

公益广告

一滴清水 一片绿地 一个地球



国际标准连续出版物号: ISSN 1006-7647 国内统一连续出版物号: CN 32-1439/TV CODEN: SSKJAT 邮发代号: 28-244 国内定价: 15.00元



水利水电科技进展

ADVANCES IN SCIENCE AND TECHNOLOGY OF WATER RESOURCES

第四十六卷第五期

二〇二六年九月出版

中国科学引文数据库核心期刊
中文核心期刊
中国科技核心期刊

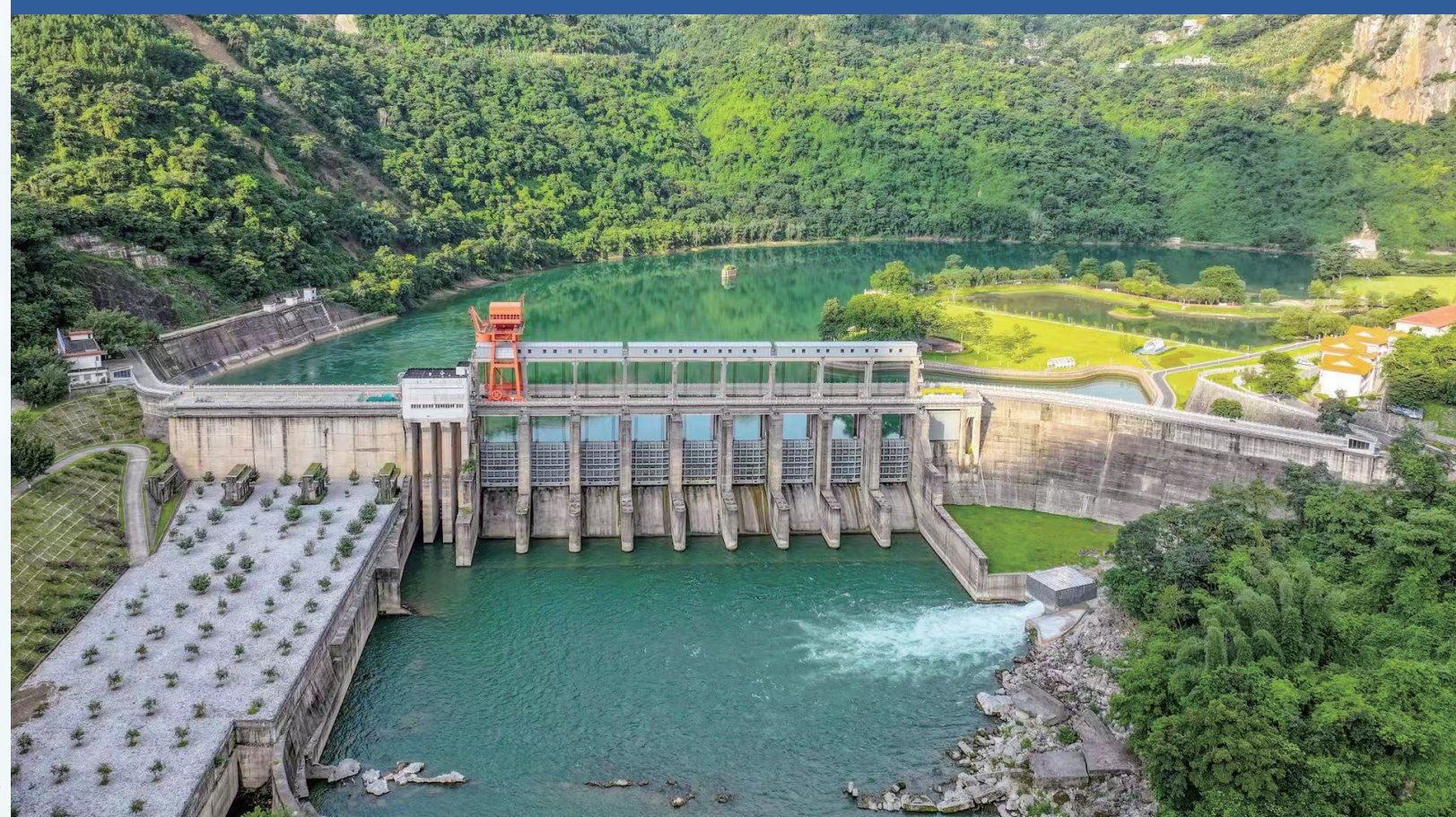
ISSN 1006-7647
CN 32-1439/TV

河海大学 主办
HOHAI UNIVERSITY



水利水电科技进展

ADVANCES IN SCIENCE AND TECHNOLOGY OF WATER RESOURCES



2026年9月

第46卷 第5期
Vol. 46 No. 5

《水利水电科技进展》第七届编辑委员会

主 任 委 员： 郑金海

副主任委员： 宋翔洲

主 编： 苏怀智

副 主 编： 冯建刚 窦 智

编 委 （以姓氏笔画为序）：

万伟锋	马金根	马福恒	王天星	王仁坤	王文全	王玉杰	王东栋	王全荣	王兆礼
王进廷	王志亮	王社亮	王环玲	王俊杰	王桂生	王继敏	文 章	方宏远	孔纲强
巴 晶	邓华锋	邓 军	左其亭	左 锐	龙 笛	卢永金	史广泰	付 强	白庆升
冯建刚	冯建军	冯树荣	成 立	华 明	向 衍	刘东海	刘昌军	刘建锋	刘晓丽
刘晓辉	刘海宇	刘 斌	刘新荣	刘耀儒	关铁生	许小华	许月萍	许增光	孙永林
孙永明	贡 力	苏怀智	李云开	李火坤	李书霞	李 伟	李 阳	李明超	李炎隆
李 剑	李洪涛	李晓俊	李高会	李家正	李超顺	李德友	杨 飞	杨威嘉	肖 艳
肖培伟	吴礼舟	岑威钧	佟宏伟	余天堂	邹德高	沈振中	张人会	张 帅	张永进
张宇宁	张 欣	张建伟	张春生	张 挺	张振华	张晓祥	张 婷	张 鹏	张 嘎
张 磊	张德胜	张璐璐	陈文龙	陈立华	陈 波	陈帝伊	陈益峰	陈 静	陈 璐
林鹏智	季 斌	金光球	金 浏	金祖权	金 峰	周玉良	周家文	周 雷	郑天元
郑克勋	郑爱武	练继建	赵明阶	钟启明	侯精明	俞晓东	俞 缙	姚 池	姚志峰
夏文博	徐 旭	高长胜	郭华明	郭进军	郭高贵	郭鹏程	唐立模	黄书岭	黄时锋
黄 彪	黄 铭	崔 博	假冬冬	彭建和	彭 鹏	蒋金洋	韩 伟	程永光	储洪强
雷 冬	雷金波	雷晓辉	窦 智	裴 吉	颜天佑	潘鹏志			

《水利水电科技进展》首届青年编辑委员会

（以姓氏笔画为序）

于福荣	弓扶元	马 韬	王 帆	王茂松	王 珏	王晋伟	王高辉	王海龙	王 娟
王铭明	王 超	王超越	王瑞红	方 正	邓 超	卢加兴	叶长亮	田 威	付晓龙
付晓东	宁逢伟	权 辉	吕兴栋	吕锡芝	朱国俊	乔 伟	任炳昱	刘贝贝	刘 俊
刘 浏	刘 超	关 涛	江 汇	许贝贝	孙世坤	孙龙刚	孙奔博	孙洪亮	孙博闻
李兆恒	李兆峰	李 毅	杨 帆	肖晨光	吴学震	吴 钦	辛建达	沈月千	张启灵
张 君	张雨霆	张 洪	张紫涛	张 楠	张 雷	张雷克	张 睿	张 龔	陈 舟
范向前	欧 斌	明 波	罗 忆	周兴波	周佳庆	周佩剑	周银军	赵志高	段 伟
宫经伟	贺登辉	袁维海	聂利超	桂 跃	顾 昊	秘向丽	徐小蓉	郭文成	郭胜山
郭 涛	唐小松	黄先北	曹学兴	梁 越	葛 巍	蒋水华	韩 勃	程 龙	程勤波
傅中志	焦伟轩	舒 实	鲁 洋	曾永顺	曾献奎	温立峰	谭乔凤	谭 磊	熊 堃
潘坚文	戴云峰	魏博文							

《水利水电科技进展》征稿简则

- 本刊是一份科学技术期刊（ISSN 1006-7647；CN 32-1439 / TV），主要反映国内外水资源开发、利用、配置、节约和保护领域的科技进步和动态，为我国水利水电工程建设及运行管理服务。主要读者对象为水利水电及相关学科的科学研究人员、工程技术人员、科技管理人员和大专院校师生。本刊逢单月出版，国内外公开发行，邮发代号：28-244。
- 本刊主要刊登与水科学、水工程、水资源、水环境、水管理等有关的科技论文，设有研究探讨、工程技术、专题综述、国外动态、科技简讯等栏目。本刊优先发表自然科学基金资助项目及其他重大科技项目的研究(技术)论文。
- 本刊已入选《中国科学引文数据库》《万方数据数字化期刊全文数据库》《中国期刊全文数据库》《中文科技期刊数据库》等数据库或网站。作者投稿时如无特别声明即被视为同意本刊通过上述媒体为读者提供服务；如有异议，请在投稿时说明。
- 来稿要求和注意事项
 - 文稿务求内容正确，应注重技术创新或学术创见；重点突出作者论文的新贡献；要求文字精练，结构严谨，数据可靠(重要数据请注明出处)；避免写成报告、讲义和学位论文的缩写形式。文稿内容不能泄露国家秘密，在政治或涉外问题上符合国家政策。
 - 文稿篇幅 4 000~6 000 字为宜，应提供中英文篇名、作者姓名及单位名称，并编写中英文摘要(约 250 个汉字)和关键词(4~6 个)。简讯类文稿一般不超过 800 字。
 - 文稿请用 A4 篇幅，正文用 5 号字通栏排版；编译稿应尊重原文的版权，注明原文出处(附外文原文或原文复印件)。计量单位一律使用法定计量单位。
 - 文稿中的图表应设计合理，大小适当。请使用三线表。图表应排在正文引用处，先文后图表。
 - 参考文献择作者亲自阅读、本文引用、公开发表或有案可查者列出，采用顺序编码制。中文期刊文献必须用中英文两种文字著录。常用著录格式(常用参考文献类型：期刊文章[J]；专著[M]；会议论文集[C]；学位论文[D]；标准[S]；报告[R]；报纸[N]；专利[P]；电子文献[EB/OL])：
[1] 作者名(外文姓前名后). 论文篇名[J]. 期刊名，年份，卷号(期次)：起止页码。
[2] 编著者(外文姓前名后). 书名[M]. 版次. 出版地：出版者，出版年：起止页码。
[3] 作者. 题名[C]// 文集编者. 文集名. 出版地：出版者，出版年：论文起止页码。
[4] 作者. 学位论文名[D]. 地名(城市名)：学位授予单位，年份。
[5] 作者. 报告名[R]. 收藏地(城市名)：收藏单位，年份。
[6] 作者. 题名[EB/OL]. [引用日期]. 获取和访问路径。
 - 摄影作品以水利水电工程为主题，要求照片清晰、层次丰富，彩照，并附简短说明。
 - 来稿请写明作者姓名、出生年、性别、职称、学位、主要研究方向(或从事的工作)、工作单位全称、邮政编码、通信地址、联系电话及电邮地址。
- 作者投稿，文责自负，本刊只对稿件作文字上的修改。请勿一稿多投。作者投稿满 3 个月未收到本刊编辑部通知者，可将稿件另行处理。
- 本刊对录用发表的文章将按与作者约定的稿酬标准支付稿酬。所付稿酬包括本简则第 3 条所列媒体的著作权使用费；同时向作者赠送当期样刊。
- 本刊对录用发表的文章酌收论文发表费，论文发表费在论文被录用后交纳。另有约定的除外。
- 本刊只接受网上投稿，网络地址：<http://jour.hhu.edu.cn>。
编辑热线：025-83786335；E-mail：jz@hhu.edu.cn 或 jz1981@vip.163.com。
微信公众号：“水利水电科技进展”或“slsdkjz”。

水利水电科技进展

(1981 年创刊,双月刊)
第 46 卷第 5 期

2026

2026 年 9 月 10 日出版

SHUILI SHUIDIAN KEJI JINZHAN

中国科学引文数据库核心期刊
中文核心期刊(2004—2026 年)
中国科技核心期刊(2003—2026 年)
中国高校百佳科技期刊
中国高校优秀科技期刊
全国水利系统优秀科技期刊
江苏省优秀期刊

编委会主任 郑金海
主 编 苏怀智
副 主 编 冯建刚 窦 智
编辑部主任 雷 燕

责任编辑 俞云利
英文编辑 俞云利

主 管:中华人民共和国教育部
主 办:河海大学

编辑出版:《水利水电科技进展》编辑部
地 址:210098 南京市西康路 1 号
电 话:025-83786335
电子邮箱:jz@hhu.edu.cn

网络地址:http://jour.hhu.edu.cn
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:全国各地邮局

邮发代号:28-244

国外发行:中国国际图书贸易集团有限公司
(北京 399 信箱 100048)

国外发行代号:BM2740

广告许可证:苏工商 3200004960327

中国标准连 ISSN 1006-7647
续出版物号:CN 32-1439/TV

CODEN: SSKJAT

国内定价:15.00 元

目 次

· 专题综述 ·

机器学习在水生态环境领域的应用研究进展
…… 侯 俊,周宁远,张 越,李永年,丁 伟,吴 军(1)
严控标准下船舶生活污水治理的技术瓶颈与发展趋势
…… 程宇航,胡 凯,许 航,陈 卫(11)

· 研究探讨 ·

重复荷载下混凝土断裂损伤演化研究
…… 郑 丹,陈永强,秦张晨,付光川,李鑫鑫(20)
HECC 早期流变特性及其调控研究
…… 李家正,唐韦杰,张秀贞,石 妍(27)
基于模态分解和分类去噪的大坝变形数据清洗方法
…… 张宏瑞,文丽娟,曹 昕,盛金保,江 超,祖安君(34)
考虑堆石料流变模型参数空间变异性的面板堆石坝随机有限元
分析 … 贺林林,聂葳杰,刘 璇,金 勇,梁 越,刘 洋(42)
结合流域产流时空分布的径流智能模拟
…… 管泽鉴,郭玉雪,许月萍,陈思维(51)
鄂尔多斯市产水量与碳储量时空演变及关联分析
…… 刘瑞华,左其亭,杨智楷(58)

· 工程技术 ·

抽水蓄能电站侧式进/出水口调整段长度优化
…… 高学平,廉 想,朱洪涛,陈培伦,王维娜,刘殷竹(67)
基于毕达哥拉斯模糊云模型的大型灌区工程安全评价
…… 岑威钧,王肖鑫,李子阳,翟来铮,魏淑卿,常东明(74)
800 MW 级混流式水轮机小波动瞬变过程研究
…… 耿清华,邓玮琪,廖祥波,张海库,陈岳嘉,王文全(81)
弯道斜向入流对单孔水闸水力特性的影响
…… 张涛涛,徐林万,肖 洋,高 杰,袁 康,田 帅(88)
某工程排沙洞弧形工作闸门后流道空蚀破坏成因的试验研究
…… 向品宇,宋铨焘,邓 军(96)
基于 BIM+知识库的深基坑施工质量虚实增强巡检方法
…… 刘 涵,刘东海,李 欣,王 东,易传斌(102)
考虑社会-经济-生态效益的衡邵干旱走廊水-能源-粮食纽带系统
多目标优化调控研究
…… 周光青,王新奎,蒋昌波,隆院男,宋昕熠,黄春福(110)
天生桥二级水电站 …… 摄影:孟 凯(封面)

CONTENTS

Research progress on application of machine learning in field of aquatic ecological environment Hou Jun, et al(1)

Technological bottlenecks and development trends for shipboard domestic wastewater management under stringent discharge standards Cheng Yuhang, et al(11)

Research on fracture damage evolution of concrete under cyclic loading Zheng Dan, et al(20)

Study on early-age rheological properties of HECC and their control Li Jiazheng, et al(27)

Dam deformation data denoising method based on modal decomposition and classification-based denoising Zhang Hongrui, et al(34)

Stochastic finite element analysis of concrete-faced rockfill dam considering spatial variability of rockfill rheological model parameters He Linlin, et al(42)

Intelligent streamflow simulation incorporating spatiotemporal distribution of watershed runoff generation Guan Zejian, et al(51)

Spatiotemporal evolution and correlation analysis of water yield and carbon storage in Ordos City Liu Ruihua, et al(58)

Optimization of adjustment-section length for side inlet/outlet of pumped storage power plants Gao Xueping, et al(67)

Safety evaluation of large-scale irrigation district projects based on Pythagorean fuzzy cloud model Cen Weijun, et al(74)

Study on small fluctuation transient process in an 800 MW-class Francis turbine Geng Qinghua, et al(81)

Effect of oblique inflow at bends on hydraulic characteristics of a single-orifice sluice Zhang Taotao, et al(88)

Experimental study on causes of cavitation erosion damage in flow passage downstream of a radial service gate in a sediment flushing tunnel of a project Xiang Pinyu, et al(96)

Virtual-real augmented inspection method for deep foundation pit construction quality based on BIM and knowledge base Liu Han, et al(102)

Study on multi-objective optimization and regulation of water-energy-food nexus system in the Hengyang-Shaoyang Arid Corridor considering social, economic, and ecological benefits Zhou Guangqing, et al(110)

机器学习在水生态环境领域的应用研究进展

侯俊¹, 周宁远¹, 张越¹, 李永年², 丁伟¹, 吴军¹

(1. 河海大学环境学院; 2. 大庆油田水务环保公司)

摘要:针对水生态环境研究中数据稀疏、非线性强和机理刻画不足等问题,基于中国知网和 Web of Science 核心合集 2014—2024 年的相关文献,在梳理经典机器学习、深度学习、集成学习及自动机器学习基本原理的基础上,从水质预测与管理、水体污染物分析、富营养化与蓝藻水华研究、水生态系统保护 4 类场景综述了机器学习在水生态环境领域的应用进展,并结合数据特征、任务目标与模型性能进行了比较分析,提出了问题导向的算法选择建议。结果表明:随机森林、XGBoost 等集成学习算法在中小样本、多因子非线性关系挖掘和变量重要性识别方面具有较好的适用性;LSTM、GRU 等模型更适用于多站点、多时间尺度序列预测;CNN、Transformer 等模型在遥感识别和藻类生物图像分析中展现出较好的应用潜力。目前,机器学习仍面临数据质量不一、模型可解释性不足、算力消耗较高以及与机理模型协同不够等问题,未来可结合数据共享系统,进一步拓展机器学习在水生态环境领域的应用空间。

关键词:机器学习;水生态环境;水质预测;蓝藻水华;生态保护

中图分类号:X52

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2026)05-0001-10

Research progress on application of machine learning in field of aquatic ecological environment//Hou Jun¹, Zhou Ningyuan¹, Zhang Yue¹, Li Yongnian², Ding Wei¹, Wu Jun¹ (1. College of Environment, Hohai University; 2. Daqing Oilfield Water Affairs and Environmental Protection Company)

Abstract: Aiming at the problems of sparse data, strong nonlinearity and insufficient mechanism characterization in aquatic ecological environment research, this paper uses literature published between 2014 and 2024 retrieved from the China National Knowledge Infrastructure (CNKI) and the Web of Science Core Collection. On the basis of sorting out the basic principles of classical machine learning, deep learning, ensemble learning and automated machine learning, this paper reviews the application progress of machine learning in the field of aquatic ecological environment from four research scenarios, including water quality prediction and management, water pollutant analysis, eutrophication and cyanobacterial bloom research, and aquatic ecosystem protection. Furthermore, a comparative analysis is carried out based on data characteristics, task objectives and model performance, and problem-oriented suggestions for algorithm selection are proposed. The results indicate that ensemble learning algorithms such as random forest and XGBoost have good applicability for small- and medium-sized samples, the mining of multi-factor nonlinear relationships and the identification of variable importance. Models including LSTM and GRU are more applicable to multi-site and multi-temporal scale sequence prediction. CNN, Transformer and other models show considerable application potential in remote sensing recognition and algal biological image analysis. At present, the application of machine learning still faces several challenges, including inconsistent data quality, insufficient model interpretability, high computational cost, and inadequate collaboration with mechanistic models. In the future, by leveraging data-sharing systems, the application scope of machine learning in the aquatic ecological environment field can be further expanded.

Key words: machine learning; aquatic ecological environment; water quality prediction; cyanobacterial bloom; ecological protection

随着全球气候变化加剧以及城市化和工业化进程的快速推进,水生态环境问题日益严峻,主要表现为水质恶化、水资源供需矛盾加剧、生态系统退化

等^[1-2]。然而,现有研究在监测、预测与管理实践方面,仍面临数据缺失和水生态环境模型局限两大挑战:①水质数据往往比流量数据更加稀疏^[3],且多为

基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFC3210903);国家自然科学基金项目(U23A2058,52370164);江苏省水利科技项目重点项目(2023003)

作者简介:侯俊(1979—),男,教授,博士,主要从事河湖水质改善与生态修复研究。E-mail:hjy_hj@hhu.edu.cn

针对特定环境问题的局部、短期数据,难以全面反映水生态环境的动态变化和长期趋势^[4];②传统的水生态环境模型通常基于现有的机理模型和经验公式^[5],在处理复杂多变的实际情况时,往往存在较大的局限性和不确定性,预测性能难以满足实际需求^[6-7]。

在此背景下,机器学习凭借其强大的数据处理能力和预测性能,成为水生态环境领域研究和实践的有力工具^[8-10]。机器学习是一种通过从历史数据中学习规律,自动生成模型来进行预测和决策的技术。该技术无需显式编程或预设规则,而是利用算法和统计模型从数据中提取特征、建立映射关系,从而实现智能化的任务处理与分析。将机器学习应用于水生态环境领域,不仅可以有效弥补监测数据的缺失,增强数据的时空连续性,而且可以在机理尚不明晰的情况下,借助大数据分析揭示水质变化的内在规律^[4,11]。此前已有研究将改进 BP 神经网络用于地下水环境质量评价^[12],验证了该思路的可行性。

近年来,机器学习越来越受到水生态环境领域研究人员的重视。本文对 2014—2024 年中国知网 (CNKI) 和 Web of Science 核心合集的相关文献进行了检索,检索时间截至 2024 年 12 月,文献类型包括研究论文与综述论文,得到中文论文 224 篇,英文论文 902 篇(图 1)。基于检索结果,本文系统梳理了机器学习算法的分类及基本原理,概述了其在水质预测与管理、水体污染物分析、富营养化与蓝藻水华研究以及水生态系统保护中的主要应用(表 1),并进一步从问题导向出发,讨论不同任务场景下的算法选择与使用边界,以期机器学习在水生态环境领域的进一步应用提供借鉴。

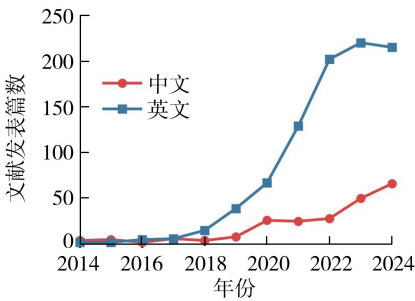


图 1 2014—2024 年机器学习在水生态环境领域相关文献发表趋势

表 1 2014—2024 年机器学习在水生态环境领域不同方向的发文占比

文献来源	发文占比/%				
	水质预测与管理	水体污染物分析	富营养化与蓝藻水华研究	水生态系统保护	其他
中文	37.1	21.9	20.5	12.9	7.6
英文	30.3	23.2	22.4	18.0	6.2
合计	31.6	22.9	22.0	17.0	6.5

1 水生态环境领域常见机器学习算法

机器学习的概念最早由亚瑟·塞缪尔于 1959 年提出^[13],即“在不直接针对问题进行编程的情况下,赋予计算机学习能力的一个研究领域”。20 世纪中后期,机器学习经过了一段漫长而曲折的发展历程^[14-22],进入 21 世纪,深度置信网络^[23]的提出使得机器学习迎来了复兴。如今,大模型和自监督学习推动着机器学习在各领域的广泛应用,如语言处理和语音识别^[24-25],智能化的新时代已经开启。

机器学习主要包括数据预处理、数据集划分、模型构建训练、验证优化及结果分析。通过多指标评价获取最优模型,完成特征重要性分析与指标预测。从任务属性和模型结构角度出发,机器学习算法目前可以大致分为经典机器学习算法、深度学习算法、集成学习算法 3 类^[26],此外,自动机器学习 (AutoML) 目前也受到越来越多的关注。表 2 总结了常用算法的基本原理及适用特点。

经典机器学习可以分为监督学习、无监督学习和半监督学习。监督学习通过学习已有数据的输入-输出对应关系来训练模型,预测新的输入数据的输出,可分为分类算法与回归算法两大类。典型的分类算法有朴素贝叶斯 (NB)^[27]、逻辑回归 (LR)^[28]等。对于回归算法,常见的有多元线性回归 (MLR)^[29]、岭回归 (RR)^[30]等。此外还有兼顾分类与回归的算法,如著名的支持向量机 (SVM)^[31]和决策树 (DT)^[20]。无监督学习通常用于处理没有标注的数据,通过寻找数据的潜在结构进行学习,可分为聚类、降维两类^[32],其常用算法分别为 k 均值聚类 (KMC)^[33]和主成分分析 (PCA)^[34]。除此以外,无监督学习也常用于异常值检测,如局部离群因子 (LOF) 法^[35]。半监督学习结合了少量标注数据和大量未标注数据,通过这两类数据的组合来训练模型^[36]。目前在水生态环境领域,半监督学习的应用仍然较少^[37]。

深度学习实际上是具有多个隐藏层 (≥ 2) 的神经网络 (NN),神经网络是一类受生物神经系统启发的机器学习算法,特别适用于解决复杂的非线性问题,它们由多个互相连接的神经元组成,分为输入层、隐藏层和输出层,每层神经元通过权重与下一层的神经元相连,能够通过训练从数据中自动学习特征和规律^[23]。深度学习的主要算法有卷积神经网络 (CNN)、循环神经网络 (RNN)、长短期记忆网络 (LSTM)、门控循环单元 (GRU)、生成对抗网络 (GAN) 等^[4]。

表 2 常见机器学习算法的基本原理及适用特点

机器学习分类	代表算法	基本原理	适用特点
监督学习	NB	基于贝叶斯定理的分类算法,通过现有先验概率计算所需的后验概率	适合处理大规模数据
	LR	对预测值进行归一化,计算事件的概率与选定的阈值进行比较	适用于二分类问题
	MLR	估计两个或多个独立特征与一个相关特征之间的线性关系	适用于线性或弱非线性任务
	RR	在线性回归的基础上加入 L2 正则化	减少过拟合
	SVM	构建超平面对高维数据进行分类,可以分为支持向量分类(SVC)和支持向量回归(SVR)	适合小样本,高维度特征场景
	DT	通过树形结构的决策规则进行分类,由根节点输入,最后从叶节点输出,分为分类树和回归树	规则直观,可解释性较强
无监督学习	KMC	将数据点分配到 k 个簇中,令簇内的方差最小化	适用于样本分类
	PCA	通过线性变换将数据投影到主成分方向上,实现降维	压缩特征,减少信息损失
半监督学习	Self-Training	通过少量标注数据和大量未标注数据的组合来训练模型	适用于标签稀缺场景
深度学习	CNN	通过卷积操作提取图像的局部特征	适用于图像分类
	RNN、LSTM、GRU	用于处理序列数据,LSTM 是 RNN 的改进版本,能够处理长序列数据中的依赖关系	适用于多时间尺度,多站点序列预测
	GAN	生成模型和判别模型相互对抗来学习,生成数据	适用于数据增强与样本扩展
集成学习(袋装法)	RF	集成多个决策树的预测结果,具有较高的精度与鲁棒性	适用于异构数据与变量筛选
集成学习(提升法)LightGBM、XGBoost		顺序训练多个基学习器,每个都试图纠正前一个的错误,最终将所有结果加权平均,能够在复杂数据集上减少模型的偏差,提高集成模型的预测能力	适用于非线性拟合与重要特征识别
集成学习(堆叠法)		将多个基学习器的预测结果用于训练一个新学习器来进行最终的预测	适合模型比选,提升预测精度
自动机器学习	H2O AutoML、AutoKeras	自动数据预处理、特征工程、模型选择、超参数调优等	适合快速建模,上手难度较低

集成学习算法是一种通过结合多个基学习器(如 DT)来提高模型性能的机器学习算法^[38]。常见的集成学习算法有袋装法(Bagging)、提升法(Boosting)和堆叠法(Stacking)。袋装法通过对原始数据集进行有放回的随机抽样,生成多个不同的子数据集,分别训练多个基学习器,最后将各个基学习器的预测结果以取平均值或投票方式取得最终结果^[39],代表算法是随机森林(RF)^[14]。提升法主要算法有自适应提升算法(AdaBoost)、梯度提升决策树(GBDT)、轻量梯度提升机(LightGBM)、极端梯度提升机(XGBoost)等^[40-42]。堆叠法则没有固定的算法,它可以组合多个不同类型的基学习器,从而获得更强的学习能力^[43]。

自动机器学习(AutoML)是一种通过自动化流程来优化和简化机器学习任务的技术。它能够减少人类在机器学习模型开发过程中的手动干预,从而降低使用门槛。AutoML 提供了从数据预处理、特征提取、模型选择到超参数调优等全流程的自动化解方案,大幅降低了机器学习模型开发的复杂性^[44]。常见的自动机器学习框架有 H2O AutoML、AutoKeras 等。

2 机器学习在水生态环境领域的应用

2.1 水质预测与管理

水质预测与管理是机器学习应用最广泛的场景

之一,其核心问题包括单指标预测、多指标综合评估和缺失数据填补。

在单指标预测方面,溶解氧、叶绿素 a、高锰酸盐指数(COD_{Mn})和浊度等均是当前研究的重点。溶解氧浓度受水温、光照、污染物浓度等多种环境变量的影响,目前对溶解氧变化及其控制因素的理解有限^[45],机器学习能够更好地探究溶解氧和各个因素之间的关系。例如:Zhi 等^[46-47]通过 LSTM 模型的时间序列分析,初步实现了河流溶解氧水平的动态预测;Bao 等^[48]结合鱼群行为特征与 T-S 模糊神经网络对溶解氧变化进行了建模,说明机器学习在多源信息融合预测方面具有较强潜力。对于其他机理尚不明确或难以实时监测的水质指标,机器学习同样适用。例如:Barzegar 等^[49]开发了 CNN 与 LSTM 相结合的混合模型,用于预测湖泊的叶绿素 a 浓度;Nong 等^[50]和 Zare 等^[51]通过集成学习算法,分别预测了水体的 COD_{Mn} 和浊度;美国农业研究局结合灌溉池中的水质参数和无人机影像数据,提升了对大肠杆菌浓度的预测精度^[52]。

除了单一的水质指标预测外,机器学习可以通过耦合多个变量特征,实现综合性的预测。例如:Smith 等^[53]综合了地质地貌、基础设施、土壤特性等静态空间特征和气象、径流、土地覆盖等动态时间特征,提出了预测特拉华河流域盐度的 RF 模型,用于评估驱动流域河流的盐碱化过程;Kim 等^[54]将水质

指数(WQI)与LSTM模型结合,在不依赖COD、TP这类难以实时测量的参数的情况下,对芬兰普拉韦西湖流域进行了综合性的水质评估;Madni等^[55]则基于H2O AutoML平台构建了以WQI为基础的自动化水质分类预测模型,并通过SHAP值^[56]来解释不同特征对模型预测的贡献;Wang等^[57]提出了一种基于Bayesian-LSTM-GRU的混合模型,实现了金清河流域平原河网多水质指标的综合性预测。

在复杂环境下,不同程度的数据缺失或数据量过少是难以避免的,机器学习可以通过数据增强(如随机采样和噪声添加)有效地拓展数据集,提高模型性能。例如:Zhi等^[4]基于监测地点的水质数据,融合水文气象、遥感及流域特征等多源空间数据,构建了深度学习模型,并将其推广至数据稀缺流域,实现了对缺失数据的有效填补;Qi等^[58]在预测水体盐度时,采用数据增强策略有效扩展了数据集,并通过迁移学习在数据量较少的情况下提升了模型的泛化能力和预测精度。

2.2 水体污染物分析

水中污染物的研究对于水生态环境保护具有重要意义。然而,受复杂环境条件和多因素交互作用的制约,现有方法难以全面、准确地反映污染物的动态行为^[59]。机器学习能够提供更精确的溯源分析和迁移预测手段,同时为黑臭水体的研究开辟新的方法路径。

准确识别水生态环境中污染物的来源是预防和修复污染的关键。Duan等^[60]提出了一种整合了机器学习、物联网和大数据的多技术集成的智慧水环境监测系统(S-WEQM),能够准确高效地识别污染物并精准追踪其来源与路径。对于水体中的溶解性有机物(DOM),Liu等^[61]将RF模型与荧光光谱结合,提出了一种新的识别源指数(SI),能有效区分不同来源的DOM;Li等^[62]使用RF模型分析了德国Elbe河微量重金属的来源,发现矿业、金属工业废水的直接排放是最主要的污染源。将机器学习的分类方法与宏基因组数据结合,还能用于抗生素抗性基因(ARGs)的溯源,进而定量评估不同污染源对ARGs污染的贡献^[63]。

机器学习模型也常被用于模拟污染物在水体中的迁移转化过程。例如:Bao等^[64]利用XGBoost模型研究了梯级水库中氮的迁移转化规律,揭示了梯级水库对氮元素输运和保留的影响以及硝酸盐转化的时空变化;Sarkar等^[65]研究了微塑料(MPs)在湿地系统中的迁移、转化、去除机制,并利用*t*-SNE聚类算法分析了MPs作为重金属载体对鱼类等水生动物的影响;Xu等^[66]采用XGBoost方法构建了定

量构效关系(QSAR)模型^[67],模拟和预测了多氯联苯(PCBs)在不同环境条件下的光降解路径和机制;此外,Gao等^[68]将RF与QSAR模型结合,分析了水体有机污染物在二价铁介导下的还原动力学特征,结果表明,耦合模型的拟合与预测性能均显著优于单一模型。

黑臭水体是指呈现令人不悦的颜色或散发令人不适气味的水体。对于黑臭水体的识别,解明权等^[69]提出了基于贝叶斯卷积网络(BCN)的黑臭水体遥感识别算法,能够精确地提取遥感图像中的黑臭水体特征;刘中等^[70]进一步将DOM数据与RF算法结合,解析了黑臭水体的形成机制,对水体中有机的种类及其与黑臭程度的关系进行了深入分析。关于黑臭水体中的致嗅物质,Huang等^[71]将分子指纹特征和MS²质谱数据与气味特性关联,采用RF/GBDT等算法,实现了对水中复杂化学物质气味特性的预测,为进一步理解黑臭水体中的气味成因提供了科学依据。

2.3 富营养化与蓝藻水华研究

富营养化与蓝藻水华是湖泊、水库和河口等缓流水体中最突出的生态环境问题之一,其形成与演变受营养盐输入、水温、风场、水动力条件及人类活动等多种因素共同影响,具有显著的非线性和时空异质性。因此,该领域已成为机器学习算法的重要应用场景,现有研究主要集中在水体营养状态评估与水华预警、蓝藻水华时空分布特征分析、环境驱动因子分析以及藻类图像处理等方面。

营养状态指数(TSI)是基于水体中的透明度、叶绿素a、总磷等参数计算所得的综合指标,用于量化评估水体的营养水平并划分富营养化等级,对富营养化控制具有重要意义。Zhang等^[72]提出了一种通过光学吸收系数间接推算TSI的方法,并与深度神经网络(DNN)结合,评估了中国961个湖泊的营养状态;Meng等^[73]则利用BP神经网络构建了TSI反演模型,并通过麻雀搜索算法(SSA)优化模型,实现了洪泽湖营养状态的较高精度评估;Shang等^[74]利用XGBoost模型和遥感数据,预测了湖泊的腐殖化指数(HIX),并分析了其在不同营养状态下的变化趋势。在充分掌握水体营养状态之后,可以进一步实现水华预警,如Qian等^[75]结合大数据与深度学习技术,开发了一种预测有害藻华(HABs)的Bloomformer-2模型,优化了自注意力机制,能够提供比传统LSTM更精确的预警结果。

机器学习模型与遥感技术结合能够有效提取蓝藻水华的时空分布特征。在时间分布上,于家斌等^[76]和Ni等^[77]分别通过遗传算法和注意力机制

优化了长短期记忆网络 (LSTM) 模型,提高了叶绿素 a 的预测精度,进而表征水华爆发的时间特点。在空间分布上,Pan 等^[78]将遥感指数引入 RF 模型,并通过量子粒子群算法 (QPSO) 优化参数选择,能够更全面地表征不同水文条件下的蓝藻水华特征;Liu 等^[79]结合图像超分辨率和侧窗卷积技术开发了一种基于深度学习的蓝藻水华识别算法 HAB-Net,提高了对条带状分布藻华的识别精度;Song 等^[80]利用无人机多光谱影像训练了改进的 Transformer 模型,结果显示,在光照和阴影条件下,该模型的水华检测精度较传统遥感指数法 NDVI 分别提升了 11.1% 和 5.4%。

机器学习能够识别蓝藻水华与环境因子之间的关系。RF 模型在这方面展现了极大的潜力,模型能够有效捕捉环境因子与蓝藻水华之间的非线性关系^[81],已被用于分析太湖蓝藻爆发的主要气象驱动因子^[82]和水质驱动因子^[83]。例如:金晓龙等^[84]利用水质监测数据与气象数据训练增强了回归树模型,成功识别了爆发期与非爆发期影响巢湖蓝藻水华的主要驱动因子;潘佳敏等^[85]通过小波-神经网络模型分析了富营养化与气象因子的多尺度耦合关系,揭示了不同时间尺度上气象因子对氮磷浓度变化的影响,并提出了季节性削减氮磷比的治理策略。

深度学习模型在藻类图像识别中的应用,为藻类的快速、准确检测和分类提供了新思路。例如:Chong 等^[86]建立了深度卷积神经网络 (DCNN) 与自动编码器相结合的模型,用于藻类显微图像的识别与分类,在处理低分辨率显微图像时表现优异;Sonmez 等^[87]开发了一种 CNN 与 SVM 的混合模型,用于区分蓝藻和绿藻的图像,准确率高达 99.66%;Chan 等^[88]利用基于 GAN 的 StyleGAN2-ADA 实现藻类图像增强,通过生成人工图像扩充数据集,提高了分类模型的性能,尤其增强了对稀有藻类的识别能力。

2.4 水生态系统保护

生态领域的数据具有多维度、高复杂性和不确定性等特征^[89],且多种环境因素之间往往存在复杂的耦合作用,使得单因素分析方法(如相关性分析和回归分析)难以获得较好的效果。机器学习能够耦合多个特征进行预测,为这些问题提供了创新的解决方案。机器学习在生态系统保护方面的应用主要包括物种识别与保护、栖息地保护和生态系统健康评估。

物种识别与保护是生物多样性保护的核心任务。传统的物种识别方法依赖于人工观察和分类,费时且易出错。基于深度学习的图像识别技术能够

实现物种的高精度自动化识别,如 Yang 等^[90]利用 CNN 模型,通过自动提取特征,成功实现了部分鱼类的识别。此外,深度学习还有助于监测人类活动对生态系统的影响,如 Chen 等^[91]采用神经网络 (NN) 模型预测了中国淡水鱼类的保护状况与灭绝风险,为未来制定保护优先策略指明了方向。

栖息地保护对于维护水生态系统平衡至关重要。机器学习能够在复杂的水生环境中捕捉复杂的模式和关系,为栖息地保护提供了强大的分析工具。例如:Agrawal 等^[92]通过机器学习模型分析了复杂的环境模式,成功实现了鱼类的栖息地适宜性分析;Yoshida 等^[93]分析了不同环境因子对鲈鱼产卵栖息地适宜性的影响,发现水温、盐度和河床基质对鱼类产卵成功与否至关重要。在数据支持的情况下,机器学习还能监测栖息地的变化。例如:唐希颖等^[94]验证了 RF 模型在湿地植物物种多样性大尺度反演方面的预测能力,实现了大范围、较高精度的湿地变化预测;何博浩^[95]利用 RF 和鲸鱼优化算法 (RF-SWOA) 结合多维环境数据进行建模,预测了海草栖息地的分布及未来变化。

生态系统健康评估旨在量化生态系统的稳定性和可持续性,从而更好地保护生态资源。随着多源数据的涌现,机器学习通过整合气候、环境、水质等多维数据,为生态系统健康评估提供了新的分析方式。例如:崔东文等^[96]通过构建 RF 模型,实现了云南文山州水生态环境的初步评价,表明该方法在复杂指标体系处理中具有较好的适用性;Kwon 等^[97]构建了 CNN 模型,引入营养硅藻指数、底栖大型无脊椎动物指数和鱼类评估指数构建了水生态系统健康指数,预测了水生态系统的健康水平。

