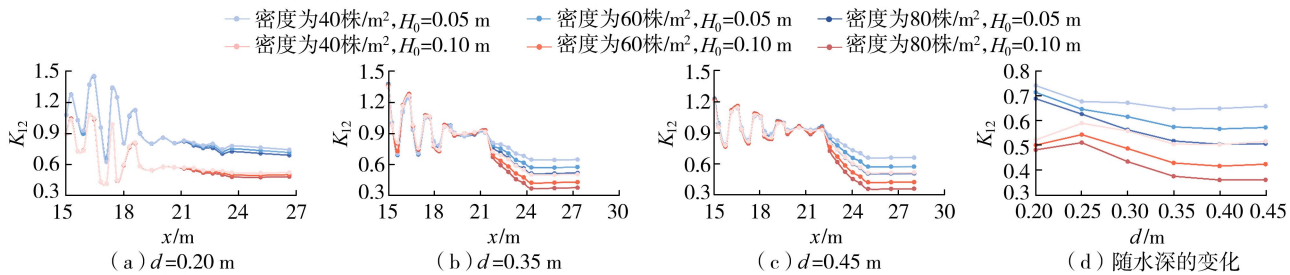


图 6 红树林与牡蛎礁协同消浪时沿程透射系数变化

Fig. 6 Variation of transmission coefficient along course during synergistic wave dissipation by mangroves and oyster reefs

3.3.2 不同水深对红树林、牡蛎礁协同减灾特性的影响

为了探究水深对牡蛎礁与红树林协同消浪效果的影响,图 6(d) 给出了相同密度、入射波高条件下透射系数随水深的变化曲线,表 2 为不同水深、密度条件下牡蛎礁单独消浪,不同密度条件下红树林单独消浪及二者协同消浪的透射系数。由表 2 可知, $d=0.20,0.25\text{ m}$ 时,牡蛎礁协同减灾效果显著,且明显削弱了植被密度对减灾效果的影响;当 d 由 0.20 m 增大至 0.25 m 时,牡蛎礁消浪作用有所减弱,而红树林消浪作用则呈先减小后增强的趋势。波高对透射系数随水深的变化规律具有显著影响, $H_0=0.05\text{ m}$ 时, K_{12} 随 d 增大而减小;大波条件下牡蛎礁消浪效果对水深敏感度较高, d 仅增大 0.05 m , K_{12} 便明显增大,因此 $H_0=0.10\text{ m}$ 时, K_{12} 随 d 增大呈先增大后减小的变化趋势。

表 2 不同条件下牡蛎礁、红树林及两者协同消浪的透射系数

Table 2 Transmission coefficients of wave dissipation by oyster reefs, mangroves, and their synergy wave under varying condition								
H_0/m	工况	密度/(株/ m^2)	透射系数					
			$d=0.20\text{ m}$	$d=0.25\text{ m}$	$d=0.30\text{ m}$	$d=0.35\text{ m}$	$d=0.40\text{ m}$	$d=0.45\text{ m}$
0.05	M1		0.806	0.779 5	0.843	0.898	0.929	0.937
		80	0.805	0.800	0.636	0.557	0.534	0.528
	M2	60	0.838	0.840	0.697	0.624	0.601	0.598
		40	0.870	0.884	0.772	0.710	0.689	0.690
	M1-2	80	0.688	0.626	0.563	0.518	0.505	0.507
		60	0.714	0.646	0.616	0.574	0.567	0.572
		40	0.741	0.677	0.672	0.646	0.649	0.658
0.10	M1		0.583	0.706	0.831	0.850	0.925	0.933
		80	0.603	0.609	0.482	0.398	0.381	0.365
	M2	60	0.632	0.664	0.546	0.462	0.438	0.442
		40	0.664	0.713	0.626	0.556	0.530	0.541
	M1-2	80	0.482	0.511	0.435	0.376	0.361	0.361
		60	0.501	0.544	0.487	0.429	0.417	0.424
		40	0.522	0.589	0.558	0.505	0.504	0.516

d 继续增大,牡蛎礁消浪的透射系数对波高的敏感性减弱,植被在减灾中起主导作用,植被密度越大,牡蛎礁对协同减灾的影响越小。 d 在 $0.25\sim0.35\text{ m}$ 时,波浪与植被冠层接触面积的增大使得植被缓流削能效益增强, K_{12} 呈减小趋势。 d 由 0.35 m 增至 0.45 m 时,红树林密度对 K_{12} 与 d 的关系产生影响,由于牡蛎礁消浪作用持续减弱,不同红树林密度下 K_{12} 变化趋势不同,这是由于红树林密度越大,其消浪效果随 d 增加的增强幅度越显著。因此在红树林与牡蛎礁的综合影响下,红树林密度为 $80\text{ 株}/\text{m}^2$ 时, K_{12} 随 d 的增大呈减

小趋势;密度为 60 株/m² 时, K_{12} 随 d 的增大基本保持稳定;密度为 40 株/m² 时, K_{12} 随 d 的增大呈上升趋势。

相较于单一牡蛎礁情况,红树林、牡蛎礁组合工况下波浪衰减率可在单一牡蛎礁情况基础上增大 6.0%~57.2%。波浪衰减率同时受到水深、红树林接触形态及牡蛎礁的共同影响;随着 d 的增大,波浪与红树林的接触面积增大,同时牡蛎礁的影响逐渐减弱,红树林的波浪衰减率逐渐增加;相较于单一红树林情况,红树林、牡蛎礁组合工况的波浪衰减率在单一红树林的基础上进一步增强了 2%~21%,当 d 与牡蛎礁高度之比小于 2.5 时,牡蛎礁对波浪削弱作用最强,波浪衰减率的增幅可达 10%~21%。

牡蛎礁作为第一道防线,通过物理阻挡和波浪反射削弱波浪能量;红树林作为第二道防线,通过摩擦阻力和能量耗散进一步减弱波浪。在低水位条件下,牡蛎礁能够更好地参与协同减灾,而红树林则更适合在高水位条件下利用冠层消浪,进而实现逐渐消能减灾。红树林、牡蛎礁两者结合形成了更加稳定的生态屏障,可以有效减少海岸侵蚀和风暴潮破坏。

3.3.3 红树林、牡蛎礁协同减灾经验公式

理论上 K_{12} 为 K_1 与 K_2 的乘积,但是从单一要素和组合要素的波浪透射系数可见,组合工况下,波能的削减并不是线性递减,而呈现多元非线性特征,因此选择对自变量进行幂函数计算。利用数值模拟试验得到的数据集,通过多元非线性回归分析建立了 K_1 、 K_2 与 K_{12} 的经验公式:

$$K_{12} = 0.8766K_1^{0.378}K_2^{0.831}$$

(13)

公式拟合基于数值模拟试验的 12 组牡蛎礁消浪 K_1 、36 组红树林消浪 K_2 和 36 组红树林与牡蛎礁协同消浪 K_{12} 的试验数据,采用 SPSS 统计软件进行多元非线性回归分析,选择 K_{12} 为因变量, K_1 、 K_2 为自变量,输入非线性表达式与参数初设值,运用非线性最小二乘法拟合,通过多次迭代观察参数变化是否稳定,确保最终残差平方和不再显著下降。图 7(a) 为数值模拟所得 K_{12} 与式(13) 计算所得 K_{12} 的拟合结果, R^2 为 0.9928,表明 K_{12} 经验公式计算值与数值模拟结果非常吻合。可见,除 $d=0.25$ m、 $H_0=0.05$ m 的工况外,数值模拟结果与经验公式拟合较好,相对误差普遍小于 3%。图 7(b) 为不同水深下静水面与植被及牡蛎礁的相对关系,相同入射波高条件下,相对水深越大,红树林的消浪作用增强, K_{12} 越小。

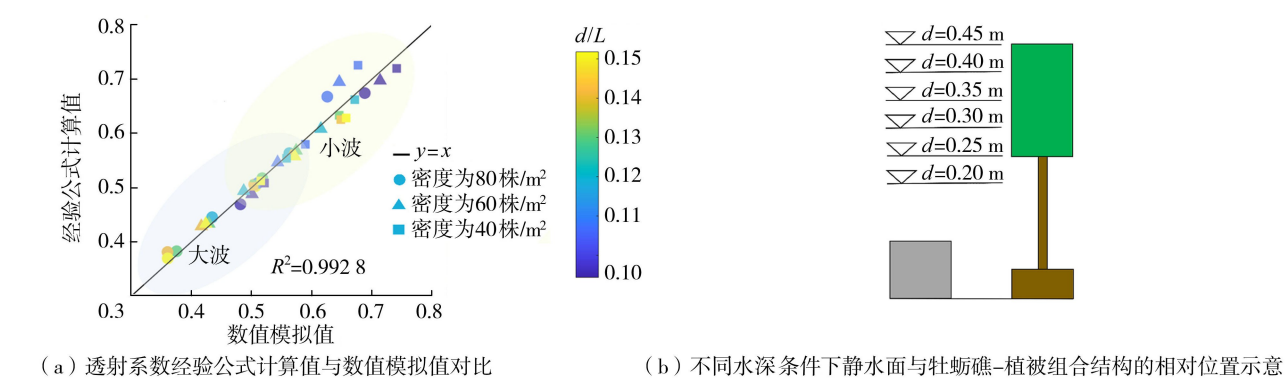


图 7 牡蛎礁与红树林组合消浪结构透射系数验证与水深影响机理

Fig. 7 Verification of transmission coefficients and water depth influence mechanism for oyster reef-mangrove combined wave dissipation structures

式(13)中, K_1 的幂指数为 0.378, K_2 的幂指数为 0.831,二者均小于 1,表明当 K_1 与 K_2 在 0~1 间变化时,牡蛎礁与红树林在协同减灾过程中存在性能差异;公式系数为 0.8766,表明牡蛎礁与红树林协同减灾组合方案的减灾效能水平得到了提升。由此可以认为,红树林在协同减灾中起主导作用,在考虑牡蛎礁与红树林协同消浪减灾时,可优先增强红树林的布置,以实现高效减灾的目的。

为进一步定量评估各减灾要素的协同效应,定义减灾要素的协同效应系数 σ ,其中减灾要素 a 对减灾要素 b 的 σ 按式(14)计算,表示在原有 b 的基础上,新增 a 后, K 的变化。 $\sigma>1$ 时表明 a 对 b 协同增强,反之表示协同削弱。

$$\sigma = K_b / K_{ab}$$

(14)

即

$$\sigma_1 = K_1 / K_{12} \quad \sigma_2 = K_2 / K_{12}$$

(15)

式中: σ_1 为 K_2 对 K_1 的协同效应系数; σ_2 为 K_1 对 K_2 的协同效应系数。

图 8(a) 为不同组合工况下红树林对牡蛎礁的协同效应,左上方存在一定的协同削弱区域,表明在原有牡蛎礁基础上新增红树林,该区域代表的工况下协同减灾效果反而比原先更差;右下方为减灾效果变好的区域, σ_1 最大可达 10 以上,协同增强效应较显著。图 8(b) 为不同组合工况下牡蛎礁对红树林的协同效应,左上方有较小一块区域存在协同削弱的可能,剩余组合工况皆可实现协同增强, σ_2 大多在 1~2 范围内,很难超过 3。综合来看,红树林协同增强潜能是牡蛎礁的 3 倍以上。

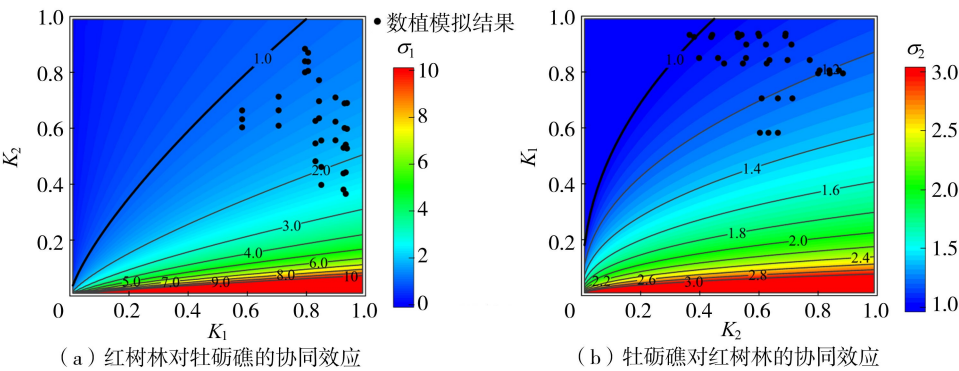


图 8 协同效应系数
Fig. 8 Synergistic effect coefficients

3.3.4 牡蛎礁对协同减灾的贡献率

为探究牡蛎礁与红树林协同减灾对消浪的贡献率,定义牡蛎礁的贡献率 P 为波浪传播经过牡蛎礁衰减波能 ΔE_1 与经过牡蛎礁和红树林衰减波能 ΔE_{12} 之比:

$$P = (H_0^2 - H_1^2)/(H_0^2 - H_{12}^2) \tag{16}$$

式中: H_1 为波浪传播至牡蛎礁与红树林中间段时的平均波高; H_{12} 为波浪传播通过红树林与牡蛎礁消浪区后的波高。

由表 3 可见, P 随 d 的增大呈先减小后趋于稳定的变化趋势。 P 受到牡蛎礁与红树林消浪性能的共同作用:低水位条件下,牡蛎礁礁顶的破波作用显著,而红树林茎秆形态密度较小,消浪作用偏弱,因此牡蛎礁 P 普遍达到 50% 以上;且红树林密度越小, P 越大,红树林密度由 80 株/ m^2 降低至 40 株/ m^2 , P 平均增加 10%;随着 d 的增大,牡蛎礁主要起摩擦消浪的作用,而红树林冠层的摩擦耗散在协同减灾中起主导作用,且红树林密度越大,波浪与植被接触面积越大, P 越小。但是高水位下,牡蛎礁仍发挥着 20% 左右的消浪贡献。

表 3 不同红树林密度下牡蛎礁在协同减灾中的贡献率

Table 3 Contribution rate of oyster reefs to synergistic disaster mitigation under different mangrove densities						
d/m	贡献率/%					
	$H_0=0.05\text{ m}$			$H_0=0.10\text{ m}$		
	80 株/ m^2	60 株/ m^2	40 株/ m^2	80 株/ m^2	60 株/ m^2	40 株/ m^2
0.20	51	55	61	81	84	89
0.25	53	55	59	64	67	73
0.30	35	38	42	25	28	31
0.35	31	33	37	23	23	25
0.40	17	18	20	16	17	16
0.45	18	19	22	18	18	19

4 结 论

a. 多排间隔布置的牡蛎礁单一消浪时,沿程透射系数变化曲线是由布拉格共振影响下的强反射波与入射波叠加、牡蛎礁的消能共同作用形成的,且入射波高越大、水深越小,透射系数越小;红树林单一消浪时,相同条件下,透射系数与植被密度、波高均呈负相关关系:入射波高越大,植被带沿程波高衰减越剧烈,波能衰减更集中于植被带前半部分。在水位不大于红树林高度的情况下,随着淹没度增大,由于红树林冠层密集,透射系数继续减小。

b. 在考虑牡蛎礁与红树林协同消浪减灾时,可优先增强红树林的栽种密度,以达到高效减灾的目的。低潮位时,牡蛎礁消浪作用显著,波高对沿程波高变化影响较为突出;平均潮位与高潮位时,红树林消浪起主导作用,波高对牡蛎礁消浪区沿程波高变化影响微弱,且波高和红树林密度越大,红树林消浪区波浪衰减越迅速。

c. 牡蛎礁作为第一道防线,通过物理阻挡和波浪反射削弱波浪能量;植被作为第二道防线,通过摩擦阻力和能量耗散进一步减弱波浪。在低水位条件下,牡蛎礁能够更好地参与协同减灾,其贡献率在 50% 以上,而红树林则更适合在高水位条件下利用冠层消浪,进而实现逐级消能减灾。两者结合形成更加稳定的生态屏障,可以有效减少海岸侵蚀和风暴潮破坏。

d. 牡蛎礁与红树林组合方案能有效提升减灾效能水平,呈现非线性协同模式。本文首次提出的多元非线性经验公式,可用于计算组合方案的协同消浪透射系数。通过量化分析减灾要素协同效应系数,牡蛎礁与红树林均能较大概率提升彼此减灾效果,且红树林对牡蛎礁的协同增强效应要显著强于牡蛎礁对红树林的协同增强效应。因此在淤泥质海岸的实际工程中,可优先考虑加强红树林的栽种,以达到高效协同减灾的目的。

参考文献:

[1] Sunkur R,Kantamaneni K,Bokhoree C,et al. Mangroves' role in supporting ecosystem-based techniques to reduce disaster risk and adapt to climate change:a review[J]. Journal of Sea Research,2023,196:102449.