3 分析与讨论

3.1 问题导向的算法选择建议

不同问题类型在数据结构、研究目标和模型需求上存在明显差异,算法选择不能脱离具体任务场景而单独讨论。然而,现有研究多侧重于具体案例中的模型构建与性能比较,对于不同水生态环境问题应如何结合数据特征、任务目标和应用需求选择合适算法,尚缺乏系统归纳。事实上,机器学习算法并不存在适用于所有场景的统一最优方案,不同算法在样本规模、特征维度、时空结构、可解释性和计算成本等方面各具优势与局限。因此,在前述应用进展基础上,有必要进一步从问题导向出发,总结不同类型水生态环境研究中机器学习算法的适用场景与选择依据,从而为相关研究和实践应用提供更具针对性的参考。表 3 从典型问题出发,总结了常用

表 3 水生态环境典型问题的机器学习算法选择建议

问题场景	数据特征	推荐算法	推荐理由	应用要点
水质单指标短期预测	连续监测数据,时间依赖性强	LSTM、GRU	能够捕捉时序依赖与非线性波动	需保证样本长度并控制过拟合
水质综合评价与分级	中小样本,多指标耦合	RF、XGBoost、LightGBM	兼顾精度、稳健性和变量重要性识别	建议结合交叉验证与特征筛选
缺失数据填补与跨区域迁移	样本不平衡,站点差异较大	自编码器、LSTM、迁移学习	适于学习隐含结构并提升迁移能力	需关注源域与目标域差异
污染物溯源与驱动因子识别	多源异构数据,可解释性要求较高	RF、XGBoost+SHAP、AutoML	精度与解释性相对平衡	分析结果应结合实际规律
水华时间序列预警	叶绿素 a、藻密度等连续序列	LSTM、Transformer	适于多步预测和长期依赖建模	宜引入气象和水动力变量
水华空间识别与遥感反演	多光谱或高分辨率影像	CNN、Transformer、RF	空间特征提取能力较强	应区分识别任务与预警任务
物种识别与生态图像分析	图像样本,类别不均衡	CNN、GAN、Transformer	适于图像分类与样本增强	需关注样本偏移与泛化能力
生态健康综合评估	多维指标,管理导向明显	RF、Stacking、AutoML	便于综合评价与模型比选	建议结合专家知识进行校核

算法的适配关系与选择依据。

总体来看,若研究目标是解释驱动机制或为管理决策提供支撑,应优先考虑 RF、XGBoost、LightGBM 等兼顾精度与可解释性的模型;若研究对象具有明显的长时间依赖或高维影像特征,则更适合采用 LSTM、GRU、CNN 或 Transformer;当样本规模有限且需要快速建立可比模型时,AutoML 和树模型具有较高实践价值。

3.2 算法选择的关键考量

在实际应用中,算法选择至少应考虑 4 个方面:①数据规模与标签质量。小样本、噪声较大的监测数据不宜直接使用参数量过大的深度模型。②时空结构。多站点长序列预测应突出时间依赖建模,遥感识别与生物图像分类则更关注空间纹理和上下文特征。③可解释性需求。面向污染溯源、驱动因子识别和管理决策的研究,不仅需要较高精度,还需要明确变量贡献和响应方向,可结合 SHAP 等解释方法增强结果可信度。④部署与推广成本。对于基层监测和业务化应用,训练效率、参数可复用性和模型可迁移性与预测精度同样重要。综合考虑上述 4 个因素,H2O AutoML 因其自带可解释性模块、自动训练、集成模型等特点,在水生态环境领域有着较好的应用前景。

4 挑战与展望

机器学习在水生态环境领域应用前景广阔,但同时也在数据获取、模型可解释性、计算资源以及与机理模型整合等方面面临着挑战。

4.1 数据获取与质量

数据是机器学习模型成功的基础,然而在水生态环境领域,数据的获取及其质量管理是两大主要

瓶颈。此外,水生态环境数据通常包括物理、化学、生物和气象等多维度数据,这些数据源异构性强,如何有效整合和处理多源异构数据是机器学习应用中的难点之一。针对数据获取与质量问题,未来应加强多源监测数据标准化、共享平台建设和质量控制流程,推动长时间序列、跨区域、跨尺度数据的整合,以提高模型训练基础。

4.2 模型可解释性与可用性

虽然机器学习模型在预测和分析中的表现优异,但其“黑箱”特性常常限制了其在环境科学领域的广泛应用,尤其是当应用场景对透明性和可解释性提出明确要求时,这一缺陷更为突出。此外,水生态环境领域的研究人员可能缺乏机器学习方面的专门知识,这使其在实际应用上面临较大困难。机器学习模型的复杂算法不仅需要大量数据,还需要专业的编程和模型调优能力,传统的环境科学家在实际操作中会感到困难。针对模型可解释性与可用性不足的问题,应发展更适配环境科学场景的解释框架,集成变量贡献分析、响应阈值识别和不确定性表达,并降低模型部署和使用门槛。

4.3 计算资源与能效

在水生态环境领域,机器学习模型通常需要处理大量的时空数据,这对计算资源的要求极高。尤其是深度神经网络等复杂模型通常需要大量的计算资源来进行训练和推理,当面对大规模环境数据时,这一需求更为迫切。深度学习模型的训练通常依赖高性能计算资源,对环境研究团队的技术基础设施提出了较高的要求。针对计算资源与业务化应用之间的矛盾,应根据任务复杂度选择适度模型,避免在小样本场景中盲目采用高算力模型,同时关注 AutoML 在实际场景中的应用潜力。

4.4 与传统机理模型的整合与平衡

机器学习模型擅长模式识别和大数据分析,属于数据驱动的方法,而传统的机理模型基于明确的物理规律和机理。如何将两者有效整合,使其优势互补,是当前研究的难点。河湖生态环境演变往往受到流量、水位、水动力条件及水文节律等多种水文要素的共同调控,具有显著的多因子耦合和动态响应特征。因此,许多应用场景需要同时兼顾物理过程机理与机器学习模型的预测能力。针对数据驱动方法与机理认知脱节的问题,未来应加强机器学习与水文、水动力、水质及生态过程模型的耦合研究,以提升模型的泛化能力和科学解释力。

5 结 语

水生态环境领域充斥着复杂的非线性过程,机器学习由于能够较好地处理复杂非线性关系,在水生态环境领域展现出较大的应用潜力。现有研究表明,机器学习已广泛应用于水质预测与管理、污染物分析、富营养化与蓝藻水华研究、水生态系统保护等方面,并在非线性拟合、多源数据融合和复杂模式识别等方面表现出较强优势。总体上,RF、XGBoost 等模型更适合作为中小样本和因子识别任务的首选方案,LSTM、GRU 和 Transformer 更适用于长序列预测与高维特征学习,CNN、GAN 等则更适合遥感与图像分析任务。未来研究应着眼于提高模型的可解释性、优化数据获取与整合、平衡模型复杂度与计算资源消耗,同时探索与机理模型的有机结合,以推动水生态环境领域的智能化发展。

参考文献:

[1] Larsen T A,Hoffmann S,Lüthi C,et al. Emerging solutions to the water challenges of an urbanizing world [J]. Science,2016,352(6288):928-933.

[2] 景晓栋,田贵良,张钰宁. 治水新思路下我国水生态补偿实践探索与政策建议[J]. 水利经济,2024,42(6): 50-57. (Jing Xiaodong, Tian Guiliang, Zhang Yuning. Exploration of water ecological compensation practice and policy suggestions in China under new thinking of water governance[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024,42(6):50-57. (in Chinese))

[3] McCabe M F,Rodell M,Alsdorf D E,et al. The future of Earth observation in hydrology [J]. Hydrology and Earth System Sciences,2017,21(7):3879-3914.

[4] Zhi W,Appling A P,Golden H E,et al. Deep learning for water quality[J]. Nature Water,2024,2(3):228-241.

[5] 周信哲,陈永娟,蒲文鹏. 机器学习在水质预测中的应用[C]//2020 中国环境科学学会科学技术年会. 南京:

中国环境科学学会,2020:3942-3947.

[6] 万雅虹. 神经网络模型在水质评价中的应用[D]. 舟山:浙江海洋大学,2017.

[7] 朱瑶,梁志伟,李伟,等. 流域水环境污染模型及其应用研究综述[J]. 应用生态学报,2013,24(10): 3012-3018. (Zhu Yao,Liang Zhiwei,Li Wei,et al. Watershed water environment pollution models and their applications: a review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2013,24(10):3012-3018. (in Chinese))

[8] Zhong Shifa,Zhang Kai,Bagheri M,et al. Machine learning:new ideas and tools in environmental science and engineering [J]. Environmental Science & Technology, 2021,55(19):12741-12754.

[9] 曹俊,张晓敏,朱迪,等. 基于机器学习模型的长江上游典型产漂流性卵鱼类自然繁殖与环境特征关系研究 [J]. 水资源保护,2025,41(6): 251-258. (Cao Jun,Zhang Xiaomin,Zhu Di,et al. Relationship between natural reproduction of typical producing semi-buoyant eggs fish in upper reaches of the Yangtze River and environmental characteristics based on machine learning models[J]. Water Resources Protection, 2025,41(6): 251-258. (in Chinese))

[10] 刘娣,孙佳倩,余钟波. 基于机器学习模型的多层土壤湿度反演[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(3):7-14. (Liu Di,Sun Jiaqian,Yu Zhongbo. Multi-layer soil moisture inversion based on machine learning models [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024,52(3):7-14. (in Chinese))

[11] 涂吉昌,陈超波,王景成,等. 基于深度学习的水质预测模型研究[J]. 自动化与仪表,2019,34(6):96-100. (Tu Jichang,Chen Chaobo,Wang Jingcheng,et al. Research on water quality prediction model based on deep learning [J]. Automation & Instrumentation, 2019,34(6): 96-100. (in Chinese))

[12] 曹剑峰,平建华,Sumare O,等. 改进 BP 神经网络在地下水环境质量评价中的应用[J]. 水利水电科技进步,2006,26(3):21-23. (Cao Jianfeng,Ping Jianhua,Sumare O,et al. Application of improved BP neural network to groundwater environmental quality evaluation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2006,26(3):21-23. (in Chinese))

[13] Samuel A L. Some studies in machine learning using the game of checkers [J]. IBM Journal of Research and Development,1959,3(3):210-229.

[14] Breiman L. Random forests[J]. Machine Learning,2001,45(1):5-32.

[15] Rosenblatt F. The perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain [J]. Psychological Review,1958,65(6):386-408.

[16] Minsky M,Papert S A. Perceptrons: an introduction to computational geometry[M]. Cambridge:The MIT Press,

- [17] Werbos P. Beyond regression; new tools for prediction and analysis in the behavioral sciences [D]. Cambridge: Harvard University, 1974.
- [18] Linnainmaa S. Taylor expansion of the accumulated rounding error[J]. BIT, 1976, 16(2): 146-160.
- [19] McClelland J L, Rumelhart D E, Group P R, et al. Parallel distributed processing, volume 2: explorations in the microstructure of cognition: psychological and biological models[M]. Cambridge: The MIT Press, 1986.
- [20] Quinlan J R. Induction of decision trees [J]. Machine Learning, 1986, 1(1): 81-106.
- [21] LeCun Y, Boser B, Denker J S, et al. Backpropagation applied to handwritten zip code recognition [J]. Neural Computation, 1989, 1(4): 541-551.
- [22] Cortes C, Vapnik V. Support-vector networks[J]. Machine Learning, 1995, 20(3): 273-297.
- [23] Hinton G E, Salakhutdinov R R. Reducing the dimensionality of data with neural networks[J]. Science, 2006, 313(5786): 504-507.
- [24] Seide F, Li Gang, Yu Dong. Conversational speech transcription using context-dependent deep neural networks[C]//Interspeech 2011. Florence: ISCA, 2011: 437-440.
- [25] Stokel-Walker C, Van Noorden R. What ChatGPT and generative AI mean for science [J]. Nature, 2023, 614(7947): 214-216.
- [26] Huang Ruixing, Ma Chengxue, Ma Jun, et al. Machine learning in natural and engineered water systems [J]. Water Research, 2021, 205: 117666.
- [27] McCallum A, Nigam K. A comparison of event models for Naive Bayes text classification [C]//AAAI-98 Workshop on Learning for Text Categorization. Madison: AAAI Press, 1998: 41-48.
- [28] Friedman J, Hastie T, Tibshirani R. Additive logistic regression; a statistical view of boosting (with discussion and a rejoinder by the authors) [J]. The Annals of Statistics, 2000, 28(2): 337-407.
- [29] Noori R, Khakpour A, Omidvar B, et al. Comparison of ANN and principal component analysis-multivariate linear regression models for predicting the river flow based on developed discrepancy ratio statistic [J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(8): 5856-5862.
- [30] Hoerl A E, Kennard R W. Ridge regression: biased estimation for nonorthogonal problems [J]. Technometrics, 2000, 42(1): 80-86.
- [31] Schölkopf B, Smola A J. Learning with kernels: support vector machines, regularization, optimization, and beyond [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2005, 16(3): 781-781.
- [32] Hofmann T. Unsupervised learning by probabilistic latent semantic analysis [J]. Machine Learning, 2001, 42(1/2): 177-196.
- [33] Jain A K. Data clustering; 50 years beyond K-means [J]. Pattern Recognition Letters, 2010, 31(8): 651-666.
- [34] Jolliffe I T, Cadima J. Principal component analysis: a review and recent developments [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2016, 374 (2015): 20150202.
- [35] Breunig M M, Kriegel H P, Ng R T, et al. LOF: identifying density-based local outliers [C]//Proceedings of the 2000 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. Dallas: ACM, 2000: 93-104.
- [36] Zhu Xiaojin, Goldberg A B. Introduction to semi-supervised learning [M]. Cham: Springer, 2009.
- [37] Haggerty R, Sun Jianxin, Yu Hongfeng, et al. Application of machine learning in groundwater quality modeling: a comprehensive review [J]. Water Research, 2023, 233: 119745.
- [38] Dietterich T G. Ensemble methods in machine learning [C]//Proceedings of the 1st International Workshop on Multiple Classifier Systems. Cagliari: Springer, 2000: 1-15.
- [39] Breiman L. Bagging predictors [J]. Machine Learning, 1996, 24(2): 123-140.
- [40] Friedman J H. Greedy function approximation: a gradient boosting machine [J]. The Annals of Statistics, 2001, 29(5): 1189-1232.
- [41] Chen Tianqi, Guestrin C. XGBoost: a scalable tree boosting system [C]//Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. San Francisco: ACM, 2016: 785-794.
- [42] Ke Guolin, Meng Qi, Finley T, et al. LightGBM: a highly efficient gradient boosting decision tree [C]//Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems. Long Beach: Curran Associates Inc. , 2017: 3149-3157.
- [43] Ting Kaiming, Witten I H. Stacking bagged and dagged models [C]//Proceedings of the 14th International Conference on Machine Learning. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc. , 1997: 367-375.
- [44] He Xin, Zhao Kaiyong, Chu Xiaowen. AutoML: a survey of the state-of-the-art [J]. Knowledge-Based Systems, 2021, 212: 106622.
- [45] Sánchez E, Colmenarejo M F, Vicente J, et al. Use of the water quality index and dissolved oxygen deficit as simple indicators of watersheds pollution [J]. Ecological Indicators, 2007, 7(2): 315-328.
- [46] Zhi Wei, Feng Dapeng, Tsai W P, et al. From hydrometeorology to river water quality: can a deep learning model predict dissolved oxygen at the continental scale? [J]. Environmental Science & Technology, 2021,

- 55(4):2357-2368.
- [47] Pyo J, Pachepsky Y, Kim S, et al. Long short-term memory models of water quality in inland water environments[J]. Water Research X, 2023, 21:100207.
- [48] Bao Yujun, Ji Changying, Zhang Bing. Prediction of dissolved oxygen content changes based on two-dimensional behavior features of fish school and T-S fuzzy neural network[J]. Water Science and Engineering, 2022, 15(3):210-217.
- [49] Barzegar R, Aalami M T, Adamowski J. Short-term water quality variable prediction using a hybrid CNN-LSTM deep learning model [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2020, 34(2):415-433.
- [50] Nong Xizhi, Lai Cheng, Chen Lihua, et al. A novel coupling interpretable machine learning framework for water quality prediction and environmental effect understanding in different flow discharge regulations of hydro-projects [J]. Science of the Total Environment, 2024, 950:175281.
- [51] Zare M S, Nikoo M R, Al-Rawas G, et al. Integrated ensemble learning approach for multi-depth water quality estimation in reservoir environments[J]. Journal of Water Process Engineering, 2024, 66:105840.
- [52] Hong S M, Morgan B J, Stocker M D, et al. Using machine learning models to estimate *Escherichia coli* concentration in an irrigation pond from water quality and drone-based RGB imagery data [J]. Water Research, 2024, 260:121861.
- [53] Smith J D, Koenig L E, Sleckman M J, et al. Predictive understanding of stream salinization in a developed watershed using machine learning [J]. Environmental Science & Technology, 2024, 58(42):18822-18833.
- [54] Kim H I, Kim D, Mahdian M, et al. Incorporation of water quality index models with machine learning-based techniques for real-time assessment of aquatic ecosystems [J]. Environmental Pollution, 2024, 355:124242.
- [55] Madni H A, Umer M, Ishaq A, et al. Water-quality prediction based on H₂O AutoML and explainable AI techniques[J]. Water, 2023, 15(3):475.
- [56] Lundberg S M, Lee S I. A unified approach to interpreting model predictions [C]//Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing System. Long Beach:Curran Associates Inc. , 2017:4768-4777.
- [57] Wang Kefan, Liu Lei, Ben Xuechen, et al. Hybrid deep learning based prediction for water quality of plain watershed [J]. Environmental Research, 2024, 262:119911.
- [58] Qi Siyu, He Minxue, Hoang R, et al. Salinity modeling using deep learning with data augmentation and transfer learning[J]. Water, 2023, 15(13):2482.
- [59] Chen Fanlun, Yang B C, Peng Shuyi, et al. Applying a deployment strategy and data analysis model for water quality continuous monitoring and management [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2020, 16(6):155014772092982.
- [60] Duan Qiannan, Zhang Qi, Quan Xudong, et al. Innovations of water pollution traceability technology with artificial intelligence[J]. Earth Critical Zone, 2024, 1(1):100009.
- [61] Liu Dongping, Nie Lei, Xi Beidou, et al. A novel-approach for identifying sources of fluvial DOM using fluorescence spectroscopy and machine learning model [J]. npj Clean Water, 2024, 7(1):79.
- [62] Li Peifeng, Hua Pei, Zhang Jin, et al. Ecological risk and machine learning based source analyses of trace metals in typical surface water [J]. Science of the Total Environment, 2022, 838:155944.
- [63] Li Liguan, Huang Qi, Yin Xiaole, et al. Source tracking of antibiotic resistance genes in the environment: challenges, progress, and prospects [J]. Water Research, 2020, 185:116127.
- [64] Bao Yufei, Wang Yuchun, Hu Mingming, et al. Deciphering the impact of cascade reservoirs on nitrogen transport and nitrate transformation: insights from multiple isotope analysis and machine learning [J]. Water Research, 2025, 268:122638.
- [65] Sarkar D J, Das Sarkar S, Das B K, et al. Occurrence, fate and removal of microplastics as heavy metal vector in natural wastewater treatment wetland system [J]. Water Research, 2021, 192:116853.
- [66] Xu Jianqiao, Wei Junyan, Wei Xinyuan, et al. Photodegradation of polychlorinated biphenyls (PCBs) on suspended particles from the Yellow River under sunlight irradiation; QSAR model and mechanism analysis [J]. Water Research, 2024, 267:122547.
- [67] Lyu Yitao, Huang Taobo, Liu Wen, et al. Unveil the quantum chemical descriptors determining direct photodegradation of antibiotics under simulated sunlight: batch experiments and model development [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2022, 10(3):108086.
- [68] Gao Yidan, Zhong Shifa, Torralba-Sanchez T L, et al. Quantitative structure activity relationships (QSARs) and machine learning models for abiotic reduction of organic compounds by an aqueous Fe(II) complex [J]. Water Research, 2021, 192:116843.
- [69] 解明权, 闵松寒, 杨辉, 等. 基于贝叶斯卷积网络的农村黑臭水体遥感识别算法研究[J]. 环境科学学报, 2024, 44(3):215-226. (Xie Mingquan, Min Songhan, Yang Hui, et al. A remote sensing recognition algorithm for rural black and odorous water bodies on Bayesian convolutional networks [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2024, 44

- (3):215-226. (in Chinese))
- [70] 刘中,吴蕊,顾霓涛,等.溶解性有机质数据结合机器学习算法对黑臭水体形成机制的解析[J].环境工程,2025,43(8):280-291. (Liu Zhong, Wu Rui, Gu Nitao, et al. Analysis of formation mechanism of black-odor water bodies by combining dissolved organic matter data with machine learning[J]. Environmental Engineering, 2025, 43(8):280-291. (in Chinese))
- [71] Huang Yuanxi, Bu Lingjun, Huang Kuan, et al. Predicting odor sensory attributes of unidentified chemicals in water using fragmentation mass spectra with machine learning models[J]. Environmental Science & Technology, 2024, 58(26):11504-11513.
- [72] Zhang Dong, Shi Kun, Wang Weijia, et al. An optical mechanism-based deep learning approach for deriving water trophic state of China's lakes from Landsat images[J]. Water Research, 2024, 252:121181.
- [73] Meng Dinghua, Mao Jingqiao, Li Weifeng, et al. An integrated framework for remote sensing assessment of the trophic state of large lakes[J]. Remote Sensing, 2023, 15(17):4238.
- [74] Shang Yingxin, Song Kaishan, Lai Fengfa, et al. Remote sensing of fluorescent humification levels and its potential environmental linkages in lakes across China[J]. Water Research, 2023, 230:119540.
- [75] Qian Jing, Qian Li, Pu Nan, et al. An intelligent early warning system for harmful algal blooms: harnessing the power of big data and deep learning[J]. Environmental Science & Technology, 2024, 58(35):15607-15618.
- [76] 于家斌,尚方方,王小艺,等.基于遗传算法改进的一阶滞后滤波和长短期记忆网络的蓝藻水华预测方法[J].计算机应用,2018,38(7):2119-2123. (Yu Jiabin, Shang Fangfang, Wang Xiaoyi, et al. Cyanobacterial bloom forecast method based on genetic algorithm-first order lag filter and long short-term memory network[J]. Journal of Computer Applications, 2018, 38(7):2119-2123. (in Chinese))
- [77] Ni Jianjun, Liu Ruping, Tang Guangyi, et al. An improved attention-based bidirectional LSTM model for cyanobacterial bloom prediction[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2022, 20(10):3445-3455.
- [78] Pan Xin, Yuan Jie, Yang Zi, et al. Spatio-temporal variation of cyanobacteria blooms in Taihu Lake using multiple remote sensing indices and machine learning[J]. Remote Sensing, 2024, 16(5):889.
- [79] Liu Rongjie, Cui Binge, Dong Wenwen, et al. A refined deep-learning-based algorithm for harmful-algal-bloom remote-sensing recognition using *Noctiluca scintillans* algal bloom as an example[J]. Journal of Hazardous Materials, 2024, 467:133721.
- [80] Song Ze, Xu Wenxin, Dong Huilin, et al. Research on cyanobacterial-bloom detection based on multispectral imaging and deep-learning method[J]. Sensors, 2022, 22(12):4571.
- [81] 徐虹,戴丛蕊,何雨琴,等.定量评估气象条件对滇池蓝藻水华发生的影响及预测[J].水生生态学杂志,2024,47(2):89-96. (Xu Hong, Dai Congrui, He Yuqin, et al. Quantitative assessment and prediction of effects of meteorological conditions on the occurrence of cyanobacteria blooms in Dianchi Lake[J]. Journal of Hydroecology, 2024, 47(2):89-96. (in Chinese))
- [82] 罗晓春,杭鑫,曹云,等.太湖富营养化条件下影响蓝藻水华的主导气象因子[J].湖泊科学,2019,31(5):1248-1258. (Luo Xiaochun, Hang Xin, Cao Yun, et al. Dominant meteorological factors affecting cyanobacterial blooms under eutrophication in Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(5):1248-1258. (in Chinese))
- [83] 王梦竹.太湖富营养化变化过程及环境驱动因子识别[D].天津:天津大学,2019.
- [84] 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))
- [85] 潘佳敏,冯禹昊,谢平,等.基于小波-神经网络耦合模型对云南星云湖富营养化气象驱动因子的分析[J].湖泊科学,2021,33(2):428-438. (Pan Jiamin, Feng Yuhao, Xie Ping, et al. Meteorological driving factor of eutrophication in Lake Xingyun, Yunnan based on the coupling model of wavelet analysis and neural network[J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(2):428-438. (in Chinese))
- [86] Chong J W R, Khoo K S, Chew K W, et al. Trends in digital image processing of isolated microalgae by incorporating classification algorithm[J]. Biotechnology Advances, 2023, 63:108095.
- [87] Sonmez M E, Eczacioglu N, Gumuş N E, et al. Convolutional neural network-support vector machine based approach for classification of cyanobacteria and chlorophyta microalgae groups[J]. Algal Research, 2022, 61:102568.
- [88] Chan W H, Fung B S B, Tsang D H K, et al. A freshwater algae classification system based on machine learning with StyleGAN2-ADA augmentation for limited and imbalanced datasets[J]. Water Research, 2023, 243:120409.

(下转第33页)

严控标准下船舶生活污水治理的技术瓶颈与发展趋势

程宇航^{1,2}, 胡凯^{1,2}, 许航^{1,2}, 陈卫^{1,2}

(1. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室; 2. 河海大学环境学院)

摘要:为明确排放标准升级及国内外差异背景下船舶生活污水处理技术的研发方向、识别技术瓶颈、推动行业可持续发展,系统分析了我国船舶生活污水排放标准、处理装置应用现状及技术研发进展。通过对比新旧排放标准及国内外海洋与内河船舶排放标准的指标,阐明了标准趋严的核心特征及其对处理工艺的更高要求;通过文献调研与排放数据统计分析,梳理了主流处理工艺及装置配备现状,分析了其技术适用性与局限性,并结合长江流域典型处理装置的实地调研与案例分析,识别了影响船载应用的关键技术瓶颈,指出了技术突破的主攻方向。结果表明:我国排放标准在指标数量和数值上较国外标准更为严格,对处理工艺的多目标协同去除能力和系统运行稳定性提出了更高要求,传统生化/物化法处理效果难以保证;400总吨以下小型船舶受空间限制和技术适配性影响,装置安装率极低;膜生物反应器及电化学耦合工艺已成为主流技术方向,但仍面临抗冲击负荷不足、船舶环境约束、数字化运维与监管能力薄弱等难题。因此,船舶生活污水治理应采用系统思维,构建空间适配、运行稳定、黑灰水处理兼顾的技术路径,重点围绕黑灰水协同处理、抗冲击工艺开发、船岸数字化运维与监管三个方向布局,并以分质回用和零排放技术为重要突破方向,促进船舶生活污水治理的节能、减污与降碳协同。

关键词:船舶生活污水;污水处理;船载污水处理装置;技术瓶颈;发展趋势

中图分类号:X703;U664.9

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2026)05-0011-09

Technological bottlenecks and development trends for shipboard domestic wastewater management under stringent discharge standards//Cheng Yuhang^{1,2}, Hu Kai^{1,2}, Xu Hang^{1,2}, Chen Wei^{1,2}(1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education; 2. College of Environment, Hohai University)

Abstract: To clarify the research and development direction of shipboard domestic wastewater treatment technology under the background of upgraded discharge standards and differences between domestic and international standards, identify technological bottlenecks, and promote the sustainable development of the industry, this paper systematically analyzes China's discharge standards for shipboard domestic wastewater, the current application status of treatment equipment, and technological research progress. First, by comparing previous and current discharge standards as well as the indicators of domestic and international discharge standards for seagoing and inland waterway vessels, the core characteristics of increasingly stringent standards and their higher requirements for treatment processes are clarified. Second, through literature review and statistical analysis of discharge data, mainstream treatment processes and the current status of equipment installation are reviewed, and their technical applicability and limitations are analyzed. Third, by combining field surveys and case analyses of typical treatment equipment in the Yangtze River Basin, key technological bottlenecks affecting shipboard application are identified, and the main directions for technological breakthroughs are pointed out. The results show that China's discharge standards are more stringent than foreign standards in terms of both the number and values of indicators, imposing higher requirements on the multi-objective synergistic removal capacity and operational stability of treatment processes, while conventional biochemical/physicochemical treatment processes can hardly guarantee satisfactory treatment performance. For small vessels below 400 gross tonnage, the installation rate of treatment equipment is extremely low due to space constraints and limited technical adaptability. Membrane bioreactors and electrochemical coupling processes have become mainstream technological directions, but they still face challenges such as insufficient shock-loading resistance, shipboard environmental constraints, and insufficient capacity for digital operation and maintenance as well as supervision. Therefore, a systematic approach should be adopted for the treatment of shipboard

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3208900)

作者简介:程宇航(2000—),男,硕士研究生,主要从事污水处理技术研究。E-mail:trnhnqc9796@163.com

通信作者:胡凯(1983—),男,副研究员,博士,主要从事船舶污水处理及循环利用理论与技术研究。E-mail:hukaihit@hhu.edu.cn

domestic wastewater to establish a technical pathway featuring spatial adaptability, stable operation, and simultaneous treatment of blackwater and graywater. Efforts should focus on three directions: synergistic treatment of blackwater and graywater, development of shock-resistant processes, and ship-shore digital operation, maintenance, and supervision. In addition, source-separated reuse and zero-discharge technologies should be taken as important breakthrough directions, so as to promote the coordinated energy conservation, pollution reduction, and carbon reduction in shipboard domestic wastewater treatment.

Key words: shipboard domestic wastewater; wastewater treatment; shipboard sewage treatment equipment; technical bottleneck; development trend

随着全球贸易迅速发展,航运业已成为现代经济的重要支柱。与此同时,规模庞大且航行频繁的船舶队伍成为重要的流动污染源,对通航水域生态环境形成持续压力。研究表明,航运活动造成的污染约占海洋环境污染总量的 35%^[1]。因此,严格控制船舶污染物排放、加强船舶生活污水治理,已成为当前环保领域的紧迫任务。

船舶污染具有流动性强、分布范围广、排放点分散等特征。其中,船舶生活污水作为主要污染源之一,排放量占比高。船舶生活污水通常包括黑水(厕所和小便池排出物)、医务室的面盆和洗澡盆排水、活畜禽货舱排出物以及混入上述废水的其他排水。以长江干线为例,每人每天生活污水产量约为 27.7 L^[2],三峡库区船舶生活污水排放量约为 336.7 万 m³/a^[3]。可见,船舶生活污水排放总量巨大,对水域环境构成显著压力。

国际海事组织(IMO)于 20 世纪 70 年代通过《MARPOL 73/78》,附则Ⅳ同期纳入公约文本,该附则于 2003 年正式生效。自此,全球船舶生活污水管控逐步走向规范化,我国也制定了相关法规与政策。2015 年《水污染防治行动计划》明确了船舶港口污染控制要求;同年,交通运输部印发《船舶与港口污染防治专项行动实施方案(2015—2020 年)》,推动港口接收设施建设;2021 年长江海事局发布《关于严控长江干线船舶污染物排放的通告》,要求实施“禁排-处罚”联动机制,禁止不达标船舶通过三峡等船闸。针对内河船舶,我国在管理实践中逐步形成差异化的治理体系。例如:2020 年《400 总吨以下内河船舶水污染防治管理办法》明确禁止小型船舶(占内河船舶总量 60%以上^[4])在饮用水水源保护区等敏感水域排放生活污水;2021 年施行的《中华人民共和国长江保护法》对长江水域船舶污染防治作出专项规定,表明我国已基本形成覆盖不同水域、吨位和污染源的全链条治理框架。

目前,船舶生活污水处理技术研发尚缺乏对国内外排放标准的系统梳理,难以明确技术装备的升级方向和适配性;同时,对现有技术短板与瓶颈缺乏系统性、精准化的识别,技术研发方向存在一定的盲目性。因此,本文对我国船舶生活污水排放标准、处

理装置应用现状及技术研发进展进行了综合分析,以期厘清关键技术瓶颈,明确技术突破方向。

1 国内外排放标准体系的演进与对比

1.1 国外排放标准

《MARPOL 73/78》是一部旨在防止船舶污染的国际法规,其中附则Ⅳ是规范船舶生活污水排放的标准,其适用范围包括 400 总吨及以上国际航行船舶,以及小于 400 总吨且经核定许可载运 15 人以上的小型国际航行船舶,其核心要求包括排放距离与速率、设备合规与处理标准、检验与记录。为应对可能加剧的污染风险,IMO 陆续通过了一系列决议:MEPC. 2(VI)决议(1976 年),引入生活污水处理装置性能试验指南,建立了基础排放框架;MEPC. 159(55)决议(2006 年),修订了排放标准;MEPC. 200(62)决议(2011 年),增加了对特殊区域(如波罗的海)的针对性管控;MEPC. 227(64)决议(2012 年),全面收紧了指标,新增总氮、总磷等营养盐控制,并引入基于进出水流量比的动态排放限值。虽然这些决议本身不具备追溯性,但从表 1 所示的变化历程中,可以观察到国际标准的收紧趋势:不仅船舶生活污水排放的限制指标数量逐渐增多,而且指标限值持续降低。

1.2 国内排放标准

我国于 1983 年成为 MARPOL 公约缔约国,此后逐步建立起较为完善的船舶污染防治法规体系。该体系以《中华人民共和国海洋环境保护法》《中华人民共和国水污染防治法》《防治船舶污染海洋环境管理条例》等为核心,确立了船舶污染防治的原则、责任与要求。其中,1983 年施行的《中华人民共和国海洋环境保护法》对废弃物倾倒、船舶作业等行为作出了防治规定;2008 年施行的《中华人民共和国水污染防治法》为包括船舶污染在内的各种污染源提供了系统的源头控制要求与治理措施;2010 年施行的《防治船舶污染海洋环境管理条例》则进一步细化了船舶污染物的排放、接收以及污染防治的要求,为执法监督提供了法规依据。此外,“十二五”“十三五”期间《国家环境保护“十二五”规划》《“十三五”生态环境保护规划》及《船舶工业

表 1 IMO 决议以及 GB 3552—2018 关于船舶生活污水排放的指标限值要求

决议/标准	分类	SS/ (mg/L)	BOD ₅ / (mg/L)	COD/ (mg/L)	耐热大肠菌 群数/(个/L)	pH 值	余氯/ (mg/L)	氨氮/ (mg/L)	总氮/ (mg/L)	总磷/ (mg/L)
IMO 决议	MEPC. 2(VI)	≤50	≤50		≤2 500					
	MEPC. 159(55)	≤35	≤25	≤125	≤1 000	6. 0~8. 5	≤0. 5			
	MEPC. 227(64)	≤35 <i>Q_i</i> / <i>Q_e</i>	≤25 <i>Q_i</i> / <i>Q_e</i>	≤125 <i>Q_i</i> / <i>Q_e</i>	≤1 000	6. 0~8. 5	≤0. 5		≤20 <i>Q_i</i> / <i>Q_e</i> 或 <i>r</i> ≥70%	≤ <i>Q_i</i> / <i>Q_e</i> 或 <i>r</i> ≥80%
GB 3552— 2018	2012 年 1 月 1 日以前	≤150	≤50		≤2 500					
	2012 年 1 月 1 日及以后	≤35	≤25	≤125	≤1 000	6. 0~8. 5	<0. 5			
	2021 年 1 月 1 日 及以后(客船内河排放)	≤20	≤20	≤60	≤1 000	6. 0~8. 5	<0. 5	≤15	≤20	≤1. 0

注: *Q_i* 为污水处理装置的进水量; *Q_e* 为污水处理装置的排水量; *r* 为去除率。

“十二五”发展规划》《船舶工业深化结构调整加快转型升级行动计划(2016—2020 年)》的陆续出台,持续推动我国船舶行业污染治理与削减工作。

在排放标准方面, 2018 年我国发布了 GB 3552—2018《船舶水污染物排放控制标准》(表 1), 对原 1983 年版进行了修订。

1.3 国内外排放标准的对比与启示

通过对比国内外排放标准(表 1), 结合新版 GB 3552—2018 对旧版(1983 年版) 的重大修订, 可以看出我国船舶生活污水管控政策的三大特征, 即排放指标的细化、排放限值的收紧、适用范围扩大及管理

体系的系统化:

a. 排放指标细化体现在指标数量增加和范围拓宽。新版标准不仅涵盖常规指标(五日生化需氧量(BOD₅)、化学需氧化量(COD)、悬浮物(SS)等), 还将氨氮、总氮、总磷等营养盐指标纳入强制控制范围, 这与 MEPC. 227(64) 决议所确立的国际趋势一致, 也有利于从源头控制船舶生活污水造成的水体富营养化。

b. 排放指标的限值要求日益收紧。以 SS 为例, 其限值从 150 mg/L 下降至 35 mg/L, 又进一步下降至 20 mg/L; 以 COD 指标为例, 我国对 2021 年及以后安装的船舶, 内河排放的 COD 限值为 60 mg/L, 明显优于国际标准 MEPC. 227 (64) 的限值(125 mg/L)。上述变化不仅体现了我国保护水环境的决心, 也体现出中国特色的治污理念。国内外标准之间的这种差异的深层根源在于: 从水域环境看, MEPC. 227(64) 主要针对海洋船舶, 海洋水体水量大、交换能力强、稀释扩散条件好, 环境容量远高于内河, 而我国内河船舶航行于长江、珠江等内河水系及湖泊水库, 这些水体流速缓慢、换水周期长、富营养化敏感性高, 因此必须采用更严格的 COD 和营养盐限值; 从管理模式看, MARPOL 公约作为国际协定需平衡各缔约国差异, 标准制定往往取“最大

公约数”, 而 GB 3552—2018 作为国家强制性标准, 可依据本国环境承载力独立决策, 体现了“源头严控、分类施策”的本土化治理逻辑。上述标准变化对处理工艺的选型产生了明确的导向作用。一方面, 指标细化要求以 BOD₅ 和 SS 为去除目标的传统单一生化工艺必须升级为具备脱氮除磷功能的处理工艺, 如厌氧-缺氧-好氧法(A²/O)、膜生物反应器(MBR)等; 另一方面, COD 和 SS 限值的收紧, 促使船舶优先采用处理效率更高、出水水质更稳定的膜分离技术, 以替代传统重力沉淀工艺。

c. 防治范围逐渐涵盖船舶污染全过程。GB 3552—2018 不仅规定了各项指标限值, 还完善了包括采样方法、监测技术、指定排放水域、日常管理在内的各项监督管理制度, 使船舶污染管控范围逐渐涵盖船舶污染全过程。

因此, GB 3552—2018 的出台既顺应了国际标准变化趋势, 又是针对我国水域特点所做的主动、系统的本土化升级, 虽然短期内会对现有处理工艺及技术装置带来升级压力, 但长远来看, 必然有力促进行业技术向更高标准发展。

2 船舶生活污水特征

船舶生活污水产生于密闭、紧凑、结构复杂的船舱环境, 其概念与岸上生活污水(即市政生活污水) 既有共同点, 也存在差异性。《MARPOL 73/78》附则 IV 与 GB 3552—2018 对船舶生活污水的界定基本一致, 包括黑水(厕所和小便池排出物)、医务室的面盆和洗澡盆排水、活畜禽货舱的排出物以及混入上述废水的其他排水^[5]。对于我国大部分内河船舶, 生活污水主要包括黑水(粪尿废水) 和灰水(洗涤、厨房等废水)。需要指出的是, 虽然 GB 3552—2018 并未将单独排放的灰水纳入强制处理范畴, 但若黑水与灰水在管道系统内混合, 则混合污水必须接受处理, 且其排放需满足与黑水同等的标准。GB

3552—2018 体现出对黑水排放的严格要求,是船载污水处理系统设计的重要考量。

2.1 水量的波动性特征

船舶用途、生活习惯、水资源获取便利程度、季节等多种因素共同作用,使船舶生活污水水量呈现明显的波动性特征。通常,货船因船员数量及生活习惯相对固定,用水特性较为稳定,用水量呈周期性变化;而客轮因人员流动性大,用水不确定因素多,用水量的日变化系数和时变化系数均相对较大。随着社会发展和生活水平提高,船舶人均生活用水量逐渐增加。从每日用水量变化曲线来看,船员三餐、交接班以及洗浴时段为每天的用水高峰,构成典型的冲击负荷,导致灰水瞬时流量波动较大^[6]。此外,船舶在港口停泊或近海航行时,由于补给便利及清洁活动增加,人均用水量通常高于在远洋航行且水资源补给受限时的水平。水量(尤其是灰水)还与季节有关:夏季因船员清洁活动频繁,灰水量增加;冬季则相应减少。目前,污染负荷相对较轻的灰水已占船舶生活污水总量的 70%~75%^[7],其巨大的水量和冲击性排放^[8],将对下游处理工艺构成持续压力。

2.2 水质的高污染物浓度特征

船上有限的空间和稀缺的淡水资源,决定了节水型器具成为普遍的选择,因而冲洗水量较少;同时,有限的空间也使得船舶卫生系统的排水路径较短。这两方面因素导致污水有机物在微生物作用下的分解量明显小于岸上市政管网内的分解量。因此,与市政生活污水相比,船舶生活污水的污染物浓度更高^[9-11]。

由典型船舶生活污水的水质和水量(表 2)可知,船舶黑水的 BOD₅ 质量浓度是市政污水的几倍甚至几十倍,即便经灰水稀释,处理负荷依然较高。厨房灰水(含油脂、食物残渣和洗涤剂)和洗涤灰水等灰水的污染物浓度较低,但排放量较大(为黑水水量的 4~7 倍),也是造成内河水域污染的潜在污染源^[12]。