[2] 王旭晨,孙林云,肖立敏,等. 沙质海岸建筑物下游海岸侵蚀及防护措施研究综述[J]. 中国港湾建设,2023,43(8):1-8. (Wang Xuchen,Sun Linyun,Xiao Limin,et al. Summary of research on downstream coast erosion and protection measures of sandy coastal buildings[J]. China Harbour Engineering,2023,43(8):1-8. (in Chinese))

[3] Jordan P,Fröhle P. Bridging the gap between coastal engineering and nature conservation? A review of coastal ecosystems as nature-based solutions for coastal protection[J]. Journal of Coastal Conservation,2022,26(2):4.

[4] Zheng Jinhai,Xu Wei,Tao Aifeng,et al. Synergy between coastal ecology and disaster mitigation in China:policies,practices,and prospects[J]. Ocean & Coastal Management,2023,245:106866.

[5] 邵光学. 海洋生态文明建设的历史进程、基本经验与深化路径[J]. 水利经济,2024,42(5):54-61. (Shao Guangxue. Historical process,basic experience and deepening path of marine ecological civilization construction in China[J]. Journal of Economics of Water Resources,2024,42(5):54-61. (in Chinese))

[6] Scyphers S B,Powers S P,Heck K L,et al. Oyster reefs as natural breakwaters mitigate shoreline loss and facilitate fisheries[J]. Plos One,2011,6(8):e22396.

[7] Chowdhury M S N,Walles B,Sharifuzzaman S M,et al. Oyster breakwater reefs promote adjacent mudflat stability and salt marsh growth in a monsoon dominated subtropical coast[J]. Scientific Reports,2019,9(1):8549.

[8] Wiberg P L,Taube S R,Ferguson A E,et al. Wave attenuation by oyster reefs in shallow coastal bays[J]. Estuaries And Coasts,2019,42(2):331-347.

[9] 冯卫兵,华伟豪,张俞. 基于 FUNWAVE-TVD 模型的岸礁次重力波数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(4):349-357. (Feng Weibing,Hua Weihao,Zhang Yu. Numerical simulation of infragravity wave over fringing reef based on FUNWAVE-TVD model[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2021,49(4):349-357. (in Chinese))

[10] 陈松贵,陈汉宝,赵洪波,等. 珊瑚礁地形上胸墙波浪力大水槽试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(1):65-70. (Chen Songgui,Chen Hanbao,Zhao Hongbo,et al. Experimental study of wave forces on the seawall of coral reef in large wave flume[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2019,47(1):65-70. (in Chinese))

[11] Morris R L,La Peyre M K,Webb B M,et al. Large-scale variation in wave attenuation of oyster reef living shorelines and the influence of inundation duration[J]. Ecological Applications,2021,31(6):1-15.

[12] Tao Aifeng,Liu Jianhao,Xu Wei,et al. Investigation on wave attenuation characteristics and mechanism of oyster castles under regular waves[J]. Ocean Engineering,2025,323:120617.

[13] 洪新,程建婷,李庆杰,等. 滨州双层牡蛎礁消浪效果的试验研究[J]. 海洋湖沼通报,2023,45(4):106-111. (Hong Xin,Cheng Jianting,Li Qingjie,et al. An experimental study on dissipating effect of double-layer oyster reefs in Binzhou coastal seawater[J]. Transactions of Oceanology and Limnology,2023,45(4):106-111. (in Chinese))

[14] Gong Shangpeng,Xu Sudong,Yin Kai,et al. Experimental study on wave attenuation and cross-shore profiles by submerged flexible vegetation[J]. Ocean Engineering,2024,307:118218.

[15] 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))
- [16] Luo Feng, Wu Hongbo, Chen Zhipeng, et al. Long-term simulation of saltmarsh landscape based on hydro-sediment and vegetation dynamics: assessing future stability[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2025, 323:109400.
- [17] 吴毅, 武国相, 张红, 等. 盐沼植被对海堤防护增效的量化研究[J/OL]. *海洋工程*, 1-9. [2025-4-13]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1423.P.20250409.1500.006>. (Wu Yi, Wu Guoxiang, Zhang Hong, et al. Quantification of the enhanced protective effects of salt marsh vegetation on coastal dikes[J/OL]. *The Ocean Engineering*, 1-9. [2025-4-13]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1423.P.20250409.1500.006>. (in Chinese))
- [18] Weaver R J, Stehno A L. Mangroves as coastal protection for restoring low-energy waterfront property[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2024, 12(3):470.
- [19] Kamil E A, Takaijudin H, Hashim A M. Mangroves as coastal bio-shield: a review of mangroves performance in wave attenuation[J]. *Civil Engineering Journal*, 2021, 7(11):1964-1981.
- [20] Liu Shuo, Xu Sudong, Yin Kai. Optimization of the drag coefficient in wave attenuation by submerged rigid and flexible vegetation based on experimental and numerical studies[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 285:115382.
- [21] Qu Ke, Lan Gangyun, Sun Weiyi, et al. Numerical study on wave attenuation of extreme waves by emergent rigid vegetation patch[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 239:109865.
- [22] 张小霞, 林鹏智. 滨海植物的海岸带减灾特性研究综述[J]. *海洋通报*, 2023, 42(5):585-600. (Zhang Xiaoxia, Lin Pengzhi. A review of coastal disaster mitigation by vegetation[J]. *Marine Science Bulletin*, 2023, 42(5):585-600. (in Chinese))
- [23] Xie Danghan, Schwarz C, Kleinhans M G, et al. Implications of coastal conditions and sea level rise on mangrove vulnerability: a bio-morphodynamic modeling study[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2022, 127(3):e2021JF006301.
- [24] Yin Kai, Lin Ming, Xu Sudong, et al. Numerical investigation of submerged flexible vegetation dynamics and wave attenuation under combined waves and following currents[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 278:114437.
- [25] 朱小伟, 侯珊, 陈俊昂, 等. 红树林生态系统中潮滩与植物消浪特性试验[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(6):99-106. (Zhu Xiaowei, Hou Peng, Chen Junang, et al. Experimental study on wave attenuation characteristics of tidal flat and vegetation in mangrove ecosystem[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2023, 51(6):99-106. (in Chinese))
- [26] Lian Yushun, Ma Jiantao, Li Dongang, et al. Experimental investigation on wave attenuation capacity of kelp farms[J]. *Ocean Engineering*, 2025, 337:121906.
- [27] 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))
- [28] Chen Zhipeng, Luo Feng, Zhou Guanghai, et al. Hydrodynamic modeling study of nature-based hybrid coastal defense strategy applied in salt marsh restoration[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2024, 298:108666.
- [29] Chen Cheng, Peng Chen, Nandasena N A K, et al. Protective effect of ecological embankment on a building subjected to tsunami bores[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 280:114638.
- [30] Sreeranga S, Takagi H, Shirai R. Community-based portable reefs to promote mangrove vegetation growth: bridging between ecological and engineering principles[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(2):590.
- [31] Raju R D, Arockiasamy M. Coastal protection using integration of mangroves with floating barges: an innovative concept[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(5):612.
- [32] Jiang Beihan, Fu Chenming, You Tuofu, et al. A laboratory study on wave attenuation by oyster reefs-mangrove system[J]. *Geo-Marine Letters*, 2025, 45(1):13.
- [33] Magdalena I, Karima N, Delfina P, et al. Wave damping by breakwater and mangrove for protecting shoreline[J]. *Results in Engineering*, 2022, 16:100693.
- [34] Peng Ming, Zhang Jingliang, Zhu Yan, et al. Experimental study on wave attenuation and stability of ecological dike system composed of submerged breakwater, mangrove, and dike under storm surge[J]. *Applied Ocean Research*, 2024, 151:104144.
- [35] Liu Qinqin, Liu Xiaojian, Zhu Xiaowei, et al. Experimental study on the restoration and protection of mangrove tidal ecosystems flat located in a high wave area[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2025, 323:109386.
- [36] Garcia N, Lara J L, Losada I J. 2-D numerical analysis of near-field flow at low-crested permeable breakwaters[J]. *Coastal Engineering*, 2004, 51(10):991-1020.

[37] He Fei, Chen Jie, Jiang Changbo. Surface wave attenuation by vegetation with the stem, root and canopy[J]. Coastal Engineering, 2019, 152: 103509.

[38] Hu Zhan, Suzuki T, Zitman T, et al. Laboratory study on wave dissipation by vegetation in combined current-wave flow[J]. Coastal Engineering, 2014, 88: 131-142.

[39] 郑金海, 余豪丰, 陶爱峰, 等. 波浪布拉格共振研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(3): 83-87. (Zheng Jinhai, Yu Haofeng, Tao Aifeng, et al. Research progress in wave Bragg resonance[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(3): 83-87. (in Chinese))

[40] Morris R L, Bilkovic D M, Boswell M K, et al. The application of oyster reefs in shoreline protection: are we over-engineering for an ecosystem engineer? [J]. Journal of Applied Ecology, 2019, 56(7): 1703-1711.

[41] Maza M, Adler K, Ramos D, et al. Velocity and drag evolution from the leading edge of a model mangrove forest[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2017, 122(11): 9144-9159.

[42] Wang Yanxu, Yin Zegao, Liu Yong. Experimental investigation of wave attenuation and bulk drag coefficient in mangrove forest with complex root morphology[J]. Applied Ocean Research, 2022, 118: 102974.

[43] Suzuki T, Hu Zhan, Kumada K, et al. Non-hydrostatic modeling of drag, inertia and porous effects in wave propagation over dense vegetation fields[J]. Coastal Engineering, 2019, 149: 49-64.

[44] Xu Wei, Tao Aifeng, Wang Risheng, et al. Review of wave attenuation by artificial oyster reefs based on experimental analysis [J]. Ocean Engineering, 2024, 298: 117309.

[45] Kobayashi N, Raichle A W, Asano T. Wave attenuation by vegetation [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 1993, 119(1): 30-48.

[46] Dalrymple R A, Kirby J T, Hwang P A. Wave diffraction due to areas of energy dissipation[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 1984, 110(1): 67-79.

[47] 陈杰, 何飞, 蒋昌波, 等. 植物消波机制的试验与理论解析研究进展[J]. 水科学进展, 2018, 29(3): 433-445. (Chen Jie, He Fei, Jiang Changbo, et al. Advances in laboratory experiment, theoretical analysis of mechanism of wave attenuation by vegetation [J]. Advances in Water Science, 2018, 29(3): 433-445. (in Chinese))

[48] Zhang Rong, Chen Yongping, Lei Jiaxin, et al. Experimental investigation of wave attenuation by mangrove forests with submerged canopies[J]. Coastal Engineering, 2023, 186: 104403.

(收稿日期: 2025-04-15 编辑: 胡新宇)

(上接第 36 页)

[24] 王其松, 邓家泉, 刘诚, 等. 叠加风场在南海台风浪数值后报中的应用研究[J]. 海洋学报, 2017, 39(7): 70-79. (Wang Qisong, Deng Jiaquan, Liu Cheng, et al. Application of superimposed wind fields to the hindcast modelling of typhoon-induced waves in the South China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2017, 39(7): 70-79. (in Chinese))

[25] 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))

[26] 尹超. 海南岛近海热带气旋引起的台风浪风险评估研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院海洋研究所), 2022.

[27] 田奇, 毕恺峰, 谢凌曦. 基于人工智能大模型的中期全球气象预报新方法[J]. 中国基础科学, 2024, 26(1): 7-13. (Tian Qi, Bi Kaifeng, Xie Lingxi. Accurate medium-range global weather forecasting based on large AI models [J]. China Basic Science, 2024, 26(1): 7-13. (in Chinese))

[28] 李江夏, 胡玉植. ERA-Interim 和 ERA-5 再分析资料中台风模拟精度评估[J]. 水利水运工程学报, 2021(1): 62-69. (Li Jiangxia, Hu Yuzhi. Assessment of typhoons in ERA-Interim and ERA-5 reanalysis datasets[J]. Hydro-Science and Engineering, 2021(1): 62-69. (in Chinese))

[29] 季余, 朱业, 李莉, 等. 浙江沿海台风浪模式的参数适应性研究[J]. 海洋预报, 2023, 40(2): 22-31. (Ji Yu, Zhu Ye, Li Li, et al. Study on the parameters adaptability of typhoon wave model in Zhejiang coastal area[J]. Marine Forecasts, 2023, 40(2): 22-31. (in Chinese))

[30] Pan Y, Chen Y, Li J, et al. Improvement of wind field hindcasts for tropical cyclones[J]. Water Science and Engineering, 2016, 9(1): 58-66.