表 2 典型船舶生活污水的水质指标和水量			
污水种类	SS/(mg/L)	BOD ₅ /(mg/L)	人均日用水量/(L/d)
船舶黑水	1 000~1 500	2 000~8 000	10~40
厨房灰水	800~1 000	1 000~1 500	10~20
洗涤灰水	50~100	50~100	25~50

与海洋船舶相比,内河船舶航行水域的水体交换能力弱,污染物易累积,使得同等生活污水排放量下对水体的影响更显著。海洋水体稀释能力强,但海洋船舶黑水排放总量大,总有机负荷高。

3 船舶生活污水处理技术研发与瓶颈分析

由于船舶生活污水特殊的水量和水质特点,为满足 GB 3552—2018 要求,有效的处理工艺应当同步高效去除高浓度有机物、氮、磷及 SS,以减少对水体的污染。

3.1 船舶生活污水处理技术研发

3.1.1 船舶生活污水处理技术类型

3.1.1.1 物化法

该方法以重力沉降、过滤等固液分离原理为基础,并与氧化、膜技术等物理化学方法联合使用,优点是占地面积小、启动时间快、操作简便、受船体摇晃影响较小等。但是该方法的许多弊端也不容忽视:①需要长期投加氧化剂(如次氯酸盐)、絮凝剂(如聚合氯化铝)等化学药剂,药剂费用高,且占用了船上储存空间,管理不当时会造成二次污染;②脱氮除磷的效率不佳,难以满足 GB 3552—2018 新增的氮磷限值要求;③固体废物处理困难,投加化学药剂产生的化学污泥需作为危险废物,经船上收集贮存后运送上岸处置,从而增加了末端的处理成本。

因此,物化法可作为深度处理或应急处理单元,但是难以独立构成满足新标准要求的完整处理方案,尤其在面对水质和水量冲击负荷时,该方法的经济性 & 处理稳定性仍面临挑战。

3.1.1.2 电化学法

该方法通过在电极表面发生氧化还原反应直接降解污染物或生成强氧化剂(如电解氯产生次氯酸钠)、絮凝剂(电絮凝)从而间接去除污染物,具有工艺集成度高、反应速度快、易于控制等优点。但是,该方法也存在以下问题:①能耗与电极成本较高。电解需消耗较多电能,电极材料不仅因采用贵金属或特殊涂层导致成本较高,且使用过程中面临钝化与损耗问题,使得更换成本和运维专业性要求较高。②技术成熟度有待提升。除了电解氯(投资与安全性要求高)和电絮凝(无需外加药剂、占地面积小)等技术已在部分特种行业废水处理中应用外,多数电化学技术(如电催化氧化)仍处于实验室或中试阶段^[13],反应副产物控制和能量效率优化是制约其工程化应用的两大因素。

因此,电絮凝技术因无需外加药剂、受船体晃动影响小,常被用作生化处理前端的强化预处理单元,以解决重力沉降在动态航行条件下效率下降的问题。

3.1.1.3 生化法

该方法依据微生物代谢原理,因其投资和运行成本相对较低,在市政生活污水处理领域应用最为

广泛。然而,船载应用时该方法的缺陷被进一步放大,主要体现在以下方面:①系统启动缓慢且环境适应性差。微生物系统培养驯化周期长,且极易受到船体晃动、温度变化(如高温机舱环境),尤其是水质和水量冲击负荷的干扰,导致系统失稳、出水水质波动。②装置体积大且运维复杂。为满足微生物生长需求,装置需要较大容积;同时,其稳定运行依赖于对曝气、污泥回流等参数的精细调控,这凸显了操作人员专业性要求与船员环保知识有限的现状之间的矛盾。

目前,主流船载生化技术主要包括以下方法:①活性污泥法与生物膜法。该类方法易受船体晃动和污水水量波动的冲击,导致固液分离效果不佳、出水水质无法稳定。②膜生物反应器(MBR)。该技术被认为是当前最具前景的船载生化处理方法。它将高效的微生物降解与膜的高效物理截留功能相结合,可有效延长污泥停留时间,提升出水水质稳定性,增强系统抗冲击能力,同时具有占地面积小、自动化程度高等优势,尤其适合缺乏专业环保人员的船舶环境。

然而,MBR在实际工程中仍面临膜污染导致通量衰减、曝气能耗高以及频繁物化清洗造成膜寿命缩短等突出问题。其中,曝气能耗通常占总能耗的一半以上,而膜污染又会进一步推高能耗和清洗频率^[14]。此外,传统MBR对氮磷的去除能力有限,需采取工艺强化或升级,如集成A²/O-MBR、间歇曝气MBR、缺氧/好氧(A/O)-MBR-化学除磷等组合工艺,才能满足排放标准要求。

工程案例表明,MBR工艺在优化条件下具有较好的稳定运行特性。例如,采用空气提升多级循环膜生物反应器(AMCMBR)处理实际船舶污水的试验表明^[15],在船舶空间有限的前提下,系统仍能在较短水力停留时间(如4 h)下实现COD去除率86.93%与总氮去除率70.49%,并在整个试验周期内保持COD与总氮达标率分别为100%与89%,反映该类船载MBR装置在膜污染与能耗挑战下仍具备较强的工程稳定性。

针对船舶生活污水SS质量浓度高(约1 500 mg/L)且含油的特性,可参考高负荷MBR工况中的化学清洗周期(建议值12~44 h)^[16],并结合

高频轻度物理清洗;同时,优先采用具备抗油污、生物污染抑制或自清洁功能的改性膜材料,以显著降低不可逆污染,并提升膜系统的运行稳定性^[17]。

3.1.1.4 膜分离与集成技术

该方法基于物理原理,与过滤等传统固液分离方法不同,是一种以超滤、纳滤、反渗透等技术为代表的压力驱动膜分离方法,已成为研究与应用热点。该方法主要适用于以下两种场景:①作为生物处理的强化环节。超滤或微滤技术与生化反应器组合形成MBR,可解决传统生化法固液分离难题,显著提高泥水分离效率。②作为污水再生回用的主力技术。以纳滤或反渗透技术为核心,可有效实现水的深度净化,达到盥洗、冲洗等回用或杂用水标准,因而成为船上污水“零排放”及资源回收的关键技术。

可见,膜技术既是现有生化法升级的“催化剂”,也是实现“船内再生循环”的“金钥匙”。膜技术的研发,应聚焦膜污染控制,并探索与其他技术的耦合集成,以兼顾效能与成本。

如表3所示^[18-20],不同处理方法在COD去除率、脱氮除磷能力、能耗、占地面积及运维要求等方面差异显著。例如,膜技术具有去除率高、占地面积小的优势,但能耗与清洗维护成本较高,而生化法脱氮效果较好,却对进水波动敏感,因此需综合考虑各方法的技术经济性与适用场景,合理选择适宜工艺。

上述不同工艺在船舶应用中的能耗与碳足迹,可参考市政污水处理工艺的数据。总体来看,生化法能耗最低,约为0.26~1.20 kW·h/m³,碳足迹多为0.2~1.3 kgCO₂e/m³^[21]。物化法能耗约为0.23 kW·h/m³,能耗与碳排放随投药量和加压程度增加^[22]。电化学法能耗波动大,为0.15~86.4 kW·h/m³,碳排放与电耗呈线性相关^[23]。膜技术整体能耗较高,反渗透(RO)为0.46~0.56 kW·h/m³,集成正渗透-膜生物反应器或压力延迟渗透-膜生物反应器为1.28~1.42 kW·h/m³^[24],而低能耗厌氧膜生物反应器-反渗透可降至0.33~0.50 kW·h/m³^[25]。因此,在船舶应用中,生化法最为节能,而电化学法与膜技术需权衡能耗带来的碳负荷。

3.1.2 国内外船舶生活污水处理装置研发

全球船舶生活污水处理技术的研发历程,本质

表3 不同船舶生活污水处理方法的性能对比

处理方法	COD去除率	脱氮除磷能力	能耗	占地面积	运维要求
物化法	一般	总氮去除较差、总磷去除较好	较低	一般	需定期加药和清理过滤设备
电化学法	较高	一般	较高	较小	需要日常运营维护较少,但对电力稳定性要求高
生化法	较高	较高	较低	一般	需定期更换污泥,对进水波动与温度敏感
膜技术	高	较高	较高	小	需定期更换污泥,进行膜清洗

上是岸上市政生活污水成熟工艺的“船上适应性改造”与“集成化、标准化”相互融合、相互推进的发展史。自 20 世纪 60 年代起,发达国家开始研发船载生活污水处理装置,从英国 Hamworthy 公司的超三叉机(生化法)、日本大晃株式会社的 SBT 系列(生化法)、丹麦 ATLAS 公司的 WSH 型(物化法)到美国 Severn Trent De Nora 公司的 Omnipure 系列(电化学法),工艺路线多样,但都致力于满足当时的排放公约^[26]。

国内研究起步于 20 世纪 70 年代,所研发的 MBR 系列装置和 CSWA 系列装置(生物接触氧化+紫外消毒)均致力于提高处理效率和环境适应性^[27-28]。目前,市场上船舶生活污水处理装置品牌众多,包括英国的 Hamworthy、美国的 EnviroVac ORCAII 系列、中国 704 所的 MBR 系列、东方船舶的 SWCB/SWCM 系列等^[29]。而在标准化方面,国际标准化组织(ISO)已发布多项设备标准(如 ISO 13617:2001、ISO 17325 系列)。虽然国内外持续探索,船舶生活污水处理技术仍面临一个根本难题:缺乏一种工艺路线能彻底、稳定地同时满足“严苛排放标准”“恶劣船载工况”“紧凑安装空间”“简易运维要求”这 4 个关键约束条件。

从处理对象来看,传统装置主要针对高浓度黑水,技术路径以生化法为核心。然而,随着水资源短缺问题日益突出和可持续发展理念不断推进,船舶生活污水中水量巨大的灰水逐渐显现出回用潜力,但相关处理技术研究较少,目前主要集中在市政生活污水中的灰水回用,以“过滤-(活性炭吸附)-消毒”或“超滤-消毒”工艺为核心方案。与黑水的生化处理路径不同,灰水处理更侧重于物理过滤与消毒,两者应加以区分。

3.2 处理技术的瓶颈分析

船舶生活污水具有高浓度、水质水量剧烈波动等特征,对污水处理装置的运行稳定性构成严峻挑战。同时,受船载空间有限等因素制约,目前我国船载生活污水处理装置的配备率并不高。以 2017 年江苏省内河流域为例,400 总吨及以上大型内河船舶生活污水处理装置配备率较为理想(约 90%);而 400 总吨以下的小型船舶配备率极低(仅约 10.5%)^[9]。截至 2022 年,广州新港海事处辖区调研结果显示,靠泊内河船舶生活污水处理装置配备率仅为 26.2%^[30]。这些数据折射出我国船舶生活污水处理技术面临的三大瓶颈。

3.2.1 技术受到船载空间的极大限制

船舶特殊的环境对处理技术造成了空间适配性差、管理对象失衡、环境适应性缺失等诸多难题。

3.2.1.1 船载环境制约

a. 内河船舶(尤其是 400 总吨以下船舶)受限于有限的船舱空间和现有船体结构(受船龄、船型、吨位等影响),对处理装置的小型化、集成化有着更高的要求。传统岸上市政生活污水处理技术即使经过定向优化,其体积和几何尺寸也难以直接适配,尤其现有船体高度可能无法满足处理装置对有效水深的要求,难以保证沉淀和曝气效果,这是许多船舶无法安装处理装置的重要原因之一。处理单元的几何尺寸(如高度、宽度和内部构造)会直接影响流态,进而决定混合、曝气与沉降能否正常形成。例如,电化学反应器高度不足时,会形成大面积“死区”,使流体偏离理想流动状态^[31]。

b. 船舶电力系统难以提供稳定、持续的功率输出。由于船舶电力系统是孤立电网,易受负荷波动及恶劣水文条件(如风浪、水流冲击)的影响,且电力负荷冗余有限,难以支持高能耗处理装置(如膜生物反应器、电化学氧化等)的加装。同时,船舶生活污水处理器的正常运行依赖于关键机电设备(如曝气、泵送与膜系统)的持续运行^[32],一旦供电不稳或中断,便可能引发水质波动,甚至导致污染物超标排放。

c. 船体结构不足以承受新增设备的重量和局部荷载。内河小型船舶的船体强度安全裕度较小,开口(如管道、电缆穿孔)或局部高荷载会破坏结构连续性,导致应力集中,使极限承载力进一步降低,并在循环荷载下加速疲劳损伤^[33]。

上述空间、电力、结构三方面因素相互叠加,加剧了船载适配难度。

3.2.1.2 管理对象失衡

基于现行法规及成本因素,小型船舶现行的“收集贮存上岸”模式主要针对高污染的黑水,这种集中处置黑水与放任灰水排放并存的模式造成两大问题:①灰水排放量可达黑水的 5~10 倍,却处于监管真空区,成为被忽视的重要污染源^[34];②污水处理系统丧失了将总量巨大的灰水作为再生资源加以利用的机会。更严峻的是,目前行业内尚无成本低廉、操作简便的灰水处理及资源回用的可靠技术。

3.2.1.3 环境适应性缺失

由于船舶具有特殊的动态环境及运行条件,传统工艺的缺陷被放大。封闭船舱内持续存在高温、剧烈震动等情况,且污染物浓度及水量波动较大。在此环境下,对投加量固定的化学药剂法的处理稳定性、生化反应效率以及系统运行安全性(如防止硫化氢等有害气体积累)等方面的要求较陆地更为严苛。

上述问题共同指向一个趋势,即技术研发不能简单地陆地工艺缩小化,而需从船舶环境特点出发,进行有针对性的优化与创新。

3.2.2 技术稳定性受到动态冲击、运维能力和基础设施等方面的挑战

a. 抗冲击负荷能力差。船舶的航行姿态扰动(震动、摇摆、倾斜、转弯)和船员作息引起的冲击式排污(瞬时大流量、高负荷)属于典型的“动态冲击”,将持续对船载生化处理系统施加压力,抑制硝化-反硝化的脱氮过程和沉淀池的固液分离效果。

b. 运维能力不足。船载处理装置,特别是生化系统,其正常运行需监测污泥性状、间歇投加药剂、定期加入菌剂等,而这些操作所需的专业技术与现有船员的知识储备存在显著差距,也与船员工作重心严重偏离,导致处理装置闲置或低效运行。此外,剩余污泥、浮渣等副产物还需要收集后上岸处置,进一步加剧了系统运维管理的难度和复杂性。例如,污泥膨胀、毒性冲击等故障在实际污水处理厂中极为常见,会直接导致污泥沉降性能恶化和污泥流失,需要具备专业诊断能力的运维人员及时处理^[35]。对于船载系统而言,负荷变化更为剧烈,全规模试验显示 HRT 和进水浓度是最敏感因素,当 HRT 降至 9 h 时总氮便无法达标^[36]。同时,现有装置普遍缺乏在线监测与智能故障诊断功能,难以对关键运行参数进行实时感知、异常预警和自动调整,对处理装置的运行稳定性构成了严峻挑战。

c. 基础设施限制。船舶电力供应有限,且存在间断性停电(如夜间停航),会影响处理装置的连续运行。有限的船体空间也极大地制约了生化反应器高度、曝气系统等相关设计要素,经济性和处理效能之间的矛盾迫使设计人员在投资、能耗、占地面积等因素之间进行权衡取舍。

3.2.3 船-岸衔接机制不畅

面向污水船内再生循环回用的场景,技术有效性主要依赖于船载设备;而面向污水收集储存上岸处理的场景,技术有效性则主要取决于从船上到岸上的衔接过程,但是现有船-岸的衔接机制不畅,主要表现在以下 3 个方面:

a. 经济方面的驱动力不足。船舶生活污水的回收价值低且上岸处置需额外费用,致使接收方(尤其是小型码头及老旧船舶的服务方)对建设和完善污水接收及处理设施的意愿不大。此外,一些老旧、客流量少的船舶用于设备改造的资金亦有限。政府层面则缺乏对接收设施建设和运营的补贴机制以平衡各方成本。成本和收益的失衡导致船-岸衔接的经济动力不足。

b. 接收点与船舶和处理设施未能有效衔接。部分码头和港口设有生活污水接收点,可是由于设施不匹配、船舶少或操作衔接不畅等原因,其服务覆盖面和服务响应能力受限。此外,这些接收点通常未与具备足够处理能力的城镇污水处理厂或处理设施有效联通^[37],使收集的污水不能及时送入终端处理设施,可能引起二次污染、设施空转。上述“最后一公里”梗阻现象也使得前端船载处理的价值大打折扣。

c. 制度因素导致责任模糊。船舶生活污水上岸处理涉及船东、码头、城镇污水处理厂以及交通与环保等多个管理部门,但缺乏跨部门的权责划分标准和协同监管机制。制度层面不够明确,导致各方推诿、衔接脱节。此外,现有法规对“上岸处理”的强制性要求不足,对违规排放的处罚力度偏弱,进一步削弱了船-岸衔接的制度约束力。

4 结 语

在生态文明建设背景下,我国船舶生活污水治理正处于“高标准要求”与“低装置安装率”相矛盾、“复杂运行瓶颈”与“薄弱处置系统”相冲突的困局。解决之道不在于追逐单一技术指标,而在于立足系统思维,提出一套契合船舶环境特点的系统性技术与管理创新方案,以破解空间限制、适应动态扰动、匹配运维能力,并贯通水陆处置链条。

此外,国内外相关研究虽聚焦船舶生活污水污染控制,但技术方面照搬岸上市政生活污水处理工艺,工程应用方面则主要关注大型渡船、游船以及海事航线船舶,缺乏面向内河船舶的污水处理技术装置体系,尤其面临以下核心问题有待突破创新:

a. 对象不完整。高浓度黑水的处理技术较为成熟,少见关于低浓度灰水的处理技术研究,黑灰混合污水处理更呈现技术孤岛的现状。

b. 视角有偏差。现有研究未对内河航道船舶生活污水排放规律及船舱环境特性进行系统分析,所用技术在实船应用时面临处理装置繁多、过程控制复杂、效果不稳定等问题,不仅技术水平亟待提高,适配性也有待改善。未来宜从开发抗冲击负荷强、耐船体晃动的复合式生物-膜分离工艺入手,例如将具有脱氮除磷效果的 A²/O 技术与 MBR 技术耦合,以实现碳、氮、磷污染物的同步去除。

c. 目标需升级。随着船舶生活污水处理对象范围的扩大和处理标准的不断提高,为彻底解决船舶生活污水污染问题、缓解航行中水资源短缺压力,迫切需要研发新型船舶生活污水零排放及分质回用技术。目前,相关研究主要依托超滤膜分离技术,聚

焦“MBR-活性炭吸附-消毒”典型工艺开发。对于大中型船舶,灰水排放量大,回用潜力更高;对于小型船舶,灰水可在满足标准的前提下排放。

d. 系统缺整合。随着排放标准的不断提升,一方面,现行处理技术在氮磷同步脱除方面的效能亟待提高;另一方面,针对船舶及港口污染防治监督执法的实际需要,目前尚缺乏全流程监管方法及基于“互联网+”等信息化技术的数字化监管平台。未来应着力发展船岸协同的数字化运维与监管技术,构建集在线监测、数据传输、远程诊断与执法辅助于一体的智能监管体系,既呼应处理装置低维护、智能化的运维需求,也有效提升监管效率。

综上所述,今后行业领域研究应针对船舶生活污水排放不均匀系数较大、污染物负荷高等特点,以“污水零排放”为理念,以“技术创新、性能可靠、设备集成”为核心,以“优质优用,低质低用”的分质回用为突破,解决船舶生活污水处理运行不稳定、操作管理烦琐等主要症结,开展高效收集及预处理技术、污染物净化技术、基于优质回用途径的纳滤技术和船舶生活污水一体化处理系统集成等全流程、全链条综合解决方案研究,攻关复杂船舱环境与污染负荷波动双重适配的船舶黑灰混合水高效脱氮除磷技术,实现船舶生活污水“节能降碳减污协同增效”的处理目标,以推动“双碳”背景下我国船舶生活污水污染控制与资源再利用的理论建立和工程应用。

参考文献:

[1] Čovič M, Bacalja B, Krčum M, et al. From ballast water to harmful air emissions: how to reduce the impact of shipping on the pollution of the marine environment: a review[J]. WIT Transactions on The Built Environment, 2021, 204: 105-116

[2] Zhong Huiling, Gao Jiajue, Gu Yimiao. Promoting ship sewage recycling in China's inland waterways: a balanced funding approach for advanced disposal fees and subsidies [J]. Ocean & Coastal Management, 2025, 267: 107728.

[3] Xiang Rong, Wang Lijing, Li Hong, et al. Temporal and spatial variation in water quality in the Three Gorges Reservoir from 1998 to 2018 [J]. Science of the Total Environment, 2021, 768: 144866.

[4] 苏杰, 胡汉强. 400 总吨以下内河船舶生活污水排放控制[J]. 世界海运, 2020, 43 (10): 37-40. (Su Jie, Hu Hanqiang. Domestic sewage discharge control for inland vessels under 400 gross tonnage [J]. World Shipping, 2020, 43 (10): 37-40. (in Chinese))

[5] 郑金明. 船舶生活污水处理与港口国监督检查[J]. 大连海事大学学报, 2010, 36 (增刊 1): 96-98. (Zheng Jinming. Ship domestic sewage treatment and port state

control inspection [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2010, 36 (S1): 96-98. (in Chinese))

[6] 张青青, 郑祥, 程振敏, 等. 船舶污水处理技术研究与应用进展[J]. 舰船科学技术, 2020, 42 (3): 6-11. (Zhang Qingqing, Zheng Xiang, Cheng Zhenmin, et al. The state of arts for marine ship wastewater treatment [J]. Ship Science and Technology, 2020, 42 (3): 6-11. (in Chinese))

[7] Kalnina R, Demjanenko I, Gorbacenko D, et al. Nutrient analysis of food waste from ships' greywater in the Baltic Sea [J]. Water, 2021, 13 (17): 2421.

[8] 刘玲花, 张盼伟, 李昆, 等. 灰水处理及回用技术研究综述[J]. 水利水电技术, 2019, 50 (8): 146-153. (Liu Linghua, Zhang Panwei, Li Kun, et al. Review on grey water treatment and recycling technology [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50 (8): 146-153. (in Chinese))

[9] 徐文文, 殷承启, 张玮, 等. 江苏省内河船舶废水污染现状及影响研究[J]. 环境科技, 2020, 33 (1): 55-60. (Xu Wenwen, Yin Chengqi, Zhang Wei, et al. The situation and impact of wastewater pollution by inland vessels in Jiangsu Province [J]. Environmental Science and Technology, 2020, 33 (1): 55-60. (in Chinese))

[10] Butt N. The impact of cruise ship generated waste on home ports and ports of call: a study of Southampton [J]. Marine Policy, 2007, 31 (5): 591-598.

[11] Chen Qing, Wu Wanqing, Guo Yafei, et al. Environmental impact, treatment technology and monitoring system of ship domestic sewage: a review [J]. Science of the Total Environment, 2022, 811: 151410.

[12] Mujingni J T, Ytreberg E, Hassellöv I M, et al. Sampling strategy, quantification, characterization and hazard potential assessment of greywater from ships in the Baltic Sea [J]. Marine Pollution Bulletin, 2024, 208: 116993.

[13] Compton P, Dehkordi N R, Knapp M, et al. Heterogeneous Fenton-like catalysis of electrogenerated H₂O₂ for dissolved RDX removal [J]. Frontiers in Chemical Engineering, 2022, 4: 864816.

[14] Lebron Y A R, Moreira V R, Da Costa P R, et al. Chemical cleaning procedures on permeability recovery and lifespan of MBR membranes treating petroleum refinery wastewater: from bench- to pilot-scale applications [J]. Journal of Water Process Engineering, 2021, 44: 102411.

[15] Cai Yuhang, Li Xin, Zaidi A A, et al. Effect of hydraulic retention time on pollutants removal from real ship sewage treatment via a pilot-scale air-lift multilevel circulation membrane bioreactor [J]. Chemosphere, 2019, 236: 124338.

[16] Bian Xiaozheng, Zhang Mengyuan, Huang Jinping, et al. A comparison study on membrane fouling in A/O-MBR and A/A-MBR at different mixed liquor-suspended solids

- p>concentrations [J].
- Environmental Technology*
- , 2025, 46 (10):1625-1635.
- [17] Wei Chunhai, Sun Chenxi, Chen Zebin, et al. Membrane fouling analysis and chemical cleaning optimization via membrane autopsy for membrane bioreactor from lab to engineering application [J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 377:134414.
- [18] Zhang Xingxing, Bahtiar F, Wang Yao, et al. Achieving simultaneous biological nutrient removal and sludge minimization from marine ship sewage based on an innovative Landscape Integrated Ecological Treatment System (LIETS) [J]. *Ecological Engineering*, 2020, 156: 105989.
- [19] Salih S S, Shihab M A, Kadhom M, et al. Simultaneous removal of organic and inorganic pollutants onto chitosan-coated pumice adsorbent [J]. *Water Science and Engineering*, 2025, 18(4):486-495.
- [20] Cai Yuhang, Luo Yihao, Long Xiangxing, et al. Wastewater treatment for ships experiencing large temperature changes: the activated sludge/membrane-biofilm reactor [J]. *Chemosphere*, 2022, 307:135852.
- [21] Qu Shen, Hu Yuchen, Wei Renke, et al. Carbon footprint drivers in China's municipal wastewater treatment plants and mitigation opportunities through electricity and chemical efficiency[J]. *Engineering*, 2025, 50:106-116.
- [22] Bartha C, Jipa M, Ignat D M, et al. The energy efficiency of domestic wastewater treatment processes: case analysis [J]. *Electrotehnică, Electronică, Automatică*, 2020, 68 (4):30-36.
- [23] Nabizadeh Chianeh F. Treatment of real municipal wastewater using aluminum electrode by electrocoagulation process: experimental design and process performance [J]. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 2024, 43(1):169-180.
- [24] Liu Shuyue, Song Weilong, Meng Manli, et al. Engineering pressure retarded osmosis membrane bioreactor (PRO-MBR) for simultaneous water and energy recovery from municipal wastewater [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 826:154048.
- [25] Wang Siyu, Liu Hang, Gu Jun, et al. Towards carbon neutrality and water sustainability: an integrated anaerobic fixed-film MBR-reverse osmosis-chlorination process for municipal wastewater reclamation [J]. *Chemosphere*, 2022, 287:132060.
- [26] 郭锦怡. 船舶生活污水处理装置工艺及装置运营管理建议[J]. *中国设备工程*, 2020(5):226-227. (Guo Jinyi. Process and operation management of ship domestic sewage treatment devices [J]. *China Plant Engineering*, 2020(5):226-227. (in Chinese))
- [27] 刘强. 船舶生活污水 MBR 集成化处理装置工程设计 [J]. *工业用水与废水*, 2018, 49(6):80-83. (Liu Qiang. Engineering design of MBR integrated device for marine domestic sewage treatment [J]. *Industrial Water & Wastewater*, 2018, 49(6):80-83. (in Chinese))
- [28] 宗平. CSWA 系列生活污水处理装置[J]. *军民两用技术与产品*, 2005(7):24. (Zong Ping. CSWA series domestic sewage treatment device [J]. *Dual Use Technologies & Products*, 2005(7):24. (in Chinese))
- [29] 刘林, 王斌, 蒋铁俊. 船舶生活污水处理装置维修改造 [J]. *机电设备*, 2022, 39(3):83-85. (Liu Lin, Wang Bin, Jiang Yijun. Maintenance and renovation of ship domestic sewage treatment plant [J]. *Mechanical and Electrical Equipment*, 2022, 39(3):83-85. (in Chinese))
- [30] 赵彬, 李晓宇, 向元京. 内河船舶生活污水排岸接收问题及对策研究[J]. *中国海事*, 2024(1):12-14. (Zhao Bin, Li Xiaoyu, Xiang Yuanjing. Study on the problems and countermeasures of receiving domestic sewage from inland ships on shore [J]. *China Maritime Safety*, 2024 (1):12-14. (in Chinese))
- [31] Hu Bolin, Zhang Xiaoqiang, Wang Zhaofeng, et al. Hydraulic characteristics, residence time distribution, and flow field of electrochemical descaling reactor using CFD [J]. *Processes*, 2021, 9(11):1896.
- [32] Walker N L, Williams A P, Styles D. Pitfalls in international benchmarking of energy intensity across wastewater treatment utilities[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 300:113613.
- [33] Deng Hui, Yuan Tian, Gan Jin, et al. Experimental and numerical investigations on the collapse behaviour of box type hull girder subjected to cyclic ultimate bending moment[J]. *Thin-Walled Structures*, 2022, 175:109204.
- [34] Maljutenko I, Hassellöv I M, Eriksson M, et al. Modelling spatial dispersion of contaminants from shipping lanes in the Baltic Sea [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, 173: 112985.
- [35] Sun Huanqi, Xiong Weili, Li Zhongmei, et al. Soft sensors for industrial fault detection using multi-scale fusion temporal convolutional autoencoders [J]. *ISA Transactions*, 2026, 174:276-286.
- [36] Cai Yuhang, Sun Peiqi, Luo Yihao, et al. An integrated full-scale system for the treatment of real ship domestic wastewater: shore-test experiments [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2023, 53:103786.
- [37] 胡怡. 九江港长江沿线船舶污染物接收转运处置现状调查及建议[J]. *中国水运(下半月)*, 2018, 18(3):129-130. (Hu Yi. Investigation and suggestions on reception, transfer and disposal of ship pollutants along the Yangtze River in Jiujiang Port [J]. *China Water Transport (Second Half)*, 2018, 18(3):129-130. (in Chinese))

(收稿日期:2026-03-30 编辑:俞云利)

重复荷载下混凝土断裂损伤演化研究

郑丹¹, 陈永强¹, 秦张晨², 付光川³, 李鑫鑫¹

(1. 重庆交通大学河海学院; 2. 重庆大学土木工程学院; 3. 重庆市水利港航建设集团有限公司)

摘要:为量化表征重复荷载下混凝土内部的断裂损伤演化机理,通过三点弯曲梁试验系统研究了混凝土断裂过程区(FPZ)裂纹长度、位移梯度及残余应变的演化规律,并采用基于Tikhonov正则化的黏聚力反演方法获得了黏聚力分布及其软化曲线。结果表明:在等幅荷载下,裂纹长度呈现先快速上升、后近线性缓增的双阶段特征,FPZ位移梯度则经历陡降与缓降两阶段衰减过程,且低荷载水平衰减幅度显著高于高荷载水平;在包络重复荷载下,裂纹长度随重复次数的增加持续扩展随后趋于稳定,而FPZ位移梯度单调递减;裂纹扩展速率滞后于裂纹口张开位移的增长,导致断裂区宽度增大而长度减小;由于重复荷载作用引发的黏聚力衰退、材料损伤及塑性变形协同发展,FPZ残余应变在加载周期内持续累积且增速加快;基于FPZ张开位移线性分布假设,采用Tikhonov正则化反演黏聚力分布,得到的软化曲线近似呈幂函数形式,反演得到的位移场与试验数据吻合较好,验证了该反演方法的可靠性。

关键词:重复荷载;混凝土;断裂过程区;黏结软化模型;裂缝扩展

中图分类号:TU528.04

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2026)05-0020-07

Research on fracture damage evolution of concrete under cyclic loading//Zheng Dan¹, Chen Yongqiang¹, Qin Zhangchen², Fu Guangchuan³, Li Xinxin¹(1. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University; 2. School of Civil Engineering, Chongqing University; 3. Chongqing Water Conservancy Port and Shipping Construction Group Co., Ltd.)

Abstract: To quantitatively characterize the fracture damage evolution mechanism inside concrete under cyclic loading, this paper systematically investigates the evolution laws of crack length, displacement gradient, and residual strain in the fracture process zone (FPZ) of concrete through three-point bending beam tests. A Tikhonov regularization-based cohesive stress inversion method is employed to invert the cohesive stress distribution, and the cohesive stress softening curve is obtained. The results indicate that under constant-amplitude loading, the crack length exhibits a two-stage characteristic of a rapid increase followed by nearly linear slow growth. The FPZ displacement gradient undergoes a two-stage attenuation process consisting of a steep decline followed by a gradual decline, with the attenuation magnitude at low load levels significantly higher than that at high load levels. Under envelope loading, the crack length continues to increase with the number of loading cycles and then tends to stabilize, whereas the FPZ displacement gradient decreases monotonically. The crack propagation rate lags behind the increase in crack mouth opening displacement, resulting in an increase in the width of the fracture process zone and a decrease in its length. Owing to the synergistic development of cohesive stress degradation, material damage, and plastic deformation induced by cyclic loading, the residual strain in the FPZ accumulates continuously over loading cycles at an accelerating rate. Based on the assumption of a linear distribution of FPZ opening displacement, the Tikhonov regularization method was used to invert the cohesive stress distribution. The resulting softening curve approximately follows a power-law form, and the inverted displacement field agrees well with the experimental data, thereby verifying the reliability of the inversion method.

Key words: cyclic loading; concrete; fracture process zone; adhesive softening model; crack propagation

混凝土因抗压强度高、成本低、耐火性好、维护成本低等特性^[1-4],在诸多领域得到了广泛应用^[5-7],可满足防火、保温、自修复、低碳^[8-11]等多方

面要求。混凝土在车辆、风浪等重复荷载作用下的疲劳失效^[12-14],本质是断裂过程区(FPZ)内微损伤的不可逆累积与演化过程^[15]。这会导致FPZ行为

基金项目:国家自然科学基金项目(52479116);重庆市水利科技重点项目(CQSLK-2024008)

作者简介:郑丹(1979—),男,教授,博士,主要从事混凝土断裂力学研究。E-mail:zhengdan@cqjtu.edu.cn

通信作者:李鑫鑫(1985—),男,教授,博士,主要从事混凝土断裂力学研究。E-mail:xinxinli@cqjtu.edu.cn

的动态异化;静力荷载下稳定的能量耗散区,在重复荷载下却因微裂纹反复开闭、骨料咬合作用衰减而丧失损伤控制能力。因此,准确揭示重复荷载下FPZ的演化规律,是解决混凝土结构疲劳失效问题的关键。

为研究混凝土断裂行为,学者们提出了多种理论模型,如虚拟裂纹模型(FCM)^[16]、有效裂纹模型(ECM)^[17]、双参数断裂模型(TPFM)^[18]、尺寸效应模型(SEM)^[19]等。这些模型为理解静力荷载下混凝土断裂机理提供了框架:FCM在真实裂纹尖端引入FPZ,认为该区域内材料未完全分离,通过黏聚力传递应力;ECM将真实裂纹长度与FPZ等效为虚拟裂纹长度,使线弹性断裂力学(LEFM)仍适用;TPFM引入应力强度因子和 T 应力(平行于裂纹面的非奇异应力)共同控制断裂;SEM反映准脆性材料断裂从强度准则到LEFM的过渡。然而,这些模型应用于重复荷载场景时具有固有的局限性:①ECM无法反映荷载循环带来的裂纹扩展增量,且其等效裂纹长度依赖于单调荷载标定;②TPFM的起裂韧度呈动态变化特性,同时需重新定义失稳韧度;③SEM未能考虑荷载历史的影响,仅能描述静力峰值荷载下的尺寸效应^[16-19]。这些局限性表明,直接套用静力荷载理论模型难以准确刻画疲劳荷载下的断裂过程。

众多学者基于FCM框架对重复荷载下混凝土的断裂行为进行了深入探索,主要通过数值模拟^[20-21]、试验观测^[22-23]和本构建模^[24-25]等方法,揭示了疲劳裂纹扩展规律与FPZ的某些宏观特征。一个普遍采用的研究范式是“正向方法”,即预先假定一个软化本构模型(如线性^[26]、双线性^[27]、三线性^[28]或幂函数模型^[29]),再通过宏观试验数据对模型参数进行反推标定。然而,这种“从宏观试验现象反推细观力学行为”的策略存在一个根本性的“尺度失配”问题^[30]。FPZ的软化关系本质上是细观尺度(微裂纹、界面脱黏等)损伤机制的体现,而宏观试验数据是各种复杂机制的混合响应,难以唯一且准确地反演其物理本质,导致所得模型参数的

物理意义不明确,其预测精度和普适性因此受限。

综上所述,当前FPZ软化关系的获取主要依赖需要预设软化模型的正向方法,目前研究缺乏能够直接从试验数据中揭示FPZ细观损伤机制且物理意义明确的本构模型。为此,本文旨在突破正向方法的局限,通过三点弯曲梁试验,并结合数字图像相关(DIC)技术,量化重复荷载下裂纹长度、位移梯度及残余应变的演化规律。在此基础上,创新性地提出了基于Tikhonov正则化的黏聚力反演方法,通过直接分析黏聚力分布来反演获取FPZ的软化关系,并将反演所得软化关系与传统模型进行对比验证,以期重复荷载下混凝土断裂过程的精细化模拟提供新的理论依据和技术途径。

1 试验方案

1.1 试件制备

试验采用11组三点弯曲试样,加载装置见图1,厚度 B 取40 mm,高度 H 取80 mm,跨高比 S/H 取4,跨长 L 取420 mm,预制裂纹高度 a_0 取24 mm。位于试件中部的V形切口预制裂纹由2 mm厚的钢板形成,裂纹尖端的角度为 30° 。

混凝土的设计抗压强度为40 MPa,水泥、水、砂、粗骨料按质量配比为1:0.41:1.03:2.30。粗骨料为粒径5~10 mm的石子,水泥为42.5 R级普通硅酸盐水泥。

1.2 试验装置和流程

试验采用MTS E45万能压力机进行三点弯曲断裂试验(图2),并配合DIC系统与分辨率为 2048×2048 像素的CCD摄像机(拍摄速率2张/s)记录裂纹扩展,同时使用引伸计和卡尺测量裂纹口张开位移(CMOD)。

为系统研究混凝土在静力与复杂重复荷载下的断裂性能与损伤演化,采用单调、等幅重复和包络重复3种加载方式:单调荷载用于获取基准断裂参数;等幅重复荷载用于分析典型疲劳损伤规律;包络重复荷载则用于模拟实际超载工况对后续损伤路径的影响。三者共同构建从静态到复杂动态服役条件的

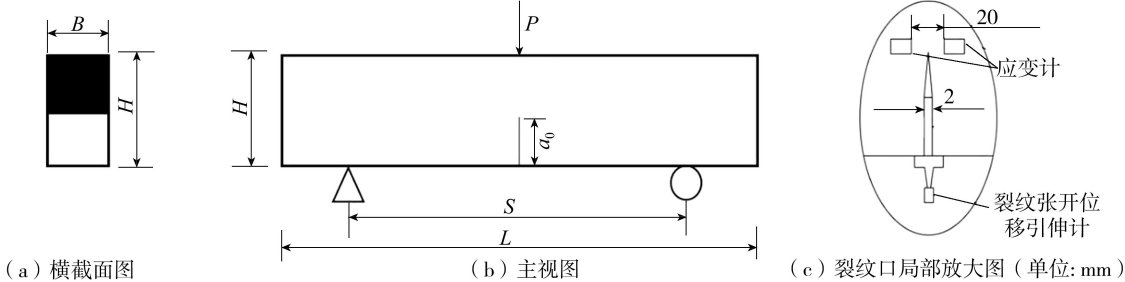


图1 三点弯曲试样加载装置示意图

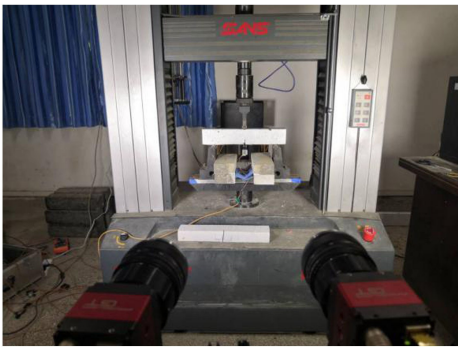


图2 三点弯曲断裂试验

完整研究体系。

试验工况设置详见表1,为兼顾混凝土材料离散性与测量可靠性,对单调及关键重复荷载工况设置2个或3个平行试件,对破坏性强的高荷载工况则设置1个试件,并辅以DIC全场测量技术,通过单试件高密度数据补偿数量上的不足,从而在揭示物理机制的同时确保观测趋势的一致性与可靠性。

2 试验结果与分析

2.1 裂纹长度演化规律

将CCD相机拍摄的三点弯曲梁试件表面散斑图像序列导入VIC-2D分析软件,计算得到重复荷载下三点弯曲梁的裂纹长度 a 。

由FPZ内的能量耗散所主导,混凝土在等幅重复荷载下的疲劳变形呈现与应力比无关的三阶段规律,依次对应微裂纹的萌生、稳定扩展和失稳扩展:第一阶段为初始缺陷活化引起的快速变形;第二阶段能量释放率与断裂韧度达到动态平衡,裂纹稳定扩展;第三阶段因有效承载面积减少和损伤连通,导致能量释放率超过材料阻力,发生失稳断裂。等幅重复荷载重复次数设为50次,旨在高效捕捉混凝土疲劳损伤演化的关键阶段,同时兼顾试验可控性与数据可靠性。该设计覆盖了材料刚度显著退化与裂缝稳态扩展的核心区间,为损伤演化分析提供了充足的数据密度。此外,50次重复避免了高周次试验导致的试件意外破坏风险,在保证数据完整性的前提下显著优化了试验成本与效率^[31]。

当荷载为峰值荷载的40%时,荷载等级较小,此时荷载略高于疲劳裂纹扩展门槛值,但不足以使

FPZ充分发展,结构整体处于弹性变形状态,仅裂纹尖端存在有限微裂区。每个循环做功部分转化为耗散能,用于克服摩擦和扩展FPZ,由于可用于裂纹扩展的能量有限,归一化裂纹长度 a_{nor} 随重复次数 n 呈准线性匀速增长。当荷载分别为峰值荷载的60%和80%时,荷载等级处于中上水平,进而使得50次等幅重复荷载处于第二阶段。此时荷载使得梁处于塑性变形阶段,而与之相对应的 $a_{nor}-n$ 曲线呈现两阶段特征:初始阶段的快速扩展源于过载效应,即首次循环高荷载在裂纹尖端形成较大残余塑性区,加速了微损伤汇集;随后的速率减缓与平台期则反映了该区产生的裂纹闭合等屏蔽机制,其发展需消耗更多能量以驱动裂纹扩展,从而表现为扩展阻力增加。荷载越高,该屏蔽效应越显著,因此需要更多循环周次突破,导致平台期出现在更高 a_{nor} 值处。图3为不同荷载水平下的 $a_{nor}-n$ 曲线。可以看出,荷载水平与对应的 a_{nor} 值呈正相关关系,这与上述力学机制的分析一致。

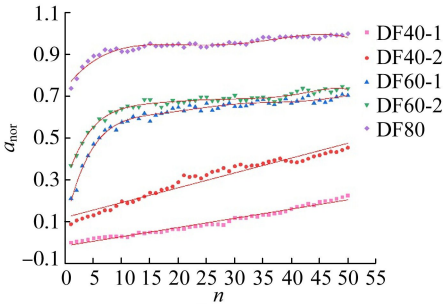


图3 等幅重复荷载下三点弯曲梁归一化裂纹长度的演化规律

包络重复荷载重复次数应大于5次^[32],本文设为6次或7次,进而精准捕捉过载效应的完整演化路径:首次过载引发裂缝尖端塑性区扩展与瞬时刚度退化;第2~4次重复记录迟滞效应主导的裂缝扩展停滞;第5~7次重复则观测累积损伤突破阈值后的加速扩展拐点。该设计有效分离了过载特有的“迟滞-加速”双阶段响应,避免了更高重复次数下包络疲劳损伤的干扰。由图4可知,在包络重复荷载作用下,裂纹扩展受“损伤累积-弛豫-再激活”过程控制,呈现动态平衡。首次过载形成的残余塑性区引致裂纹闭合,造成短期扩展停滞;随着后续损伤累

表1 试验工况设置

试件编号	荷载类型	试件数量	荷载控制	位移控制
DD-1、DD-2、DD-3	单调荷载	3		0.1 mm/min
DF40-1、DF40-2	等幅重复荷载	2	0.4 P_{max}	加载:0.06 mm/min;卸载:0.03 mm/min
DF60-1、DF60-2	等幅重复荷载	2	0.6 P_{max}	加载:0.06 mm/min;卸载:0.03 mm/min
DF80	等幅重复荷载	1	0.8 P_{max}	加载:0.06 mm/min;卸载:0.03 mm/min
BL-1、BL-2	包络重复荷载	2		加载:0.01 mm/min;卸载:0.03 mm/min

注: P_{max} 为单调荷载下3组试件的平均峰值荷载。

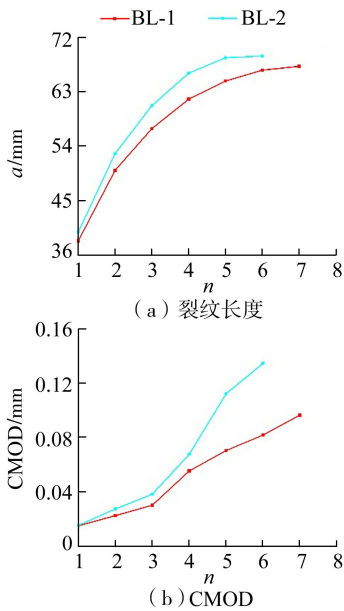


图4 包络重复荷载下三点弯曲梁裂纹长度与CMOD随 n 的演化规律

积突破闭合应力屏蔽,裂纹重新稳定扩展。整个过程表现为 a 随 n 持续增长,而扩展速率则在加卸载过程中逐渐减缓至稳定。CMOD随 n 的演化与 a 类似,关键差异在于其未表现出收敛趋势,这一现象的本质是材料内部能量耗散方式的转变。高应力循环下,裂纹面张开导致应力三轴度降低,使驱动能优先用于FPZ的横向膨胀而非纵向扩展,导致主裂纹扩展让位于周边损伤区的弥散化发展,进而实现应力重分布。

2.2 位移分布梯度演化规律

图5为等幅重复荷载下三点弯曲梁归一化位移分布梯度的演化规律。由图5可知,在等幅重复荷载作用下,三点弯曲梁的归一化位移分布梯度 k_{nor} 随重复次数 n 的增加呈逐渐减小的两阶段趋势:近似线性下降阶段和平稳下降阶段。除此之外,随着荷载的增大, k_{nor} 进入第二阶段所需次数显著减少:当荷载为峰值荷载的40%、60%、80%时,分别需要约40、15、5次。同时, k_{nor} 具有荷载依赖性,其随荷载水平的提升而减小。40%峰值荷载下的 k_{nor} 值及

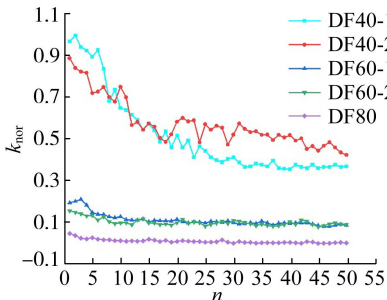


图5 等幅重复荷载下三点弯曲梁归一化位移分布梯度的演化规律

其下降幅度均显著高于60%和80%峰值荷载下的 k_{nor} 。

图6为包络重复荷载下三点弯曲梁位移分布梯度的演化规律。由图5和图6可知,位移分布梯度 k 与重复次数 n 成反比,这表明在加卸载过程中,尽管 a 与CMOD都呈增长态势,但前者增长速率小于后者,说明FPZ的宽度与长度成反比。

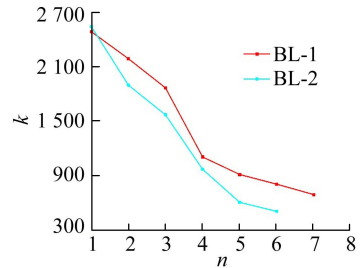


图6 包络重复荷载下三点弯曲梁位移分布梯度的演化规律

2.3 残余应变演化规律

图7与图8的残余应变结果与卫军等^[33]提出的三阶段模型总体一致,均呈初始快速增长、随后稳定线性增长和最终加速破坏的特征。荷载水平越高,材料越早由初始快速增长阶段过渡到稳定线性增长阶段,如80%峰值荷载下,该阶段转变在10次循环内完成。差异在于,如图7所示,高荷载下曲线更平滑、残余应变幅值更大,这是因为低荷载时FPZ尺寸小,残余应变量级低,VIC-2D软件计算会受周围线弹性区干扰,导致数据波动;而中高荷载下FPZ充分发展,信号更强,结果更稳定。这表明三阶段规律具有普适性,但阶段转变点和曲线形态受荷载水平、加载历史与局部行为共同影响。

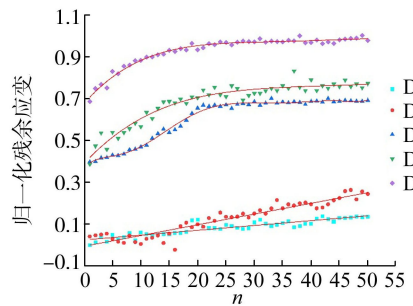


图7 等幅重复荷载下三点弯曲梁残余应变的演化规律

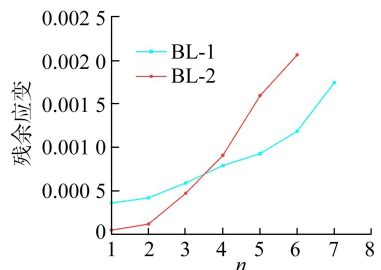


图8 包络重复荷载下三点弯曲梁残余应变的演化规律

如图 8 所示,包络重复荷载下 n 与残余应变成正比,随着 n 的增加,残余应变的增速经历了一个由慢至快的过程。残余应变可表征该材料的塑性变形与损伤程度。FPZ 内黏聚力驱动裂纹尖端产生闭合的趋势,从而抵抗裂纹的扩展,但随着 n 的增加,FPZ 长度收缩并伴随黏聚力衰减,致使材料抵抗开裂的能力弱化,损伤与塑性变形协同加剧。

3 软化关系反问题求解

3.1 计算原理

由于材料随机性、损伤复杂性及技术限制,混凝土软化关系难以准确获取。目前广泛应用的正向方法需预先假设软化曲线形式(如线性、双线性),并通过试算拟合宏观试验数据(如 P -CMOD 曲线)。但该方法存在两大局限:①曲线形式的预设基于数值拟合需求,缺乏物理依据;②通过宏观数据反推细观行为存在“尺度失配”问题,导致参数物理意义模糊,难以真实表征 FPZ 内的细观损伤过程。

为克服既有局限,本文提出基于 Tikhonov 正则化的反问题求解策略。该方法具备三重优势:①将软化关系离散为待求黏聚力值并直接反演,避免预设数学形式,从而揭示材料本征响应;②利用 DIC 全场位移数据作为输入,建立从细观损伤到宏观黏聚力分布的逆映射,解决尺度失配问题^[34];③引入 Tikhonov 正则化抑制噪声干扰,确保反演结果具有物理合理性。

FPZ 黏聚力分布情况大致可分为 4 个阶段:①初始阶段,FPZ 尚未形成,裂纹尖端的黏聚力等于未损伤混凝土的抗拉强度;②形成阶段,在施加外荷载后,预制裂纹尖端开始发展 FPZ,其长度和黏聚力分布随荷载增加而不断变化;③线性上升阶段,随着荷载增大,CMOD 相应提升,当位移超过最大允许值时,裂纹发生宏观扩展,此过程持续至荷载达到峰值;④下降破坏阶段,荷载达到峰值后,随 CMOD 继续增加,荷载逐渐减小,宏观裂缝持续发展直至试件完全破坏。

按照 FCM 的假设,为使裂缝应力奇异性消失,应满足 3 个条件:①黏聚力可表征为裂纹张开位移的函数;②裂纹张开位移可表征为外部荷载、黏聚力和裂纹几何形态的函数;③应力奇异性应在裂纹尖端消失。

FPZ 上任意点的张开位移可由外部荷载和黏聚力共同引起的裂纹张开位移叠加得到。按照 Paris 公式^[35],裂纹张开位移可进一步由外部荷载和黏聚力提供的应力强度因子表示,由外部荷载和黏聚力引起的张开位移可分别计算,并基于叠加原理得到

总张开位移。

根据 FPZ 裂纹张开位移线性分布的假设,若外部荷载及其对应的全场位移 $\delta(x)$ 已知,则可分离出黏聚力产生的位移贡献,从而求解 FPZ 黏聚力分布。该求解过程构成一个反问题。

为解决反问题,需要用到 Tikhonov 正则化方法。已知矩阵 A 和向量 b ,求解向量 σ ,使其满足下式:

$$A\sigma = b \tag{1}$$

式中: A 为影响系数矩阵,通过权函数法计算得到; b 为黏聚力等效位移向量,由实际总裂纹张开位移减去外部荷载 P 对应的裂纹张开位移得到。当向量 σ 的解不唯一时,就可以利用 Tikhonov 正则化方法来解决该问题。为求解向量 σ ,利用普通最小二乘法寻求最小化残差平方和,即使 $\|A\sigma - b\|^2$ 的值最小,为筛选特定解,将其进行转换,使其包含正则化项 $\|A\sigma - b\|^2 + \|\Gamma\sigma\|^2$ 。

显式解 σ 为:

$$\sigma = (A^T A + \Gamma^T \Gamma)^{-1} A^T b \tag{2}$$

正则化程度由正则化矩阵 Γ 的尺度控制,考虑 $\Gamma = \alpha I$ 的特例,当正则化参数 $\alpha = 0$ 且 $A^T A$ 可逆时,对应的 Tikhonov 正则化解收敛至标准最小二乘解。

3.2 计算流程

计算流程如下:①依据单调荷载三点弯曲试验数据(峰值荷载 P_{max} 、对应 CMOD 与裂纹长度 a),结合 FPZ 张开位移线性分布假设,计算位移梯度 k ;②采用 Paris 公式和权函数法计算外荷载应力强度因子及裂纹张开位移,将断裂过程区的总张开位移扣除上述外荷载引起的张开位移分量,即可插值得到黏聚力所贡献的张开位移分量;③引入 Tikhonov 正则化方法,联合 Paris 公式与黏聚力位移分量构建反问题控制方程,通过奇异值分解(CSVD)求解;④基于所得黏聚力分布及位移线性假设,反演 FPZ 软化曲线与张开位移分布。

3.3 计算结果

FPZ 张开位移计算结果如图 9 所示。单调荷载下裂纹张开位移的分布与反演得到的黏聚力趋势总体一致,验证了该方法捕捉静力荷载断裂行为的有效性。但试验值均略高于反演值,出现系统性偏差,这源于反演所依据的 LEFM 理论在描述混凝土大范围 FPZ 时存在局限,导致 α 估值偏低,影响了反演精度。此外,DD-3 试件表现出的显著差异主要源于混凝土材料固有的离散性,属正常波动。

软化曲线如图 10 所示,混凝土 FPZ 内黏聚力随张开位移增大而衰减,当黏聚力为 0 时对应的张开位移为宏观裂纹尖端位置。

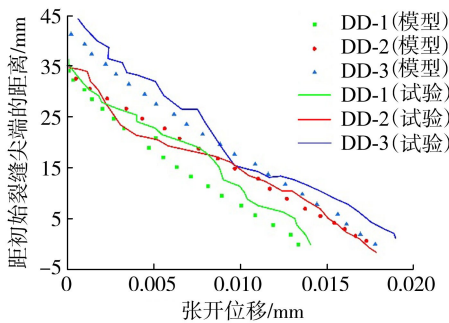


图9 单调荷载下FPZ 张开位移分布对比

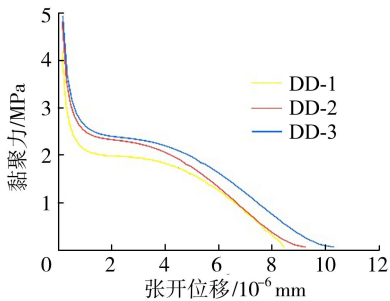


图10 黏聚力反问题计算所得FPZ 软化曲线

3.4 方法对比

为评估反演方法与传统方法在FPZ黏聚力分布计算中的性能差异,选取幂函数模型与双线性模型两种典型软化曲线进行对比。为进一步量化曲线吻合程度,引入均方根误差(RMSE)与决定系数(R^2)作为评价指标。图11对比了本文方法、幂函数模型及双线性模型所得的软化曲线。本文方法所得曲线光滑连续,初始尾部呈现渐近拖尾特征,符合断裂能完全耗散的物理过程。尤为关键的是,在软化起始阶段,反演曲线展现出更大的初始下降梯度,这真实揭示了峰值应力后FPZ内损伤快速演化的物理本质,突破了传统模型因预设数学形式而无法准确再现材料真实损伤速率的局限。幂函数模型在非线性软化阶段与之吻合良好,但初始斜率与尾部衰减存在系统性偏差。双线性模型则因人为预设拐点而导致形态僵化,在拐点处出现应力突变,与材料连续损伤的本质相悖。因此,本文方法在刻画从损伤起始到最终破坏的全过程中均展现出更强的物理合理性。

在非线性软化阶段(张开位移超过 4×10^{-6} mm),幂函数模型与反演结果基准的 R^2 为0.936, RMSE为0.164 MPa,二者高度吻合,前者恰为正向求解中广泛采用的FPZ软化关系假设形式,由此证实了反问题求解模型的可靠性。

图11的定性对比与上述定量分析共同表明:基于经验假设的传统模型在描述材料复杂的非线性软化行为时存在固有局限性。本文的无预设反演方法所获得的软化曲线不仅能够揭示如初始下降梯度更大这类传统方法无法捕捉的物理细节,而且因其严

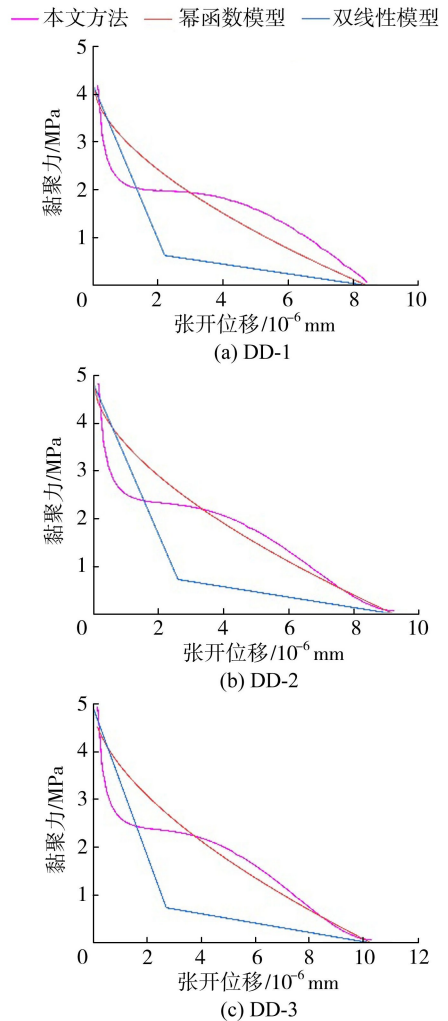


图11 不同模型所得FPZ黏聚力-张开位移软化曲线对比
格依赖于材料的物理响应,故而能更真实、连续地反映FPZ内黏聚力的分布与演化规律,其物理机制更为明确,从而为建立与细观机制直接关联的损伤模型提供了新途径。

4 结论

a. 等幅重复荷载下,裂纹长度与CMOD变化模式相似,两者均在快速上升后进入近线性缓增阶段;FPZ位移梯度则呈先陡降再缓降的两阶段衰减特征,且低荷载水平下的衰减程度高于高荷载水平。

b. 对于包络重复荷载,裂纹长度随重复次数的增加而持续增长,最终趋于稳定。伴随此过程,位移梯度单调递减,揭示出裂纹扩展滞后于CMOD增长,致使断裂区宽度增加而长度减小。

c. 重复荷载下FPZ残余应变在加载周期内持续增长且加速累积。此现象归因于重复作用导致的FPZ黏聚力衰退、材料损伤和塑性变形的持续发展。

d. 基于FPZ张开位移线性分布假设,采用基于Tikhonov正则化的黏聚力反演方法反演FPZ黏聚力分布,得到的软化关系呈近似幂函数的特征,与常见

假设形式相符。其预测的位移场与试验结果一致,验证了该反演方法的可靠性与准确性。

参考文献:

[1] Wang Zhen, Li Huajian, Huang Fali, et al. Mechanical properties of railway high-strength manufactured sand concrete: typical lithology, stone powder content and strength grade [J]. Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition, 2025, 40 (1): 194-203.

[2] 詹韵泓,钱文勋,石勇刚,等. 拉应力作用下水工混凝土抗盐冻性能试验研究 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2026, 54 (3): 125-133. (Zhan Yunhong, Qian Wenxun, Shi Yonggang, et al. Experimental study on salt-freeze resistance of hydraulic concrete under tensile stress [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2026, 54 (3): 125-133. (in Chinese))

[3] Vedrtnam A, Palou M T, Varela H, et al. Experimental and numerical study on post-fire self-healing concrete for enhanced durability [J]. Scientific Reports, 2025, 15 (1): 9731.

[4] Lee T, Kim D, Cho S, et al. Advancements in surface coatings and inspection technologies for extending the service life of concrete structures in marine environments; a critical review [J]. Buildings, 2025, 15 (3): 304.

[5] 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))

[6] 刘国豪,甘磊,刘玉,等. 不同砂率及骨料粒径对塑性混凝土断裂韧度的影响 [J]. 水利水电科技进展, 2024, 44 (3): 39-44. (Liu Guohao, Gan Lei, Liu Yu, et al. Effects of different sand rates and aggregate sizes on fracture toughness of plastic concrete [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44 (3): 39-44. (in Chinese))

[7] Wang Wei, Le Ping, Liu Shifan, et al. Experimental study on mechanical properties and brittleness of sandstone-concrete combined body under triaxial seepage-stress coupling [J]. Construction and Building Materials, 2025, 465: 140016.

[8] Khan S, Al-Deen S, Lee C K. Mechanical and durability behaviours of low carbon concrete: a systematic review [J]. Journal of Building Engineering, 2025, 100: 111633.

[9] Chen Zixuan, Xiao Jianzhuang. Fire-insulation properties of recycled aggregate concrete, its application in composite concrete structures, and concrete-concrete interface effects: a review [J]. Journal of Building Engineering,

2025, 107: 112681.

[10] Guven H, Inel M. The effect of travertine waste on the strength and insulation properties of foam concrete [J]. Materials Research Express, 2025, 12 (1): 015509.

[11] He Shan, Sayadi S, Patel R A, et al. Perspectives on the incorporation of self-healing in the design practice of reinforced concrete structures [J]. Structural Concrete, 2025, 26 (6): 7284-7311.

[12] Gomaa E, Ghenni A, Elgawady M A. Repair of ordinary Portland cement concrete using ambient-cured alkali-activated concrete: interfacial behavior [J]. Cement and Concrete Research, 2020, 129: 105968.

[13] Tayeh B A, Bakar B H A, Johari M A M, et al. Utilization of ultra-high performance fibre concrete (UHPFC) for rehabilitation: a review [J]. Procedia Engineering, 2013, 54: 525-538.

[14] Wang Yanshuai, Peng Kaidi, Alrefaei Y, et al. The bond between geopolymer repair mortars and OPC concrete substrate: strength and microscopic interactions [J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 119: 103991.

[15] 苗佩. 低周循环轴压荷载下结构型纤维混凝土损伤演化试验研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2024.

[16] Bažant Z P, Oh B H. Crack band theory for fracture of concrete [J]. Matériaux et Construction, 1983, 16 (3): 155-177.

[17] Karihaloo B L, Nallathambi P. An improved effective crack model for the determination of fracture toughness of concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1989, 19 (4): 603-610.

[18] Jenq Y, Shah S P. Two parameter fracture model for concrete [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1985, 111 (10): 1227-1241.

[19] Nallathambi P, Karihaloo B L. Determination of specimen-size independent fracture toughness of plain concrete [J]. Magazine of Concrete Research, 1986, 38 (135): 67-76.

[20] Sain T, Kishen J M C. Energy-based equivalence between damage and fracture in concrete under fatigue [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2007, 74 (15): 2320-2333.

[21] Slowik V, Plizzari G A, Saouma V E. Fracture of concrete under variable amplitude fatigue loading [J]. Materials Journal, 1996, 93 (3): 272-283.

[22] Maitra S R, Reddy K S, Ramachandra L S. Stress intensity factor based damage prediction model for plain concrete under cyclic loading [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018, 30 (7): 04018118.

[23] Bhowmik S, Ray S. An experimental approach for characterization of fracture process zone in concrete [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2019, 211: 401-419.

(下转第 101 页)

HECC 早期流变特性及其调控研究

李家正^{1,2}, 唐韦杰^{1,2}, 张秀贞², 石妍²

(1. 三峡大学土木与建筑学院; 2. 长江科学院材料与结构研究所)

摘要:通过流变性能试验、工作性能试验、凝结时间试验以及水化热试验,研究了水工水泥基复合材料(HECC)的早期流变特性,并分析了聚羧酸高性能减水剂(PCA-1)、非保坍型聚羧酸高性能减水剂(PCA-2)和早强型聚羧酸高性能减水剂(PCA-3)对 HECC 流变特性的调控效果。结果表明:HECC 拌合物的流变特性符合宾厄姆模型,其屈服应力和黏度均随时间延长而增大;在相同掺量下,3 种减水剂减水效果相近,但坍落度经时变化存在差异,同一测试时间内掺加 PCA-3 的拌合物屈服应力和黏度略大;贯入阻力仪法测得的初凝和终凝时间分别比维卡仪法延长 3~4 h 和 5~6 h,结合现场施工情况,证实贯入阻力仪法的结果更为准确;掺加 PCA-2 和 PCA-3 的拌合物的放热峰分别提前了 1.93 h 和 1.77 h,累计放热量在掺加 PCA-2 后减少了 1.366 J/g,掺加 PCA-3 后增加了 0.998 J/g;早强型减水剂通过促进水化反应调控 HECC 的流变特性,而非保坍型减水剂通过影响颗粒间的吸附作用发挥调控作用。

关键词:水工水泥基复合材料(HECC);流变特性;聚羧酸减水剂;水化热;凝结时间
中图分类号:TV432⁺.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2026)05-0027-07

Study on early-age rheological properties of HECC and their control//Li Jiazheng^{1,2}, Tang Weijie^{1,2}, Zhang Xiuzhen², Shi Yan² (1. College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University; 2. Department of Material and Structure, Changjiang River Scientific Research Institute)

Abstract: The early-age rheological properties of hydraulic engineered cementitious composites (HECC) were investigated through rheological tests, workability tests, setting time tests, and hydration heat tests. The effects of three superplasticizers, a high-performance polycarboxylate superplasticizer (PCA-1), a non-slump-retaining high-performance polycarboxylate superplasticizer (PCA-2), and an early-strength high-performance polycarboxylate superplasticizer (PCA-3), on the rheological characteristics of HECC were evaluated. The results showed that the rheological behavior of fresh HECC followed the Bingham model, with both yield stress and viscosity increasing over time. At the same dosage, the three superplasticizers exhibited similar water-reducing effects but differed in slump retention. At a given testing time, mixtures containing PCA-3 exhibited slightly higher yield stress and viscosity. The initial and final setting times determined by the penetration resistance method were 3~4 h and 5~6 h longer, respectively, than those determined by the Vicat method. Field construction observations confirmed that the penetration resistance method provided more accurate results. The heat release peaks of mixtures containing PCA-2 and PCA-3 occurred 1.93 h and 1.77 h earlier, respectively. Cumulative heat release decreased by 1.366 J/g with PCA-2 and increased by 0.998 J/g with PCA-3. The early-strength superplasticizer regulated the rheological characteristics of HECC by promoting hydration, whereas the non-slump-retaining superplasticizer exerted its effect by affecting interparticle adsorption.

Key words: hydraulic engineered cementitious composites (HECC); rheological characteristics; polycarboxylate superplasticizer; hydration heat; setting time

高延性纤维增强水泥基复合材料(ECC)最初由美国密歇根大学 Li 等^[1]于 20 世纪 90 年代设计提出。该材料具有优异的延展性,在拉伸和剪切荷载作用下呈现应变硬化和多缝开裂特征^[2],并具有良

好的抗裂能力和变形适应性。目前 ECC 在工民建领域应用广泛,涵盖曲面墙体、边坡加固、道路施工、桥面修复、挡土墙修复、灌溉渠道修补等工程^[3-5]。水工建筑物因其特殊的运行环境、结构特点以及复

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(CKSF2024I023/CL);国家自然科学基金项目(52400149,U2340229)

作者简介:李家正(1970—),男,正高级工程师,博士,主要从事水工材料与结构工程研究。E-mail:1659959395@qq.com

通信作者:唐韦杰(2000—),男,硕士研究生,主要从事水工材料研究。E-mail:18716184843@163.com

杂的荷载条件,对材料的抗裂性能及变形适应性要求极高。针对这一需求,长江水利委员会长江科学院结合 ECC 材料特性和水工工程实际,研发了适用于水利领域的水工水泥基复合材料(HECC),其在水工堆石坝防渗面板、堆石坝新型心墙结构以及碾压混凝土防渗层等水工建筑物防渗部位具有广泛的使用场景^[6]。与传统 ECC 相比,HECC 采用工程地缘性材料,将人工砂最大粒径增至 1.25 mm,并结合不同使用场景,对坍落度等工作性能进行按需设计。

近年来,混凝土面板堆石坝在水利水电工程挡水建筑物建设领域得到了广泛应用^[7]。在该类坝体中,混凝土面板承担着坝体主要的防渗功能,它需要承受较大水头差所带来的压力,其性能对保障坝体渗流的安全与稳定起着决定性作用。采用 HECC 面板代替传统的混凝土面板,可显著改善面板应力分布,提高其变形适应能力,从而有效抑制裂缝的产生。

与普通面板混凝土相比,HECC 剔除了粗骨料,属于水泥砂浆,其力学性能参数均满足设计指标要求,且具有优异的延性和耐久性。然而从堆石坝面板施工角度考虑,尽管 HECC 原材料粒径较 ECC 有所提升,但因缺乏粗骨料的骨架支撑,施工时 HECC 在坡面上的稳定性面临挑战。具体而言,HECC 中纤维的分散对工作性能有较高要求;坍落度过低会影响材料整体均质性,而坍落度过高会导致 HECC 的坡面稳定性较差,难以适应面板滑模施工工艺。因此,为兼顾 HECC 的施工性能和均质性,需研究其早期流变特性的发展规律并进行合理调控。

围绕上述施工需求,已有研究从材料组成和静置时间等方面探讨了水泥基材料的流变性能及工作性能。Yang 等^[8]研究了 C 类粉煤灰与 F 类粉煤灰的比例、水胶比、高效减水剂用量以及黏度调节剂用量 4 个因素对 ECC 新拌状态和硬化后性能的影响,结果表明,水胶比对 ECC 砂浆(不含纤维)塑性黏度的影响最显著,而塑性黏度又对 ECC 的极限抗拉强度和抗拉应变能力具有显著影响。Ley-Hernández 等^[9]发现,随着静置时间的延长,新拌浆体的屈服应力和塑性黏度均迅速上升。胡伟等^[10]研究表明,当水胶比由 0.25 增至 0.35、粉煤灰掺量由 40%增至 60%时,HECC 的流变性能提高;而当纤维掺量由 1%增至 2%、硅灰掺量由 0%增至 6%时,HECC 的流变性能降低。杨志全等^[11]针对不同水灰比的牛顿型水泥浆液,研究了其流变性能随时间的演变规律,结果表明,在(25±2)℃的常温条件下,水化时间和水灰比均对浆液动力黏度具有明显作用。

上述研究主要针对材料组成对 HECC 新拌浆体

流变性能的影响,而对 HECC 早期流变特性的时变性规律关注较少,难以为滑模提升速度、抹面时间等施工工艺参数提供准确的技术支撑。鉴于此,本文通过控制单方用水量和减水剂用量制备低坍落度 HECC,系统研究其早期流变特性,并对比不同类型减水剂对 HECC 早期流变时变特性的影响,以期为 HECC 在面板堆石坝中的应用提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 原材料

试验选用华润水泥控股有限公司生产的润丰低热硅酸盐水泥,密度为 3.2 g/cm³,比表面积为 285 m²/kg,标准稠度用水量为 26.0%,使用云南曲靖的 I 级粉煤灰代替部分水泥,密度为 2.36 g/cm³,比表面积为 308 m²/kg。水泥和粉煤灰的化学成分如表 1 所示。

表 1 水泥和粉煤灰主要化学组分的质量分数

材料	化学组分的质量分数/%						
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	R ₂ O
润丰低热水泥	61.00	22.23	4.30	4.71	4.50	2.63	0.37
I 级粉煤灰	2.50	62.73	21.15	10.10	2.09	0.13	0.99

注:R₂O 为钠当量碱含量,R₂O=Na₂O+0.658K₂O。

所用人工砂的最大粒径为 1.25 mm,细度模数为 1.62,表观密度为 2.79 g/cm³,饱和面干吸水率为 1.4%。为改善 HECC 的工作性能,减水剂采用江苏苏博特新材料股份有限公司生产的聚羧酸高性能减水剂(PCA-1)、非保坍型聚羧酸高性能减水剂(PCA-2)和早强型聚羧酸高性能减水剂(PCA-3);纤维选用深圳市维特耐新材料有限公司生产的 PE 纤维,直径为 24 μm,长度为 18 mm,断裂强度为 2900 MPa,弹性模量为 116 GPa,断裂伸长率为 2.6%,密度为 0.97 g/cm³。

1.2 配合比

试验通过控制单方用水量和减水剂掺量来制备低坍落度 HECC。在相同试验条件下,3 组 HECC 的用水量、水泥用量、粉煤灰用量和人工砂用量分别为 242、342、444、1 094 kg/m³,纤维掺量均为 1.0%,减水剂掺量均为 0.25%,仅改变减水剂品种,分别为 PCA-1、PCA-2 和 PCA-3。通过流变性能试验、坍落度损失试验、跳桌流动度试验、凝结时间试验及水化热试验,测试不同减水剂对 HECC 流变特性时变性的影响。

1.3 试验方法

1.3.1 流变性能试验

使用 RS 流变仪进行流变性能试验。该流变仪的最大扭矩为 100 mN·m,配备 VT30-15 型桨式转子。测试流程分为预剪切与数据采集两个阶段,具

体如图 1 所示。在预剪切阶段,对剪切速率进行控制,使其在 30 s 内由 0 s^{-1} 逐步提升至 100 s^{-1} ,并在接下来的 30 s 内又从 100 s^{-1} 降至 0 s^{-1} 。进行预剪切操作的目的是使各组砂浆在正式测试之前达到一致的初始剪切状态。进入数据采集阶段后,剪切速率在 75 s 内从 0 s^{-1} 匀速上升至 150 s^{-1} ,接着在随后的 75 s 内从 150 s^{-1} 匀速下降至 0 s^{-1} 。整个过程共采集 150 个数据点,据此绘制剪切应力随剪切速率变化的上行与下行曲线。

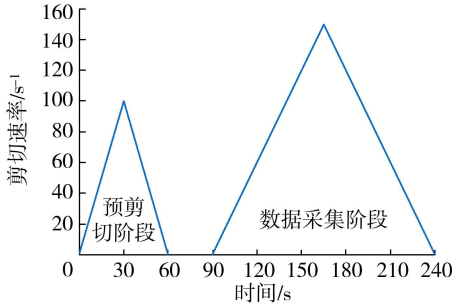


图 1 流变性测试程序

1.3.2 坍落度损失试验

根据 GB/T 50080—2016《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》测定 HECC 的坍落度及坍落度损失。将拌合物放置在湿润无明水的底板,表面加覆盖物防止水分散失,每隔 30 min 测定一次坍落度,总测试时长为 3 h。

1.3.3 跳桌流动度试验

砂浆的流动度按照 GB/T 2419—2005《水泥胶砂流动度测定方法》中规定的方法进行测量。搅拌后装入水泥胶砂流动度测定仪的圆台形容器中,测其流动度。

1.3.4 凝结时间试验

分别使用净浆(维卡仪法)和砂浆(贯入阻力法)的凝结时间测试方法:

a. 维卡仪法。根据 GB/T 1346—2024《水泥标准稠度用水量、凝结时间与安定性检验方法》,通过维卡仪测定湿气养护条件下初凝(试针距底板 $4\pm 1\text{ mm}$)和终凝(试针不沉且留痕)所需的时间。

b. 贯入阻力法。按照 SL/T 352—2020《水工混凝土试验规程》,在不同贯入阻力示值下更换不同的测试针,记录贯入阻力值为 3.5 MPa 的时间作为初凝时间,贯入阻力值为 28 MPa 的时间作为终凝时间。

1.3.5 水化热试验

使用 TAM-Air 八通道微量热仪研究 3 种减水剂对 HECC 水化反应动力学的影响,试验温度为 20°C 。按照试验配合比制备 HECC 浆体(未加纤维),在测试温度条件下快速搅拌制备好浆体后,装入样品瓶中,称重并放入量热仪监测通道进行水化

热测试。

2 结果与分析

2.1 流变性能

2.1.1 流变模型分析

图 2 为掺加 PCA-1 制备的 HECC 浆体的流变曲线,其上行段呈明显的剪切变稀特性,即随着剪切速率的增大,剪切应力增加的幅度逐渐变小;而下行段近似呈直线,具备宾厄姆流体的典型特征。

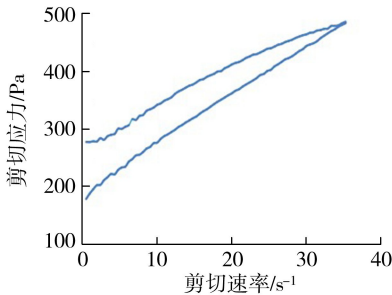


图 2 掺加 PCA-1 的 HECC 浆体的流变曲线

屈服应力反映了浆体由原本的静止状态转变为流动状态所必须克服的最小剪切应力值,而塑性黏度体现的是浆体内部结构对流动过程所产生的阻碍特性。值得注意的是,下行曲线处于上行段下方,二者共同构成了一个滞回环。这一现象表明,在测试过程中,材料内部的微结构遭到了破坏,使得在相同的剪切速率条件下,剪切应力出现了下降的情况。考虑在剪切速率下降阶段所测得的数据具有更高的可靠性和良好的重复性^[12-14],故本文选取剪切速率下降阶段所测得的数据来开展后续的流变性分析。

图 3 为不同类型减水剂的 HECC 浆体在拌和后 0、30、60、90、150、180 min 等时间节点的流变曲线,绘图时,从采集的 150 个数据点中每隔选取 15 个数据点进行展示。由图 3 可知,掺加不同的外加剂制备的 HECC 拌合物均呈现宾厄姆流体的行为特征,且在拌和后一定时间内持续保持该特征。

表 2 为掺加不同减水剂的 HECC 在不同时刻的流变性回归方程以及对应的流变参数,其中 τ 为剪切应力, γ 为剪切速率。由表 2 可知,依据宾厄姆流体对流变曲线进行拟合所得结果具有较高的相关性,相关系数均超过 0.96。由此可以推断,减水剂种类的差异并未对浆体的流变性类型产生显著影响,宾厄姆流体能够较为合理地用于 HECC 流变特性规律的研究。因此,本文借助该模型回归得出的各组流变方程来确定浆体的屈服应力与塑性黏度。

2.1.2 屈服应力

图 4 为不同减水剂对 HECC 屈服应力的影响,其中,掺加 PCA-2 和 PCA-3 的 HECC 在 210 min 时

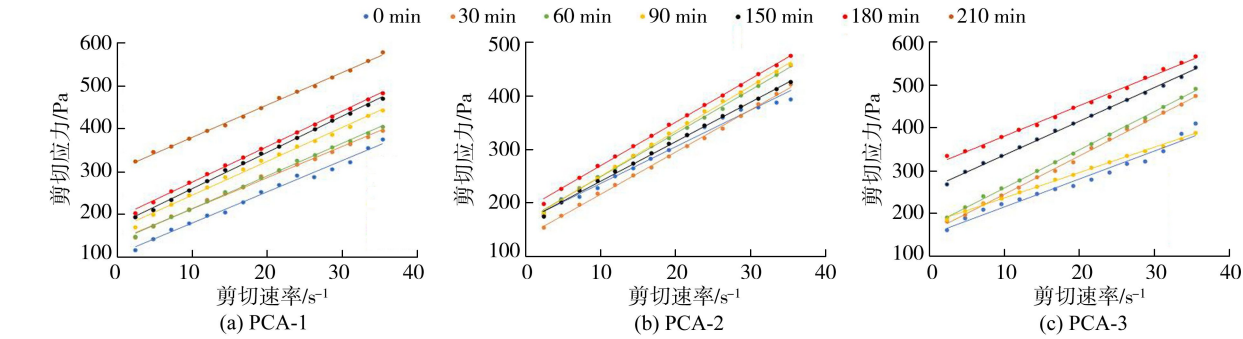


图3 掺加不同减水剂的 HECC 经时流变曲线

表2 掺加不同减水剂的 HECC 在不同时间的流变参数

减水剂	时间/min	屈服应力/Pa	塑性黏度/(Pa·s)	回归方程	相关系数
PCA-1	0	105.31	7.36	$\tau = 7.36\gamma + 105.31$	0.990
	30	138.92	7.36	$\tau = 7.36\gamma + 138.92$	0.996
	60	136.05	7.70	$\tau = 7.70\gamma + 136.05$	0.998
	90	164.88	7.98	$\tau = 7.98\gamma + 164.88$	0.994
	150	174.93	9.00	$\tau = 9.00\gamma + 174.93$	0.999
	180	191.35	8.38	$\tau = 8.38\gamma + 191.35$	0.999
	210	305.27	7.64	$\tau = 7.64\gamma + 305.27$	0.998
PCA-2	0	168.32	6.87	$\tau = 6.87\gamma + 168.32$	0.987
	30	137.49	7.92	$\tau = 7.92\gamma + 137.49$	0.998
	60	167.43	8.14	$\tau = 8.14\gamma + 167.43$	0.999
	90	164.92	8.49	$\tau = 8.49\gamma + 164.92$	0.999
	150	166.94	7.44	$\tau = 7.44\gamma + 166.94$	0.998
	180	187.50	8.19	$\tau = 8.19\gamma + 187.50$	0.999
PCA-3	0	150.48	6.61	$\tau = 6.61\gamma + 150.48$	0.968
	30	156.09	9.06	$\tau = 9.06\gamma + 156.09$	0.998
	60	177.62	5.96	$\tau = 5.96\gamma + 177.62$	0.998
	90	171.51	8.98	$\tau = 8.98\gamma + 171.51$	0.999
	150	258.84	7.94	$\tau = 7.94\gamma + 258.84$	0.999
	180	310.55	7.20	$\tau = 7.20\gamma + 310.55$	0.996