(收稿日期: 2024-09-13 编辑: 彭桃英)

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.03.020

基于 SWAN 模型的海上光伏群桩对近岸波浪场的影响分析

涂彧涵^{1,2}, 张蔚^{1,2}, 黄睿^{1,2}, 王晓光^{1,2}

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室; 2. 河海大学港口海岸与近海工程学院)

摘要: 针对大规模海上光伏群桩对近岸波浪场的影响, 依托 SWAN 模型提出一种基于底摩擦系数等效的概化方法, 从而解决高密度桩基全网格模拟计算效率低的瓶颈; 运用该方法模拟了山东省青岛市棋子湾海上光伏站 5 万根桩基在不同工况下对波浪场的衰减效应。结果表明: 群桩对波浪传播具有显著的阻挡作用, 波高衰减由海向陆逐渐增大, 极端工况下近岸侧波高衰减率可达 30%。该方法能有效解决大规模群桩模拟的计算难题, 可为海上光伏项目的波浪场影响以及桩基设计与参数选择提供技术手段。

关键词: 海上光伏; 波浪场; 波高衰减; 底摩擦系数; SWAN 模型; 棋子湾海上光伏站

Impact analysis of offshore photovoltaic pile groups on nearshore wave fields based on SWAN model

Tu Yuhan^{1,2}, Zhang Wei^{1,2}, Huang Rui^{1,2}, Wang Xiaoguang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University;
2. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University)

Abstract: To address the impact of large-scale offshore photovoltaic pile groups on nearshore wave fields, a generalized model method adopted SWAN model based on equivalent bottom friction coefficient was proposed to solve the bottleneck of low computational efficiency in full-grid simulation of high-density pile foundations. Based on the method, the attenuation effect of 50 000 pile foundations on wave fields under different working conditions in the offshore photovoltaic area of Qizi Bay, Qingdao, Shandong Province was simulated. The results indicate that the pile group has a significant blocking effect on wave propagation; the wave height attenuation gradually increases from sea to land, and the wave height attenuation rate on the nearshore side can reach 30% under extreme conditions. This method can effectively solve the computational difficulties in simulating large-scale pile groups and provides technical means for the wave field impact, pile foundation design, and parameter selection of offshore photovoltaic projects.

Key words: offshore photovoltaic; wave field; wave height attenuation; bottom friction coefficient; SWAN model; Qizi Bay offshore photovoltaic station

可再生能源的快速发展, 对实现全球气候目标、保障能源安全及推动社会经济可持续发展具有不可替代的战略意义, 已成为应对气候危机、保障能源供给的重要途径^[1-2]。根据国际能源署的研究数据, 可再生能源发电量在全球总发电量的占比将从 2020 年的 29% 增至 2030 年的 60% 以上, 到 2050 年有望接近 90%, 其中风电与光伏发电量可达总发电量的 70%^[3]。在各类可再生能源中, 太阳能作为增速快、应用前景广阔的清洁能源, 发展潜力突出^[4], 而光伏设备是实现太阳能向电能高效转换的关键载体。在众多太阳能发电技术中, 海上光伏凭借其独特的优势, 已成为极具发展潜力的技术方向, 规模化、阵列式光伏系统呈现出强劲的发展态势^[5]。相较于陆上光伏, 海上光伏光照条件更优、可用空间更广, 降低了对土地资源的依赖, 进一步提升了工程的经济可行性^[6]。固定式海上光伏作为新兴的海上能源开发形式, 主要利用桩基础作为光伏组件的支撑结构^[7]。根据装机容量的差异, 海上光伏场址通常需布设数千乃至上万根桩基, 其桩基布设对区域流场、波浪场的影响, 是项目建设安全、工程投资及区域生态保护的重要影响因素。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42206165)

作者简介: 涂彧涵 (2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事河口海岸水动力学研究。E-mail: 18720009167@163.com

通信作者: 张蔚 (1979—), 男, 教授, 博士, 主要从事河口海岸水动力学、近海潮波运动及河口地貌演变研究。E-mail: w. zhang@hhu.edu.cn

当前,数值模拟技术已广泛应用于波浪与结构相互作用的分析中,其高效性与经济性为工程实践提供了重要支持^[8]。王鑫等^[9]通过构建三维冲刷数值模型,依托如东海上风电场风力机基础,揭示了风力机基础冲刷机理;薛玉娆等^[10]基于 FVCOM 三维水动力模型,将桩柱绕流阻力等效转化为水流阻力,提出一种桩群阻水效果概化方法,通过在水动力控制方程中引入桩群阻力项,探究不同桩群布置对水动力环境参数的影响,构建了关于群桩下方和后方流场演变规律的三维水动力改进模型;谢友鸽等^[11]通过改变底摩擦系数,以实现东沙岛海域模拟的有效波高与卫星实测数据的吻合,结果表明,调整底摩擦系数能够很好地反映波浪的演变特征。此外,相关学者围绕数值模拟与海上结构物进行分析研究^[12-17],但是以往近岸工程桩基布局相对稀疏,其对波浪的衰减影响有限。而海上光伏工程不同于常规海上结构物,受光伏板密集效应的影响,支撑光伏板的群桩数量可达万计^[18]。受算力条件的限制,在进行海岸动力影响的研究中,很难实现百万级网格的效率计算。因此本文以棋子湾海上光伏站为例,提出等效摩阻概念,通过区域化局部加密网格,使摩阻等效于群桩的影响,再赋值于整个近海场重新进行计算,以此等效桩基对流场与波浪场的影响。该方法在提升计算效率的同时,可合理还原群桩作用下波浪场的变化规律,为海上光伏工程波浪响应模拟及工程安全评估提供参考。

1 研究区概况

棋子湾海上光伏站(35°38'N, 119°45'E)位于山东省青岛市黄岛区沐官岛附近的棋子湾海域,处于黄海海域潮间带,涨潮时场地被海水淹没,落潮后局部地段出露;自然地面高程在-6.0~0.45 m 之间,潮滩表层沉积物以砂为主,中值粒径为 0.1~0.49 mm,横河口外侧及河道尾闾细颗粒含量增大,海底表层沉积物砂含量小于 50%,粉砂和黏土含量相对增高。根据董家口港 2006 年 9 月至 2007 年 8 月逐时验潮实测数据资料,该海域平均潮差为 2.94 m,最大潮差可达 4.79 m。

光伏站距海岸边最近距离约 50 m,最远距离约 1 km。上游有横河连接入海口,目前拟分为两侧开发建设,分别位于横河入海口东、西侧。选择单排桩轻型固定支架方案作为光伏基础,光伏场采用标准化阵列布置,方阵长 29.98 m,宽 4.58 m,单个方阵上有 2(排)×26(列)光伏桩,桩直径 0.4 m,站内共计约 5 万根光伏桩。计算区域及光伏站位置如图 1 所示。

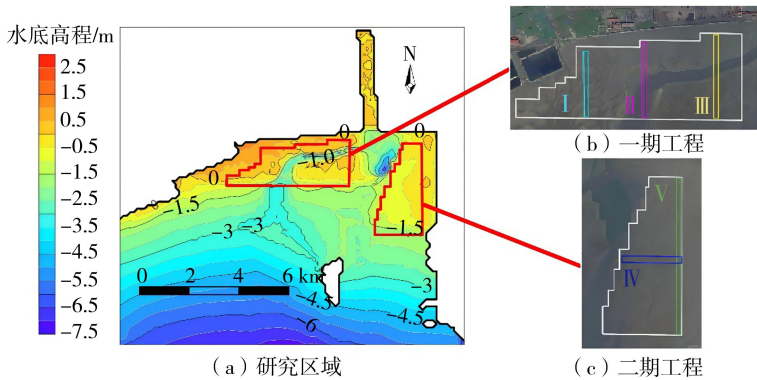


图 1 研究区概况
Fig. 1 Overview of study area

2 研究方法

2.1 SWAN 模型

SWAN 模型是在第三代海浪模型 WAM 的基础上优化改进的模型,适用于近岸、湖泊、河口等浅水区域的波浪数值模拟。该模型综合考虑波浪浅化、折射、底摩擦、水深引起的波浪破碎、风能输入以及三波与四波非线性相互作用等物理过程,可合理模拟近岸波浪的生成与传播过程^[19-20]。SWAN 模型采用基于 Euler 近似的作用量谱平衡方程,因在流场中能谱密度并不守恒,但能谱密度与相对频率的比值守恒,即动谱密度具有守恒性。在笛卡尔坐标系下,动谱平衡密度表示为:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial v_x N}{\partial x} + \frac{\partial v_y N}{\partial y} + \frac{\partial v_\theta N}{\partial \theta} + \frac{\partial v_\sigma N}{\partial \sigma} = \frac{S}{\sigma} \tag{1}$$

式中: N 为波作用量密度; $\nu_x, \nu_y, \nu_\theta, \nu_\sigma$ 分别为 N 在方向 x, y, θ, σ 上的传播速度; S 为以谱密度表示的源汇项,包含风能输入 S_{in} ,非线性波相互作用 S_{nl3}, S_{nl4} ,白帽耗散 $S_{ds,w}$,底摩擦耗散 $S_{ds,b}$,波浪破碎耗散 $S_{ds,br}$,进一步解释可参考 Yang 等^[21]的研究。

2.2 网格及地形建立

计算地形资料来自现场实测和海图,采用高斯-克吕格投影将地形数据投影至 CGCS2000 坐标系,中央子午线设定为 120°。所有水深点高程基准统一调整为 1985 高程基准。模型计算域横向宽度为 16 km,纵向长度为 11 km,工程区距离波浪入射边界约 7.6 km。为充分考虑光伏电站下方沐官岛对工程区的影响,对其进行挖空处理,波浪以绕射和反射形式传播。

模型时间步长设为 3 s,时间步数 1000 步,模拟时长 50 min。计算域风生浪较小,故模型不考虑风场与冰盖的影响,重点考虑波浪的衍射、能量交换、波浪破碎、底摩擦影响、白帽耗散等过程;波能的交换采用四相波非线性相互作用机制,波能破碎耗散指数取 0.80,白帽耗散系数取 4.5。底摩擦耗散指数采用尼古拉兹粗糙度设定,根据水深将其设置为随空间变化的参数文件。水深最深处糙率为 0.06,近岸处取 0.18。不考虑桩基,模型共包含 78 858 个网格单元、40 043 个计算节点,计算网格见图 2。网格的尺寸介于 50~100 m。由于不考虑光伏桩的影响,模型使用的网格大小能够满足所需的求解精度要求。

2.3 边界条件与模型验证

将黄家塘湾与沐官岛设为陆地边界,该边界不含波浪信息,即没有波浪从该边界进入计算区域,而从该边界传播到模型外的波浪则被完全吸收。将近海洋边界设为波浪开边界,模型采用冷启动方式进行计算,风浪谱选用 JONSWAP 谱;通过有效波高、谱峰周期、平均波向及方向分布度等波浪参数设置边界条件,并将水位按设计标准(1 年、25 年、50 年、100 年一遇)设为恒定值,可促使模型快速收敛并达到稳定流场状态。

为了验证模型各参数的影响,选取山东电力工程咨询院有限公司 7 个测点在极端波浪条件下的实测波高值,与模型计算值进行比较,测点位置如图 3 所示,计算结果见表 1。从表 1 可以看出,7 个测点波高的模型计算值和实测值非常接近。近岸测点因波高的绝对值较小,加之受地形影响,细微变化也会引起波高相对值变化较大,从而造成误差的波动,这可能是造成个别测点误差略大的原因。在 SSE、S、SSW 3 个方向上误差相差不明显,SSE、SSW 向因波浪传播过程中受地形和沿岸建筑物影响较强,故误差略高,总体平均相对误差为 2.17%~4.33%。以上计算结果表明,模型对近岸波浪设计要素具备较高的计算精度,能够较好地复现研究区工程前波浪场分布特征,可满足后续数值模拟与机理分析的应用要求。

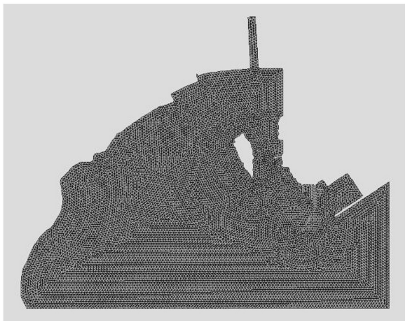


图 2 计算网格
Fig. 2 Computational grid

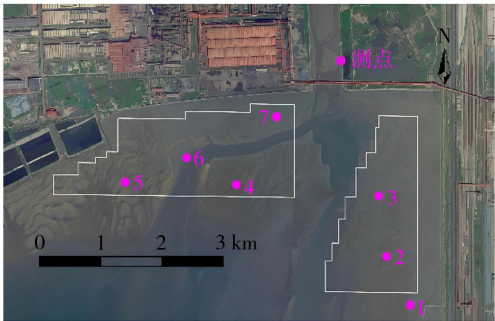


图 3 各测点具体位置
Fig. 3 Specific locations of measurement points

表 1 模型计算波高与实测波高对比

测点	模型计算波高/m			实测波高/m			误差/%		
	S 向	SSE 向	SSW 向	S 向	SSE 向	SSW 向	S 向	SSE 向	SSW 向
1	1.12	0.98	1.21	1.10	0.91	1.18	1.79	7.14	2.33
2	1.27	1.22	1.23	1.24	1.12	1.21	2.36	8.20	1.69
3	1.22	1.17	1.22	1.25	1.16	1.25	2.46	0.85	2.08
4	1.39	1.32	1.46	1.35	1.30	1.38	2.88	1.52	5.44
5	1.21	1.13	1.28	1.16	1.14	1.18	4.13	0.88	8.00
6	0.89	0.83	0.91	0.89	0.84	0.89	0	1.20	1.73
7	0.87	0.77	0.95	0.88	0.85	0.90	1.15	10.39	5.48

2.4 模型概化

按照工程设计方案,研究区共设5万根光伏桩,考虑到网格密度及计算困难,采用分区域概化模型开展工程区波浪场分布与传播特性数值模拟。具体实施步骤如下:在光伏站提取5个子区域,位置见图1(b)(c)。各子区域包含9列光伏桩,其中编号Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ分别对应一期工程中的3个子区域,桩基数量分别为639(71×9)、693(77×9)、783(87×9)根。编号Ⅳ、Ⅴ对应二期工程,桩基数量为972(9×108)、1593(177×9)根。再针对各子区域分别构建局部波浪模型,采用网格加密技术精确刻画光伏桩的几何形态与平面布置,计算得到对应局部模型的波浪场分布及波高沿程变化规律。

当波浪由深水区传入浅水区时,波浪与底床的相互作用变大,底摩擦是造成波浪能量耗散的重要影响因素。故在概化模型时,根据各子区域局部波浪模型的波浪场分布,将光伏桩对波浪场分布的影响参数化,概化为底摩擦系数,并写入文件。采用迭代优化法确定底摩擦系数,即基于经验初步设定参数取值,代入模型开展模拟计算;再将模拟计算结果与实测数据进行对比分析,根据模拟结果逐步调整并最终率定最优参数。概化前后的底摩擦系数如图4所示,概化前的底摩擦系数随水深变化,取值范围为0.06~0.16 m;概化后的底摩擦系数作为概化模型的参数设置,其取值范围为0.06~1 m。

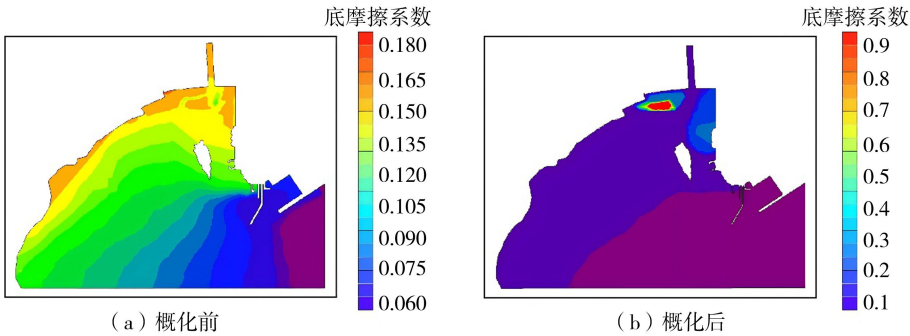


图4 概化前后底摩擦系数示意图

Fig.4 Schematic diagram of bottom friction coefficients before and after generalization

同时,对5个子区域概化模型设置由海向陆的沿程采样点,提取采样点的有效波高,并与局部精细波浪模型计算结果开展对比验证,以确保概化模型可以有效还原局部波浪模型的结果,从而保证概化模型精准模拟工程后波浪传播及场分布特征。波高拟合效果如图5所示。

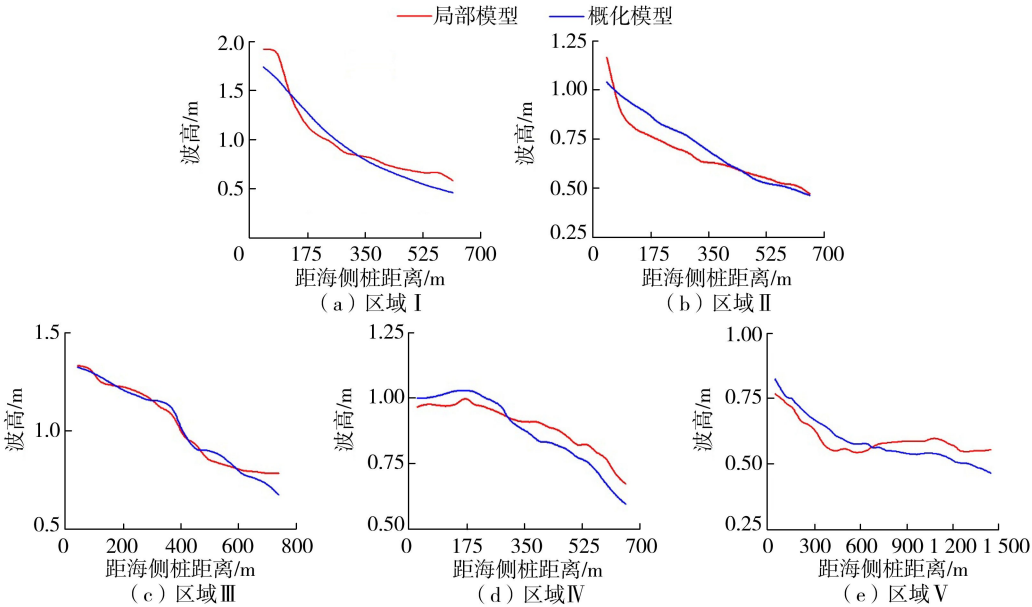


图5 波高对比

Fig.5 Comparison of wave heights

计算结果表明,区域Ⅰ~Ⅴ平均误差分别为8.06%、6.59%、2.85%、5.79%、4.42%,其中区域Ⅴ临近东

侧与北侧潮滩,波浪传播受地形起伏及防波堤影响显著,这也是该区域波高出现小幅振荡、演变规律存在一定差异的主要原因。整体而言,局部精细模型与概化模型的波高计算结果吻合度良好,整体误差较小,由海向陆的波高沿程变化趋势基本一致。可见,通过调整底摩擦系数构建的概化模型,能够较好概化工程区高密度群桩对波浪传播及波高分布的影响效应,模拟计算结果符合波浪传播基本理论,所建概化模型可靠、计算成果合理可信。

3 计算结果与分析

3.1 设计波要素与设计工况

北海预报中心于 2006 年 9 月 17 日设立了胶南董家口港区风、浪、潮观测设备安装地点。胶南董家口港区风、浪、潮观测站值班室位于董家口半岛南部,建筑高度约 15 m,光学测波仪和风向风速传感器均安装于此,观测站东面临海,周围无高大建筑物遮挡,地理坐标为 35°36′18″N、119°46′47″E。测波点水深为 7.3 m,海域开阔度 180°,波浪浮标位于观测点 SSE 向,直线距离约 1 200 m。潮位测点选择在贡口船坞码头内,验潮点坐标为 35°37′18″N、119°47′15″E,工程设计水位基于该站点全年实测观测数据计算确定。

波浪观测资料为每日 8 次定时观测,观测时间为 2、5、8、11、14、17、20、23 时;其中波型、波向仅开展日间 4 次观测,对应时间为 8、11、14、17 时。采用 2006 年 9 月至 2007 年 8 月实测波浪资料,对董家口海域波浪特征开展统计分析。结果表明,研究区海域常浪向以偏 SE 向为主,其波高分布特征如图 6 所示。结合研究区海域地理位置与湾口朝向,综合海区常浪向、强浪向分布特征可知,SSE、S 向波浪对工程项目最为不利。拟建项目位于棋子湾湾内,湾内波浪主要由南侧湾口传入,且湾内风成浪较小;研究区东侧离岸距离较近,同时受地形及防波堤影响,因此选取对研究区波浪影响最显著的 S 向作为波浪数值计算方向。

对于 S 向波浪,选取研究区邻近海洋站 12.8 m 水深处 16 a 的实测波高,采用 P-Ⅲ型频率计算法求得各重现期波高,并通过数值模拟方法反演外海 30 m 水深处不同重现期的波高。将研究区邻近海洋站历年 S 向 $H_{1/10}$ 最大波高从大至小排序成序列,再对该序列进行频率统计分析,得到各重现期 S 向的特征波高值,其中, $H_{1/10}$ 为将波高序列从大到小排序后取前 10% 的波高计算得到的平均值,对应的波高频率分析结果见图 7。

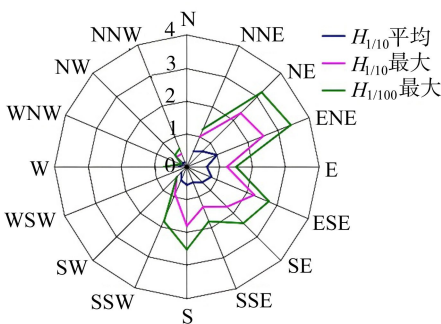


图 6 各向波高的分布 (单位:m)

Fig. 6 Directional distribution of wave heights (unit: m)

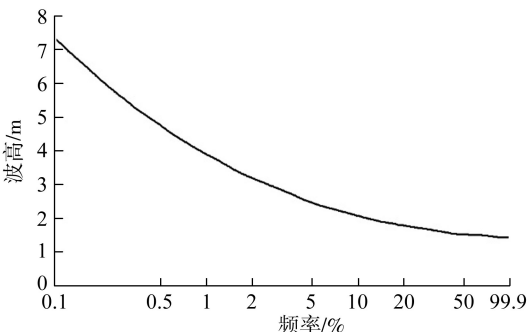


图 7 S 向年极值 $H_{1/10}$ 波高的 P-Ⅲ型曲线

Fig. 7 P-Ⅲ type curve of annual extreme $H_{1/10}$ wave height in S direction

基于以上分析,本文波浪推算共设置 4 个特征水位、4 个不同入射波高以及 4 种不同波周期作为设计波要素进行推算,对比分析不同设计工况下群桩对棋子湾内波浪场及波高变化的影响,观察波浪场分布变化规律。由于研究区在设计时以 50 a 重现期洪水工况为设计标准,故选取 50 a 重现期作为代表工况,设计波浪要素见表 2,其中 H_s 为有效波高; T_p 为谱峰周期。

3.2 不同工况下波浪场分布变化

3.2.1 水位对波浪的影响

由图 8(a)(b)可知,在同一重现期、相同入射波高与波周期条件下,随着水位抬升,波浪传播过程中波高整体呈增大趋势。当水位较低时,入射波浪更早进入浅水区,更容易受到地形及底摩擦的影响,波浪能量

表 2 设计波浪要素 (S 向波浪)

Table 2 Designed wave elements (S-directional waves)

重现期/a	H_s /m	T_p /s	设计水位/cm
100	5.90	18.03	329.5
50	5.40	16.70	317.5
25	4.80	15.26	305.5
1	1.02	5.03	197.5

衰减速率更快。50 a 重现期洪水设计水位较 1 a 重现期抬升幅度达 1.2 m, 波浪形态及等高线在传播过程中均产生了明显变化; 波浪传播至光伏站时, 波高平均增幅可达 0.4 m。

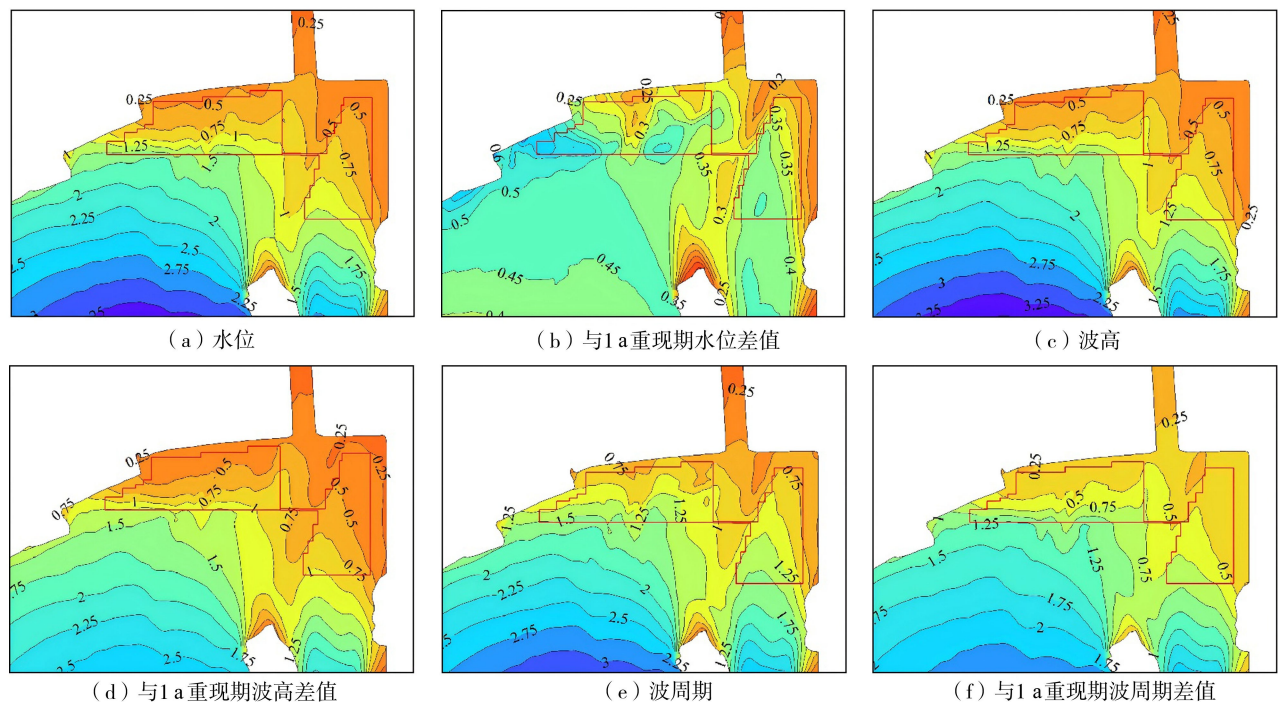


图 8 50 a 重现期波浪场分布 (单位:m)

Fig.8 Distribution of wave fields under 50-year return period (unit: m)

3.2.2 入射波高对波浪的影响

在同一水位与波周期条件下,入射波高与传播至光伏站的波高呈正相关关系,即入射波高增大时,光伏站波高也随之相应增大。对于 25、50、100 a 重现期的波浪情况,入射波高增幅较小,因棋子湾海域整体波浪场分布特征基本一致,湾内波高整体增幅平缓。由图 8(c)(d)可知,1 a 重现期波高较 50 a 重现期波高减小 4.38 m,该工况下波浪传播过程更为平缓,传播至光伏站时,波高仅为 0.3~0.5 m;尽管波浪形态及等高线的整体变化幅度不大,但波高分布特征与高重现期条件差异性明显。

3.2.3 波周期对波浪的影响

水位与入射波高相同时,波周期越大,波浪的能量衰减相对越平缓,能量的耗散带来的影响较小。大周期波浪因波长更长,与海底相互作用范围更大,单位传播距离内能量损失率也相对较低;而短周期波浪因频繁与海底作用,其波高及能量的衰减速率更快。由图 8(e)(f)可知,在 1 a 重现期波周期情况下,波浪在传递至光伏站时波高已大量消散,相比于 50 a 重现期波周期情况,波高平均减少了 0.6 m。

通过分析不同重现期水位、波高及波周期对波浪传播特性的影响,可见水位变化对波浪传播过程影响显著,较高水位条件下波浪衰减较慢,传递至光伏站时波高显著增大;而低水位时波浪会更早进入浅水区,受地形和底摩擦影响更为显著,波高衰减速率加快,传递至光伏站时波高已大量耗散,与高重现期工况差异明显。同时,入射波高的增大会直接导致光伏站波高相应增加,波高变化时对应的波浪形态及等高线虽然变化不大,但光伏站处波高分布差异性明显。波周期对波浪传播同样具有重要影响,长周期波浪因能量衰减慢、波长较长,单位传播距离能量损失较小,传递至光伏站时波高保持较好,而短周期波浪受底摩擦作用强烈,波高衰减更快,相较于长周期条件波高显著减少。

综合来看,水位、波高和波周期共同决定了波浪传播过程中的能量耗散和波高分布特征,高水位、大波高及长周期条件下波浪能量保持更好,影响相对较小,而低水位、小波高及短周期条件下波浪衰减更快,对光伏站的影响更为显著。

3.3 波浪场衰减率对比

选取 50 a 重现期作为典型代表工况,对群桩建设前后的波浪场进行对比分析,有无群桩影响的波高差值分布见图 9。可见,波浪由外海向近岸传播过程中,在抵达光伏站前,波高空间分布与传播规律基本一致,非