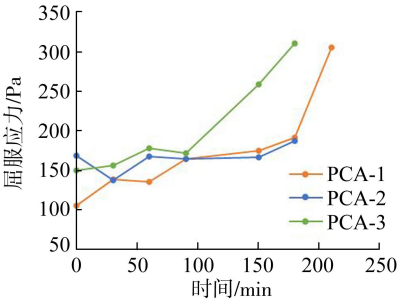


图4 不同减水剂对 HECC 屈服应力的影响

浆体屈服应力超出仪器的最大扭矩,因而未测得数据。聚羧酸减水剂加入后会吸附在水泥颗粒和水化产物表面,通过静电斥力和空间位阻作用破坏水泥颗粒的结团,使被包裹在结团内的自由水被释放出来,从而降低屈服应力^[15]。由图4可知,随着时间推移,掺加 PCA-1 的浆体屈服应力逐渐增加,这可能是因为水泥水化反应持续进行,导致浆体逐渐硬化;掺加 PCA-2 的浆体屈服应力同样呈上升趋势,但增幅较小;PCA-3 中的快凝组分会加速水泥早期水化,促进钙矾石(Aft)等水化产物的快速生成,显

著缩短凝结时间,使颗粒间结构迅速形成,导致屈服应力在短时间内急剧上升。掺加 PCA-1 的 HECC 的屈服应力在 180~210 min 之间出现大幅增长,掺加 PCA-2 和 PCA-3 的 HECC 在该时段均未测得数据,说明可能也发生了显著提升,此时间节点与采用维卡仪法测得的初凝时间相近。

2.1.3 塑性黏度

黏度是表征浆体内部结构阻碍流动的性能指标,其大小主要取决于浆体内部絮凝结构的数量及其破坏程度^[16]。图5为不同减水剂对 HECC 塑性黏度的影响。PCA-1 含有保坍组分,能有效延缓水泥颗粒的重新絮凝,其分子通过静电斥力和空间位阻作用维持水泥颗粒的分散状态,从而减缓黏度上升速度。随着时间推移,浆体流动性保持较好,塑性黏度增长平缓,体现了保坍组分对工作性能的长效维持作用。PCA-2 因缺乏保坍组分,其分散效果随时间逐渐减弱,水泥颗粒因范德华力作用快速重新聚集,导致浆体结构致密化,塑性黏度显著上升,表明保坍组分对延缓絮凝具有关键作用。PCA-3 中的快凝部分在初期加速了水泥早期水化反应,60 min 时黏度出现波动,这可能与水化反应的不均匀性以及减水剂与水化产物间复杂的相互作用有关。因此,塑性黏度在较短时间内急剧上升,流动性迅速下降,但由于早期水化较为剧烈,后期黏度水平与其他两种减水剂相近。总体而言,不同减水剂的功能组分直接影响了水泥浆体的分散状态和水化动力学特性;PCA-1 减水剂通过延缓絮凝维持低黏度;PCA-2

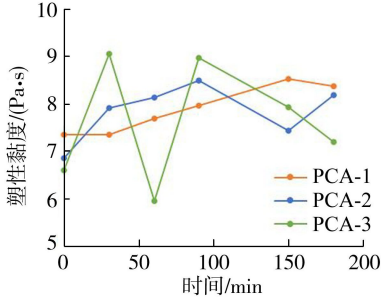


图5 不同减水剂对 HECC 塑性黏度的影响

因分散失效导致黏度快速上升;而 PCA-3 通过加速水化促使结构致密化。

2.2 工作性能

由不同减水剂对 HECC 流动度的影响(表 3)可知,在不加纤维时,掺加 PCA-1、PCA-2、PCA-3 的 HECC 的跳桌流动度分别为 215、220、203 mm;在加纤维时,跳桌流动度分别为 150、145、140 mm。由此可见,3 种减水剂的减水效果相当。

表 3 不同减水剂对 HECC 流动度的影响

减水剂	跳桌流动度/mm	
	不加纤维	加纤维
PCA-1	215	150
PCA-2	220	145
PCA-3	203	140

减水剂类型是影响混凝土坍落度损失速率、加重混凝土损失程度的主要因素之一^[17]。图 6 为不同减水剂对 HECC 坍落度损失的影响。由图 6 可知,掺加 PCA-1 的 HECC 在前两小时内保持很好的工作性能,在 2 h 至 3 h 之间的坍落度损失加快,掺加 PCA-1 的 HECC 在 2 h 和 3 h 时的坍落度分别降低了 35%和 76%,PCA-1 具有良好的缓凝效果。相比之下,掺加 PCA-2 的 HECC 的坍落度损失比 PCA-1 大、比 PCA-3 小,这是因为 PCA-2 中没有保坍组分,早期水化未被抑制,大量自由水被水化产物结合。掺加 PCA-3 的 HECC 坍落度损失最大,因为 PCA-3 中的快凝组分加速了前期的水化反应,迅速消耗水分并生成水化产物,减水剂本身也可能被快速生成的水化产物包裹或吸附,导致分散效果的衰减加速。由此可见,合理选择减水剂的种类是有效控制混凝土坍落度损失的重要举措。

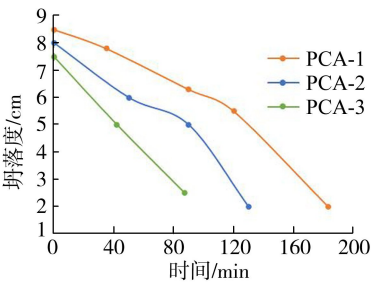


图 6 不同减水剂对 HECC 坍落度损失的影响

2.3 凝结时间

使用维卡仪法和贯入阻力仪法测试不同减水剂对 HECC 初凝和终凝时间的影响,结果见图 7。由图 7 可知,使用维卡仪法时,初凝时间由长到短依次为 PCA-1、PCA-2、PCA-3;终凝时间 PCA-1 最长,PCA-2 和 PCA-3 相同。使用贯入阻力法时,掺加 PCA-1 的 HECC 的初凝和终凝时间最长,掺加 PCA-2 的 HECC 次之,掺加 PCA-3 时时间最短。PCA-1

通常具有较好的缓凝作用,能够通过延缓水化反应维持 HECC 的工作性能,从而延长凝结时间;PCA-2 由于缺少保坍组分,减少了 HECC 的流动性保持能力,导致凝结时间较常规减水剂缩短,但缩短幅度不如 PCA-3 显著。PCA-3 可通过加速水泥水化反应,快速形成硬化结构。

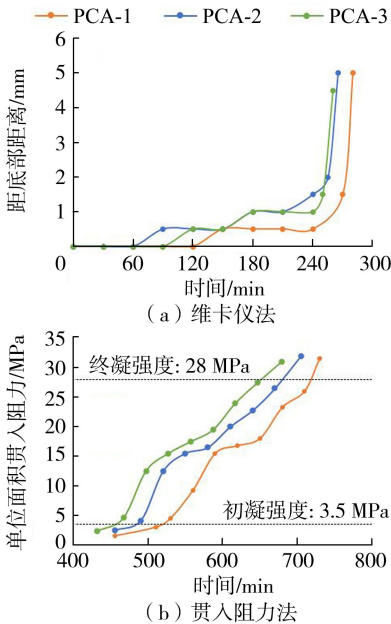


图 7 不同减水剂对 HECC 初凝和终凝时间的影响

表 4 为不同方法测得的掺加不同减水剂时 HECC 的凝结时间。由表 4 可知,贯入阻力法测得的初凝、终凝时间分别比维卡仪法延长 3~4 h 和 5~6 h,结合施工现场的实际凝结时间得出,使用贯入阻力法测得的凝结时间更为准确。

表 4 不同方法测得的使用不同减水剂时 HECC 的凝结时间

减水剂	维卡仪法		贯入阻力法	
	初凝时间/min	终凝时间/min	初凝时间/min	终凝时间/min
PCA-1	285	355	530	720
PCA-2	270	340	485	680
PCA-3	260	340	457	655

2.4 水化热

图 8 为不同减水剂对 HECC 水化进程的影响,包括对放热速率(图 8(a))和累计放热量(图 8(b))的影响。掺加 PCA-1 时,诱导期较掺加 PCA-2 和 PCA-3 时略长,到达放热峰的时间也较长,且峰值明显较低。在放热峰出现前,掺加 PCA-2 和 PCA-3 的 HECC 的放热速率比掺加 PCA-1 时略高,且放热峰的出现时间分别较掺加 PCA-1 时提前 1.93、1.77 h;掺加 PCA-1、PCA-2、PCA-3 的 HECC 放热峰值分别为 0.356、0.365、0.376 mW/g,掺加 PCA-1 的 HECC 在放热峰后其放热速率反超 PCA-2 和 PCA-3,39 h 后三组放热速率相近。在各组试验

中,水泥在水化加速期的曲线斜率大致相同。这表明,即便采用不同类型的减水剂,HECC 在水泥水化加速期的水化动力学机制保持不变^[18]。由图 8(b)可知,掺加 PCA-3 的 HECC 累计放热量最大,为 45.689 J/g,其次为 PCA-1 (44.691 J/g) 和 PCA-2 (43.325 J/g)。这可能是因为 PCA-2 在加速期的水化速率比 PCA-1 高,在放热峰后,由于被水化产物覆盖、消耗或缺乏持续补充的分散剂分子,使其分散力较快衰减,掺加 PCA-2 的 HECC 更易发生絮凝。这种絮凝阻碍了水分子向水泥颗粒内部的扩散以及水化产物向外扩散,从而减缓了 PCA-2 在减速期和稳定期的反应速率,导致掺加 PCA-2 时的累计放热量低于掺加 PCA-1 的 HECC。PCA-3 通过多种机制显著加速了水泥的水化反应进程,导致在相同时间内水化反应更彻底、程度更高,因此累计放热量高于 PCA-1。

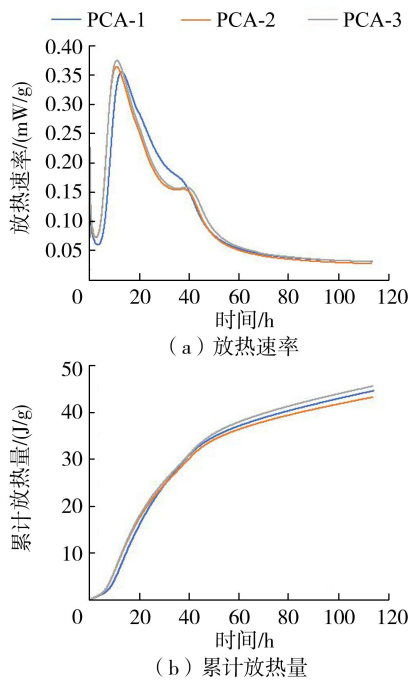


图 8 不同减水剂对 HECC 水化进程的影响

3 结 论

- a. HECC 拌合物的流变特性严格符合宾厄姆模型,其回归方程的相关系数均超过 0.96。随着时间的延长,掺加 3 种不同减水剂的 HECC 屈服应力均有所提高,且在 210 min 时出现大幅提升的拐点,该时间节点与维卡仪法测得的初凝时间相近。
- b. 3 种减水剂在相同掺量(0.25%)下减水效果相当,但对流变参数的调控差异显著:PCA-3 中的快凝组分能够直接促进水泥早期水化反应,使放热峰提前,导致掺加该减水剂的拌合物在初期黏度上升最快、坍落度损失最大、凝结时间最短。PCA-2 主

要通过改变材料颗粒间的吸附作用来调控早期流变特性。其坍落度损失速度和水化放热速率介于早强型和常规减水剂之间。

c. 当 HECC 人工砂粒径增至 1.25 mm 时,试针易受砂粒阻碍,导致维卡仪法判断凝结状态不准。贯入阻力仪法更为准确,其测得的初凝和终凝时间分别比维卡仪法长 3~4 h 和 5~6 h,更贴合滑模施工等现场实际情况。

d. 掺加 PCA-1、PCA-2、PCA-3 的 HECC 的放热峰值分别为 0.356、0.365、0.376 mW/g。尽管减水剂类型不同,但 HECC 的水化动力学机制保持一致。

参考文献:

[1] Li V C, Wang S, Wu C. Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite (PVA-ECC) [J]. ACI Materials Journal, 2001, 98 (6): 483-492.

[2] 王玉璞,李家正,石妍. 超高延性水泥基复合材料耐久性研究进展 [J]. 人民长江, 2024, 55 (1): 175-183. (Wang Yupu, Li Jiazheng, Shi Yan. Research progress on durability of ultra-high engineered cementitious composites [J]. Yangtze River, 2024, 55 (1): 175-183. (in Chinese))

[3] 韩建平,柴巧利. 高延性纤维增强水泥基复合材料研究应用新进展 [J]. 土木工程与管理学报, 2011, 28 (3): 18-23. (Han Jianping, Chai Qiaoli. Research and application of engineering cementitious composite [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2011, 28 (3): 18-23. (in Chinese))

[4] Li V C. 高延性纤维增强水泥基复合材料的研究进展及应用 [J]. 硅酸盐学报, 2007, 35 (4): 531-536. (Li V C. Progress and application of engineered cementitious composites [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2007, 35 (4): 531-536. (in Chinese))

[5] Yücel H E, Dutkiewicz M, Yıldızhan F. Application of ECC as a repair/retrofit and pavement/bridge deck material for sustainable structures; a review [J]. Materials, 2022, 15 (24): 8752.

[6] 李家正. 高延性水泥基复合材料在水工结构中的应用构想 [J]. 长江科学院院报, 2023, 40 (2): 1-6. (Li Jiazheng. Envisaging the application of hydraulic engineered cementitious composites (HECC) in hydraulic structures [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40 (2): 1-6. (in Chinese))

[7] 孙玉莲,兰驷东,严俊,等. 混凝土面板堆石坝运行期存在的渗流问题及成因研究综述 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2016, 14 (6): 431-436. (Sun Yulian, Lan Sidong, Yan Jun, et al. Research on seepage problem and character of concrete face rock-fill dam under operating period [J]. Journal of China Institute of Water Resources

and Hydropower Research, 2016, 14 (6) : 431-436. (in Chinese))

[8] Yang Enhua,Sahmaran M, Yang Yingzi, et al. Rheological control in production of engineered cementitious composites [J]. ACI Materials Journal, 2009, 106 (4) : 357-366.

[9] Ley-Hernández A M, Feys D. Resting time effect on the rheological behavior of cement paste in presence of superplasticizer [J]. Cement and Concrete Research, 2021, 142:106347.

[10] 胡伟,李家正,石妍,等. 不同配合比的 HECC 力学与干缩性能试验研究[J]. 人民长江, 2024, 55 (4) : 222-229. (Hu Wei, Li Jiazheng, Shi Yan, et al. Experimental study on mechanical and drying shrinkage properties of HECC with different mix proportions[J]. Yangtze River, 2024, 55 (4) : 222-229. (in Chinese))

[11] 杨志全,丁一,杨溢,等. 不同水灰比的牛顿型水泥浆液流变性随时间变化规律[J]. 农业工程学报, 2020, 36 (19) : 161-167. (Yang Zhiquan, Ding Yi, Yang Yi, et al. Hydration-time-dependent rheological behaviors of Newtonian cement grouts with different water cement ratios [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(19) : 161-167. (in Chinese))

[12] Kwan A K H, Fung W W S. Roles of water film thickness and SP dosage in rheology and cohesiveness of mortar[J]. Cement and Concrete Composites, 2012, 34 (2) : 121-130.

[13] Kwan A K H, Fung W W S, Wong H H C. Water film thickness, flowability and rheology of cement-sand mortar [J]. Advances in Cement Research, 2010, 22 (1) : 3-14.

[14] Vikan H, Justnes H. Rheology of cementitious paste with silica fume or limestone [J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37 (11) : 1512-1517.

[15] 张明璇,王鹏飞,杨涛,等. 聚羧酸减水剂对硫铝酸盐水泥基注浆材料影响[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53 (4) : 348-361. (Zhang Mingxuan, Wang Pengfei, Yang Tao, et al. Effect of polycarboxylic acid superplasticizer on sulphoaluminate cement based grouting material [J]. Coal Science and Technology, 2025, 53 (4) : 348-361. (in Chinese))

[16] Kuder K G, Ozyurt N, Mu E B, et al. Rheology of fiber-reinforced cementitious materials [J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37 (2) : 191-199.

[17] 林宝城. 高效减水剂对新拌混凝土坍落度损失的影响 [J]. 建材与装饰, 2016 (22) : 161-163. (Lin Baocheng. Effect of high-efficiency superplasticizer on slump loss of fresh concrete [J]. Construction Materials & Decoration, 2016 (22) : 161-163. (in Chinese))

[18] 黄伟,周佳敏,衷从浩,等. 早强型聚羧酸系减水剂对基准水泥早期水化的影响研究[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41 (4) : 1211-1221. (Huang Wei, Zhou Jiamin, Zhong Conghao, et al. Effect of early-strength polycarboxylate superplasticizer on early hydration of reference cement [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41 (4) : 1211-1221. (in Chinese))

(收稿日期: 2025 - 07 - 14 编辑: 俞云利)

+++++

(上接第 10 页)

[89] 徐楚原. 机器学习在生态环境大数据中的应用[J]. 化工设计通讯, 2023, 49 (8) : 177-179. (Xu Chuyuan. Application of machine learning in ecological environment big data [J]. Chemical Engineering Design Communications, 2023, 49 (8) : 177-179. (in Chinese))

[90] Yang Xinting, Zhang Song, Liu Jintao, et al. Deep learning for smart fish farming: applications, opportunities and challenges[J]. Reviews in Aquaculture, 2021, 13 (1) : 66-90.

[91] Chen Jinnan, Ding Chengzhi, He Dekui, et al. Assessing the conservation status of Chinese freshwater fish using deep learning[J]. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 2023, 33 (4) : 1505-1521.

[92] Agrawal S, Dubey S, Naik K J. Deep reinforcement learning for forecasting fish survival in open aquaculture ecosystem[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2023, 195 (11) : 1389.

[93] Yoshida K, Yajima H, Islam M T, et al. Assessment of spawning habitat suitability for Amphidromous Ayu (*Plecoglossus altivelis*) in tidal Asahi River sections in Japan; implications for conservation and restoration [J]. River Research and Applications, 2024, 40 (8) : 1497-1511.

[94] 唐希颖,李化哲,崔丽娟,等. 湿地植物物种多样性无人机高光谱遥感反演研究[J]. 地球信息科学学报, 2024, 26 (8) : 1954-1974. (Tang Xiyang, Li Huazhe, Cui Lijuan, et al. Inversion of wetland plant species diversity using UAV hyperspectral data [J]. Journal of Geo-information Science, 2024, 26 (8) : 1954-1974. (in Chinese))

[95] 何博浩. 基于机器学习的潜在海草适宜性栖息地预测研究[D]. 海口:海南大学, 2024.

[96] 崔东文,金波. 基于随机森林回归算法的水生态文明综合评价[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34 (5) : 56-60. (Cui Dongwen, Jin Bo. Comprehensive evaluation of water ecological civilization based on random forests regression algorithm [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34 (5) : 56-60. (in Chinese))

[97] Kwon Y S, Kang H, Pyo J. Estimation of aquatic ecosystem health using deep neural network with nonlinear data mapping [J]. Ecological Informatics, 2024, 81 : 102588.

(收稿日期: 2025 - 10 - 19 编辑: 俞云利)

基于模态分解和分类去噪的大坝变形数据清洗方法

张宏瑞¹, 文丽娟², 曹 昕^{1,3}, 盛金保^{1,3}, 江 超^{1,3}, 祖安君^{1,3}

(1. 南京水利科学研究院大坝安全与管理研究所; 2. 高台县水务局; 3. 水利部大坝安全管理中心)

摘要:为解决大坝变形监测中的数据噪声干扰问题、提高监测数据质量,将灰狼优化(GWO)算法、变分模态分解(VMD)、小波阈值去噪(WTD)和S-G滤波器进行融合,提出了一种基于无监督学习的大坝变形数据清洗方法。该方法利用GWO算法对VMD的分解参数进行自适应寻优,并采用优化后的VMD将变形序列分解为多个本征模态函数(IMF),然后根据各IMF的样本熵对其进行分类,对高频IMF和中低频IMF采用差异化的去噪处理,组合重构得到清洗后的变形数据。某拱坝的实例验证结果表明:该方法在有效消除多频段噪声的同时,较好地保留了变形数据的统计特性,且对不同噪声水平均表现出鲁棒性;去噪后的序列作为训练样本,可提升点-区间预测模型的精度;该方法对不同长度的监测序列均具有良好的适用性。

关键词:大坝变形监测;数据噪声;模态分解;优化算法;分类去噪

中图分类号:TV698.1

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2026)05-0034-08

Dam deformation data denoising method based on modal decomposition and classification-based denoising//Zhang Hongrui¹, Wen Lijuan², Cao Xin^{1,3}, Sheng Jinbao^{1,3}, Jiang Chao^{1,3}, Zu Anjun^{1,3} (1. *Dam Safety and Management Department, Nanjing Hydraulic Research Institute*; 2. *Gaotai County Water Affairs Bureau*; 3. *Dam Safety Management Center, Ministry of Water Resources*)

Abstract: To address the problem of data noise interference in dam deformation monitoring and improve the quality of monitoring data, a dam deformation data cleaning method based on unsupervised learning is proposed by integrating the grey wolf optimizer (GWO) algorithm, variational mode decomposition (VMD), wavelet threshold denoising (WTD), and the Savitzky-Golay (S-G) filter. In this method, the decomposition parameters of VMD are adaptively optimized using the GWO algorithm, and the optimized VMD is employed to decompose the deformation sequence into multiple intrinsic mode functions (IMFs). Then, the IMFs are classified according to their sample entropy, and classification-based denoising is applied to the high-frequency IMFs and the medium- and low-frequency IMFs. Finally, the processed IMFs are reconstructed to obtain the cleaned deformation data. Case validation on an arch dam shows that the proposed method effectively eliminates noise across multiple frequency bands while well preserving the statistical characteristics of the deformation data, and exhibits robustness to different noise levels. The denoised sequence, when used as training samples, can improve the accuracy of the point-interval prediction model. In addition, the method has good applicability to monitoring sequences of different lengths.

Key words: dam deformation monitoring; data noise; modal decomposition; optimization algorithm; classification-based denoising

随着监测感知体系的持续发展,大坝的变形、渗流等结构响应变化能够被有效记录^[1]。监测数据既能实时反馈大坝结构状态,又可作为结构性态诊断和风险识别的基础^[2-3]。然而,受设备质量、环境条件、人为观测误差等多种因素影响,监测数据易被噪声污染,掩盖了大坝的真实行为特征^[4]。因此,

有效清洗变形数据中的噪声对提升监测数据的质量至关重要。

由于结构变形是坝体在水位波动、温度变化、材料老化等内外因素共同作用下的综合响应,变形数据往往呈现非线性和非稳态特性^[5-6]。为此,分析大坝变形行为时通常将原始序列分解为多个独立分量

基金项目:国家自然科学基金项目(52509173);国家重点研发计划项目(2024YFC3210604);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y725004)

作者简介:张宏瑞(2000—),男,硕士研究生,主要从事大坝安全健康诊断研究。E-mail:hrzhang27@foxmail.com

通信作者:江超(1984—),男,正高级工程师,硕士,主要从事水利水电工程安全监测与信息化研究。E-mail:290280772@qq.com

以降低数据复杂度。例如: Xu 等^[7]将位移分解为突变、季节和趋势变化部分,并定量分析了各自的变化规律; Song 等^[8]通过将非平稳信号分解为平稳信号,提出了基于“分解-重组”的缺失数据填补方法。对于去噪问题,数据分解的目的在于准确定位高频噪声成分。经验模态分解(EMD)及其变体^[9-10]能够将数据递归地分解为围绕局部极值的本征模态函数(IMF),但往往无法完全分离不同频率分量,易出现模态混叠和边界振荡现象^[11]。相比之下,变分模态分解(VMD)作为一种自适应分解方法,通过求解变分优化问题来实现序列分解,能够从频域角度更准确地定位和分离不同频率成分^[12]。Luo 等^[13]利用多变量 VMD 分解某拱坝时空变形数据,基于分解序列建立了多输出预测模型,显著提高了点预测精度; Wang 等^[14]通过 VMD 识别了大坝的非突变和突变行为,并结合云模型评估了大坝健康状态。尽管 VMD 在信号分解方面表现出色,但其分解能力高度依赖于两个关键参数(惩罚参数 γ 和模态数 K)^[15],若参数选择不当,易引发过度分解或分解不足问题,限制了方法的实用性^[16]。

除噪声定位外,合理选择去噪方法同样关键。小波阈值去噪(WTD)是小波分析中的经典算法,其原理为通过设定阈值滤除高频信号中的噪声^[17-18];而 Savitzky-Golay (S-G) 滤波器则在时域内实现去噪,能在保留原始信号形状、宽度等特征的基础上提高数据的整体平滑性^[19]。现有研究普遍认为噪声仅存在于高频 IMF 中,对中低频 IMF 则是直接保留,这种简化处理忽略了中低频 IMF 中潜在的干扰成分。

针对上述问题,本文提出了一种基于模态分解和分类去噪的大坝变形数据清洗方法。该方法首先通过灰狼优化(GWO)算法自动确定 VMD 的最优参数组合,避免人工预设参数导致分解结果出现大的偏差,然后针对样本熵分类后的高频 IMF 和中低频 IMF 分别采用 WTD 和 S-G 滤波器进行差异化去噪处理,组合重构得到清洗后的变形数据。该方法的有效性通过在某拱坝径向位移数据和仿真信号序列上的实证分析得到了验证。

1 研究方法

1.1 VMD

VMD 是一种自适应、非递归的信号处理方法^[20]。该方法通过构建变分优化框架,将原始信号 $f(t)$ 分解为 K 个具有不同中心频率和有限带宽的本征模态函数 $u_k(t)$ ($k=1,2,\dots,K$)。具体而言,首先通过希尔伯特变换获得各模态的解析信号,再通过

复指数调制将其频谱搬移至基带,以估计各模态的带宽,然后以各模态估计带宽之和最小为优化目标,并约束所有模态之和等于原始信号。据此建立如下约束变分模型:

$$\begin{cases} \min_{\{u_k(t)\}, \{\omega_k\}} \left\{ \sum_{k=1}^K \|\partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \|^2_2 \right\} \\ \text{s. t. } \sum_{k=1}^K u_k(t) = f(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: ∂_t 为对时间 t 的偏导数算子; $\delta(t)$ 为狄拉克函数; j 为虚数单位; ω_k ($k=1,2,\dots,K$) 为第 k 个模态 $u_k(t)$ 的中心频率。

上述约束变分问题可通过交替方向乘子法进行迭代求解^[20]。VMD 的分解性能主要受惩罚因子 γ 和模态数 K 的影响。当 γ 取值不合理时可能导致模态混叠或过度平滑,而 K 设置不当则可能产生欠分解或冗余模态。因此,本文进一步采用 GWO 算法对这两个关键参数进行自适应寻优。

1.2 GWO 算法

GWO 算法^[21]是一种模拟灰狼群体等级结构和协同捕食行为的群智能优化算法。根据适应度值,将当前种群中的最优、次优和第三优个体分别记为 α 、 β 和 δ 狼,并由三者共同引导其余候选个体更新位置,以逐步逼近最优解。

在第 q 次迭代中,候选个体与 α 、 β 、 δ 狼之间的距离分别表示为:

$$\begin{cases} D_{\alpha,q} = |C_{1,q} \odot X_{\alpha,q} - X_q| \\ D_{\beta,q} = |C_{2,q} \odot X_{\beta,q} - X_q| \\ D_{\delta,q} = |C_{3,q} \odot X_{\delta,q} - X_q| \end{cases} \quad (2)$$

式中: X_q 为第 q 次迭代时候选个体的位置向量; $X_{\alpha,q}$ 、 $X_{\beta,q}$ 、 $X_{\delta,q}$ 分别为当前最优、次优和第三优个体的位置向量; $D_{\alpha,q}$ 、 $D_{\beta,q}$ 、 $D_{\delta,q}$ 为候选个体与 3 种优势个体之间的距离向量; $C_{i,q}$ ($i=1,2,3$) 为系数向量; $\odot$ 表示向量间的逐元素乘积。

进一步根据 3 种优势个体的位置,分别计算候选个体的潜在更新位置:

$$\begin{cases} X_{1,q} = X_{\alpha,q} - A_{1,q} \odot D_{\alpha,q} \\ X_{2,q} = X_{\beta,q} - A_{2,q} \odot D_{\beta,q} \\ X_{3,q} = X_{\delta,q} - A_{3,q} \odot D_{\delta,q} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $X_{1,q}$ 、 $X_{2,q}$ 、 $X_{3,q}$ 分别为候选个体在 α 、 β 和 δ 狼引导下得到的潜在更新位置向量; $A_{i,q}$ ($i=1,2,3$) 为控制搜索方向和距离的系数向量。

候选个体在下次迭代中的位置由上述 3 个潜在位置共同确定:

$$X_{q+1} = \frac{X_{1,q} + X_{2,q} + X_{3,q}}{3} \quad (4)$$

系数向量 $A_{i,q}$ 和 $C_{i,q}$ 分别为:

$$A_{i,q} = a_q (2r_{1i,q} - 1) \quad (5)$$

$$C_{i,q} = 2r_{2i,q} \quad (6)$$

式中: $r_{1i,q}$ 、 $r_{2i,q}$ 为各分量在 $[0, 1]$ 内随机取值的向量; a_q 为随迭代过程由 2 逐渐减小至 0 的控制参数。随着 a_q 减小, GWO 的搜索范围逐渐收缩, 使算法由较大范围的全局搜索逐渐转向当前优势解附近的局部搜索。

1.3 变形数据的自适应模态分解

针对大坝变形数据的非线性和非平稳特性, 前述 VMD 方法能够在频域内实现信号的自适应分解, 而 GWO 算法则可以解决 VMD 参数选择的主观性。在此基础上, 本文构建基于 GWO 优化 VMD 超参数的大坝变形数据分解策略。具体步骤如下:

a. 设定 GWO 的种群规模、最大迭代次数以及 VMD 惩罚因子 γ 和模态数 K 的搜索范围, 并随机初始化灰狼种群。每只灰狼的位置对应一组候选 VMD 参数 (γ, K) 。

b. 利用各候选参数组合对原始变形序列 $f(t)$ 进行 VMD 分解, 并计算分解所得 IMF 的包络熵^[22]。以包络熵作为 GWO 的适应度函数, 适应度值越小, 表明对应参数组合下 IMF 的能量分布越集中、随机性越低。根据各候选解的适应度值确定当前的 α 、 β 和 δ 狼, 并按照式 (2) ~ (6) 更新其余候选个体的位置。

c. 在每次迭代完成后, 更新控制参数并重新计算各候选参数组合的适应度, 直至达到最大迭代次数。最终, 将适应度最优灰狼对应的参数组合确定为 VMD 的最优参数 (γ_{opt}, K_{opt}) , 并利用该参数组合完成大坝变形序列的最终分解。

上述步骤中所涉及的包络熵计算公式为:

$$H_k = - \sum_{i=1}^N p_i \ln p_i \quad (7)$$

$$p_i = E_i / \sum_{j=1}^N E_j \quad (8)$$

式中: H_k 为第 k 个 IMF 的包络熵值; N 为采样点数; E_i 为第 i 个采样点的包络幅值; p_i 为 E_i 归一化后的概率分布。

在获得 VMD 分解结果后, 通过计算各 IMF 的样本熵^[23]来量化其复杂度和随机程度, 以此作为后续去噪方法选择的判据。Dhandapani 等^[24]指出, 熵值大于 0.6 的 IMF 分量随机性较强, 主要包含高频噪声成分, 而熵值小于 0.6 的 IMF 分量规律性较强, 包含主要的变形信息。因此, 本文选择 0.6 作为区分高频 IMF 和中低频 IMF 的样本熵阈值。

1.4 小波阈值去噪

噪声数据通常表现为高不确定性的部分, 对应

波动较大的高频 IMF。本文采用小波阈值去噪 (WTD)^[25]方法处理高频 IMF 分量, 以消除集中在高频部分的噪声分量。WTD 的流程可概括为:

a. 小波分解。选择合适的小波基函数和分解层数, 对高频 IMF 进行多尺度小波分解后得到一系列小波系数, 常见的基函数类型有 Coiflets、Morlet、Daubechies 等。

b. 阈值处理。小波阈值函数包括硬阈值函数和软阈值函数, 其中硬阈值会将小于阈值的小波系数归零, 这可能导致去噪后的信号在某些点上出现伪吉布斯现象, 而软阈值是将超过预设值的小波系数按照固定幅度进行缩减, 重构后的信号具有更好的连续性, 因此本文采用软阈值函数作为小波阈值去噪的阈值函数。

c. 小波重构。对经过阈值处理的小波系数进行逆小波变换, 重构得到 WTD 处理后的高频 IMF。

1.5 S-G 滤波器

S-G 滤波器^[26]是一种基于多项式拟合的平滑滤波技术, 通过在滑动窗口内对数据点进行最小二乘拟合来实现平滑, 对于每个数据点, S-G 滤波器选取其所属滑动窗口内的数据点, 然后用指定阶数的多项式对这些点进行拟合, 最后用拟合多项式在中心点的值作为原始数据点的平滑结果:

$$\hat{x}_j = \frac{1}{L} \sum_{i=-m}^m a_i x_{j+i} \quad (9)$$

式中: $\hat{x}_j$ 为位置 j 处滤波后的信号; a_i 为第 i 个卷积系数; x_{j+i} 为 $j+i$ 处的原始信号; m 为窗口半径; L 为归一化因子, $L = 2m + 1$ 。

相比于移动平均等简单滤波方法, S-G 滤波器在平滑信号的同时能够更好地保持信号的峰值形状和边缘特征, 不会产生明显的峰值展宽或位移, 因此更适用于对中低频 IMF 内干扰信息的平滑处理。

1.6 实施步骤

根据上述理论与方法, 提出一种基于模态分解和分类去噪的大坝变形数据清洗方法, 具体的实施流程如图 1 所示。

2 工程实例验证

2.1 工程背景及数据集

某双曲拱坝始建于 1957 年, 其最大坝高为 45.0 m, 坝顶高程为 239.0 m, 共有 13 个坝段, 大坝下游立面见图 2。为监测大坝的结构安全状况, 坝体内外配置了全面的监测系统, 包括垂线、压力计和渗流测量装置等。首次蓄水后定期采集监测数据并在延迟 48 h 后自动检查测量结果, 如果出现可疑或错误的测量结果, 则重新测量并校准数据, 因此数据

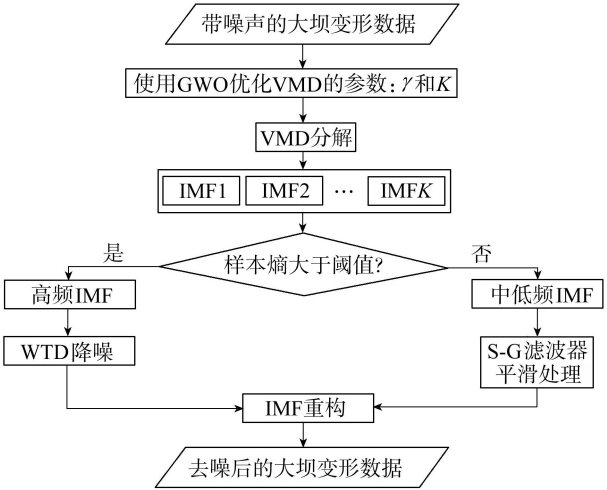


图1 去噪流程

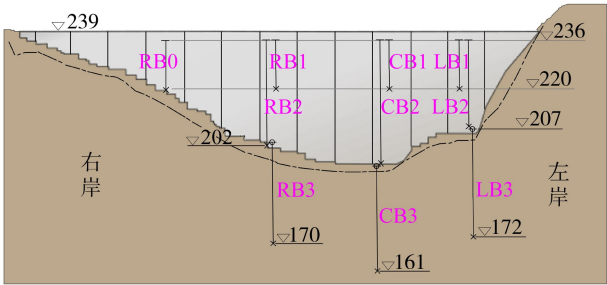


图2 大坝下游立面及监测设施布置(单位: m)

库中存储的监测数据未受到显著噪声干扰,可选作基准测试数据。

为验证所提出方法的去噪能力,选择CB2、CB3测点采集的径向位移数据作为建模对象,数据的时间跨度为2000年1月19日至2012年12月3日,共656组数据。为模拟噪声环境,文中以信噪比^[27]为控制参数,向原始数据中添加噪声,其加噪过程如下:

$$f'(t) = f(t) + n(t) \tag{10}$$

其中
$$n(t) \sim N\left(0, \frac{\bar{x}^2}{10S_{db}/10}\right)$$

式中: $f'(t)$ 为加噪后的数据; $f(t)$ 为原始数据; $n(t)$ 为高斯白噪声; $\bar{x}^2$ 为原始数据的均方差; S_{db} 为预设

的信噪比。由 $n(t)$ 的表达式可知,噪声水平与信噪比呈负相关关系,即 S_{db} 数值越小,噪声方差越大,对应的噪声水平越高。

为模拟不同程度的噪声,对CB2、CB3测点的原始位移数据分别添加 S_{db} 为10、15、18 dB的噪声,构建了3种不同含噪水平的数据集,分别记为CB2_10dB、CB2_15dB、CB2_18dB、CB3_10dB、CB3_15dB、CB3_18dB,结果如图3所示。从图3可以观察到,随着信噪比的递减,变形信号的细节特征逐渐被噪声掩盖,数据的随机波动幅度增强,这为方法的鲁棒性验证提供了多层次的测试基准。

2.2 去噪过程分析

以CB3_18dB噪声数据为例介绍该方法的去噪流程。在GWO算法优化参数(γ, K)前,灰狼数量和最大迭代次数分别设为45和15,惩罚因子 γ 和模态数 K 的寻优空间分别为[100, 5000]和[3, 15],构建了以最小化包络熵为适应度函数的VMD参数优化方法,得到的最优参数为 $\gamma = 1404$ 和 $K = 6$,优化后的VMD用于分解CB3_18dB,结果见图4。

从图4(b)可以看出,优化后的VMD将CB3_18dB分解为6个在频域上呈现清晰边界划分的IMF分量,大致分别对应于[0, 5]、[5, 15]、[15, 35]、[35, 60]、[190, 240]、[270, 330]的独立频率区间,有效避免了EMD方法中易出现的模态混叠。图4(a)中高阶IMF(IMF5、IMF6)包含较高的频率和较多毛刺噪声,中低频IMF(IMF1~IMF4)则显示出较低的频率和更清晰的变化模式。进一步计算各IMF的样本熵,IMF1~IMF6的样本熵分别为0.036、0.216、0.446、0.427、0.673和0.632。其中,IMF5和IMF6的样本熵均大于0.6,而IMF1~IMF4均小于0.6,与图4所反映的频率及随机波动特征基本一致。因此,将IMF5和IMF6划分为高频IMF,将IMF1~IMF4划分为中低频IMF,并据此选择相应的去噪方法。

为准确去除噪声,IMF5、IMF6采用WTD,其超

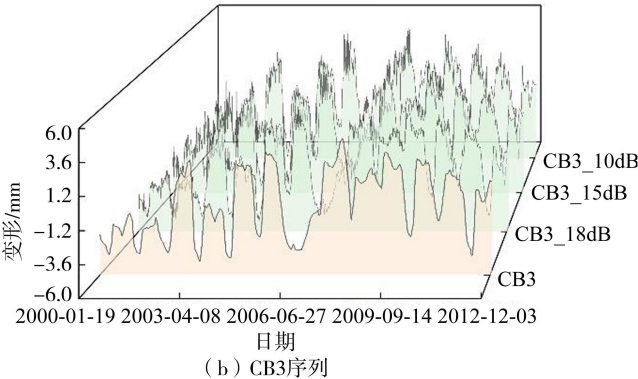
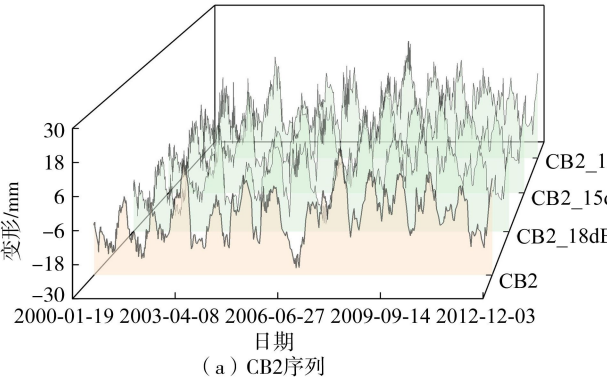


图3 不同含噪水平的数据集

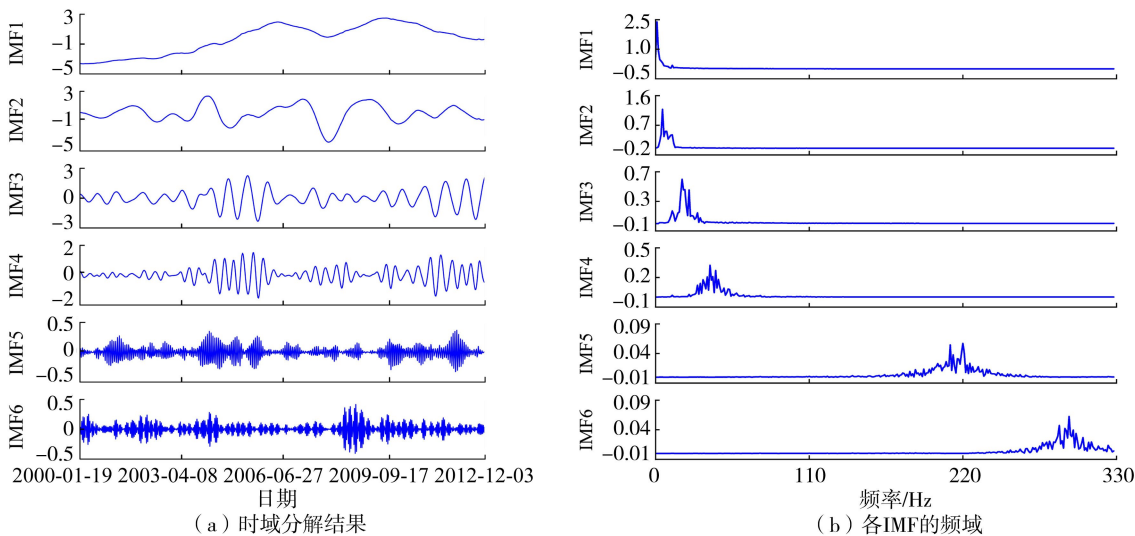


图4 CB3_18dB 的分解结果

参数取值如下:小波基函数选为 Daubechies 4,分解层数为 6;IMF1~IMF4 采用 S-G 滤波器平滑处理,滑动窗口的长度为 7,多项式拟合阶数为 3。重构处理后的 IMF 得到清洗结果,去噪前后的对比见图 5,其中 CB3_去噪后表示去噪后的 CB3 数据。

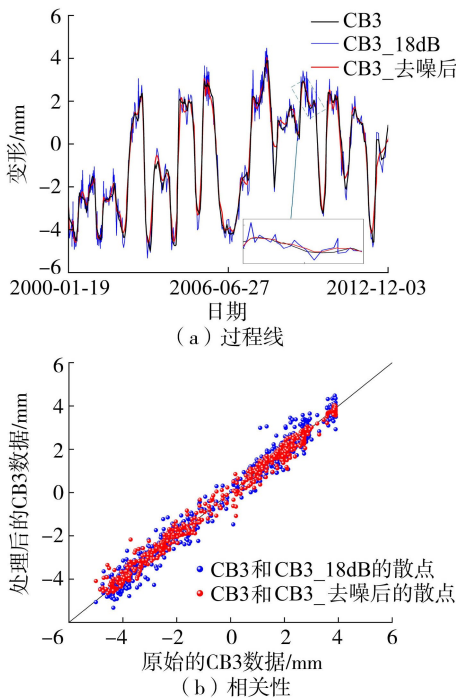


图5 CB3 去噪前后的对比

由图 5(a)可知,在 18dB 的噪声水平下,变形数据出现波形畸变,且序列中有许多的毛刺,信号失真严重。去噪后,尽管相较于原始数据仍存在微小偏差,但成功复现了变形序列的局部变化情况(如局部放大图所示)。图 5(b)通过散点关系展示了去噪前后数据间的相关性,可见去噪后散点分布更紧密,与原始数据没有明显偏差。

CB3 去噪前后的统计特征变化见表 1。对比分

析发现,含噪数据的峰值较原始数据偏高 14.6%,均值偏差为 2.2%,而去噪后数据的峰值偏差仅为 3.3%,均值偏差降至 1.7%。去噪后的标准差、偏度和峰度与原始数据的偏差分别为 1.0%、1.1%和 2.1%,均明显小于含噪数据的对应偏差,表明去噪结果较好地恢复了 CB3 的整体分布形状。

表1 CB3 去噪前后的统计特征

序列	峰值/mm	均值/mm	标准差/mm	偏度	峰度
CB3	3.9100	-0.3067	2.7154	-0.0947	-1.5048
CB3_18dB	4.4772	-0.2998	2.6487	-0.1061	-1.4346
CB3_去噪后	4.0368	-0.3015	2.7434	-0.0937	-1.4728

2.3 去噪方法对比

为验证本文提出的大坝变形数据清洗方法(GVWS)在不同变形测点和不同含噪水平下的性能优越性,选择 EMD-WTD^[28]、EMD-PSO-VMD^[29]、SSA-VMD-DFA^[30]作为对比方法,并通过均方根误差(RMSE)、平均绝对误差(MAE)、决定系数(R^2)作为去噪效果的定量评价指标,RMSE、MAE 越小, R^2 越大,则模型的性能越好,量化结果如图 6 所示。

由图 6 可知,随着噪声程度的增加,这 4 种方法的去噪能力均会退化,但相较于对比方法,GVWS 去噪后数据的 RMSE、MAE 更小, R^2 更大,因此和原始数据之间的偏差最小。由此可知,对于非线性和非平稳的大坝变形数据,准确的模态分解以及合适的去噪方法对于去噪性能都有重要影响。此外,GVWS 方法的性能受信噪比的影响最小,这种鲁棒性对于保障不同环境条件下的数据可靠性至关重要。

3 讨论

3.1 预处理对变形预测的影响

数据去噪属于大坝变形建模的预处理环节,为验证数据清洗对变形预测分析的影响,设计了对比

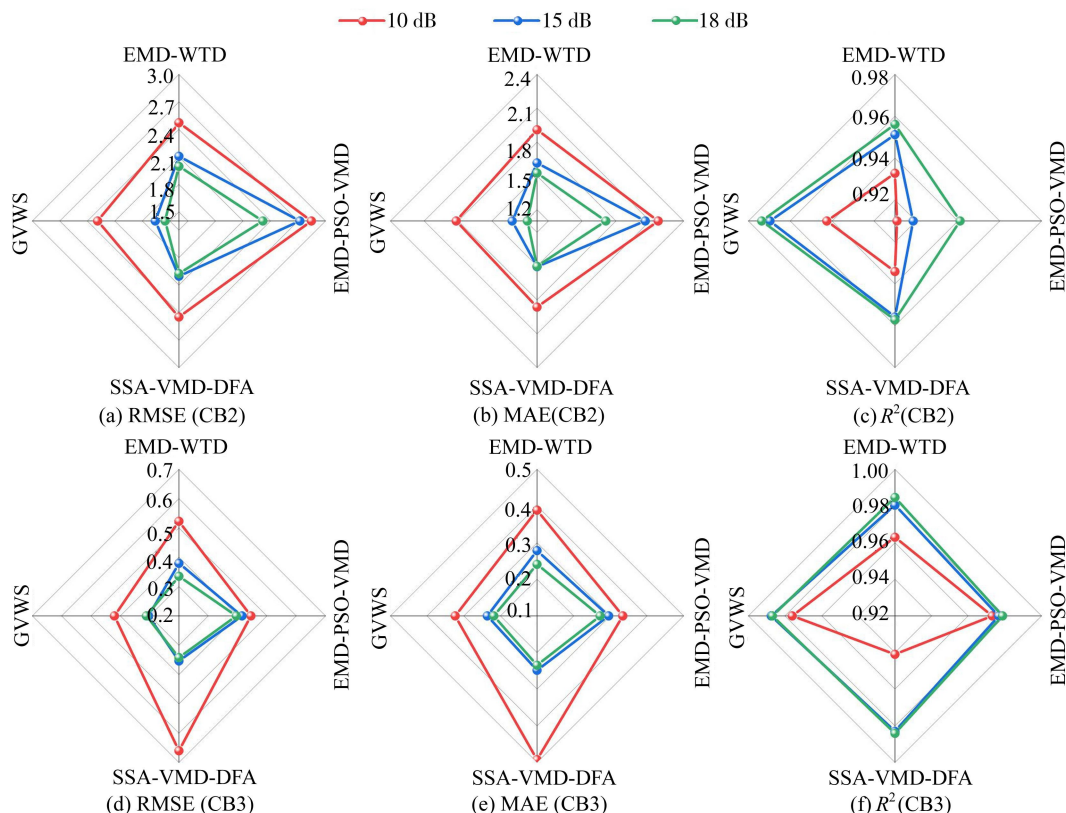


图6 去噪方法的性能对比

试验来评估去噪处理对大坝变形点-区间预测性能的改善效果。具体来说,试验基于水压-季节-时间理论构建了极限学习机^[31]预测模型,分别使用 CB3 原始数据、CB3_18dB 噪声数据以及 CB3_去噪后数据作为训练集,使用 CB3 真实变形数据作为测试集,以 2011 年 1 月 3 日为分界点划分训练集和测试集,极限学习机的隐层单元数设置为 50。

为全面评估预测性能,采用 RMSE、MAE、 R^2 评价点预测精度,同时引入平均中心偏差 (MCD) 和预测区间归一化平均宽度 (NMPIW)^[32] 量化区间预测的性能。NMPIW 和 MCD 越小,区间预测的不确定性越低,结果可靠性越高。

不同训练集的点-区间预测性能结果和预测曲线分别见表 2 和图 7。从表 2 和图 7 可以看出,训练数据的质量直接影响模型的预测性能。即使去噪后的预测性能未完全恢复至原始水平,但相较于直接使用含噪数据,训练集去噪后的预测性能明显改善:点预测的 RMSE 降低 2.95%,区间预测的 NMPIW 降低 12.79%。性能的差异可以解释为含噪训练数据掩盖了大坝的实际变形行为,干扰模型对真实变

表 2 不同训练集的点-区间预测性能

训练集	点预测			区间预测	
	RMSE/mm	MAE/mm	R^2	MCD/mm	NMPIW
CB3	0.4219	0.3531	0.9418	0.3531	1.0246
CB3_18dB	0.4477	0.3669	0.9345	0.3669	1.3650
CB3_去噪后	0.4345	0.3641	0.9383	0.3641	1.1904

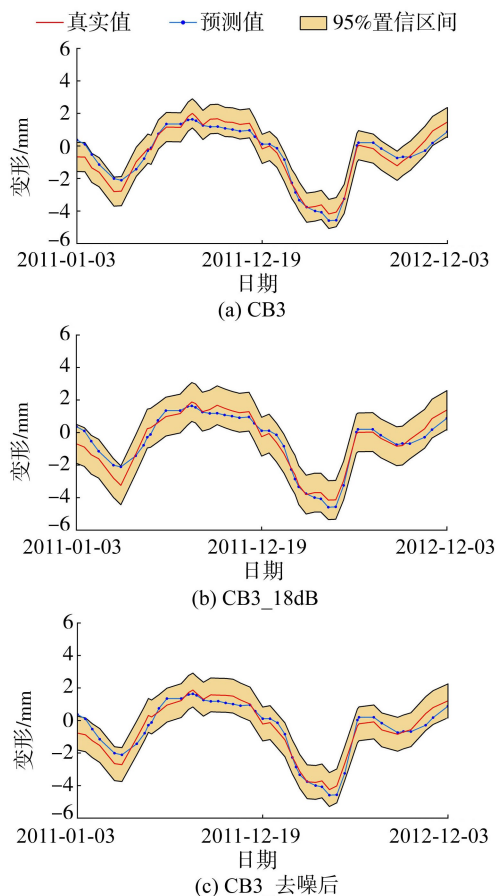


图7 不同训练集得到的预测曲线

形规律的学习,导致预测结果离散度增大;而由于去噪处理能够复现真实数据特征,使模型能够准确捕

捉变形演化模式,从而提高了点预测精度并收窄了预测区间。

3.2 通用性分析

上述试验分析基于特定工程的大坝变形数据展开,为验证该方法在更广泛的大坝监测项目中的去噪通用性,设计了仿真信号进行验证分析。考虑变形、应力、渗流等结构响应主要受上游库水位、温度和时效因素的综合影响^[33],构建的仿真信号采用两组周期项模拟周期性变化的库水位和温度荷载作用,采用两组趋势项模拟时效荷载的作用^[34]。结构响应的仿真序列生成方法为:

$$s = 10\sin\left(\frac{2\pi h}{365}\right) + 5\cos\left(\frac{4\pi h}{365}\right) + \frac{h}{100} + \ln\left(\frac{h}{100}\right) \tag{11}$$

式中: h 为仿真序列的信号数量。

试验分别选取 1 000、2 000 和 3 000 个信号的仿真序列构建测试样本,向各仿真序列添加信噪比为 18 dB 的高斯白噪声,相关参数设置与 2.2 节相同,去噪前后与原序列的差异大小见表 3。

表 3 去噪前后的各仿真信号评价指标

信号数量	去噪前后	RMSE/mm	MAE/mm	R^2
1 000	去噪前	1.136 8	0.892 0	0.949 7
	去噪后	0.526 8	0.421 0	0.989 2
2 000	去噪前	1.960 4	1.542 7	0.931 8
	去噪后	0.615 2	0.489 0	0.993 3
3 000	去噪前	2.741 6	2.160 3	0.927 3
	去噪后	0.803 8	0.636 3	0.993 8

从表 3 可以发现,所提出的方法在不同长度的仿真序列上均表现出良好的去噪能力。随着序列长度从 1 000 增加到 3 000, RMSE 和 MAE 的改善程度从约 53% 逐步提升至约 70%, R^2 的提升幅度也从 4.16% 增加到 7.17%, 表明该方法对于较长序列具有更显著的去噪效果,同时随着数据量的增加其性能表现更加稳定。

4 结 语

本文提出了一种基于模态分解和分类去噪的大坝变形数据清洗方法,在真实变形监测数据和仿真信号上的验证分析表明:采用 GWO 算法优化 VMD 参数实现了模态自适应分解,优化后的 VMD 将变形序列分解为频率区间清晰的 IMF 分量,有效避免了模态混叠现象;结合 WTD 和 S-G 滤波器的差异化处理,在去除高频噪声的同时消除了中低频分量中的干扰成分,较好地保留了真实变形数据的统计特征和变化规律;在不同的噪声环境下,该方法相较于对比方法具有更强的鲁棒性, R^2 值保持在 0.93 以上;将清洗后的数据用于变形预测建模,区间预测的

NMPIW 和 MCD 更小,降低了变形分析任务的不确定性;该方法对不同长度的序列均具有良好的适应性,且性能指标的改善程度随着序列长度增加而提升。

参考文献:

[1] Najih H, Aboulhassane A, Moustachi O E K. Contributions of artificial intelligence to dam monitoring: a literature review[J]. Asian Journal of Civil Engineering, 2025, 26 (12): 4925-4940.

[2] 葛盼猛, 陈波, 刘庭赫, 等. 基于 KPCA-ICFSFDP-MOGP 的拱坝多测点变形数据预处理及预测方法[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43 (4): 92-97. (Ge Panmeng, Chen Bo, Liu Tinghe, et al. Preprocessing and prediction method for multi-point deformation data of arch dams based on KPCA-ICFSFDP-MOGP [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43 (4): 92-97. (in Chinese))

[3] Prakash G, Dugalam R, Barbosh M, et al. Recent advancement of concrete dam health monitoring technology: a systematic literature review[J]. Structures, 2022, 44: 766-784.

[4] 冯燕明, 何杨杨, 左生龙, 等. 大坝安全监测数据降噪的流形学习方法[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44 (4): 59-64. (Feng Yanming, He Yangyang, Zuo Shenglong, et al. Manifold learning method for denoising dam safety monitoring data[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44 (4): 59-64. (in Chinese))

[5] 石佳晨, 岳春芳, 朱明远, 等. 基于 CEEMDAN-改进小波阈值的大坝变形数据处理方法[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44 (5): 80-86. (Shi Jiachen, Yue Chunfang, Zhu Mingyuan, et al. Dam deformation data processing method based on CEEMDAN and improved wavelet threshold[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44 (5): 80-86. (in Chinese))

[6] 赵二峰, 李章寅, 袁冬阳. 基于双阶段注意力机制的大坝变形深度学习预测模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51 (6): 44-52. (Zhao Erfeng, Li Zhangyin, Yuan Dongyang. Deep learning model for deformation prediction of dam based on dual-stage attention mechanism [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51 (6): 44-52. (in Chinese))

[7] Xu Xiaoyan, Yang Jie, Ma Chunhui, et al. Segmented modeling method of dam displacement based on BEAST time series decomposition[J]. Measurement, 2022, 202: 111811.

[8] Song Jintao, Yang Zhaodi, Li Xinru. Missing data imputation model for dam health monitoring based on mode decomposition and deep learning[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2024, 14 (5): 1111-

- [9] 付思韬,赖宇杰,顾冲时,等. 基于 EEMD-AFSA-CNN 的混凝土坝变形预测模型[J]. 水利水电科技进展,2026,46(1):48-53. (Fu Sitao, Lai Yujie, Gu Chongshi, et al. Concrete dam deformation prediction model based on EEMD-AFSA-CNN [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2026, 46(1):48-53. (in Chinese))
- [10] 欧斌,张才溢,陈德辉,等. 基于 EMD-小波阈值-LSTM 模型的混凝土坝变形预测[J]. 排灌机械工程学报,2025,43(4):379-386. (Ou Bin, Zhang Caiyi, Chen Dehui, et al. Deformation prediction of concrete dam based on EMD-wavelet threshold-LSTM model [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2025, 43(4):379-386. (in Chinese))
- [11] 丰少伟,柴凯,杨云生. 基于 SVRM 极值延拓的 EMD 端点效应抑制方法[J]. 兵工自动化,2024,43(3):32-37. (Feng Shaowei, Chai Kai, Yang Yunsheng. EMD end effect suppression method based on SVRM extremum extension [J]. Ordnance Industry Automation, 2024, 43(3):32-37. (in Chinese))
- [12] 陈永平,韩韬,邱超,等. 基于调和分析及 VMD-LSTM 混合模型的甬江河口水位预报方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(2):1-10. (Chen Yongping, Han Tao, Qiu Chao, et al. Water level forecasting method for the Yongjiang River Estuary based on harmonic analysis and VMD-LSTM hybrid model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(2):1-10. (in Chinese))
- [13] Luo Shaoyang, Wei Bowen, Chen Liangjie. Multi-point deformation monitoring model of concrete arch dam based on MVMD and 3D-CNN [J]. Applied Mathematical Modelling, 2024, 125:812-826.
- [14] Wang Yakun, Xiang Yan, Dai Bo, et al. Dam early warning model based on structural anomaly identification and dynamic effect variables selection [J]. Structures, 2025, 74:108507.
- [15] 吴挺玮,潘罗平,安学利. 融合 HO-VMD 的水电机组摆度信号消噪方法[J]. 水力发电学报,2024,43(12):107-115. (Wu Tingwei, Pan Luoping, An Xueli. Noise reduction method of vibration signals from hydroelectric generators based on HO-VMD [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2024, 43(12):107-115. (in Chinese))
- [16] 许秋鸿,刘晓青. 基于 VMD-XGBoost-GRU 模型的危岩体变形预测[J]. 水利水电科技进展,2024,44(2):92-98. (Xu QiuHong, Liu Xiaoqing. Deformation prediction of dangerous rock mass based on VMD-XGBoost-GRU model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(2):92-98. (in Chinese))
- [17] Zhang Caiyi, Fu Shuyan, Ou Bin, et al. Prediction of dam deformation using SSA-LSTM model based on empirical mode decomposition method and wavelet threshold noise reduction [J]. Water, 2022, 14(21):3380.
- [18] Guo Yingjia, You Zongzhe, Wei Bowen. Working mode identification method for high arch dam discharge structure based on improved wavelet threshold-EMD and RDT algorithm [J]. Water, 2022, 14(22):3735.
- [19] Gu Chongshi, Wu Binqing, Chen Yijun. A high-robust displacement prediction model for super-high arch dams integrating wavelet de-noising and improved random forest [J]. Water, 2023, 15(7):1271.
- [20] Dragomiretskiy K, Zosso D. Variational mode decomposition [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3):531-544.
- [21] Mirjalili S, Mirjalili S M, Lewis A. Grey wolf optimizer [J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69:46-61.
- [22] 王薇,程忠耀,向延念,等. 基于 RIME-VMD 联合小波阈值的爆破振动信号去噪方法[J]. 铁道科学与工程学报,2026,23(1):465-479. (Wang Wei, Cheng Zhongyao, Xiang Yannian, et al. Blasting vibration signal denoising method based on RIME-VMD combined wavelet threshold [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2026, 23(1):465-479. (in Chinese))
- [23] Liu Mingkai, Wen Zhiping, Su Huaizhi. Deformation prediction based on denoising techniques and ensemble learning algorithms for concrete dams [J]. Expert Systems with Applications, 2024, 238:122022.
- [24] Dhandapani R, Mitiche I, McMeekin S, et al. Enhanced partial discharge signal denoising using dispersion entropy optimized variational mode decomposition [J]. Entropy, 2021, 23(12):1567.
- [25] Chang S G, Yu Bin, Vetterli M. Adaptive wavelet thresholding for image denoising and compression [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(9):1532-1546.
- [26] Savitzky A, Golay M J E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures [J]. Analytical Chemistry, 1964, 36(8):1627-1639.
- [27] 朱亦鹏,贾东振,何秀凤. 基于 ICEEMDAN 的 GNSS 大坝变形监测去噪方法[J]. 测绘科学,2025,50(6):64-70. (Zhu Yipeng, Jia Dongzhen, He Xiufeng. Denoising method for GNSS dam deformation monitoring based on ICEEMDAN [J]. Science of Surveying and Mapping, 2025, 50(6):64-70. (in Chinese))
- [28] Li Xue, Gong Zibang, Bao Jinfeng, et al. Intelligent recognition of boulders in shield tunnels based on GPR dataset optimization using SE-EMD-WTD [J]. Journal of Applied Geophysics, 2025, 238:105717.

(下转第 50 页)

考虑堆石料流变模型参数空间变异性的面板堆石坝随机有限元分析

贺林林^{1,2}, 聂葳杰¹, 刘璇¹, 金勇¹, 梁越^{1,2}, 刘洋³

(1. 重庆交通大学河海学院; 2. 重庆交通大学国家内河航道整治工程技术研究中心; 3. 重庆科技大学土木与水利工程学院)

摘要:针对堆石料流变随机有限元分析中未充分考虑模型参数空间变异性的问题,以某面板堆石坝工程为例,建立了考虑堆石料流变效应的面板堆石坝确定性有限元数值计算模型,采用 Cholesky 协方差分解法生成流变模型参数随机场,借助 ABAQUS、MATLAB 和 Python 三方交互实现可以考虑材料参数空间变异性的非侵入式随机有限元交互计算,并利用蒙特卡罗法进行面板堆石坝应力变形响应指标的统计分析。结果表明:相比于基于单一确定性材料参数的坝体有限元分析,考虑流变特性的随机有限元分析得到的应力和变形值偏于安全,各项指标极值差异在 2%~6% 之间,超标概率均超过 50%;采用考虑堆石料流变模型参数空间变异性的随机有限元分析方法更符合工程实际,可以提高面板堆石坝变形预测的可靠性。

关键词:面板堆石坝;堆石料;流变模型;参数空间变异性;随机有限元法
中图分类号:TV641.4⁺3 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2026)05-0042-09

Stochastic finite element analysis of concrete-faced rockfill dam considering spatial variability of rockfill rheological model parameters//He Linlin^{1,2}, Nie Weijie¹, Liu Xuan¹, Jin Yong¹, Liang Yue^{1,2}, Liu Yang³(1. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University; 2. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University; 3. School of Civil and Hydraulic Engineering, Chongqing University of Science and Technology)

Abstract: To address the insufficient consideration of spatial variability of rockfill rheological model parameters in stochastic finite element analysis, taking an actual concrete-faced rockfill dam (CFRD) project as an example, a deterministic finite element model considering the rheological effects of rockfill materials was established. The Cholesky covariance decomposition method was employed to generate random fields of rheological model parameters. Through the integrated interaction of ABAQUS, MATLAB, and Python, a non-intrusive stochastic finite element calculation accounting for the spatial variability of material parameters was achieved. The Monte Carlo method was then used to perform statistical analyses of the stress and deformation responses of the CFRD. The results show that, compared with the finite element analysis based on a single set of deterministic material parameters, the stochastic finite element analysis considering rheological properties yields more conservative stress and deformation estimates. The differences in the extreme values of various indicators range from 2% to 6%, and the exceedance probabilities for all indicators are all greater than 50%. The proposed stochastic finite element method incorporating the spatial variability of rockfill rheological model parameters is more consistent with actual engineering conditions and can improve the reliability of deformation predictions for CFRDs.

Key words: concrete-faced rockfill dam; rockfill material; rheological model; parameter spatial variability; stochastic finite element method

随着面板堆石坝坝高提升、填筑分区增多和堆石料复杂性增强,面板堆石坝变形时空分布与演化特性呈现显著的非线性与不确定性,因此,面板堆石坝变形分析与控制在设计施工与运行维护中至关重要。此外,在荷载长期作用下,堆石材料由于颗粒破碎、重排、颗粒强度劣化等原因,会发生持续时间较长的流变变形,这种变形使坝体的应力和变形进一步发生显著变化,存在较大安全隐患。孔维耀等^[1]

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52379097);重庆市自然科学基金创新发展联合基金重点项目(CSTB2024NSCQ-LZX0114);重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2023NSCQ-MSX0873)

作者简介:贺林林(1983—),女,副教授,博士,主要从事港口海岸及近海工程结构设计理论与计算方法研究。E-mail:helinl@126.com

通信作者:刘洋(1982—),男,正高级工程师,博士,主要从事水工结构设计、计算及健康诊断研究。E-mail:liuyang99132@163.com

基于原位观测资料对公伯峡面板堆石坝沉降值进行分析,发现流变引起的最大沉降值达 210 mm,约为坝高的 0.16%,流变特性显著。邴能惠^[2]通过天生桥一级面板堆石坝位移实测数据分析得出,该坝体在施工期和运行期的变形量均较大,持续时间较长,堆石体的流变变形是面板顶部与垫层脱空并出现大量裂缝的重要原因。张丙印等^[3]通过实测数据反演得到流变模型参数,并计算得到不考虑堆石体流变变形特性时坝体最大沉降量与原型观测的最大沉降量相差 1.5 m,而考虑堆石体流变变形特性时计算结果与原型观测结果符合较好,说明流变变形对坝体沉降具有显著影响。

堆石体的流变变形是公认的导致坝体后期变形较大的主要原因之一^[4-5]。目前,堆石坝流变变形的预测方法主要有两类:一是利用现场变形观测数据,通过曲线拟合方法预测流变变形;二是建立堆石料流变模型预测流变变形。由于堆石体的实际物理力学参数在空间上往往存在一定的差异性和不确定性^[6-7],而传统有限元分析假定堆石料本构模型参数均质化,忽略了材料参数的空间变异性的影响,导致变形预测结果与实际观测值存在一定的偏差^[3,8]。随机有限元结合了传统有限元分析的精确性与自身随机分析的全面性,能够在考虑材料参数空间变异性的基础上,对堆石坝的结构变形响应进行更为准确的预测^[9-10]。已有研究表明堆石料材料参数在空间分布上存在不确定性,并采用随机有限元法研究材料参数空间变异性对坝体应力变形的影响。例如:朱晟等^[11]基于空间随机场理论,开展了两河口心墙堆石坝级配模型参数的空间变异性研究,结果表明考虑级配参数空间变异性的随机有限元计算结果相比于确定性有限元计算结果均不同程度地增大;Chi 等^[12]基于观音岩心墙堆石坝填筑期的现场干密度监测数据及室内三轴试验结果,建立了干密度与邓肯-张 $E-B$ 模型参数相关的随机场模型,研究表明考虑参数空间变异性的有限元分析结果与反演模拟结果更为一致,有助于提高大坝变形计算的准确性;白国炜等^[13]基于随机场理论,构建了糯扎渡心墙堆石坝的材料参数空间变异性模型,并进行了静、动力随机有限元分析,结果表明施工质量较高的大坝,竣工期最大沉降和蓄水期坝顶最大变形倾度的标准差和超标概率较小;蔡新合等^[14]基于渗流-流变耦合模型对覆盖层地基进行了随机有限元分析,进而讨论了参数空间变异性对面板堆石坝长期变形的影响。

以上研究证明了随机场理论在变形分析中的可行性及合理性,但现有考虑材料物理特性与模型参

数空间变异性的随机有限元分析多是针对堆石坝结构动力响应、坝体沉降等方面的研究,针对堆石料流变模型参数空间变异性的堆石坝流变变形预测研究相对较少,多数没有全面考虑参数空间变异性的影响。鉴于此,本文在已有研究的基础上,基于正交试验法对流变模型参数进行敏感性分析,采用协方差分解法生成模型参数随机场,通过 ABAQUS、MATLAB、Python 三方交互实现可以考虑材料参数空间变异性的非侵入式随机有限元交互计算,并利用蒙特卡罗法进行面板堆石坝位移响应指标的统计分析,系统考虑材料流变模型参数空间变异性对面板堆石坝的影响,以提高变形预测的合理性,为面板堆石坝确定性结构响应安全评价体系的建立提供参考。

1 随机有限元分析方法

本文所采用的非侵入式随机有限元分析方法,其核心思想是将传统确定性有限元分析与随机分析过程相分离,在确定的相关距离、自相关函数及变异系数下,采用协方差矩阵分解法得到堆石料参数随机场,然后将需要考虑空间变异性的参数映射到面板堆石坝传统确定性有限元模型中,在简化计算量和提高计算效率的同时可以获得可靠的数值仿真结果,实现传统有限元分析精确性与随机分析全面性的结合。

1.1 模型参数随机场的生成

在随机有限元分析中,确定单元网格的材料参数是实现随机有限元分析的关键步骤,综合考虑相关性与随机性,是实现面板堆石坝材料参数空间随机场合理构建的前提。鉴于对数正态随机场在模拟正值模型参数方面的优势,本文将筑坝堆石料材料参数均拟定为服从对数正态分布的随机变量^[15-16]。对数正态随机场可通过协方差矩阵分解法来模拟,具体步骤如下:

步骤 1 令随机场单元与有限元单元一致,将模型划分为 n_e 个单元,根据有限元计算网格单元坐标,利用 MATLAB 计算各单元中心点坐标 (x_i, y_i, z_i) ,其中 i 为有限元单元编号, $i=1, 2, \dots, n_e$ 。

步骤 2 采用拉丁超立方样本构成独立标准正态随机样本矩阵 $\mathbf{A}$;经过 n 次随机抽样(n 为随机模拟次数),可以得到 m 个列向量。

步骤 3 对标准正态空间等效互相关系数矩阵 $\mathbf{L}_1 \mathbf{L}_1^T = \mathbf{R}_0$ 进行 Cholesky 分解,由 $\mathbf{L}_1 \mathbf{L}_1^T = \mathbf{R}_0$ 得到三角矩阵 $\mathbf{L}_1$,与样本矩阵 $\mathbf{A}$ 相乘,可得相关标准高斯随机场 $\mathbf{H}_0$:

$$\mathbf{H}_0 = \mathbf{L}_1 \mathbf{A} \tag{1}$$

步骤4 通过等概率变换方法将 H_D 转换为相关非高斯随机场 H_i :

$$H_i = G_i^{-1}(\Phi(H_D)) \tag{2}$$

式中: $G_i^{-1}(\cdot)$ 为非高斯分布边缘累积分布的逆函数; $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布累积分布函数; 下标 i 为正态变量。对 H_D 取指数, 便可得到对数正态随机场 H_{Di} :

$$H_{Di} = L_i A L_i^T \tag{3}$$

$$\sigma_{lni} = \sqrt{\ln(1 + (\sigma_i/\mu_i)^2)} \tag{4}$$

$$\mu_{lni} = \ln\mu_i - \sigma_{lni}^2/2 \tag{5}$$

式中: μ_i 为正态变量 i 的均值; σ_i 为正态变量 i 的标准差; μ_{lni} 为对数正态变量 lni 的均值; σ_{lni} 为对数正态变量 lni 的标准差。

步骤5 以上过程实现了一次对数正态随机场的建立, 对于步骤2中的 m 次随机抽样结果, 将步骤3和步骤4进行 m 次重复, 即实现了对数正态随机场的 m 次模拟与建立。

1.2 三方交互随机有限元的实现方法

基于 ABAQUS、MATLAB 和 Python 三方交互, 根据随机场协方差分析方法理论, 可实现随机有限元分析。三方交互实现的原理为采用 MATLAB 脚本语言和 Python 脚本语言编制脚本生成堆石料流变模型参数空间变异性随机场, 将其作为材料参数赋值给有限元软件中的计算模型, 进而开展随机有限元数值模拟并完成蒙特卡罗模拟计算。

基于 ABAQUS、MATLAB 和 Python 三方交互实现随机有限元模拟的步骤如下: ①采用 Python 脚本语言在 ABAQUS 中获取面板堆石坝模型堆石料网格和节点信息, 输出模型 inp 文件; ②采用 MATLAB 语言编制的随机场模拟程序, 根据网格和节点信息、相关距离、标准差和相关函数生成随机场向量; ③通过修改 inp 文件关键字, 将随机场向量作为材料参数映射到 ABAQUS 的有限元单元; ④由 MATLAB 批量修改 inp 文件, 采用 Python 脚本在 ABAQUS 中批量提交计算 inp 文件, 并提取计算结果。随机有限元计算流程见图1。

1.3 蒙特卡罗模拟方法

对于很多实际工程项目来说, 蒙特卡罗模拟需要进行大量的随机采样, 以得到较为精确的随机结果, 因此计算成本比较高。为节省随机有限元模拟时间, 提高计算效率, 在实际蒙特卡罗模拟过程中, 通常选取能够表征结构响应特点的指标, 并将指标的滑动平均值或滑动标准差随模拟次数的变化曲线达到“平稳”之后的模拟次数作为蒙特卡罗随机模拟次数。

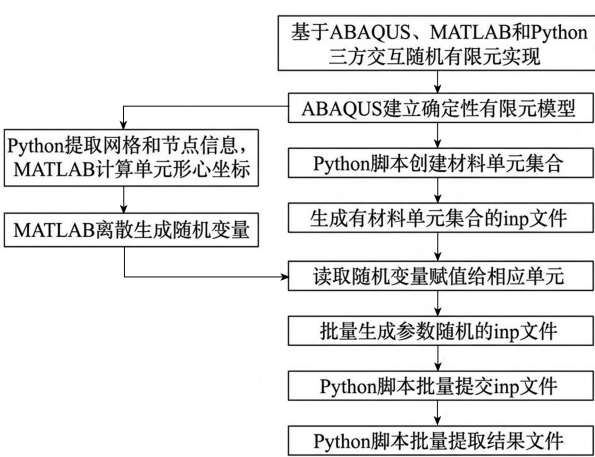


图1 随机有限元计算流程

1.4 分布方式检验与超标概率分析

正态概率分布图是由标准正态分布的分位数为横坐标、样本值为纵坐标的散点图。通过比较测试样本数据的分位数与已知分布线来检验数据的分布是否服从正态分布。若正态概率分布图中的数据点近似沿一条直线分布, 则说明测试样本数据满足正态分布, 否则不满足正态分布。

将随机场计算得到的应力变形结果与确定性参数计算得到的结果进行比较, 定义随机参数作用下堆石坝流变变形响应的概率(P)^[9,14]为坝体流变计算中参数最大值未超过设计值的计算次数与有限元模拟次数的比值。

2 有限元分析模型的建立

2.1 依托工程

本文依托某一典型面板堆石坝工程开展考虑堆石料流变模型参数空间变异性的面板堆石坝随机有限元分析。该工程等级为 I 等大(1)型, 其挡水建筑物为混凝土面板堆石坝, 坝顶高程为 553.00 m, 坝顶宽度为 10 m, 最大坝高 73 m, 坝顶长度 150 m, 坝体分区示意图见图2。

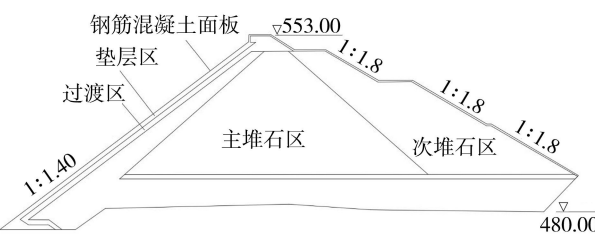


图2 某面板堆石坝典型剖面示意图(单位:m)

为提高建模效率, 本文基于该面板堆石坝的实际工程特征进行合理简化, 并建立相应的数值模型, 计算中不考虑基础的影响, 将坝基面上节点3个方向均进行约束, 坝体及左右两岸端顺河向垂直断面节点取坝轴线向约束。坝体整体取10个横断面, 网格节

点总数共 19024 个,单元总数 18428 个,其中混凝土面板单元 1748 个,单元类型采用六面体八节点缩减积分单元(C3D8R);堆石体单元 16680 个,单元类型采用六面体八节点单元(C3D8),如图 3 所示。面板与坝体之间采用 Goodman 单元连接^[17-18]。采用生死单元法^[10,19]模拟大坝填筑施工过程,逐级施加荷载,坝体变形计算分为 18 个荷载步。具体加载过程如下:荷载步 1~13 施加堆石料自重荷载,荷载步 14 施加堆石坝面板的自重荷载;荷载步 15~17 水库蓄水至高程 537.00 m(正常高水位),荷载步 18 计算流变变形。

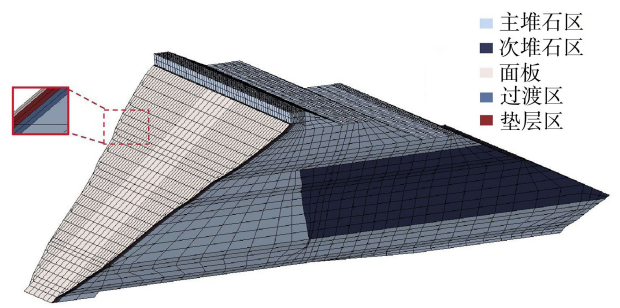


图 3 面板堆石坝网格划分

计算时,堆石料的本构模型采用邓肯-张 $E-B$ 模型,垫层区、过渡区、主堆石区和次堆石区模型参数取值如表 1 所示。混凝土面板按线弹性材料考虑,弹性模量 $E=15\text{ GPa}$,泊松比 $\nu=0.18$,密度 $\rho=2.4\text{ g/cm}^3$ 。

表 1 坝体各分区邓肯-张 $E-B$ 模型参数

分区	$\rho/(g/cm^3)$	$\varphi/(^\circ)$	c/kPa	R_f	K
垫层区	2.20	48.4	0	0.88	1496
过渡区	2.14	52.3	0	0.88	1429
主堆石区	2.12	43.1	0	0.78	1000
次堆石区	2.09	38.0	0	0.63	556

分区	n	K_b	m	$\Delta\varphi$	K_{ur}
垫层区	0.29	412	0.21	5.2	2995
过渡区	0.29	433	0.23	8.9	2860
主堆石区	0.43	355	0.34	4.7	1975
次堆石区	0.36	240	0.20	9.1	550

注: φ 为内摩擦角; c 为黏聚力; R_f 为破坏比; K 为切线模量参数; n 为切线模量指数; K_b 为体积模量参数; m 为体积模量指数; $\Delta\varphi$ 为摩擦角降低值; K_{ur} 为卸载再加载模量。

2.2 七参数流变模型

工程领域常用的流变模型包括三参数模型、双屈服面模型、九参数幂级数模型和七参数模型等^[20]。其中,改进的七参数模型通过同时考虑围压和剪应力效应,能更准确地模拟流变增量随时间递减的特性,且该模型理论完善、参数相对较少,在工程实践中应用广泛。本文采用七参数流变模型考虑堆石料流变效应。七参数流变模型将流变速率分解为体积流变速率 $\dot{\varepsilon}_v$ 和剪切变形速率 $\dot{\varepsilon}_s$:

$$\dot{\varepsilon}_v = \alpha \dot{\varepsilon}_{vf} (1 - \dot{\varepsilon}_{vf} / \dot{\varepsilon}_{sf}) \tag{6}$$

$$\dot{\varepsilon}_s = \alpha \dot{\varepsilon}_{sf} (1 - \dot{\varepsilon}_{sf} / \dot{\varepsilon}_{sf}) \tag{7}$$

式中: $\dot{\varepsilon}_{vf}$ 、 $\dot{\varepsilon}_{sf}$ 分别为 t 时刻已经累计的体积流变和剪切流变; $\dot{\varepsilon}_{vf}$ 为最终体积流变; $\dot{\varepsilon}_{sf}$ 为最终剪切流变; α 为堆石料第一天产生的流变应变占最终总流变应变的比例。为便于分析,对垫层区、过渡区和次堆石区 3 个材料分区的七参数流变模型参数值与次堆石区料取相同值^[21]。在参考同类工程基础上,根据有关试验结果^[20] 确定七参数流变模型参数取值如表 2 所示。

表 2 坝体各分区七参数流变模型参数取值

分区	$\alpha/10^{-3}$	$b/10^{-4}$	$c/10^{-4}$	$d/10^{-3}$	m_1	m_2	m_3
主堆石区	6	4	2.0	3.5	0.76	0.63	0.54
次堆石区	6	4	3.8	4.0	0.66	0.56	0.60