光伏站区域的波高差值基本趋近于 0。当波浪途经光伏站区域时,受密集群桩的阻挡与底摩擦共同作用,波浪能量耗散加剧,使得有效波高与最大波高的沿程衰减速率较工程前明显增大。相较于无群桩工况,光伏站址西侧、东侧区域波高平均分别减小 0.25、0.33 m;靠海侧波浪平均衰减率为 3%,至近岸处平均衰减率增大至 30%左右。

4 结 论

对不同重现期水文条件的波浪传播规律进行研究,结果表明,水位变化对波浪传播过程具有重要影响。较高水位时波浪衰减速度减缓,传递至光伏站的波高明显增大;较低水位时波浪提前进入浅水区,受地形和底摩擦的共同作用,波高在抵达光伏站前已快速衰减,与高水位工况差异显著。入射波高与光伏站区域波高呈正相关关系,虽然波浪整体形态与等深线分布未发生明显改变,但与光伏站区域波高分布特征存在明显差异。同时,波周期对波浪传播的影响同样显著,长周期波浪因能量衰减较慢、波长较长,单位距离能量损失较少,传递到光伏站时波高保持较好,而短周期波浪受到更多的底摩擦作用,波高衰减速率更快,最终光伏站区域波高较长周期工况显著减少。

光伏站的数值模拟结果显示,群桩建设对海湾波浪场的影响主要集中于站址内,对非群桩区域波浪场分布及传播影响较小。光伏群桩的修建对波浪传播具有显著的阻挡作用,导致光伏站区域波高较工程前明显衰减,且衰减规律呈现明显的空间分布特征,整体表现为由海向陆逐渐增大的趋势。在光伏站靠海侧,有、无群桩情况的有效波高差异较小,随着向岸线的靠近,群桩引起的波高衰减速率持续加快,波高差值不断拉大,在近岸处达到峰值。在 50 a 重现期的极端工况下,波高衰减率由靠海侧的 3% 逐渐增大至近岸侧的 30% 左右。

综上可得,水位、波高及波周期共同影响波浪的传播特性,光伏群桩的建设对波浪场的阻滞作用集中于光伏站区域,近岸波高衰减率显著高于离岸区,呈现明显的由海向陆逐渐递增的空间分布特征。可见,本文模拟方法在保证精度的同时,有效提升了大规模群桩数值模拟的计算效率,为近海光伏工程的波浪环境评估、群桩布局优化及防灾设计提供了科学依据。

参考文献:

[1] Yi Wen,Lin Pengzhi. Offshore solar photovoltaic potential in the seas around China[J]. Applied Energy,2024,376(Part B): 124279.

[2] 李顺,彭士涛,齐兆宇. 零碳港区建设与能源融合发展路径探析[J]. 水利经济,2025,43(2):90-99. (Li Shun,Peng Shitao, Qi Zhaoyu. Analysis on the development path of zero-carbon port area construction and energy integration[J]. Journal of Economics of Water Resources,2025,43(2):90-99. (in Chinese))

[3] 曾桢,王溥,朱童. 海上风电与光伏发展现状、趋势与未来策略研究[J]. 科技促进发展,2024,20(9):749-760. (Zeng An, Wang Pu, Zhu Tong. Research on the current status, trends and future development strategy of offshore wind power and photovoltaic[J]. Science and Technology for Development,2024,20(9):749-760. (in Chinese))

[4] Ranjbaran P,Yousefi H,Gharehpetian G B,et al. A review on floating photovoltaic (FPV) power generation units[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2019,110:332-347.

[5] Crijns-Graus W,Wild P,Amineh M P,et al. International comparison of research and investments in new renewable electricity technologies;a focus on the European Union and China[J]. Energies,2022,15(17):6383.

[6] Olkkonen V,Haaskjold K,Klyve Ø S,et al. Techno-economic feasibility of hybrid hydro-FPV systems in Sub-Saharan Africa under different market conditions[J]. Renewable Energy,2023,215:118981.

[7] 徐卫兵,惠星,李东侠,等. 桩基固定式海上光伏项目开发建设策略[J]. 西北水电,2023(5):118-122. (Xu Weibing, Hui Xing,Li Dongxia,et al. Development and construction strategies for fixed offshore photovoltaic projects with pile foundation[J]. Northwest Hydro Power,2023(5):118-122. (in Chinese))

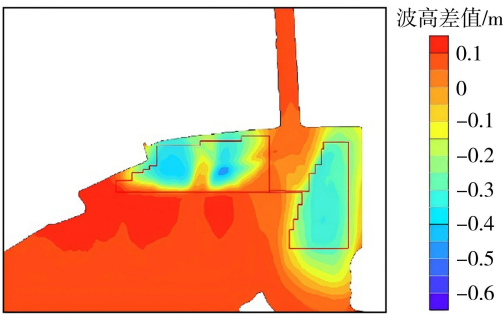


图 9 50 a 重现期有无群桩影响波高差值
Fig. 9 Wave height difference with and without pile foundations under 50-year return period

[8] Kong L S, Qi D M, Wan Y Y, et al. Numerical simulation of wave field in the Yangtze Estuary[J]. Port & Waterway Engineering, 2010(2):46-49.

[9] 王鑫,林鹏,陈晓路,等. 东海上风力机组基础冲刷机理数值模拟研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(12):239-244. (Wang Xin, Lin Peng, Chen Xiaolu, et al. Numerical simulation on scour mechanism of offshore wind turbine foundation in Rudong[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2021, 42(12):239-244. (in Chinese))

[10] 薛玉娆,张金凤,张庆河,等. 桩码头桩群对水动力参数影响的数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2024(5):95-102. (XueYurao, Zhang Jinfeng, Zhang Qinghe, et al. Numerical simulation of the impact of pile groups of high-pile wharves on hydrodynamic parameters[J]. Hydro-Science and Engineering, 2024(5):95-102. (in Chinese))

[11] 谢友鸽,郭金运,朱金山,等. 基于 SWAN 模型的东沙岛海域有效波高模拟与分析[J]. 山东科技大学学报(自然科学版) 2016, 35(3):17-24. (Xie Youge, Guo Jinyun, Zhu Jinshan, et al. Simulation and analysis of significant wave height over seas of Dongsha Island based on SWAN model[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science Edition) 2016, 35(3):17-24 (in Chinese))

[12] 张永强,孙永福,王恩康,等. 长乐海上风电场水动力影响数值模拟研究[J]. 海岸工程, 2019, 38(4):293-303. (Zhang Yongqiang, Sun Yongfu, Wang Enkang, et al. Numerical simulation of hydrodynamic influence in the Changle offshore wind farm [J]. Coastal Engineering, 2019, 38(4):293-303. (in Chinese))

[13] 邱妮珊,姚作芳,左秀玲,等. 于 SWAN 模型的西沙群岛永乐环礁波浪数值模拟与时空分析[J]. 地理科学进展, 2024, 43(9):1811-1825. (Qiu Nishan, Yao Zuofang, Zuo Xiuling, et al. Numerical simulation and spatiotemporal analysis of waves at Yongle Atoll, Xisha Islands based on SWAN modeling[J]. Progress in Geography, 2024, 43(9):1811-1825. (in Chinese))

[14] 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 SWAN model in rivers [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(4):323-328. (in Chinese))

[15] 施凌,杨炜,胡华盛,等. 大范围波浪数值模拟研究[J]. 水道港口, 2022, 43(3):347-352. (Shi Ling, Yang Wei, Hu Huasheng, et al. Study on large scale wave mathematical model[J]. Journal of Waterways and Harbors, 2022, 43(3):347-352. (in Chinese))

[16] 洪新,李松霖,褚芹芹,等. 基于两种嵌套方案数值模拟烟台北部海域海浪的对比研究[J]. 海洋湖沼通报, 2021, 43(2):40-47. (Hong Xin, Li Songlin, Chu Qinqin, et al. A comparative study on the numerical simulation of offshore ocean wave based on two nesting method in Yantai[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2021, 43(2):40-47. (in Chinese))

[17] 刘远超,袁博博,于倩. 港池长周期波浪振荡模态研究[J]. 水道港口, 2020, 41(4):397-403. (Liu Yuanchao, Yuan Bobo, Yu Qian. Long-period wave oscillation mode in harbor basin [J]. Journal of Waterway and Harbor, 2020, 41(4):397-403. (in Chinese))

[18] 姜冠男. 我国海上光伏产业现状及发展趋势分析[J]. 现代工业经济和信息化, 2024, 14(1):77-79. (Jiang Guannan. Analysis of the current situation and development trend of China's offshore photovoltaic industry[J]. Modern Industrial Economy and Informatization, 2024, 14(1):77-79. (in Chinese))

[19] 张振伟,刘必劲,邹志利,等. 高阶 Boussinesq 型水波方程色散和变浅性能的改进[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(2):37-44. (Zhang Zhenwei, Liu Bijin, Zou Zhili, et al. Improvement of dispersion and shoaling property of a set of high-order Boussinesq-type equations[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(2):37-44. (in Chinese))

[20] 刘凡,陆小敏,徐丹,等. 海浪预报方法研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(5):387-393. (Liu Fan, Lu Xiaomin, Xu Dan, et al. Research progress of ocean waves forecasting method [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(5):387-393. (in Chinese))

[21] Yang J, Shaer C A, Heath L S. The SWAN user's manual, version 1. 1[M]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1995.

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.03.021

基于解析解的珠江口虎门盐度扩散特性研究

周苑^{1,2}, 徐龔文^{1,2}, 张蔚^{1,2}, 唐苏轩², 王子杰²

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室; 2. 河海大学港口海岸与近海工程学院)

摘要: 基于盐度对流扩散方程,在盐度纵向对流扩散系数恒定与沿程变化两种假设条件下,构建了珠江口虎门盐水入侵定常扩散系数解析模型和变常扩散系数解析模型,结合现场实测径流与盐度数据,模拟复演盐水入侵过程,对比分析了盐度纵向对流扩散系数时空变化规律,探讨了虎门盐度扩散特性。结果表明:虎门盐度纵向对流扩散系数变化幅度较小,盐水入侵过程曲线呈现钟形过渡形态,表现为下游外凸、上游内凹的特征,盐度梯度沿上游方向先逐渐增大后减小;虎门下游水道的盐度扩散特征受东江来水影响显著,呈明显区段特征;大、小潮期间,受东江影响的虎门下游水道盐度纵向对流扩散系数时空平均值为 $1785\text{ m}^2/\text{s}$,而虎门上下游水道的整体时空平均值为 $2649\text{ m}^2/\text{s}$;黄埔右站为虎门水道的分段特征站点,相较于综合考虑上下游扩散特征的取值方式,解析模型采用黄埔右站下游水道率定得到的盐度纵向对流扩散系数,可提高模型对东江影响河段纵向盐度分布变化的预测精度,但会在一定程度上低估虎门盐水入侵的实际长度。

关键词: 盐水入侵;解析方法;盐度纵向对流扩散系数;珠江口;虎门

Study on salinity dispersion characteristics in Humen of the Pearl River Estuary based on analytical solutions

Zhou Yuan^{1,2}, Xu Yanwen^{1,2}, Zhang Wei^{1,2}, Tang Suxuan², Wang Zijie²

(1. State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University;

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

Abstract: Based on the salinity advection-dispersion equation, constant-dispersion-coefficient and variable-dispersion-coefficient analytical models for saltwater intrusion in Humen of the Pearl River Estuary were constructed under two assumptions of a constant longitudinal salinity advection-dispersion coefficient and a spatially varying longitudinal salinity advection-dispersion coefficient. With field measured runoff and salinity data, the saltwater intrusion process was simulated and reproduced; the spatiotemporal variation laws of the longitudinal salinity advection-dispersion coefficient were comparatively analyzed, and the salinity dispersion characteristics in Humen were explored. The results indicate that the variation range of the longitudinal salinity advection-dispersion coefficient in Humen is small, and the saltwater intrusion process curve presents a bell-shaped transition form, characterized by convexity in the downstream reach and concavity in the upstream reach; the salinity gradient gradually increases and then decreases along the upstream direction. The salinity dispersion characteristics of the downstream waterway in Humen are significantly affected by the incoming water from the Dongjiang River, showing obvious segmented features. During spring and neap tides, the spatiotemporal average of the longitudinal salinity advection-dispersion coefficient in the downstream waterway of Humen affected by the Dongjiang River is $1785\text{ m}^2/\text{s}$, while the overall spatiotemporal average of the upstream and downstream waterways of Humen is $2649\text{ m}^2/\text{s}$. Huangpuyou Station is a segmented characteristic station of the Humen Waterway. Compared with the value assignment method that comprehensively considers the upstream and downstream dispersion characteristics, adopting the longitudinal salinity advection-dispersion coefficient calibrated for the waterway downstream of Huangpuyou Station in the analytical model can improve the prediction accuracy of the model for longitudinal salinity distribution changes in the reach affected by the Dongjiang River but underestimates the actual length of saltwater intrusion in Humen to a certain extent.