注: b 为体积流变参数; c 为剪切流变参数; d 为应力水平参数; m_1 为体积时间参数; m_2 为剪切时间参数; m_3 为后期衰减参数。

3 随机有限元实现及验证

3.1 基于正交试验的流变模型参数敏感性分析

七参数流变模型中 7 个参数对面板堆石坝应力变形均具有一定的影响^[22]。在进行流变模型计算分析时,基于有限元模型和正交试验法对流变模型参数进行了正交试验,对坝体竖向位移极值 s_w 、水平位移极值 s_v 和轴向位移极值 s_u 进行敏感性分析,正交试验因素水平如表 3 所示。通过极差分析法对面板堆石坝长期变形后的位移极值进行分析,结果见图 4。由图 4 可知, b 、 m_1 、 m_2 对位移的极差值较大,说明三者对坝体 s_w 、 s_v 、 s_u 影响较显著,而 α 、 c 、 d 、 m_3 对位移的影响较小,故可将 b 、 m_1 、 m_2 作为考虑随机场模拟参数空间变异性分析的重点。

表 3 正交试验因素水平

因素水平	$\alpha/10^{-3}$	$b/10^{-4}$	$c/10^{-4}$	$d/10^{-3}$	m_1	m_2	m_3
1	5.4	3.6	1.8	3.15	0.684	0.567	0.486
2	6.0	4.0	2.0	3.50	0.760	0.630	0.540
3	6.6	4.4	2.2	3.85	0.836	0.693	0.594

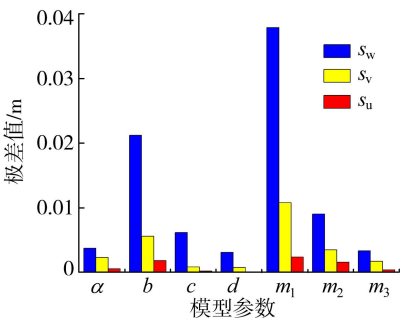


图 4 模型敏感性分析结果

3.2 随机场参数与数字特征确定

随机场理论主要通过土体参数的均值、方差、自相关函数以及自相关距离来描述岩土体在空间中的分布情况。针对参数随机场自相关距离,文献[23-

24]统计了土体参数波动范围的取值情况,堆石坝各分区采用的材料在物理力学性质上虽存在一定差异,但其整体差异较小。根据文献[25-27],堆石坝水平自相关距离一般设置为30~150 m,竖向自相关距离一般为水平距离的1/3~1/20。综合考虑,拟定本文堆石料竖向自相关距离为10 m、水平自相关距离为40 m。

针对参数随机场变异系数,根据文献[28]对堆石坝流变参数的反演分析结果,主堆石料的流变参数变异系数小于0.25,而次堆石料的小于0.35。考虑到主堆石区为坝体变形的主要区域,且其设计和施工要求较为严格,参考已有文献取值情况,设置该区域的流变参数变异系数为0.1,其余分区设为0.2。主、次堆石区料随机参数见表4。

表4 主、次堆石区料随机参数

材料	m_1 均值	b 均值	m_2 均值	变异系数
主堆石区料	0.76	0.0004	0.63	0.1
次堆石区料	0.66	0.0004	0.56	0.2

材料	竖向自相关 距离/m	水平自相关 距离/m	分布类型
主堆石区料	10	40	对数正态分布
次堆石区料	10	40	对数正态分布

在随机场模型中,一般采用理论自相关函数来描述堆石料同一分区中两个不同空间位置处参数之间的自相关性。由于高斯型自相关函数具有较好的平稳性^[16],本文选用高斯型自相关函数进行表征。

3.3 面板堆石坝随机有限元应力变形分析

以参数 m_1 为例,对堆石料流变模型参数随机场进行随机模拟,一次随机模拟得到的随机参数场如图5所示,可见,本文流变模型参数随机场基本符

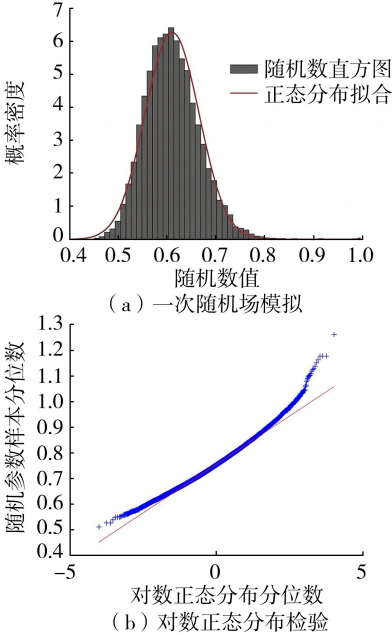


图5 随机参数 m_1 概率统计规律

合对数正态分布,表明计算结果可靠。

图6为随机参数一次典型实现结果,图7为随机有限元计算得到的考虑堆石料流变模型参数随坝体标准断面应力变形的一次抽样计算结果,可见考虑堆石料流变模型参数空间变异性后面板堆石坝的应力变形计算结果仍符合一般规律,表明了计算结果的可靠性。

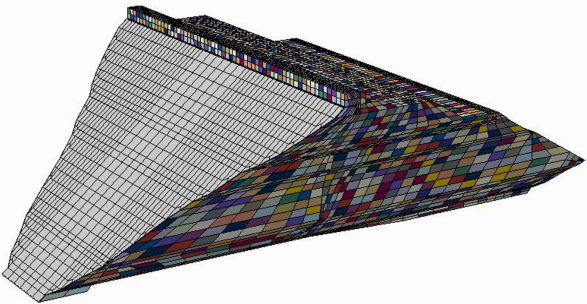


图6 随机参数一次典型实现结果

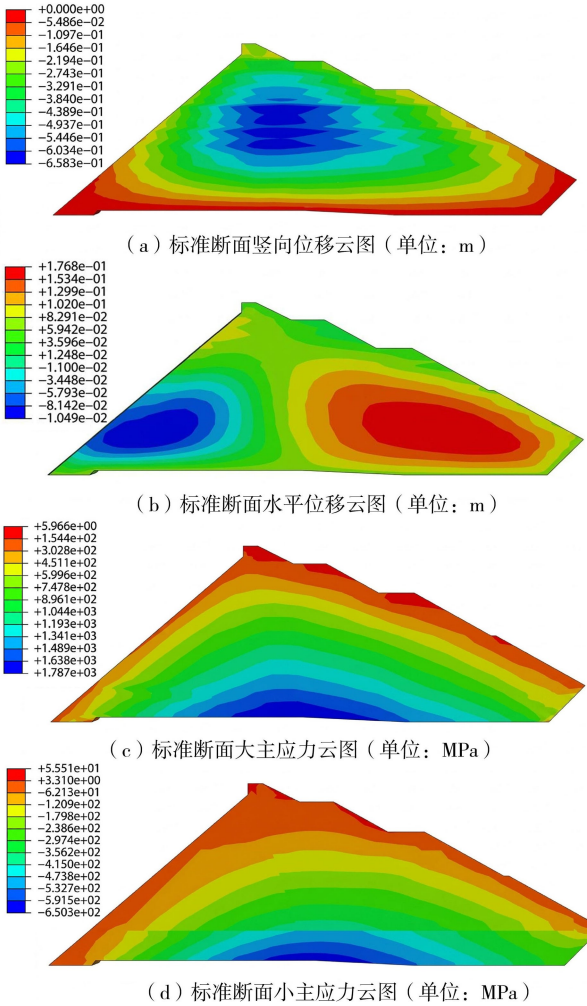


图7 随机有限元一次抽样计算结果

3.4 蒙特卡罗模拟次数的确定

蒙特卡罗方法的精度主要依赖于模拟次数,模拟次数的多少将直接决定模拟结果的真实性和过多的模拟次数会增加计算成本,因此需进行计算结

果收敛性检验。以参数 m_1 、 b 为例,将坝体竖向位移极值作为坝体响应值,对响应结果进行平均处理,绘制出平均响应值随模拟次数的变化曲线如图 8 所示。

由图 8 可见,随着模拟次数的增加坝体位移响应值逐渐趋于稳定,并且当模拟次数小于 100 次时,竖向位移极值的均值变化幅度较大,当模拟次数超过 100 次并逐渐增加时,坝体响应趋于稳定。因此,本文选定 200 次模拟计算作为计算标准,对不同工况进行 200 次随机场计算,以保证所得到的结果具有足够的准确性和可靠性。

4 有限元分析结果

基于上述 ABAQUS、MATLAB 和 Python 三方交互开展考虑堆石料流变模型参数空间变异性的面板堆石坝应力变形分析,评估流变模型参数空间变异性对坝体应力变形的影响情况。

对面板堆石坝位移极值敏感性较高的流变模型参数 m_1 、 b 、 m_2 同时进行随机有限元分析,结果如

图 9 和图 10 所示,图 10 中虚线为均一参数确定性有限元分析的结果。

由图 9 可知,各响应值的正态概率分布图上的点可以较好地用直线拟合,满足正态分布。由此进一步表明堆石料流变模型参数满足对数正态分布时,坝体应力变形极值分布基本满足正态分布,表明上述分析结果合理可靠。

根据各坝体响应值均值表征的随机有限元计算结果,将图 10 中考虑堆石料流变模型参数空间变异性的面板堆石坝长期变形计算结果统计于表 5。由表 5 可知,考虑堆石料流变模型参数空间变异性的随机有限元计算得到的面板堆石坝响应极值均比确定性有限元计算结果略大。根据文献[29]统计的已建面板堆石坝监测数据,同级别坝高的面板堆石坝施工后坝体最大沉降范围为 0.24~0.69 m,本文随机有限元计算结果变化范围在此区间之内,并与同级别坝高的计算结果基本相符^[30-31]。其中,竖向位移极值、水平位移极值、大主应力极值和小主应力极值的极值差异分别为 5.16%、3.86%、2.74%、

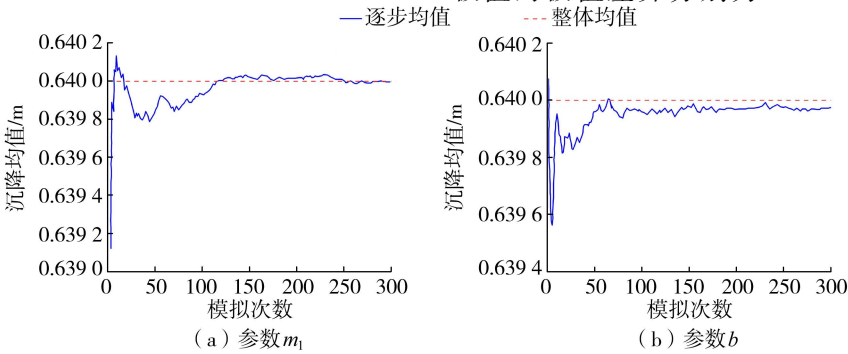


图 8 竖向位移极值的均值随模拟次数的变化

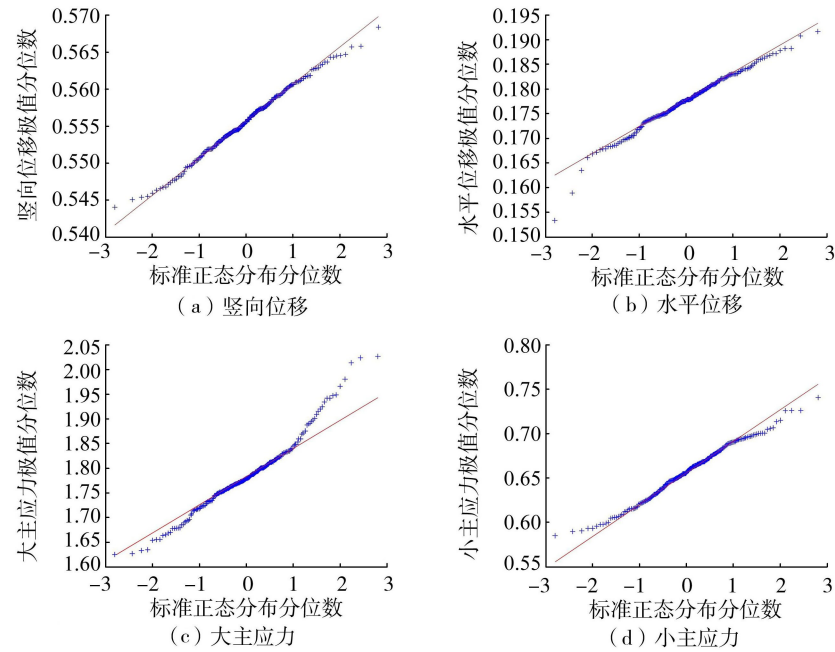


图 9 考虑堆石料流变模型参数空间变异性的面板堆石坝应力变形极值正态概率分布检验结果

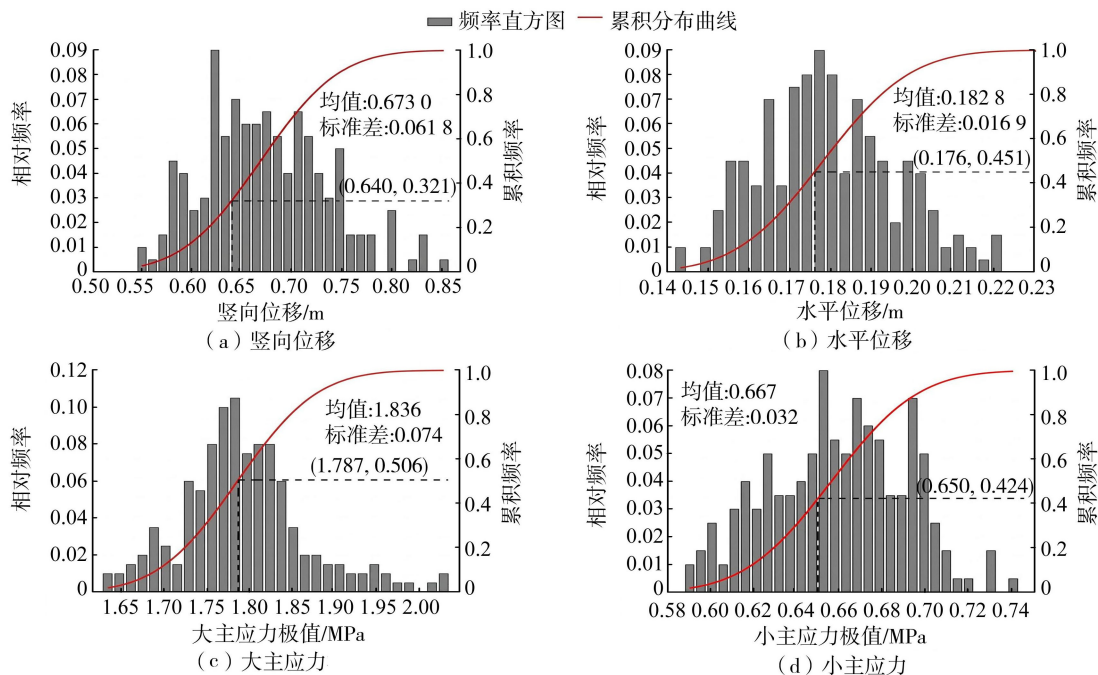


图 10 考虑堆石料流变模型参数空间变异性的面板堆石坝应力变形极值频率分布

表 5 考虑堆石料流变模型参数空间变异性的随机有限元计算结果

指标	极值差异/%	超标概率/%
竖向位移极值	5.16	67.9
水平位移极值	3.86	54.9
大主应力极值	2.74	50.4
小主应力极值	2.61	57.6

2.61%。与忽略堆石料流变模型参数空间变异性的确定性有限元相比,随机有限元的应力变形结果偏大在 2%~6%之间,计算结果偏于安全,提高了坝体的安全性。从超标概率计算结果看,若设计阶段忽略这种材料不确定性对结构进行设计分析,则有 67.9%的可能性会低估坝体竖向位移极值,54.9%的可能性会低估上下游最大水平位移,50.4%的可能性会低估坝体大主应力最大值,57.6%的可能性会低估坝体小主应力最大值。由此可见,考虑堆石料流变模型参数空间变异性的变形分析可以提高坝体应力变形预测的可靠性,有效降低因忽略材料不确定性而导致的预测偏差,对保障面板堆石坝的长期稳定性具有重要意义。

5 结 论

a. 依托确定性面板堆石坝三维有限元数值计算模型,通过正交试验参数敏感性分析,从七参数流变模型中筛选出了对坝体三向位移影响程度较高的 3 个模型参数,分别为 m_1 、 b 、 m_2 。

b. 对考虑堆石料流变及参数空间变异性的面板堆石坝模型进行随机有限元计算,得到流变模型参数随机场基本符合对数正态分布;蒙特卡罗统计

分析结果表明,面板堆石坝随机有限元计算得到的应力变形结果符合一般变形规律,当随机模拟至 200 次时,坝体各响应值达到统计稳定。

c. 考虑堆石料流变模型参数空间变异性的随机有限元计算结果与确定性有限元计算结果相比,堆石坝标准断面的竖向位移极值差异为 5.16%,水平位移极值差异为 3.86%,大主应力极值差异为 2.74%,小主应力极值差异为 2.61%,且各指标超标概率均超过 50%。由此可见,随机有限元计算结果偏于安全,考虑堆石料流变模型参数的空间变异性可提高变形预测的可靠性。

参考文献:

- [1] 孔维耀,王子健,王玉洁,等. 公伯峡面板堆石坝堆石料流变特性反演分析[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(5): 26-30. (Kong Weiyao, Wang Zijian, Wang Yujie, et al. Back analysis of rheological deformation characteristics of Gongboxia concrete-faced Rockfill Dam[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(5): 26-30. (in Chinese))
- [2] 郇能惠. 高混凝土面板堆石坝设计理念探讨[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8): 1143-1150. (Li Nenghui. New concept of design for high concrete face rockfill dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(8): 1143-1150. (in Chinese))
- [3] 张丙印,师瑞锋. 流变变形对高面板堆石坝面板脱空的影响分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(8): 1179-1184. (Zhang Bingyin, Shi Ruifeng. Influence of creeping on separation between concrete slab and cushion layer in high concrete face rock-fill dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(8): 1179-1184.)

- 2004,25(8):1179-1184. (in Chinese))
- [4] 迟世春,王腾腾,贾宇峰.堆石料颗粒的延迟破碎时间研究[J].岩土工程学报,2024,46(12):2602-2609. (Chi Shichun, Wang Tengting, Jia Yufeng. Delayed crushing time for particles of rockfill materials [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(12):2602-2609. (in Chinese))
- [5] 温立峰,李锋,吴莉.渗流-流变耦合作用下深覆盖层面板堆石坝性状演化规律[J].西北水电,2023(5):7-14. (Wen Lifeng, Li Feng, Wu Li. Seepage-creep coupling analysis of concrete face rockfill dam built on alluvium foundation[J]. Northwest Hydropower, 2023(5):7-14. (in Chinese))
- [6] Feng Wenquan, Chi Shichun, Jia Yufeng. Random finite element analysis of a clay-core-wall rockfill dam considering three-dimensional conditional random fields of soil parameters [J]. Computers and Geotechnics, 2023, 159:105437.
- [7] Chen Hui, Liu Donghai. Stochastic finite element analysis of rockfill dam considering spatial variability of dam material porosity[J]. Engineering Computations, 2019, 36(9):2929-2959.
- [8] 章荣军,于同生,郑俊杰.材料参数空间变异性对水泥固化淤泥填筑路堤稳定性影响研究[J].岩土工程学报,2018,40(11):2078-2086. (Zhang Rongjun, Yu Tongsheng, Zheng Junjie. Influences of spatial variability of material properties on stability of embankment filled with cement-stabilized mud [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(11):2078-2086. (in Chinese))
- [9] 郭晴,刘东海,陈辉.空间差异性下沥青混凝土心墙坝应力与变形的随机有限元分析[J].长江科学院院报,2019,36(11):140-146. (Guo Qing, Liu Donghai, Chen Hui. Stress and deformation of asphalt concrete core wall dam in consideration of spatial difference: stochastic finite element analysis [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(11):140-146. (in Chinese))
- [10] 胡长明,田明辉,朱武卫,等.考虑蠕变模型参数空间变异性的高贴坡变形预测[J].应用力学学报,2025,42(4):850-859. (Hu Changming, Tian Minghui, Zhu Wuwei, et al. Deformation prediction of high sticking slope considering the spatial variability of creep model parameters [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2025, 42(4):850-859. (in Chinese))
- [11] 朱晟,卢知是.考虑级配空间随机特性的堆石坝变形应力分析[J].河海大学学报(自然科学版),2021,49(6):543-549. (Zhu Sheng, Lu Zhishi. Deformation and stress analysis of rockfill dams considering spatial randomness of gradation parameter [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(6):543-549. (in Chinese))
- [12] Chi Shichun, Feng Wenquan, Jia Yufeng, et al. Application of the soil parameter random field in the 3D random finite element analysis of Guanyinyan composite dam [J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 17:e01329.
- [13] 白国伟,贾宇峰,相彪.基于随机场理论的糯扎渡大坝随机有限元分析[J].人民长江,2025,56(7):174-180. (Bai Guowei, Jia Yufeng, Xiang Biao. Stochastic finite element analysis on Nuozhadu core-wall rockfill dam based on random field theory [J]. Yangtze River, 2025, 56(7):174-180. (in Chinese))
- [14] 蔡新合,周恒,黎康平,等.覆盖层地基参数空间变异性对面板堆石坝长期变形的影响[J].水力发电,2025,51(10):22-30. (Cai Xinhe, Zhou Heng, Li Kangping, et al. Influence of spatial variability of overburden foundation parameters on long-term deformation of face rockfill dams [J]. Water Power, 2025, 51(10):22-30. (in Chinese))
- [15] 陆雪妮,朱晟.考虑级配参数空间变异性的堆石坝随机有限元分析[J].水力发电,2022,48(6):81-89. (Lu Xueni, Zhu Sheng. Stochastic finite element analysis of rockfill dam considering spatial variability of gradation parameters [J]. Water Power, 2022, 48(6):81-89. (in Chinese))
- [16] 袁艳玲,郭琴琴,周正军,等.考虑参数相关的高心墙堆石坝材料参数反分析[J].岩土力学,2017,38(增刊1):463-470. (Yuan Yanling, Guo Qinqin, Zhou Zhengjun, et al. Back analysis of material parameters of high core rockfill dam considering parameters correlation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(S1):463-470. (in Chinese))
- [17] 杨鸽,何展国,甘龙厚,等.考虑蠕变及水力耦合效应的高面板坝系统可靠度[J].同济大学学报(自然科学版),2025,53(8):1218-1228. (Yang Ge, He Zhanguo, Gan Longhou, et al. System reliability analysis of a high concrete-faced rockfill dam considering creep effects and hydro-mechanical coupling [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2025, 53(8):1218-1228. (in Chinese))
- [18] 朱安龙,张胤,廖洁,等.大角度折线型高面板堆石坝坝体和面板的应力与变形规律[J].水利水电科技进展,2020,40(1):48-55. (Zhu Anlong, Zhang Yin, Liao Jie, et al. Research on stress and deformation law of dam body and face slab of high concrete face rockfill dam with large angle broken line [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(1):48-55. (in Chinese))
- [19] 刘东海,张钊,陈辉.填筑形象对土石坝结构性态影响的精细有限元分析[J].河海大学学报(自然科学版),2019,47(6):514-522. (Liu Donghai, Zhang Zhao, Chen Hui. Precise finite element analysis on influence of construction appearances to earth-rock dam structural behaviors [J]. Journal of Hohai University (Natural

- Sciences), 2019, 47(6): 514-522. (in Chinese))
- [20] 王瑞骏, 李阳, 丁占峰. 堆石料流变模型参数敏感性分析的正交试验法[J]. 水利学报, 2016, 47(2): 245-252. (Wang Ruijun, Li Yang, Ding Zhanfeng. The sensitivity analysis of seven-parameter rockfill rheological model based on the orthogonal test method [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(2): 245-252. (in Chinese))
- [21] 陈生水, 阎志坤, 傅中志, 等. 特高面板砂砾石坝结构安全性论证[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(11): 1949-1958. (Chen Shengshui, Yan Zhikun, Fu Zhongzhi, et al. Evaluation of safety performance of extremely high slab-faced gravel dams [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(11): 1949-1958. (in Chinese))
- [22] 李国英, 米占宽, 傅华, 等. 混凝土面板堆石坝堆石料流变特性试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1712-1716. (Li Guoying, Mi Zhankuan, Fu Hua, et al. Experimental studies on rheological behaviors for rockfills in concrete faced rockfill dam [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(11): 1712-1716. (in Chinese))
- [23] 蒋水华, 李典庆, 周创兵, 等. 考虑自相关函数影响的边坡可靠度分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(3): 508-518. (Jiang Shuihua, Li Dianqing, Zhou Chuangbing, et al. Slope reliability analysis considering effect of autocorrelation functions [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(3): 508-518. (in Chinese))
- [24] Tan Xiaohui, Wang Xue, Khoshnevisan S, et al. Seepage analysis of earth dams considering spatial variability of hydraulic parameters [J]. Engineering Geology, 2017, 228: 260-269.
- [25] Zhu Bin, Pei Huaifu, Yang Qing. Reliability analysis of submarine slope considering the spatial variability of the sediment strength using random fields [J]. Applied Ocean Research, 2019, 86: 340-350.
- [26] 李占超, 侯会静. 大坝安全监控指标理论及方法分析[J]. 水力发电, 2010, 36(5): 64-67. (Li Zhanchao, Hou Huijing. Theory and methods on dam safety monitoring indexes [J]. Water Power, 2010, 36(5): 64-67. (in Chinese))
- [27] Chen Jianyun, Liu Pengfei, Xu Qiang, et al. Seismic analysis of hardfill dams considering spatial variability of material parameters [J]. Engineering Structures, 2020, 211: 110439.
- [28] 马春辉. 基于离散元的堆石料宏细观参数智能反分析及其工程应用研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
- [29] 温立峰, 柴军瑞, 许增光, 等. 面板堆石坝性状的初步统计分析[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(7): 1312-1320. (Wen Lifeng, Chai Junrui, Xu Zengguang, et al. Preliminary statistical analysis of behavior of concrete face rockfill dams [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(7): 1312-1320. (in Chinese))
- [30] 谢晓华, 李国英. 成屏混凝土面板堆石坝应力变形分析[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(2): 243-246. (Xie Xiaohua, Li Guoying. Stress-deformation analysis of Chengping concrete-faced rockfill dam [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(2): 243-246. (in Chinese))
- [31] 朱纯祥, 梁林林, 唐国峰. 莲花混凝土面板堆石坝监测成果分析[J]. 水力发电, 2000(4): 49-52. (Zhu Chunxiang, Liang Linlin, Tang Guofeng. Analysis on the observation results of Lianhua concrete facing rockfill dam [J]. Water Power, 2000(4): 49-52. (in Chinese))
- (收稿日期: 2025-05-20 编辑: 熊水斌)
- +++++
- (上接第 41 页)
- [29] Li Chengjun, Wu Yacen, Lin Haijun, et al. ECG denoising method based on an improved VMD algorithm [J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(23): 22725-22733.
- [30] Xu Deming, Wang Yuan, Huang Jingqi, et al. Multi-step prediction model enhanced by adaptive denoising and encoder-decoder for shield machine cutterhead torque in complex conditions [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2025, 158: 106398.
- [31] 张宏瑞, 江超, 盛金保, 等. 基于 IJTIL-WELM 的混凝土坝变形自适应预测方法[J]. 水利水电工程学报, 2026(3): 128-137. (Zhang Hongrui, Jiang Chao, Sheng Jinbao, et al. Adaptive method for predicting concrete dam deformation based on IJTIL-WELM [J]. Hydro-Science and Engineering, 2026(3): 128-137. (in Chinese))
- [32] Zhu Qiannan, Chang Pengxia, Zhu Tian, et al. Daily streamflow interval predictions up to 30 days ahead based on multi-timescale nested strategy and multi-objective walrus optimizer [J]. Journal of Hydrology, 2025, 652: 132646.
- [33] Wang Shaowei, Gu Chongshi, Liu Yi, et al. Displacement observation data-based structural health monitoring of concrete dams: a state-of-art review [J]. Structures, 2024, 68: 107072.
- [34] 陈斯煜, 盛金保, 林潮宁, 等. 基于 OVMD 的大坝变形监测数据预处理方法[J]. 水利水电工程学报, 2025(3): 139-147. (Chen Siyu, Sheng Jinbao, Lin Chaoning, et al. A preprocessing method for dam deformation monitoring data based on OVMD [J]. Hydro-Science and Engineering, 2025(3): 139-147. (in Chinese))
- (收稿日期: 2025-06-17 编辑: 俞云利)

结合流域产流时空分布的径流智能模拟

管泽鉴, 郭玉雪, 许月萍, 陈思维

(浙江大学建筑工程学院)

摘要:针对当前径流智能模拟对水文物理过程考虑不足的问题,提出了结合流域产流时空分布的径流智能模拟方法,以浙江省永安溪流域为例,构建了以 SWAT 模型子流域 3 种逐日产流组分为输入的 tri-SWAT-Transformer 模型,并将该模型与 SWAT 模型等对照模型的径流模拟结果进行比较。结果表明:tri-SWAT-Transformer 模型的径流模拟改善效果最明显,率定期和验证期纳什效率系数分别为 0.95、0.89,较 SWAT 模型分别提升了 90.0%、107.0%;在高流量条件下,tri-SWAT-Transformer 模型的模拟效果最好,其纳什效率系数较 SWAT 模型提升了 200.0%,百分比偏差、均方根误差较 SWAT 模型分别降低了 89.6%、68.8%。通过产流组分与径流组分相关性分析解释了 tri-SWAT-Transformer 模型优于其他模型的原因,认为 tri-SWAT-Transformer 模型能通过 Transformer 的多头注意力机制,充分捕捉各类产流水文物理过程的时空分布特征,对产流信息时空分布特征利用程度均高于其他对照模型。

关键词:径流模拟;产流;SWAT 模型;Transformer 模型;永安溪流域

中图分类号:P338⁺.2

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2026)05-0051-07

Intelligent streamflow simulation incorporating spatiotemporal distribution of watershed runoff generation//Guan Zejian, Guo Yuxue, Xu Yueping, Chen Siwei(*College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University*)

Abstract: To address the insufficient consideration of hydrological physical processes in current intelligent streamflow simulation, an intelligent streamflow simulation method incorporating the spatiotemporal distribution of watershed runoff generation was proposed. Taking the Yong'anxi River Basin in Zhejiang Province as a case study, a tri-SWAT-Transformer model was developed using the three daily runoff generation components simulated by the SWAT model for each sub-basin as model inputs. The simulation performance of the proposed model was compared with that of the SWAT model and other comparative models. The results show that the tri-SWAT-Transformer model achieves the best streamflow simulation performance, with Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) values of 0.95 and 0.89 during the calibration and validation periods, representing improvements of 90.0% and 107.0%, respectively, over the SWAT model. Under high-flow conditions, the proposed model also performs best, with the NSE increased by 200.0%, and the percent bias and root mean square error reduced by 89.6% and 68.8%, respectively, compared with the SWAT model. Furthermore, correlation analysis between runoff generation components and streamflow components explains why the tri-SWAT-Transformer model outperforms the other models. The results indicate that the tri-SWAT-Transformer model can fully capture the spatiotemporal distribution characteristics of various runoff generation hydrological physical processes through the multi-head attention mechanism of Transformer, and makes better use of the spatiotemporal distribution of runoff generation information than other reference models.

Key words: streamflow simulation; runoff generation; SWAT model; Transformer model; the Yong'anxi River Basin

在气候变化与人类活动的影响下,我国接近 2/3 的国土面积面临洪涝灾害威胁,洪涝灾害发生的可能性和不确定性不断增加,径流的丰枯变化愈发明显,进而影响流域水资源调度和管理^[1-3]。作为水循环的重要组成部分,径流模拟精度直接关系到径流预报及水资源管理的科学性^[4]。流域水文模

型能够描述流域水循环及降雨径流形成过程,被广泛应用于径流模拟研究中^[5]。然而,其率定过程复杂,易受模型结构、参数及观测数据等不确定性因素的影响^[6]。

以机器学习与深度学习模型为代表的驱动模型凭借其强大的非线性拟合能力,在径流模拟领

域得到了广泛应用,提高了径流模拟的准确性^[7]。例如:岳兆新等^[8]提出了一种基于信息熵和改进极限学习机的中长期径流预测模型,并利用改进粒子群算法优化极限学习机参数,提升了模型预测性能;李菊等^[9]利用改进蜣螂优化(IDBO)和改进侏儒优化(IDMO)算法优化正则化极限学习机(RELM)的超参数,提出了基于小波包变换(WPT)的WPT-IDBO-RELM与WPT-IDMO-RELM模型,结果表明这两个模型具有预测精度高、计算规模小、实用价值高等特点;Liu等^[10]将Transformer模型与LSTM模型进行径流模拟结果对比,发现Transformer模型在处理大型数据集和捕获复杂分布方面具有潜在优势,但在处理小型数据集时存在局限。

然而,数据驱动模型仅关注输入与输出之间的复杂非线性关系,忽略了水文过程的物理机制。近年来,国内外众多学者将水文物理模型与数据驱动模型进行耦合,以改善水文模拟与预报效果。耦合方式主要分为两种:①数据驱动模型根据模拟预报误差校正水文物理模型结果,作为水文物理模型的后处理器^[11-12];②将水文物理模型生成的物理状态或通量数据作为输入,用于训练数据驱动模型,或直接替代水文物理模型中的某一模块^[13-14]。目前,有较多采用深度学习方法的径流模拟研究考虑了流域时空信息并取得了较好的模拟效果^[15],但对模型与流域水文过程物理一致性的分析仍相对不足。基于此,本文以浙江省永安溪流域为研究对象,提出了一种结合流域产流时空分布的径流智能模拟方法,构建以SWAT模型子流域3种产流组分为输入的tri-SWAT-Transformer模型,将该模型与SWAT模型、Transformer模型,以及以SWAT模型子流域逐日总产流量为输入的s-SWAT-Transformer模型的径流模拟结果进行比较,从特征注意力、相关性分析等角度对模型的物理一致性进行解释,并评估各模型模拟效果及相对SWAT模型的改进程度。

1 研究方法

1.1 SWAT模型

SWAT模型是由美国农业部农业研究服务局开发的一种分布式水文模型,能够模拟流域水文过程及产汇流机制,包含气候、水文、土地利用、河道汇流和管理措施等多个模块^[16]。由于具有明确的物理机制、完善的模型结构和较强的适应性,SWAT模型被广泛应用于径流模拟及水资源管理,是国际上应用最广泛的生态水文模型之一。

1.2 Transformer模型

Transformer模型是Vaswani等^[17]提出的一种基

于自注意力机制的神经网络。相较于传统循环神经网络(RNN)难以进行并行计算、卷积神经网络(CNN)长序列建模能力不足的劣势,Transformer采用编码器-解码器架构和多头自注意力机制,能够有效捕捉长序列不同位置间的时序依赖关系,在提升模型表达能力的同时提高了长序列处理效率。

1.3 SWAT-Transformer耦合模型

本文提出了一种兼顾流域水文物理过程时空分布特征的SWAT-Transformer耦合模型。该模型以SWAT产流模块模拟的子流域地表产流、壤中产流和地下产流等逐日产流组分作为Transformer模块输入,以流域出口逐日实测径流作为训练目标,利用Transformer替代SWAT汇流模块,实现流域出口逐日径流模拟。本文探讨了耦合模型输入对径流模拟结果的影响,构建了以子流域逐日3种产流组分为输入的tri-SWAT-Transformer模型,并与以子流域逐日总产流量为输入的s-SWAT-Transformer模型进行径流模拟结果比较。模型训练前,需要确认模型输入与输出的时滞,以保证输入与输出之间的物理联系与序列相关性。tri-SWAT-Transformer模型的创新点在于其输入维度的构造方式,相比只以单一总产流量为输入的s-SWAT-Transformer模型,tri-SWAT-Transformer模型对产流过程采用更细化的表征方式,模型输入为 $3 \times B \times T$ 的三维张量(3代表耦合模型的3种产流组分; B 为SWAT模型划分的子流域个数; T 代表时序长度),从而使模型在空间和时间尺度上能够充分学习各产流组分之间的复杂耦合关系,并有效捕捉其对径流响应的时滞特性。在tri-SWAT-Transformer模型中,输入的三维张量首先经过位置编码与嵌入映射适配Transformer自注意力机制,随后Transformer模块依托多头注意力层自动学习不同时间点和空间位置的交互特征,从而对流域出口的日径流变化作出精准模拟。

1.4 Eckhardt数字滤波法

数字滤波法源于信号分析领域,主要功能是选择滤波函数分离高频与低频信号。在基流分割中,可通过数字滤波法分离径流的低频与高频信号,从而将径流划分为基流与快速径流^[18]。Eckhardt^[19]在传统数字滤波法的基础上提出了一种双参数数字滤波法:

$$b_i = \frac{(1 - B_{\max})ab_{i-1} + (1 - a)B_{\max}y_i}{1 - aB_{\max}} \quad (1)$$

式中: b_i 、 b_{i-1} 分别为 i 、 $i-1$ 时刻的基流; $B_{\max}$ 为最大基流指数; a 为反映基流消退时间的滤波参数; y_i 为 i 时刻的总径流量。 a 的取值对径流划分影响较小, $B_{\max}$ 在不同水文地质条件下可取相应经验值,本文

α 取值 0.98, $B_{\max}$ 取推荐值 0.80^[20]。

1.5 模型评价指标

选取纳什效率系数(NSE)、百分比偏差(PB)、均方根误差(RMSE)、平均绝对百分比误差(MAPE)作为模型评价指标^[21-22]。其中,NSE 常用于衡量水文模型模拟流量相比实测流量的偏离程度;PB 为模型模拟值和实测值之间误差(系统偏差)占实测值的百分比(本文采用 PB 的绝对值评估 PB 改善效果);RMSE 为模拟值与实测值之间误差的平均量级;MAPE 为模拟值与实测值之间误差的平均相对误差。NSE、PB、RMSE 及 MAPE 的计算公式见文献[21-22]。

2 研究案例

2.1 研究区概况

永安溪位于浙江省中东部,是椒(灵)江流域上游的主要支流,自西向东流,长 144 km^[23]。永安溪流域面积约为 2 704 km²,介于 28°24'N~29°06'N、120°12'E~121°06'E 之间,地处亚热带季风气候区,多年平均气温为 18.3℃,多年平均降水量为 1 608 mm。流域全年降水主要集中在 4—10 月,降水主要分布在流域东部和南部,降水时空分布不均特征明显^[24]。

本文采用永安溪流域各站点实测日降水量数据、柏枝岙水文站实测日径流量数据以及仙居气象站实测逐日气象数据进行日尺度径流模拟,各站点位置如图 1 所示,其中柏枝岙水文站是永安溪流域的出口控制断面,多年平均径流量为 23.00 亿 m³,柏枝岙水文站和仙居气象站兼具雨量观测功能,其余 11 个站点均为雨量站^[25]。采用中国科学院地理空间数据云的 SRTM DEM 90 m 高程数据作为数字高程数据,采用 HWSO 中国土壤数据库 1 km 分辨率数据作为土壤类型数据,采用 LUCC 2015 年中国土地利用 1 km 分辨率数据作为土地利用数据。SWAT 模型所需站点气温、太阳辐射、湿度、风速等逐日气象数据和逐日径流数据由中国气象局和台州市水利

局提供。

2.2 模型构建与参数设置

采用 ArcSWAT 构建 SWAT 模型,将永安溪流域划分为 56 个子流域,并利用 SWAT-CUP 软件中的 SUFI-2 算法进行参数率定。研究时段为 2011—2020 年,其中率定期为 2014—2020 年,验证期为 2011—2013 年。采用率定后的 SWAT 模型得到柏枝岙水文站出口断面径流模拟序列与各子流域逐日地表产流、壤中产流与地下产流数据,在此基础上构建 tri-SWAT-Transformer 模型及 s-SWAT-Transformer 模型。同时构建 Transformer 模型,并以流域各站点逐日降水为输入,以柏枝岙水文站出口断面逐日实测径流为输出。偏相关分析表明,降水与出口径流、78%以上子流域总产流与出口径流的偏相关系数均在时滞为 1 d 时达到最大,因此所有模型输入与输出的时滞均设置为 1 d。

tri-SWAT-Transformer 与 s-SWAT-Transformer 均采用 2 层 Transformer 结构,隐藏层维度为 512,注意力头数为 12。模型采用 Adam 优化器,以均方误差为损失函数,训练 200 轮,批量大小设置为 16。通过随机搜索方法对初始学习率与丢包率进行超参数调优,初始学习率和丢包率的搜索区间分别为 (10⁻⁶,10⁻⁴) 与 (0,0.3),共进行 500 次搜索。训练至 100 轮时,学习率衰减至初始值的 10%。数据集按 5:2:3 划分训练集、验证集和测试集,对应时段分别为 2016—2020 年、2014—2015 年和 2011—2013 年。Transformer 模型采用相同的数据划分方法、超参数搜索策略和学习率衰减方式,仅将批量大小调整为 32。

3 结果与分析

3.1 各模型径流模拟结果对比

各模型径流模拟结果如图 2、图 3 所示,相关评价指标见表 1。可知,高流量条件下 SWAT 模型模拟值整体低于实测值,表明高流量条件下该模型径流模拟值存在一定程度的低估,流量数据点较为分散且实测数据点大多位于 45°线下方。当实测径流量小于 1 000 m³/s 时,较多数据点位于 45°线上方,表明低流量条件下该模型径流模拟值存在一定程度的高估。相比 SWAT 模型,Transformer 模型提高了高流量时的模拟精度;进一步融合 SWAT 产流信息后的 2 种耦合模型的模拟效果进一步提升,其中 tri-SWAT-Transformer 模型表现最佳,率定期和验证期的 NSE 分别达 0.95 和 0.89;s-SWAT-Transformer 模型次之。2 种耦合模型率定期的 PB 较 SWAT 模型与 Transformer 模型有所减小,但验证期的 PB 改善