Key words: saltwater intrusion; analytical approach; the longitudinal salinity advection-dispersion coefficient; the Pearl River Estuary; Humen

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3001000);中央高校基本科研业务费专项资金项目(B240201003);国家自然科学基金项目(42006155)

作者简介: 周苑(2001—),女,硕士研究生,主要从事河口海岸动力学研究。E-mail:577420193@qq.com

通信作者: 徐龔文(1988—),女,副教授,博士,主要从事河口海岸动力学研究。E-mail:yanwenxu@hhu.edu.cn

近年来,随着河口三角洲地区工业和农业生产力的快速增长,盐水入侵已逐步演变为全球性河口生态灾害问题^[1]。珠江三角洲为典型的复合型三角洲,上游西江、北江、东江三江汇流,下游八口入海;区域河网密布,各汉道径流量与潮汐强度差异显著,各水道口门水动力条件分异明显^[2-3]。其中,虎门纳潮量位居珠江三角洲八大口门首位,潮动力呈逐年增强趋势,为珠江三角洲盐水入侵最为严重的区域之一^[4]。

河口盐水入侵机制与盐度分布规律一直是陆海相互作用领域的研究热点,国内外学者已围绕河口盐水入侵开展了大量理论与实际应用。盐水入侵的研究方法主要包括实测资料统计分析、数值模拟、物理模型和解析分析等^[5]。数值模拟能够模拟任意水动力组合工况,特别适用于大型工程规划应用,但模型构建与运行过程通常较为复杂,物理机理表征的间接性较为突出。相比之下,解析分析虽需要基于较多假设条件建立模型,但作为经典的物理机制分析工具,通过解析盐水入侵控制方程的数学关系,能够直观反映各主要物理参数之间的相互作用,有助于更深入地理解河口盐度扩散的物理过程。

20 世纪 60 年代,Ippen 等^[6]依托系统试验与理论分析,得出了影响盐度瞬时纵向分布的主要影响因子;此后,Fischer 等^[7-8]利用大型室内水槽开展物理试验,建立了盐水入侵长度与河口动力过程相关模型,以研究棱柱形河口的盐水入侵问题;Prandle^[9-10]通过理论推导构建模型,强调了河道横断面面积变化率在确定盐度空间分布中的重要性;Savenije^[5]利用指数函数表征喇叭形河口形态,建立了喇叭形河口盐度分布预测模型,假设冲积河口可以简化为理想河口^[11],河宽与河道横断面面积呈指数减小,在涨憩和落憩两种平衡条件下,该模型有效地预测了世界上许多河口的盐水入侵长度和纵向盐度分布规律,如湄公河河口^[12]和长江口^[13]。

盐水入侵解析法是研究河道盐度纵向扩散的一种简单有效的分析方法,以实测数据为基础,从盐度对流扩散方程入手,能够直观反映盐度输运的物理过程^[6]。盐度对流扩散方程通过盐度纵向对流扩散系数涵括盐水入侵的扩散机理,进而构建河口盐水入侵解析模型。盐度纵向对流扩散系数是构建河口盐水入侵解析模型的重要参数,其确定方法通常采用两种假设^[14]:①将其视为沿程不变的参数,称作定常扩散系数;②假设其从口门处向上游不断衰减,其值与径流以及到河口的距离相关,称作变常扩散系数。

本文基于珠江口虎门实测数据,结合上述两种不同的盐度纵向对流扩散系数假设条件,构建虎门盐水入侵解析模型,分析虎门盐度纵向扩散特征,并探讨不同扩散系数对模型模拟虎门盐度扩散过程的影响。

1 研究区概况

珠江径流量充沛,多年平均入海水量约为 3 319.1 亿 m³,平均流量约为 10 524.8 m³/s,入海径流量仅次于长江,位居我国第二位。珠江口门呈喇叭形状水平展开,沿河口主轴方向,从北到南全长约 70 km,水域宽度从北部的 15 km 向口门逐渐增加,到口门处达 35 km。

珠江三角洲是一个典型的复合型三角洲,由西北江三角洲与东江三角洲及潭江等小河组成。西北江三角洲是以思贤滘、崖门、虎门三地为顶点的三角形区域,东江三角洲则以石龙、黄埔、虎门为顶点形成三角形格局。珠江径流通过八大口门分流入海,东四口门自东向西依次为虎门、蕉门、洪奇门、横门,汇入伶仃洋;西四口门中,磨刀门、鸡啼门单独入海,虎跳门和崖门则汇入黄茅海(图 1)。

虎门位于东莞市沙角,其入海径流包含东江的全部、西、北江的部分以及上游流溪河的来水。淡水补给主要源自东江、流溪河与西、北江,其中流溪河年径流量远小于其余两大水源。虎门外为喇叭形伶仃洋河口湾,口门宽度约 4 km。珠江八大口门中,虎门潮差最大,最大潮差达 3.66 m,平均潮差为 1.70 m^[4]。

本文采用的实测数据来源于 2005 年西北江三角洲网河区枯水期同步水文测验,该成果是近年来珠江三角洲网河区较为完整、系统的枯水期同步水文和盐度资料^[15]。沿虎门水道共选取 9 个监测站,布设如图 1 所示,口门控制站为大虎,自口门向上游依次为泗盛濠、漳澎、麻涌、大盛、黄埔右、大石、沙洛围及浮标厂。选用 2005 年 1 月 21 日至 2 月 3 日的盐度、水位和流量实测资料作为基础数据,并分别选取 1 月 24—25 日、1 月 27—28 日和 1 月 30—31 日作为大潮期、中潮期和小潮期的代表时段。为了探究虎门盐水入侵最严重状态下河口盐度的分布特征,重点分析虎门涨憩时刻盐度沿程扩散过程。由于日盐度最大值与涨憩时刻盐度值接近^[13],采用现场测量的日最大盐度数据代替涨憩时刻盐度。

2 盐水入侵解析模型

在一维模型概化过程中,本文充分考虑了河口盐水入侵过程的实际动力情况。盐、淡水的混合与径流、

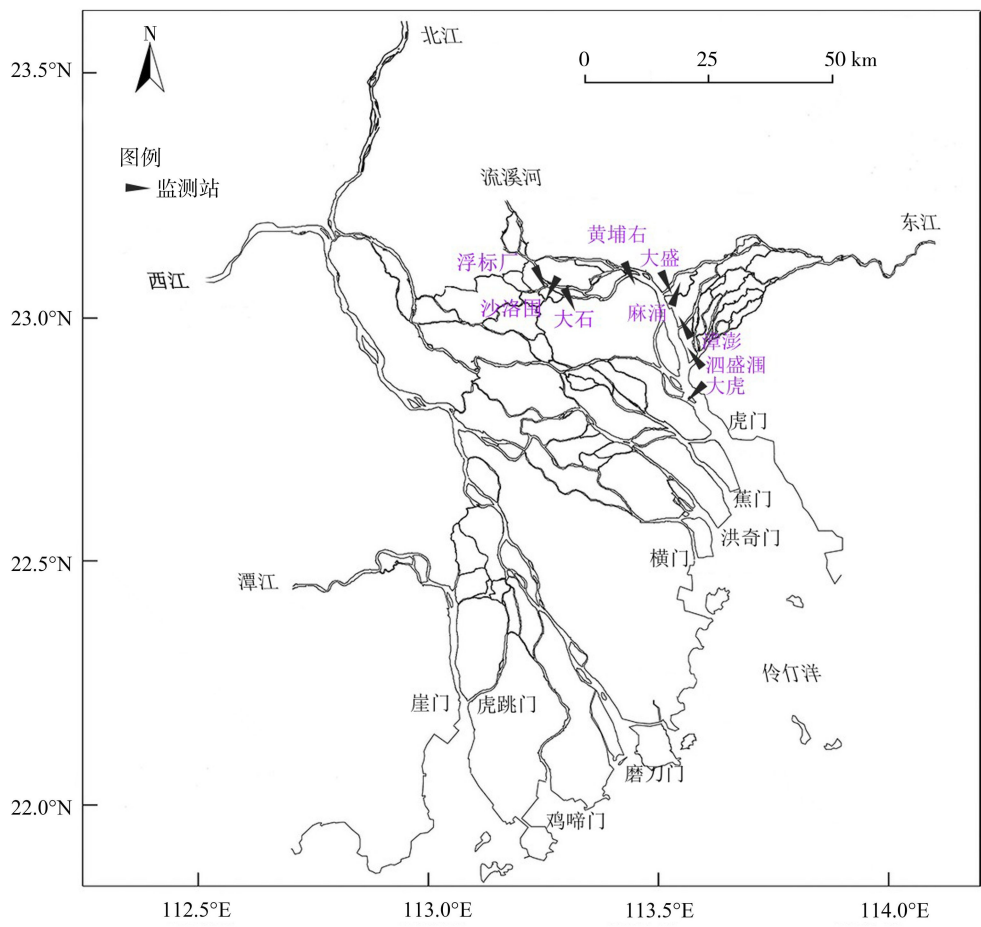


图 1 珠江口监测站布置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of monitoring station layout of the Pearl River Estuary

潮汐动力相关,径流越强,河口盐、淡水分层现象越显著^[16],因而,枯季强潮河口整体呈现完全混合状态^[17],盐度扩散纵向一维特性显著。本文聚焦于河口盐水入侵的纵向变化规律,是强潮河口典型的一维动力特性。

2.1 基本方程

不考虑时间效应的稳态解析模型是研究盐度扩散空间分布规律、预测盐水入侵距离的常用工具。忽略时间项,一维盐度对流扩散方程可以表示为:

$$\frac{d(Aus)}{dx} = \frac{d}{dx} \left(AD_x \frac{ds}{dx} \right) \tag{1}$$

式中: A 为河口断面面积; s 为断面平均盐度; x 为纵向坐标轴,原点在口门处,向海方向为负值,因而计算中径流值为负值,潮流值为正值; D_x 为纵向对流扩散系数; u 为断面平均流速,可分解为潮流流速 u_t 和径流流速 u_f 。稳态状况下,如涨憩或落憩时刻, u_t 为 0^[5],所以式(1)中 u 可简化为 u_f ,也可看作径流量与河口横断面面积之比。对式(1)进行积分可得:

$$\frac{ds}{s} = \frac{Q_f}{AD_x} dx \tag{2}$$

式中: Q_f 为径流量。

河口形态对盐度扩散与分布具有至关重要的影响^[18], Nguyen 等^[12]通过大量现场观测研究证实,冲积河口断面面积向上游方向在自然状态下呈现指数收敛变化形态。基于该结论,河口断面面积可表示为:

$$A = A_0 \exp \left(- \frac{x}{a} \right) \tag{3}$$

式中: A_0 为口门处 ($x=0$) 断面面积; a 为断面面积收敛长度。

2.2 定常扩散系数解析模型

在河口盐度的定常扩散系数解析模型中,盐度的 D_x 取为常数,即 D_x 与 x 无关。式(2)中 D_x 沿程不变,可用口门纵向对流扩散系数 D_0 代替 D_x ,即 $D_x = D_0$ 。将式(3)代入式(2),等式两边积分后可得:

$$\ln \frac{s}{s_0} = - \frac{a}{\alpha_0 A_0} \left[\exp\left(\frac{x}{a}\right) - 1 \right] \tag{4}$$

其中

$$\alpha_0 = - \frac{D_0}{Q_f}$$

式中: s_0 为口门平均盐度; α_0 为口门盐度混合系数。

研究表明,盐度函数 $\ln(s/s_0)$ 与距离函数 $\exp(x/a)$ 之间存在绝对的线性关系^[19],其斜率表达式为 $k = aQ_f/(D_0A_0)$,因而, D_0 与 α_0 可以基于实测盐度值通过回归分析的方法确定。将 α_0 代入式(4),则河口盐度扩散分布可表示为:

$$s = s_0 \exp\left\{ \frac{aQ_f}{D_0A_0} \left[\exp\left(\frac{x}{a}\right) - 1 \right] \right\} \tag{5}$$

根据式(5)可得到盐水入侵长度 x_L 为:

$$x_L = a \ln \left[1 + \frac{A_0D_0}{aQ_f} \ln\left(\frac{s}{s_0}\right) \right] \tag{6}$$

2.3 变常扩散系数解析模型

在河口盐度的变常扩散系数解析模型中,盐度的 D_x 假设与径流相关,且沿水道向上游沿程变化,可表示为^[20]:

$$\frac{dD_x}{dx} = K \frac{Q_f}{A} \tag{7}$$

式中: K 为范登伯格系数,数值在 0~1 之间变化。考虑断面面积沿程呈指数收敛,将式(3)代入式(7),方程两边积分可得到 D_x 与 D_0 的相对关系表达式, D_0 和 K 可用经验分析方法确定^[5]:

$$\frac{D_x}{D_0} = 1 - \frac{Ka}{\alpha_0 A_0} \left[\exp\left(\frac{x}{a}\right) - 1 \right] \tag{8}$$

$$K = 0.2 \times 10^{-3} \left(\frac{E}{H}\right)^{0.65} \left(\frac{E}{C^2}\right)^{0.39} (1 - \delta b)^{-2.0} \left(\frac{b}{a}\right)^{0.58} \left(\frac{Ea}{A_0}\right)^{0.14} \tag{9}$$

式中: E 为河口潮程值; H 为河口潮差; C 为谢才系数; δ 为潮差的沿程衰减率; b 为河口宽度收敛长度。涨憩(HWS)时刻, D_0 的经验表达式为^[21]:

$$D_{0,HWS} = 1400 \left(\frac{E_0 v_0 h_0}{a}\right) N_R^{0.5} \tag{10}$$

式中: v_0 为口门潮流流速振幅; h_0 为口门潮周期平均水深; N_R 为河口理查德系数。冲积河口潮程可视为沿程不变,即 $E = E_0$ 。假设潮流流速振幅沿程不变,则 N_R 可通过口门相关物理参数确定:

$$N_R = \frac{\Delta\rho}{\rho} \frac{g\bar{h}}{v_0^2} \frac{Q_f T}{E_0 A_0} \tag{11}$$

式中: $\Delta\rho$ 为虎门水道纵向密度差; ρ 为虎门口门密度; g 为重力加速度; $\bar{h}$ 为河口潮周期平均水深; T 为潮周期。尽管经验分析方法(式(9)~(11))是确定 D_x 的常用方法,但在实际河口应用中发现,由于经验分析方法的计算精度较差,导致部分河口盐水入侵预测结果出现较大的偏差^[5]。因而,在实际河口应用变常扩散系数解析模型时,通常会结合实测盐度数据,通过率定方法确定 K 及 α_0 。

将式(7)代入式(2),可得:

$$\frac{ds}{s - s_f} = \frac{1}{K} \frac{dD_x}{D_x} \tag{12}$$

等式两边积分,可得:

$$\frac{s - s_f}{s_0 - s_f} = \left(\frac{D_x}{D_0}\right)^{\frac{1}{K}} \tag{13}$$

式中: s_f 为上游盐度的边界值。因此,在变常扩散系数解析模式中,纵向盐度分布可表达为:

$$s = s_f + (s_0 - s_f) \left\{ 1 - \frac{Ka}{\alpha_0 A_0} \left[\exp\left(\frac{x}{a}\right) - 1 \right] \right\}^{1/k}$$

(14)

根据式(14)可得到在涨憩时的盐水入侵长度为:

$$x_L = a \ln \left\{ \left[1 - \left(\frac{s - s_f}{s_0 - s_f} \right)^k \right] \frac{\alpha_0 A_0}{Ka} + 1 \right\}$$

(15)

3 虎门盐度扩散解析

3.1 虎门形态特征参数

珠江三角洲是冲积型三角洲,其河口断面面积向上游方向表现为指数收敛的变化特征。如图 2 所示,图中曲线代表基于式(3)进行指数拟合的计算值, R^2 为 0.92,拟合良好。 $A_0 = 37\,822\text{ m}^2$,由式(3)计算可得 $a = 16.7\text{ km}$ 。 A_0 较大,而 a 较小,准确反映出虎门水道宽口门、河道迅速收窄的喇叭形河口特征。

3.2 定常扩散系数解析

假设盐度的 D_x 沿水道保持不变,通过式(5)可构建虎门盐水入侵定常扩散系数解析模型,其中 D_x 的确定是求解该模型的关键。 D_x 与径流、潮流等动力条件密切相关。当径流增加时,淡水输入量随之增多,河口区域盐度整体降低,对盐水上溯形成抑制,并改变盐度梯度和流速结构,从而影响盐度纵向输移过程及 D_x 的等效取值。潮流强度及其周期性变化同样会影响盐度在河口的混合与分布。涨潮时,潮流推动盐水向上游输移;落潮时,径流与落潮流共同促进盐水向下游输送。潮周期内的往复输移和混合作用使盐水入侵过程呈现动态变化,进而影响定常扩散系数解析模型中 D_x 的确定。

基于式(4),可采用相对盐度与相对距离函数的线性回归拟合方法求解盐度的 D_x 。模型盐度的 D_x 通过沿程 6 个站点(大虎、泗盛濠、漳澎、麻涌、大盛、黄埔右)的大潮、小潮实测盐度数据确定。图 3 为虎门盐度函数与距离函数线性关系,4 组散点分别代表 6 个站点 1 月 24、25、30、31 日的实测盐度值,直线代表 $\ln(s/s_0)$ 与 $\exp(x/a)$ 的线性拟合方程,其斜率即为 $aQ_f/(D_0A_0)$ 的值。拟合结果表明,相对盐度与相对距离两个变量的直线拟合效果较好,因此,可基于拟合斜率进一步确定 α_0 和 D_0 。

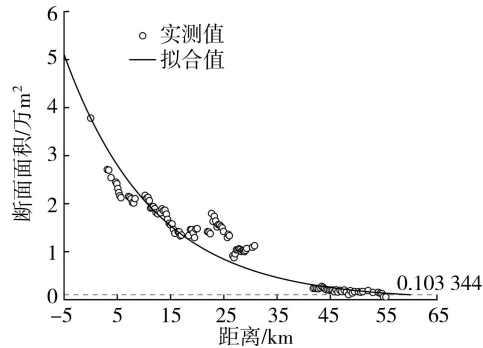


图 2 虎门沿程实测断面面积及拟合趋势线

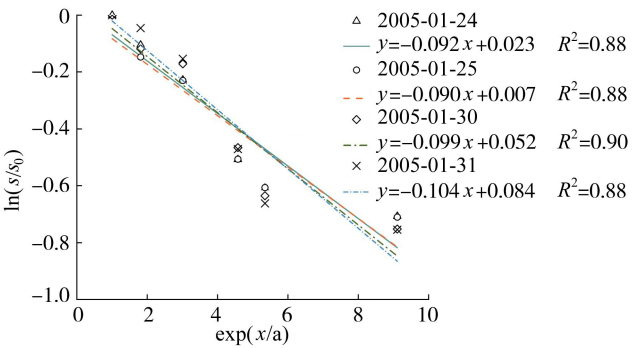


图 3 虎门盐度函数与距离函数的线性关系

Fig. 2 Measured along-channel cross-sectional area and fitted trend line in Humen

Fig. 3 Linear relationship between salinity function and distance function in Humen

定常扩散系数解析模型相关系数计算结果如表 1 所示,其中 Q_h 为虎门入海流量^[4],大潮期间 Q_h 为 $500 \sim 550\text{ m}^3/\text{s}$,小潮期间为 $600 \sim 700\text{ m}^3/\text{s}$,整体变幅较小; K 同样波动不大; R^2 平均值为 0.89,表明拟合精度较高、效果良好。虎门盐水入侵的 α_0 平均值为 4.60 m^{-1} ,标准差约为 0.26 m^{-1} ,大潮期间相较小潮期间 α_0 高出约 10%。

基于式(5)并结合表 1,构建虎门盐水入侵定常扩散系数解析模型。选取 1 月 24、30 日的计算结果,分别表征大潮、小潮期间虎门纵向盐度分布情况,如图 4 所示,图中三角形散点代表从口门向上游沿程 8 个监测站点的实测盐度值。通过对比计算值与实测值的偏离度,可见虎门盐水入侵的定常扩散系数解析模型能够较好地反演盐水入侵过程中盐度沿程的空间分布。大潮期间虎门口门盐度约为 21‰ ,而小潮期间约为 17‰ ;相较而言,小潮期间虎门口门盐度更低,大潮期间盐水入侵更为严重。大、小潮情况下盐水入侵距离均

超过 60 km,影响范围可直达广州河段。

表 1 定常扩散系数解析模型参数

时间	$Q_h/(\text{m}^3/\text{s})$	K	α_0/m^{-1}	R^2
2005-01-24	-525	-0.092	4.80	0.88
2005-01-25	-537	-0.090	4.91	0.88
2005-01-30	-626	-0.099	4.46	0.90
2005-01-31	-663	-0.104	4.25	0.88

河口盐度扩散过程曲线形态受地形、地貌与气候条件的共同影响而呈现不同的区域特征。河口水动力过程虽会影响盐水入侵的距离,但不会改变盐度分布的变化趋势,即曲线形态基本保持不变。通常情况下,冲积型河口的盐水入侵为沿程逐渐衰减的过程。由图 4 进一步分析可知,虎门盐度扩散过程曲线呈现典型的钟形过渡特征,表现为口门处收敛段较短、上游收敛段较长。这是由于虎门的喇叭形态使其纳潮量较大,下游受强潮控制,导致口门盐度梯度偏小,盐度扩散变化相对平缓;随着盐水向上游不断扩散,盐度梯度先逐渐增大后减小,曲线相应呈现下游外凸、上游内凹的变化特征。与之相比,径流控制型河口的盐度扩散过程多表现为较典型的内凹衰减分布特征^[22]。

3.3 变常扩散系数解析

假设盐度的 D_x 沿程变化,可通过式(14)构建虎门盐水入侵变常扩散系数解析模型。模型的计算精度主要受 K 与 α_0 两个关键参数控制。其中,对于同一河口, K 一般不随时间变化,可视为反映河口自然特征的参数,主要与河口几何形态特征、河道糙率等因素有关。 K 为无量纲参数,是影响盐水入侵过程曲线形状的重要参数。

与之不同, α_0 可随水动力条件的变化而变化,主要受潮汐条件和河流径流量的共同影响。相较于 K 对盐水入侵过程曲线形状的控制作用, α_0 更多反映口门附近盐度扩散能力的强弱,并直接影响盐水入侵的长度。

确定 K 与 α_0 的常用方法包括经验公式法和实测数据率定法,两种方法已在国内外众多河口研究中得到广泛应用,但其计算效果并不一致^[19]。本文采用经验公式法和实测数据率定法分别构建虎门盐水入侵的变常扩散系数解析模型,通过对比经验公式法和实测数据率定法模拟虎门盐度沿程扩散分布的效果,优选出适用于虎门水动力特征的参数确定方法及模型参数组合。

3.3.1 经验公式法

依据式(9)~(11)推求虎门 K 与 α_0 的经验值,进而构建变常扩散系数解析模型,模型计算结果如图 5 所示。选用 2005 年 1 月 24、30 日实测资料,分别代表大潮与小潮期间虎门纵向盐度分布情况。可以看出,经验公式法构建的模型虽能准确描绘盐度扩散过程曲线的变化形态,即钟形过渡特征,但在预测盐水入侵距离时存在明显的低估现象。究其原因,虎门受东江、西江、北江、流溪河等多条河流影响,尤其在黄埔右站以下河段,而上游河段仅受西江、北江与流溪河的影响,径流量明显小于下游,而经验公式法难以精准反映该河段沿程径流动力的差异化演变特征。

3.3.2 实测数据率定法

由于 K 主要由河口固有属性决定,首先通过

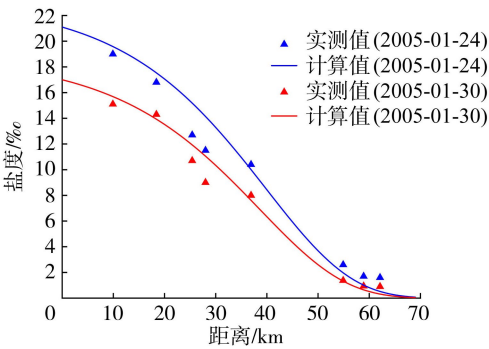


图 4 定常扩散系数解析模型计算值与实测值对比
Fig. 4 Comparison of calculated and observed values for constant-dispersion-coefficient analytical model

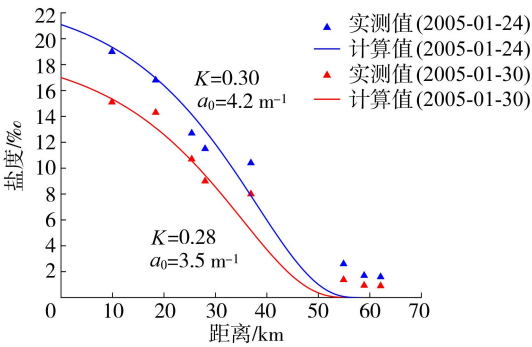


图 5 经验公式模式下变常扩散系数解析模型计算值与实测值对比
Fig. 5 Comparison of calculated and observed values for variable-dispersion-coefficient analytical model under empirical-formula mode

式(14)及盐水入侵过程曲线的形状确定虎门 K 值;再结合实测数据,利用最小二乘法确定 α_0 。选用大虎、泗盛濶、漳澎、麻涌、大盛、黄埔右站点 1 月 24—25 日、30—31 日的实测盐度数据进行参数率定,结果如表 2 所示。可见, α_0 平均值为 4.7 m^{-1} ,标准差约为 0.15 m^{-1} 。

将基于实测数据率定所得 K 值与 α_0 代入式(14),建立基于实测数据率定法的虎门盐水入侵变常扩散系数解析模型。如图 6 所示,该模型虽与实测值存在一定误差,但相较于经验公式法,模拟精度得到了显著提升。对盐水入侵距离的预测更准确,且与定常扩散系数解析模型得出的入侵距离较为接近。预测精度的提升主要归因于基于实测数据率定法综合考虑了虎门上、下游的径流动力差异;率定过程上、下游兼顾,在一定程度上改善了计算结果。因此,采用基于实测数据率定法构建的变常扩散系数解析模型更适用于虎门盐水入侵的模拟。

4 讨 论

4.1 盐水入侵解析方法比较

研究结果表明,虎门属性决定 K 取值为 0.1, α_0 在大、小潮期间变化虽不大,但呈现从大潮向小潮逐渐减小的趋势。虎门盐水入侵的定常扩散系数解析模型和变常扩散系数解析模型均基于大潮和小潮的实测数据进行率定和构建。为进一步验证这两个模型模拟虎门盐水入侵过程的适用性,选取大潮和小潮的混合系数平均值作为模型验证的理论混合系数,并基于中潮的实测盐度数据,对比分析定常扩散系数解析模型与变常扩散系数解析模型的模拟结果及差异特征。

虎门盐水入侵的变常扩散系数解析模型确定 $K=0.1$, α_0 取平均值 4.7 m^{-1} 。相比之下,定常扩散系数解析模型构建更为简便,只需率定 α_0 ,可通过回归分析快速确定,其 α_0 取平均值 4.60 m^{-1} 。

基于虎门中潮期间的实测盐度数据,代入 α_0 分别开展定常扩散系数解析模型和变常扩散系数解析模型模拟计算,结果如图 7 所示。可以看出,定常扩散系数解析模型和变常扩散系数解析模型的计算结果与实测值均存在一定的误差,尤其在距离口门较远的上游区域。为进一步量化定常扩散系数解析模型与变常扩散系数解析模型在虎门盐水入侵模拟中的差异,采用卡方检验法对计算值和实测值的相似度进行比较。经计算,定常扩散系数解析模型的卡方检验值为 11.19,而变常扩散系数解析模型的卡方检验值为 34.77。从数值比较来看,定常扩散系数解析模型的模拟结果与实测数据更为接近,模拟精度更高。因此,定常扩散系数解析模型在虎门的

表 2 变常扩散系数解析模型参数

Table 2 Parameters of variable-dispersion-coefficient analytical model

时间	$Q_h/(\text{m}^3/\text{s})$	K	α_0/m^{-1}
2005-01-24	-525	0.1	4.9
2005-01-25	-537	0.1	4.8
2005-01-30	-626	0.1	4.7
2005-01-31	-663	0.1	4.5

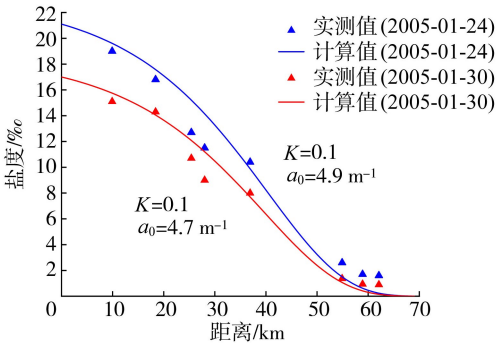


图 6 率定模式下变常扩散系数解析模型计算值与实测值对比

Fig. 6 Comparison of calculated and observed values for variable-dispersion-coefficient analytical model under calibration mode

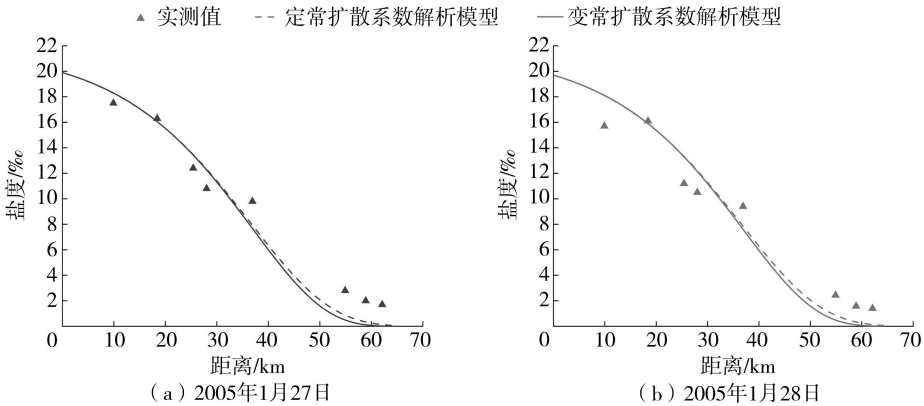


图 7 虎门中潮盐水入侵过程解析模型模拟结果对比

Fig. 7 Comparison of simulation results of analytical models for saltwater intrusion process in Humen during moderate tide

应用中展现了更优的模拟效果,且模型的率定和构建过程相对简单,适合作为盐水入侵的快速预测工具。

4.2 东江对虎门盐度扩散特征的影响

虎门上、下游盐度变化显著,其差异性主要受西江、北江和东江等多源径流的共同作用影响。其中,东江径流主要影响虎门下游水域,直接导致盐度沿程扩散呈现明显分段特征,对虎门水道盐度扩散特征的分析具有关键作用。为此,基于定常扩散系数解析模型,并结合 2005 年 1 月 21 日至 2 月 3 日虎门的实测径流和盐度数据,进一步探讨东江对虎门水道盐度纵向扩散特征的影响。

由图 1 可知,黄埔右站以上的水道几乎不受东江径流的影响,因此选取黄埔右站作为虎门水道分段的特征站点。基于该特征站点,设置两组工况进行比较,以评估东江流量对定常扩散系数解析模型预测虎门水道盐度扩散过程及盐水入侵长度的影响。工况 1 采用大虎、泗盛濠、漳澎、麻涌、大盛 5 个下游站点的相关数据;工况 2 在工况 1 的基础上增加了黄埔右站的实测盐度数据,以确定虎门水道的盐度对流扩散系数,率定结果见表 3。 Q_h 平均值为 $-576\text{ m}^3/\text{s}$; H 平均值为 2.03 m。

表 3 不同工况参数率定结果

Table 3 Parameter calibration results under different scenarios

日期	$Q_h/(\text{m}^3/\text{s})$		H/m		K		R^2		α_0/m^{-1}		$D_0/(\text{m}^2/\text{s})$	
	工况 1	工况 2	工况 1	工况 2	工况 1	工况 2	工况 1	工况 2	工况 1	工况 2	工况 1	工况 2
2025-01-21	-383	-383	1.73	1.73	-0.137	-0.091	0.99	0.89	3.22	4.85	1234	1858
2025-01-22	-446	-446	1.97	1.97	-0.139	-0.093	0.99	0.90	3.18	4.75	1417	2118
2025-01-23	-498	-498	2.28	2.28	-0.139	-0.093	0.97	0.88	3.18	4.75	1582	2364
2025-01-24	-525	-525	2.42	2.42	-0.142	-0.092	0.99	0.88	3.11	4.80	1632	2520
2025-01-25	-537	-537	2.50	2.50	-0.137	-0.090	0.99	0.88	3.22	4.91	1731	2635
2025-01-26	-580	-580	2.53	2.53	-0.143	-0.095	0.95	0.87	3.09	4.65	1791	2696
2025-01-27	-486	-486	2.27	2.27	-0.137	-0.092	0.98	0.89	3.22	4.80	1566	2332
2025-01-28	-584	-584	2.51	2.51	-0.140	-0.091	0.93	0.85	3.15	4.85	1842	2834
2025-01-29	-667	-667	2.26	2.26	-0.147	-0.100	0.95	0.88	3.00	4.42	2003	2945
2025-01-30	-626	-626	2.05	2.05	-0.141	-0.099	0.96	0.90	3.13	4.46	1960	2792
2025-01-31	-663	-663	1.68	1.68	-0.154	-0.104	0.95	0.88	2.87	4.25	1901	2815
2025-02-01	-705	-705	1.43	1.43	-0.140	-0.100	0.86	0.85	3.15	4.42	2223	3113
2025-02-02	-655	-655	1.38	1.38	-0.131	-0.095	0.94	0.90	3.37	4.65	2208	3044
2025-02-03	-705	-705	1.36	1.36	-0.164	-0.103	0.95	0.84	2.69	4.29	1898	3022

选取 2005 年 1 月 21 日至 2 月 3 日整个大、小潮期间的实测盐度值,工况 1 条件下, R^2 平均值为 0.96,拟合结果良好; D_0 平均值为 $1785\text{ m}^2/\text{s}$,与大潮相比,小潮期间虎门 D_0 整体增加,增幅约为 23%。工况 2 R^2 平均值为 0.88, D_0 平均值为 $2649\text{ m}^2/\text{s}$ 。与工况 1 相比, D_0 平均值显著增大;与工况 1 类似,小潮期间 D_0 平均值高于大潮期间,但两者之间的差距缩小。考虑上、下游 6 个站点数据的情况下,率定得到小潮 D_0 增量为 18%。

通过对比两种工况率定的解析模型在实际应用中的表现,可更直观地揭示东江对虎门水道上、下游盐度扩散特征的影响。图 8 为虎门盐水入侵长度与入海流量变化关系。在扩散系数解析模型中, s_0 取大、小潮周期口门盐度平均值,为 19‰,并选取 2‰作为判定盐水入侵长度的盐度阈值。

如图 8 所示,相较工况 1 的计算结果,工况 2 率定模型预测的盐水入侵长度与实测数据表现出更高的一致性。这是因为工况 2 模型取用的 D_x 时空平均值为 $2649\text{ m}^2/\text{s}$,较好地表征了虎门上下游的综合扩散特征,有效提高了对上游低盐度咸水界的预测精度。而工况 1 模型采用的 D_x 较小,时空平均值为 $1785\text{ m}^2/\text{s}$,体现了东江对虎门下游水道盐度扩散的直接影响。图 9 为不同工况下虎门盐度沿程分布模拟结果对比。可见,相较于工况 2,工况 1 率定的解析模型在下游站点的计算结果与实测数据更为接近,尤其在东江影响下,工况 1 模型对虎门水道盐度扩散的预测更为精准。然而,工况 1 模型可能低估虎门上游的低盐度值,并对盐水入侵的实际长度有所低估。因此,在选择使用工况 1 或工况 2 率定的解析模型进行虎门盐度扩散预测时,应慎重考虑各模

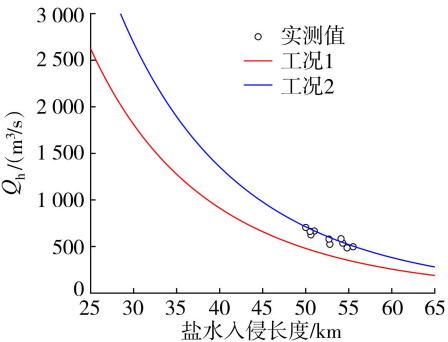


图 8 虎门盐水入侵长度与入海流量关系
Fig. 8 Relationship between seaward discharge and saltwater intrusion length in Humen

型的局限性。

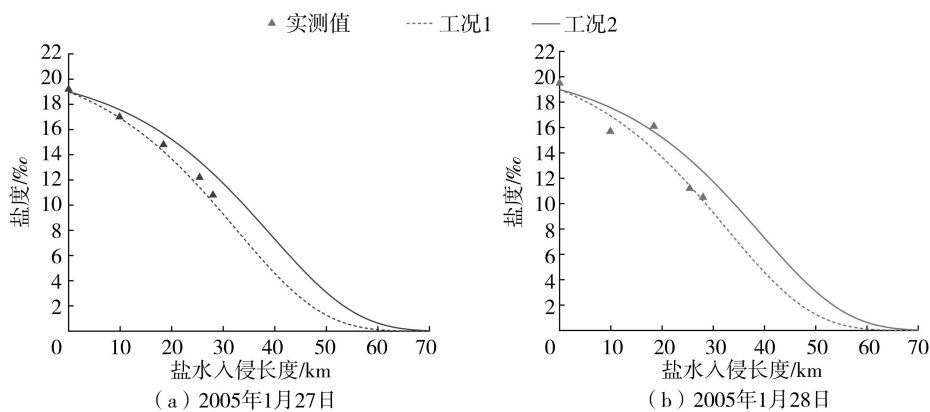


图 9 不同工况下虎门盐度沿程分布模拟结果对比

Fig. 9 Comparison of simulated results of longitudinal salinity distributions in Humen under different scenarios

5 结 论

- a. 珠江口虎门由于纳潮量大,下游通常受潮汐影响显著,口门附近盐度梯度较小,盐度沿程变化较为平缓。盐度梯度向上游逐渐增大,并在盐水入侵末端附近再次减小,形成下游外凸、上游内凹的钟形过渡形态盐度沿程变化特征。范登伯格系数 K 是影响盐水入侵过程曲线形状的重要参数,而口门盐度混合系数 α_0 更多表征口门盐度扩散能力的强弱,并对盐水入侵长度具有直接影响。
- b. 两种解析模型均能较好模拟虎门盐度沿程分布并预测盐水入侵距离,但综合考虑计算精度和模型简便性,定常扩散系数解析模型在虎门盐度沿程分布模拟中更具适用性。东江来水对虎门水道盐度扩散具有显著影响,并呈现分区段变化特征。模型取用黄埔右下游水道的扩散特征,可显著提高其对东江影响河段纵向盐度分布变化的预测精度,但可能低估虎门盐水入侵的实际长度。

参考文献:

[1] 杨芳,陈文龙,卢陈,等. 粤港澳大湾区咸潮综合防控体系研究[J]. 水资源保护,2023,39(1):32-41. (Yang Fang, Chen Wenlong, Lu Chen, et al. Research on comprehensive prevention and control system of saltwater intrusion in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Water Resources Protection,2023,39(1):32-41. (in Chinese))

[2] 张钊汇,危小艳,张蔚. 三维理想河口盐水入侵对径潮驱动变化的响应[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(3):96-102. (Zhang Zhaohui, Wei Xiaoyan, Zhang Wei. Response of saltwater intrusion in three-dimensional idealized estuary to changes in runoff-tide forcing[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2024,52(3):96-102. (in Chinese))

[3] Gong Wenping, Maa J P Y, Hong Bo, et al. Salt transport during a dry season in the Modaomen Estuary, Pearl River Delta, China [J]. Ocean & Coastal Management,2014,100:139-150.

[4] Xu Yanwen, Zhang Wei, Zhu Yuliang, et al. Analytical solution for salt intrusion in multiple-freshwater-source estuaries: application to Humen Estuary[J]. Environmental Earth Sciences,2017,76(19):661.

[5] Savenije H H G. Salinity and tides in alluvial estuaries[M]. Amsterdam:Elsevier,2005:197.

[6] Ippen A T, Harleman D R F. One-dimensional analysis of salinity intrusion in estuaries [R]. Vicksburg: Army Engineer Waterways Experiment Station,1961.

[7] Fischer H B. Discussion of minimum length of salt intrusion in estuaries[J]. Journal of the Hydraulics Division,1974,100(5):708-712.

[8] Rigger B P. Minimum length of salt intrusion in estuaries[J]. Journal of the Hydraulics Division,1973,99(9):1475-1496.

[9] Prandle D. Salinity intrusion in estuaries[J]. Journal of Physical Oceanography,1981,11(10):1311-1324.

[10] Prandle D. On salinity regimes and the vertical structure of residual flows in narrow tidal estuaries[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science,1985,20(5):615-635.

[11] Matsoukis C, Amoudry L O, Bricheno L, et al. Investigating how river flow regimes impact on river delta salinization through idealized modeling[J]. Frontiers in Marine Science,2023,10:1075683 .

[12] Nguyen D, Savenije H H G. Salt intrusion in multi-channel estuaries;a case study in the Mekong Delta, Vietnam[J]. Hydrology & Earth System Sciences,2006,10(5):743-754.

[13] Zhang Erfeng,Savenije H H G,Wu Hui,et al. Analytical solution for salt intrusion in the Yangtze Estuary,China[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science,2011,91(4):492-501

[14] Savenije H H G. A one-dimensional model for salinity intrusion in alluvial estuaries[J]. Journal of Hydrology,1986,85:87-109.

[15] 吴志勇,白博宇,何海,等. 珠江流域 1981—2020 年水文干旱时空特征分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(1):1-9. (Wu Zhiyong,Bai Boyu,He Hai,et al. Temporal and spatial characteristics of hydrological drought in the Pearl River Basin from 1981 to 2020[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2023,51(1):1-9. (in Chinese))

[16] Biemond B,De Swart H,Dijkstra H A,et al. Estuarine salinity response to freshwater pulses [J]. Journal of Geophysical Research-Oceans,2022,127(11):e2022JC018669.

[17] 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 the response of saltwater intrusion to morphological changes of estuarine bar in the Modaomen Estuary[J]. Water Resources Protection,2024,40(5):104-111. (in Chinese))

[18] Hendrickx G G,Kranenburg W M,Antol  nez J A A,et al. Sensitivity of salt intrusion to estuary-scale changes;a systematic modelling study towards nature-based mitigation measures,estuarine[J]. Coastal and Shelf Science,2023,295:108564.

[19] Brockway R,Bowers D,Hoguane A,et al. A note on salt intrusion in funnel-shaped estuaries:application to the Incomati estuary, Mozambique[J]. Estuaries, Coastal and Shelf Science,2006,66:1-5.

[20] Van den Burgh P. Ontwikkeling van een methode voor het voorspellen van zoutverdelingen in estuaria,kanalen en zeeen[R]. Deltadienst;Rijkswaterstaat,1972.

[21] Savenije H H G. Rapid assessment technique for salt intrusion in alluvial estuaries [D]. Delft:International Institute for Infrastructure,1992.

[22] Xu Yanwen,Zhang Wei,Chen Xiuhua,et al. Comparison of analytical solutions for salt intrusion applied to the Modaomen estuary [J]. Journal of Coastal Research,2015,31(3):735-741.

(收稿日期:2024-10-17 编辑:胡新宇)

(上接第 148 页)

[14] 雷小途,陈联寿. 热带气旋风场模型构造及特征参数估算[J]. 地球物理学报,2005,48(1):25-31. (Lei Xiaotu,Chen Lianshou. A method to construct tropical cyclone wind distribution models and estimate its characteristic parameters[J]. Chinese Journal of Geophysics,2005,48(1):25-31. (in Chinese))

[15] 江志辉. 热带气旋模型风场改进及其在 LAGFD-WAM 中的应用[D]. 青岛:国家海洋局第一海洋研究所,2007.

[16] Zhao Lin,Lu Anping,Zhu Ledong,et al. Radial pressure profile of typhoon field near ground surface observed by distributed meteorologic stations[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2013,122:105-112.

[17] Fang Pingzhi,Ye Gengjiao,Yu Hui. A parametric wind field model and its application in simulating historical typhoons in the Western North Pacific Ocean[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2020,199:104-131.

[18] Hu Kelin,Chen Qin,Kimball S K. Consistency in hurricane surface wind forecasting:an improved parametric model[J]. Natural Hazards,2012,61(3):1029-1050.

[19] Wei C C. Study on wind simulations using deep learning techniques during typhoons;a case study of Northern Taiwan[J]. Atmosphere,2019,10(11):684.

[20] Chen Cheng,Lin Hongkun,Guan Dawei. Enhancing typhoon wave hindcasting with random forests and BP neural networks in the SWAN model[J]. Frontiers in Marine Science,2024,11:1472047.

[21] 宫崎正卫,Jelesnianski C P. 台风风暴潮预报技术手册[M]. 北京:海洋出版社,1982.

[22] Zhuo Jingyi,Tan Zhemin. Physics-augmented deep learning to improve tropical cyclone intensity and size estimation from satellite imagery[J]. Monthly Weather Review,2021,149:2097-2113.

[23] Willoughby H E,Rahn M E. Parametric representation of the primary hurricane vortex. Part I:observations and evaluation of the Holland (1980) model[J]. Monthly Weather Review,2004,132(12):3033-3048.

[24] 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))

[25] Fang Genshen,Zhao Lin,Song Lili,et al. Reconstruction of radial parametric pressure field near ground surface of landing typhoons in Northwest Pacific Ocean[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2018,183:223-234.

(收稿日期:2024-12-27 编辑:胡新宇)