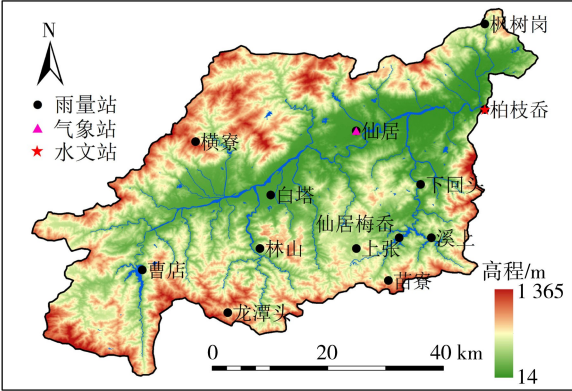


图 1 永安溪流域各站点位置

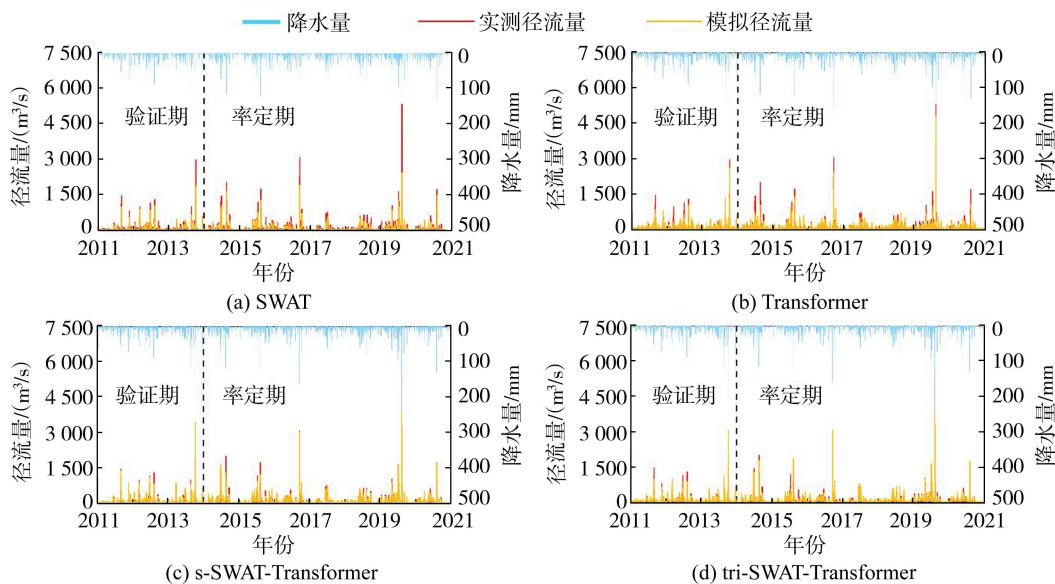


图2 各模型径流模拟过程线

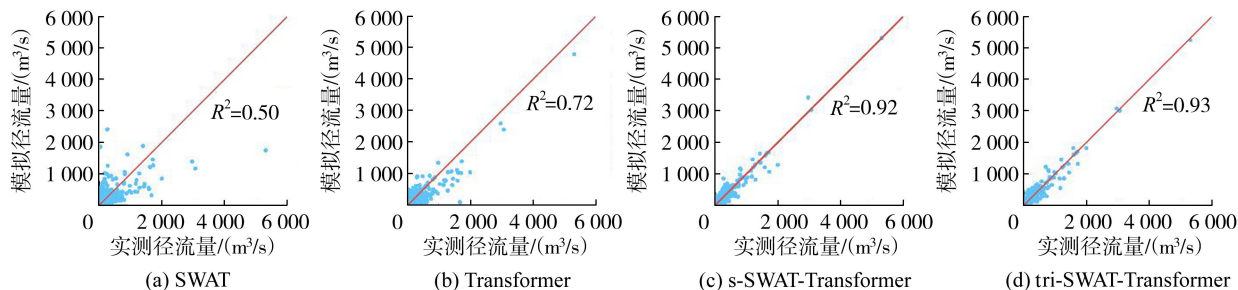


图3 各模型模拟径流量与实测径流量对比

表1 各模型评价指标

模型	NSE		PB/%		RMSE/(m³/s)	
	率定期	验证期	率定期	验证期	率定期	验证期
SWAT	0.50	0.43	23.0	23.0	131.1	111.4
Transformer	0.73	0.68	17.4	10.2	96.7	83.7
s-SWAT-Transformer	0.93	0.87	4.2	14.4	49.7	53.3
tri-SWAT-Transformer	0.95	0.89	5.1	15.2	42.1	49.4

效果不明显。各模型在 RMSE 上的表现情况排序与在 NSE 上一致。结合各项评价指标可知,2 种耦合模型的模拟效果相比 SWAT 模型与 Transformer 模型均得到显著改善,其中 tri-SWAT-Transformer 模型的改善幅度最大。

选取 2019 年超强台风“利奇马”洪水作为典型洪水事件,各模型模拟结果如图 4 所示。可见 SWAT 模型存在洪峰提前 1 d 且洪峰量被低估的问题,而 Transformer 模型及 2 种耦合模型对洪水起涨过程的模拟更接近实际情况,洪峰模拟误差明显减小,其中 tri-SWAT-Transformer 模型表现最佳。分析其原因,SWAT 模型根据长期逐日径流进行校准,未针对洪水过程进行校准,且全域统一的单位线参数无法体现不同子流域汇流时间的差异,导致模拟洪

峰提前^[26]。此外,SWAT 模型退水过程偏缓,Transformer 模型退水过程偏快,而 2 种耦合模型能够较好地模拟洪水起涨、洪峰及退水过程,与实测过程吻合较好。

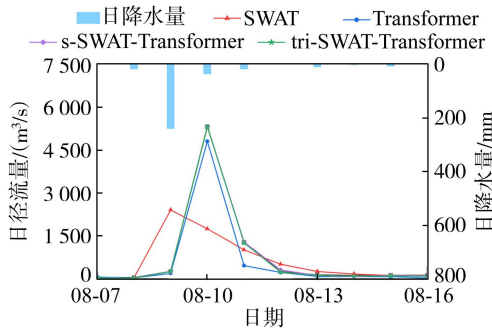


图4 2019 年“利奇马”洪水事件各模型模拟结果

3.2 高流量模拟效果分析

2011—2020 年柏枝岙水文站实测逐日径流序列平均值为 $71.8 \text{ m}^3/\text{s}$,中位数为 $31.6 \text{ m}^3/\text{s}$,实测高流量显著高于逐日径流序列平均值与中位数,且集中于梅雨季和台风期,该时段内暴雨洪水形成的洪峰特征最为突出。因此,有必要对各模型在高流量条件下的模拟效果进行分析。

结合该流域洪水陡涨陡落特性与柏枝岙水文站

出口断面日径流量特点,将研究时段内柏枝岙水文站出口超越概率 $P\leq 10\%$ 的流量界定为高流量^[27]。计算各模型在高流量条件下的NSE、PB及RMSE,结果如表2所示。由表2可知,2种耦合模型在高流量条件下的模拟效果显著优于SWAT模型与Transformer模型,其中,tri-SWAT-Transformer模型在NSE、PB、RMSE这3项评价指标上的表现最优。相较于Transformer模型与SWAT模型,tri-SWAT-Transformer模型的NSE分别提升了32.9%、200.0%,PB分别降低了88.5%、89.6%,RMSE分别降低了53.4%、68.8%,模型模拟效果得到明显改善。

表2 高流量下各模型评价指标

模型	NSE	PB/%	RMSE/ (m ³ /s)	MAPE/%		
				年最大1d	年最大3d	年最大7d
SWAT	0.31	36.5	364.1	27.3	22.9	17.5
Transformer	0.70	33.0	243.7	24.3	33.1	33.4
s-SWAT-Transformer	0.91	6.6	131.5	10.0	9.9	10.5
tri-SWAT-Transformer	0.93	3.8	113.6	8.8	5.5	7.5

选取水文变异指标中的年最大1d、3d、7d径流量作为极端高流量评价指标^[28]。鉴于MAPE能够统一量纲,可用于横向对比多个极端高流量事件的模拟相对误差,计算各模型年最大1d、3d、7d模拟径流量MAPE,以量化各模型在极端高流量下的模拟误差,结果如表2所示。可见tri-SWAT-Transformer模型在年最大1d、3d、7d径流量模拟中均表现最佳,MAPE均小于10%;2种耦合模型的MAPE均明显低于SWAT模型和Transformer模型,表明融合流域水文物理过程信息能够有效提高极端高流量下的模拟精度。相比之下,Transformer模型在年最大3d、7d径流量模拟中误差较大,表明仅依赖降水信息难以充分反映下垫面调蓄等水文物理过程^[29]。

SWAT模型在高流量条件下误差较大,主要与其对地表汇流过程的描述较为简化有关^[30]。耦合模型利用Transformer多头注意力机制对SWAT模型的模拟误差进行校正,提高了洪峰模拟能力。以s-SWAT-Transformer模型对2019年超强台风“利奇马”洪水的模拟为例,分析了洪峰日及洪峰前后两日的模型注意力分布。结果表明:洪峰日模型注意力主要集中于流域西南部产流量较大的子流域,而洪峰前后2日注意力分布较为均匀,表明s-SWAT-Transformer模型能够自适应关注关键产流区域,并利用流域空间信息提升极端高流量下的模拟精度。

3.3 产流组分与径流组分相关性分析

鉴于tri-SWAT-Transformer模型的大多数指标均优于SWAT模型、Transformer模型以及不考虑产流组分的s-SWAT-Transformer模型,本文进一步分析产流组分与径流组分的相关性,以解释tri-SWAT-Transformer模型模拟效果最优的原因。

为分析产流组分与径流组分之间的相关关系,采用Eckhardt数字滤波法将柏枝岙水文站实测径流划分为快速径流与基流,结果如图5所示,可见快速径流平均占比约为84%,基流平均占比约为16%。将研究时段内SWAT模型模拟的56个子流域的产流组分时间序列进行面积加权平均,得到流域平均总产流时间序列,并分析它们与柏枝岙水文站实测径流及径流划分所得的径流组分时间序列之间的相关性,计算各序列之间的皮尔逊相关系数,结果如图6所示。

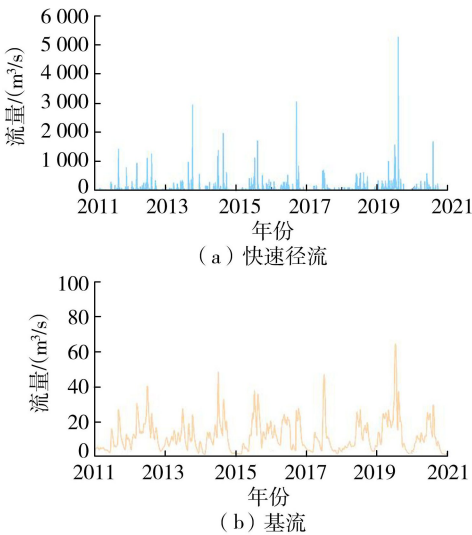


图5 柏枝岙水文站实测径流组分过程线

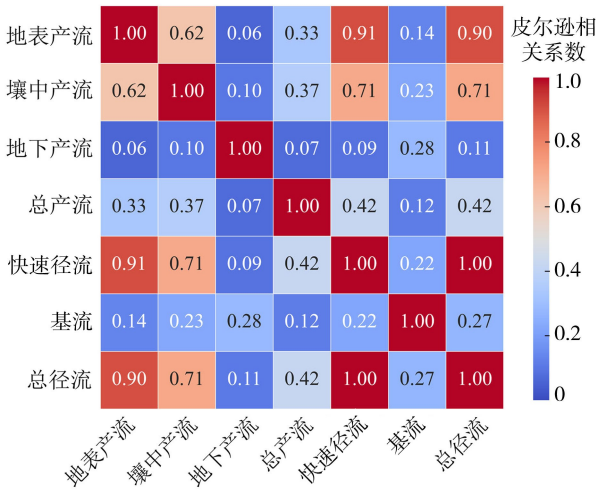


图6 流域平均总产流、实测径流及径流组分时间序列皮尔逊相关系数热力图

由图6可知,各时间序列之间的皮尔逊相关性

数均呈正相关关系,总产流与总径流之间的皮尔逊相关系数为 0.42,而地表产流、壤中产流与总径流之间的皮尔逊相关系数分别为 0.90 和 0.71。地下产流相对于降水的滞后性较强,与总径流之间的相关性较弱,由于总产流序列中包含了与总径流相关性较弱的地下产流,且地下产流在非汛期较为稳定,叠加成总产流序列后,削弱了与总径流的对应关系,导致总产流与总径流之间的皮尔逊相关系数下降。由于基流与总径流之间的相关性不高,而 tri-SWAT-Transformer 模型能捕捉到对径流生成贡献突出的地表产流、壤中产流与总径流之间的强相关性,对产流信息时空分布特征的利用程度高于 s-SWAT-Transformer 模型,因而模拟效果得到进一步的提升。

4 结 论

a. SWAT 模型径流模拟率定期和验证期的 NSE 分别为 0.50 和 0.43,整体来看,SWAT 模型模拟效果一般,在高流量条件下存在一定程度的低估。Transformer 模型、s-SWAT-Transformer 模型、tri-SWAT-Transformer 模型径流模拟率定期的 NSE 分别为 0.73、0.93、0.95,验证期的 NSE 分别为 0.68、0.87、0.89,这 3 种模型的模拟效果均较 SWAT 模型显著提升,其中 tri-SWAT-Transformer 模型效果最佳,s-SWAT-Transformer 模型次之。在典型洪水事件模拟中,也是 tri-SWAT-Transformer 模型表现最佳。

b. 在高流量径流模拟中,tri-SWAT-Transformer 模型表现最好:相较于 SWAT 模型,其 NSE 提升了 200.0%,PB 降低了 89.6%,RMSE 降低了 68.8%;相较于 Transformer 模型,其 NSE 提升了 32.9%,PB 降低了 88.5%,RMSE 降低了 53.4%。SWAT 与 Transformer 耦合模型在极端高流量下的模拟效果显著优于 SWAT 模型与 Transformer 模型,其中以 tri-SWAT-Transformer 模型效果最好。这是因为耦合模型能通过 Transformer 模型的多头注意力机制,利用流域空间信息校正 SWAT 模型的误差,进而提升模拟效果。

c. 本文通过产流组分与径流组分相关性分析,解释了 tri-SWAT-Transformer 模型模拟效果优于 SWAT 模型、Transformer 模型与 s-SWAT-Transformer 模型的原因。tri-SWAT-Transformer 模型能充分捕捉各类产流水文物理过程的时空分布特征,其对产流信息时空分布特征的利用程度均高于其他 3 种对照模型。

参考文献:

[1] 徐宗学,陈浩,任梅芳. 变化环境下我国典型特大城市

洪涝灾害成因分析[J]. 水资源保护,2025,41(5):33-40. (Xu Zongxue, Chen Hao, Ren Meifang. Analysis on causes of flooding/waterlogging disasters in typical megacities of China under changing environment [J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (5) : 33-40. (in Chinese))

[2] 王浩,赵铜铁钢,田雨,等. 考虑时间变化的洪涝灾害损失评估[J]. 水利学报,2024,55(2):127-136. (Wang Hao, Zhao Tongtiegang, Tian Yu, et al. Incorporating temporal changes into flood loss assessments [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55 (2) : 127-136. (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] Bian Lekang, Qin Xueer, Zhang Chenglong, et al. Application, interpretability and prediction of machine learning method combined with LSTM and Light GBM: a case study for runoff simulation in an arid area [J]. Journal of Hydrology, 2023, 625: 130091.

[5] 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))

[6] 李翔泉. 基于气象集合预报统计后处理的流域径流预报研究[D]. 武汉:武汉大学,2020.

[7] Herath H M V V, Chadalawada J, Babovic V. Genetic programming for hydrological applications: to model or to forecast that is the question [J]. Journal of Hydroinformatics, 2021, 23 (4) : 740-763.

[8] 岳兆新,艾萍,熊传圣,等. 基于信息熵与改进极限学习机的中长期径流预测[J]. 水利水电科技进展,2021,41(4):7-14. (Yue Zhaoxin, Ai Ping, Xiong Chuansheng, et al. Medium-long term runoff forecasting based on information entropy and improved extreme learning machine [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41 (4) : 7-14. (in Chinese))

[9] 李菊,崔东文. 基于 WPT-IDBO-RELM 和 WPT-IDMO-RELM 模型的日径流预测[J]. 水利水电科技进展,2024,44(6):48-55. (Li Ju, Cui Dongwen. Daily runoff prediction based on WPT-IDBO-RELM and WPT-IDMO-RELM models [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44 (6) : 48-55. (in Chinese))

[10] Liu Jiangtao, Bian Yuchen, Lawson K, et al. Probing the limit of hydrologic predictability with the Transformer network [J]. Journal of Hydrology, 2024, 637: 131389.

[11] 徐嘉远,邹磊,夏军,等. TVGM-LSTM 耦合模型及其径

- 流模拟效果分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(6): 104-110. (Xu Jiayuan, Zou Lei, Xia Jun, et al. TVGM-LSTM coupling model and its runoff simulation effect analysis [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(6): 104-110. (in Chinese))
- [12] Wang Wenchuan, Zhao Yanwei, Xu Dongmei, et al. Error correction method based on deep learning for improving the accuracy of conceptual rainfall-runoff model [J]. Journal of Hydrology, 2024, 643: 131992.
- [13] 季通焱, 黄鹏年, 李艳忠, 等. 长短时记忆网络与新安江模型耦合的降雨径流模拟性能[J]. 水力发电学报, 2024, 43(1): 24-34. (Ji Tongyan, Huang Pengnian, Li Yanzhong, et al. Study on performance of rainfall-runoff simulations using coupled long short-term memory network and Xin'anjiang model [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2024, 43(1): 24-34. (in Chinese))
- [14] Yan Yufei, Liu Hanxiao, Xu Shu, et al. Advances in coupling machine learning with hydrological simulation: a review[J]. Water Science and Engineering, 2026, 19(1): 1-10.
- [15] 罗赞, 张翔宇, 董增川, 等. 基于物理机制耦合深度学习的黄河干流流量演进模拟[J]. 水科学进展, 2025, 36(2): 217-229. (Luo Yun, Zhang Xiangyu, Dong Zengchuan, et al. Simulation of river flow evolution in the Yellow River main stream based on the coupling of physical mechanisms and deep learning[J]. Advances in Water Science, 2025, 36(2): 217-229. (in Chinese))
- [16] 梁犁丽, 汪党献, 王芳. SWAT 模型及其应用进展研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2007, 5(2): 125-131. (Liang Lili, Wang Dangxian, Wang Fang. Discussion on SWAT model and its application[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2007, 5(2): 125-131. (in Chinese))
- [17] Vaswani A, Shazeer N, Parmar N, et al. Attention is all you need [C]//Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems. Long Beach: Curran Associates Inc., 2017.
- [18] 王琰, 陈耀宇, 常虹. 基于同位素的 Eckhardt 数字滤波法参数季节性动态识别研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(12): 99-110. (Wang Yan, Chen Yaoyu, Chang Hong. Seasonal dynamic identification of Eckhardt digital filter parameters based on isotopes [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(12): 99-110. (in Chinese))
- [19] Eckhardt K. How to construct recursive digital filters for baseflow separation[J]. Hydrological Processes, 2005, 19(2): 507-515.
- [20] Chen Hao, Huang Saihua, Xu Yueping, et al. Using baseflow ensembles for hydrologic hysteresis characterization in humid basins of southeastern China [J]. Water Resources Research, 2024, 60(4): e2023WR036195.
- [21] Moriasi D N, Arnold J G, Van Liew M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(3): 885-900.
- [22] De Myttenaere A, Golden B, Le Grand B, et al. Mean absolute percentage error for regression models [J]. Neurocomputing, 2016, 192: 38-48.
- [23] 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))
- [24] Liu Li, Gu Haiting, Xu Yueping, et al. Real-time flood forecasting via parameter regionalization and blending nowcasts with NWP forecasts over the Jiao River, China [J]. Journal of Hydrometeorology, 2023, 24(3): 561-582.
- [25] 沈凯琦, 赵超, 张翔宇, 等. 下岸水库对永安溪水文情势的影响分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(5): 174-180. (Shen Kaiqi, Zhao Chao, Zhang Xiangyu, et al. Influence analysis of Xia'an Reservoir on hydrological regime of the Yong'an River [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(5): 174-180. (in Chinese))
- [26] Yu Dan, Xie Ping, Dong Xiaohua, et al. Improvement of the SWAT model for event-based flood simulation on a sub-daily timescale [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2018, 22(9): 5001-5019.
- [27] 董磊华, 熊立华, 万民. 基于贝叶斯模型加权平均方法的水文模型不确定性分析[J]. 水利学报, 2011, 42(9): 1065-1074. (Dong Leihua, Xiong Lihua, Wan Min. Uncertainty analysis of hydrological modeling using the Bayesian model averaging method [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(9): 1065-1074. (in Chinese))
- [28] 薛联青, 张卉, 张洛晨, 等. 基于改进 RVA 法的水利工程对塔里木河生态水文情势影响评估[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(3): 189-196. (Xue Lianqing, Zhang Hui, Zhang Luochen, et al. Impact of water conservancy projects on eco-hydrological regime of Tarim River based on improved RVA method [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(3): 189-196. (in Chinese))
- [29] Granata F, Zhu Senlin, Di Nunno F. Advanced streamflow forecasting for Central European rivers: the cutting-edge Kolmogorov-Arnold networks compared to transformers [J]. Journal of Hydrology, 2024, 645: 132175.
- [30] Yang Shuai, Tan M L, Song Qixuan, et al. Coupling SWAT and Bi-LSTM for improving daily-scale hydro-climatic simulation and climate change impact assessment in a tropical river basin [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 330: 117244.

(收稿日期: 2025-06-12 编辑: 骆超)

鄂尔多斯市产水量与碳储量时空演变及关联分析

刘瑞华^{1,2}, 左其亭^{1,2}, 杨智楷¹

(1. 郑州大学水利与交通学院; 2. 郑州大学黄河生态保护与区域协调发展研究院)

摘要:基于 InVEST 模型分析了 2010—2022 年鄂尔多斯市产水量与碳储量的时空演变特征,并利用地理时空加权回归模型(GTWR)与空间自相关分析探究了产水量与碳储量影响因素的空间集聚特征及两者的空间异质性。结果表明:产水量与碳储量的莫兰指数均值为 0.351,呈现高产水量-高碳储量与低产水量-低碳储量的集聚特征;多年平均产水量达 27.965 亿 m³,年际波动显著,主要受土地利用类型、蒸散发和碳储量影响;碳储量呈增长态势,由 2010 年的 11.566 亿 t 增长至 2022 年的 11.949 亿 t,主要受土地利用类型和产水量影响。

关键词:产水量;碳储量;InVEST 模型;GTWR 模型;空间自相关分析;鄂尔多斯市

中图分类号:TV213.4

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2026)05-0058-09

Spatiotemporal evolution and correlation analysis of water yield and carbon storage in Ordos City//Liu Ruihua¹, Zuo Qiting^{1,2}, Yang Zhikai¹ (1. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University; 2. Yellow River Institute for Ecological Protection and Regional Coordinated Development, Zhengzhou University)

Abstract: The spatiotemporal evolution characteristics of water yield and carbon storage in Ordos City from 2010 to 2022 were analyzed using the InVEST model. The geographically and temporally weighted regression (GTWR) model and spatial autocorrelation analysis were used to investigate the spatial clustering characteristics of influencing factors and the spatial heterogeneity between water yield and carbon storage. The results show that the mean Moran's index of water yield and carbon storage was 0.351, exhibiting high water yield-high carbon storage and low water yield-low carbon storage clustering patterns. The multi-year average water yield was 2.7965 billion m³ with significant interannual fluctuations, and it was primarily influenced by land use type, evapotranspiration, and carbon storage. Carbon storage showed an increasing trend, rising from 1.1566 billion tons in 2010 to 1.1949 billion tons in 2022, and was mainly affected by land use type and water yield.

Key words: water yield; carbon storage; InVEST model; GTWR model; spatial autocorrelation analysis; Ordos City

鄂尔多斯市是我国重要的能源化工基地,也是北方防沙带生态屏障的重要区域,其资源开发与生态保护的协调发展对实现区域可持续发展具有重要意义。产水量与碳储量作为表征区域水文调节能力和生态固碳效能的关键指标^[1],展现出显著的协同与权衡特征^[2]。中国提出的“碳中和”目标^[3]正深刻重构国土空间格局与资源管理模式,其中土地利用变化通过改变地表覆被特征,既影响降水-径流转化机制^[4],又调控着生态系统碳源与碳汇动态^[5],这种双重影响在流域尺度呈现出复杂的空间异质性。研究产水量与碳储量的时空变化及其关联,对保护区域水资源安全、固碳减排和维持生态系统稳定意义重大。

InVEST 模型因其集成了产水量、碳储量等多类生态系统服务模块,所需数据易于获取,参数较少且运算速度快,结果可空间化直观呈现,近年来已在产水服务与碳储量评估方面得到大量应用。例如:Halder 等^[6]、Gashaw 等^[7]和常建波等^[8]分别利用 InVEST 模型对印度西孟加拉邦洪泛区、上青尼罗河流域和黄河流域的产水量进行了评估;Meza-Mori 等^[9]、Yang 等^[10]、郑海岳等^[11]分别使用 InVEST 模型对秘鲁安第斯山脉、黄河三角洲和淮南市的碳储量进行了多情景模拟,均验证了该模型在生态系统服务量化中的适用性。土地利用类型的变化通过改变植被覆盖类型,不仅直接调控着固碳效率,还通过冠层截留、蒸散发调节等水文过程间接影响产水能

基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFC3211301);国家自然科学基金项目(52279027)

作者简介:刘瑞华(2001—),男,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:liuruihua2024@163.com

通信作者:左其亭(1967—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:zuoqt@zzu.edu.cn

力。丛中笑等^[12]发现森林生态系统虽具有显著的固碳优势,但其高蒸散特性与对径流的阻滞作用,会对流域产水量产生影响,而产水量波动又通过水分胁迫影响植被生产力,进而对碳储量产生影响,形成复杂的反馈回路^[13]。因此,在“碳中和”目标下,合理制定土地利用制度对水资源的可持续利用极为关键^[14]。目前对鄂尔多斯市产水量与碳储量的研究^[15-16],多聚焦于二者的权衡协同关系,但对其时空演变的影响机制探讨不深,尤其缺乏对各影响因素的空间异质性分析。因此,系统揭示产水量与碳储量时空分异规律、识别关键影响因素并探究其作用的空间变异性,对明晰区域生态系统服务功能、促进可持续发展具有重要的理论与实践意义。

本文集成 InVEST 模型、空间自相关方法和地理时空加权回归 (geographically and temporally weighted regression, GTWR) 模型,分析鄂尔多斯市产水量与碳储量的时空变化特征,以期对鄂尔多斯市水资源管理及“双碳”目标实现提供参考。

1 研究区概况及数据处理

1.1 研究区概况

鄂尔多斯市(图 1)位于内蒙古自治区西南部,全市总面积为 86 752 km²,行政区域包括东胜区和

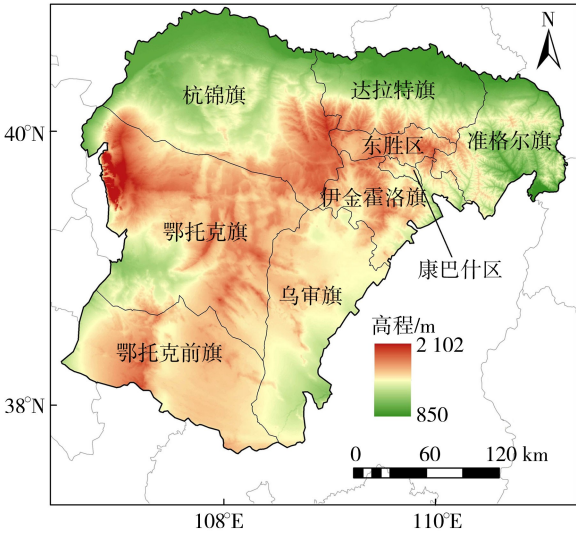


图 1 鄂尔多斯市概况

康巴什区 2 个市辖区及鄂托克前旗、鄂托克旗、杭锦旗等 7 个旗。作为国家主体功能区规划确定的重点开发区域,鄂尔多斯市不仅是我国最大的煤炭生产基地,更是北方防沙带生态安全屏障的关键核心区域。鄂尔多斯市年产水量呈波动趋势,干旱频发加上城市不断扩张,水资源供需矛盾日益尖锐。近年来,当地大规模植树种草,并发展新能源,生态系统碳储量稳步增长。鄂尔多斯市地处中温带大陆性干旱及半干旱气候区,降水量少,蒸发旺盛,风沙频繁,生态较为脆弱。作为国家重要能源基地,鄂尔多斯市煤炭资源丰富,同时承担着向华北、华东等地区供应能源的重要任务。

1.2 数据来源及预处理

1.2.1 InVEST 模型数据

InVEST 模型涉及的关键参数包括降水、蒸散发、植物根茎深度、植物可利用含水率、土地利用类型、生物物理量系数及碳密度等。其中,降水量和蒸散发数据分辨率为 1 km,来源于国家地球科学数据中心;植物根茎深度以土壤深度表示,分辨率为 90 m,来源于文献[17];植物可利用含水率数据分辨率为 250 m,来源于国际土壤参考信息中心;土地利用数据采用武汉大学发布的 30 m 分辨率土地利用数据集;生物物理量参数来源于文献[18];碳密度数据来源于文献[19];水资源总量数据用于 InVEST 模型产水量模块参数 Z 的率定,来源于内蒙古水资源公报。通过 ArcGIS 平台进行数据预处理,将土地利用数据重分类为农田、林地、草地、水域、未利用土地与建设用地 6 类,并将降水量和蒸散发等数据由逐月数据处理为逐年栅格数据,统一重采样为 30 m 分辨率。所有数据均采用 Albers_Conic_Equal_Area 投影。

1.2.2 GTWR 模型数据

基于前人研究成果和研究区特征^[19-20],选取了如表 1 所示的 10 个具有代表性的产水量和碳储量影响因素,涵盖自然、人类活动和地形等方面。为确保空间一致性,所有数据均采用 Albers_Conic_Equal_Area 投影,数据处理在 ArcGIS 平台中完成,根据文献[21]

表 1 产水量与碳储量影响因素及数据来源

数据名称	分辨率	数据来源
植被归一化系数	30 m	MOD13A3 数据 (https://www.earthdata.nasa.gov/)
降水量、蒸散发	1 km	国家地球科学数据中心 (https://www.geodata.cn/)
高程、坡度、坡向	90 m	地理空间数据云 (https://www.gscloud.cn/)
人口密度	1 km	LandScan 数据集 (https://landscan.ornl.gov)
降水量	1 km	国家青藏高原数据中心 (https://data.tpd.cn/)
土壤种类	1 km	全球土壤数据库 (https://www.fao.org/)
国内生产总值	1 km	资源环境科学与数据中心 (http://www.resdc.cn/)
土地利用	30 m	武汉大学 30 m 土地利用数据集 (https://doi.org/10.5281/zenodo.12779975)

与研究区状况构建规则渔网网格进行空间离散,并提取相关栅格数据值至网格点,再利用提取的点数据进行 GTWR 模型运算,最终将模型运算结果空间聚合至旗(区)级行政区划单元,以更清晰地揭示鄂尔多斯市各旗(区)影响因素的空间分异特征。

2 研究方法

2.1 产水量计算

2.1.1 产水量估算

InVEST 模型通过构建生态过程与土地利用的耦合关系实现服务功能评估。其中产水量模块基于 Budyko 水热平衡理论,采用下垫面特征修正的水量平衡方程进行空间化模拟,其计算公式如下^[22]:

$$Y_{xj} = (1 - E/P_x)P_x \tag{1}$$

式中: Y_{xj} 为栅格单元 x 内第 j 类土地覆被的产水强度,mm; P_x 为栅格单元 x 内空间化年降水量,mm; E 为由改进的 Zhang-Enke 模型计算获得的实际年蒸发量,mm,详细算法见文献[23]。

2.1.2 产水量率定

通过对鄂尔多斯市产水量的迭代计算,结合水资源公报数据进行验证后发现,当参数 Z 取值为 10 时,模型模拟结果与实际数据呈现出良好的拟合效果(表 2),表明该参数取值能够较好地反映研究区的水文特征。

表 2 产水量率定结果

年份	实际值/亿 m ³	模拟值/亿 m ³	误差/%
2010	20.78	22.60	8.8
2013	20.43	21.23	3.9
2016	37.20	38.46	3.4
2019	26.29	25.89	1.5
2022	31.75	31.66	0.3

2.2 区域碳储量计算

InVEST 碳储量模块可量化并可可视化区域碳储量的空间分布,总碳储量由地上生物碳储量、地下生物碳储量、土壤碳储量和死亡有机碳储量组成。

在使用 InVEST 模型计算碳储量时,碳密度数据是关键参数,通常通过实地调研并查阅相关资料获得。参考文献[19]确定研究区各土地利用类型的碳密度取值,如表 3 所示。

表 3 鄂尔多斯市各土地利用类型碳密度

土地利用类型	碳密度/(t/hm ²)			
	地上	地下	土壤	死亡有机物
农田	3.02	42.74	98.13	0
林地	22.46	61.38	75.86	0
草原	18.70	45.81	90.43	3.8
水域	1.59	0	0	0
未利用土地	0.69	0	70.61	0
建设用地	1.32	9.37	28.42	0

2.3 空间自相关分析

空间自相关分析采用统计方法量化空间单元间的关联程度,揭示其空间分布特征。本文首先采用全局莫兰指数对产水量与碳储量的整体空间集聚特征进行分析,以判断研究区产水量与碳储量在空间上是否存在显著的自相关性。全局莫兰指数 I 的取值范围为 $[-1,1]$,当 $I>0$ 时表示空间正相关,即高值与高值、低值与低值趋于集聚;当 $I<0$ 时表示空间负相关,即高值与低值趋于离散;当 I 趋近于 0 时则表示空间随机分布。在此基础上,进一步采用局部莫兰指数识别碳储量与产水量的局部空间聚类模式,具体包括高产水量-高碳储量集聚、低产水量-低碳储量集聚、高产水量-低碳储量异常和低产水量-高碳储量异常 4 种类型,从而更细致地揭示空间异质性特征。

2.4 GTWR 模型

GTWR 模型是对地理加权回归模型(GWR)的进一步发展。GTWR 模型融合时空维度,分析回归系数的时空非平稳性,统一解释地理现象的时空差异机制。

借鉴已有研究^[24-25]选取影响因素,采用 GTWR 模型探讨水文、经济、地形与人口等因素对产水量与碳储量的影响,模型输入的影响因素包括人口密度(x_1)、高程(DEM, x_2)、坡度(x_3)、坡向(x_4)、降水量(x_5)、植被归一化指数(NDVI, x_6)、国内生产总值(GDP, x_7)、蒸散发(x_8)、土壤种类(x_9)、土地利用类型(x_{10})、产水量(x_{11})、碳储量(x_{12})。水文因素直接影响产水量大小,地形因素通过影响汇流和土壤持水能力作用于产水量,并制约植被类型与土壤碳储量;经济与人口活动深刻影响产水量与碳储量,建设用地扩张破坏植被减少碳储量,同时改变下垫面可能减少产水量,人口增长加剧用水需求,对水资源构成压力。在分析产水量影响因素时,自变量为 $x_1 \sim x_{10}$ 、 x_{12} ;在分析碳储量影响因素时,自变量为 $x_1 \sim x_{11}$ 。

3 结果与分析

3.1 产水量时空变化特征

表 4 为 2010—2022 年鄂尔多斯市产水量的变化情况,这 13 年的多年平均产水量为 27.965 亿 m³,2016 年达到峰值 38.457 亿 m³,较最低值 2013 年的 21.226 亿 m³ 增幅显著,整体来看,鄂尔多斯市产水量呈现波动上升趋势。

研究期间各旗(区)产水量呈现显著时空分异,其中乌审旗作为主要产水区,2022 年产水量达到 7.105 亿 m³,而康巴什区产水量最低,仅为 0.145 亿 m³。2013—2016 年全市产水量出现显著

增长,产水量的显著增长受益于降水增加及“三北防护林”等生态修复工程对水源涵养能力的提升^[26]。杭锦旗增幅最大,达到258.5%,可能源于其境内库布齐沙漠治理工程大幅改善了区域水文条件^[27]。2016—2019年产水量普遍下降,鄂托克旗降幅超过50%,这可能与气候干旱叠加地下水管控政策实施有关^[20,28]。各旗(区)产水动态差异明显,杭锦旗表现为剧增锐减的波动特征,东胜区在低基数基础上波动较大,2013年增长41.2%,2019年下降36.6%。2022年各旗(区)产水量可分为3个梯队,第一梯队为乌审旗和达拉特旗,年产水量超过5亿m³,第二梯队包括准格尔旗和鄂托克前旗,年产水量介于3亿~5亿m³之间,其余旗(区)归为第三梯队,各区域差异本质上反映了自然条件与人为干预强度的空间分异。

表4 鄂尔多斯市各旗(区)产水量

行政区	产水量/亿 m ³				
	2010 年	2013 年	2016 年	2019 年	2022 年
伊金霍洛旗	1.993	2.013	3.299	2.617	3.050
乌审旗	5.765	5.551	7.803	5.768	7.105
鄂托克旗	2.700	1.847	4.754	2.304	3.670
杭锦旗	2.559	1.536	5.507	2.240	2.691
准格尔旗	2.525	2.773	3.951	3.055	3.551
鄂托克前旗	2.709	2.713	4.413	3.490	4.955
达拉特旗	3.763	4.012	7.598	5.689	5.786
东胜区	0.468	0.661	0.931	0.590	0.702
康巴什区	0.119	0.120	0.201	0.137	0.145
合计	22.601	21.226	38.457	25.89	31.655

3.2 碳储量时空变化特征

表5为鄂尔多斯市碳储量的变化情况,可见2010—2022年各旗(区)碳储量呈现显著的差异化演变特征,总碳储量增长了0.383亿t,从2010年的11.566亿t增长到2022年的11.949亿t,主要得益于其生态修复与保护措施的有效实施。

表5 鄂尔多斯市各旗(区)碳储量

行政区	碳储量/亿 t				
	2010 年	2013 年	2016 年	2019 年	2022 年
伊金霍洛旗	0.815	0.822	0.821	0.820	0.818
乌审旗	1.512	1.578	1.594	1.577	1.638
鄂托克旗	2.785	2.751	2.799	2.828	2.918
杭锦旗	2.105	2.144	2.189	2.195	2.180
准格尔旗	1.137	1.137	1.137	1.135	1.132
鄂托克前旗	1.695	1.728	1.734	1.722	1.736
达拉特旗	1.136	1.147	1.152	1.148	1.150
东胜区	0.326	0.323	0.323	0.322	0.322
康巴什区	0.055	0.055	0.055	0.055	0.055
合计	11.566	11.685	11.804	11.802	11.949

鄂托克旗作为碳储量最高的区域,从2.785亿t持续增长至2.918亿t,虽在2013年短暂下降,但整体增幅达到4.7%,凸显生态保护成效,该旗的碳储量增长主要得益于退耕还林、沙地植被恢复等生态

工程提升了植被碳汇能力^[29]。乌审旗碳储量在2010年为1.512亿t,经历波动后,到2022年达到1.638亿t,累计增长8.3%,其中2019年的阶段性下降与后续加速增长形成鲜明对比,这主要得益于乌审旗依托毛乌素沙地治理工程实现了生态系统碳储量的稳定增长^[30]。杭锦旗呈现阶梯式攀升后再回落的特征,2019年达到2.195亿t峰值后微降,最终较2010年增长3.6%。鄂托克前旗碳储量呈波动上升态势,从2010年的1.695亿t增长至2022年的1.736亿t,累计增长约2.4%,其中2016年达到1.734亿t阶段性高点后小幅回调,2022年回升至峰值水平。准格尔旗和达拉特旗波动幅度较小,东胜区则持续缓降,2022年碳储量较2010年减少1.2%,康巴什区始终为550万t,为各旗(区)的最低值。东胜区的碳储量下降与城市扩张挤占生态空间、硬化地表增加直接相关。伊金霍洛旗碳储量变化呈现特殊趋势,在2013年达到0.822亿t峰值后逐年递减,形成倒U形曲线,2022年较峰值下降0.5%。这一演变格局或与生态工程实施、土地利用转型及城市化进程的交互作用密切相关。

3.3 产水量与碳储量空间自相关分析

本文基于GeoDa与ArcGIS平台开展鄂尔多斯市产水量与碳储量空间关联性分析,结果如图2与表6所示。莫兰指数均值为0.351($p<0.05$, $Z>2.58$),证实产水量与碳储量存在弱正向空间依赖关系。

表6 莫兰指数及显著性检验

年份	莫兰指数	P 值
2010	0.376	0.001
2013	0.311	0.001
2016	0.350	0.001
2019	0.307	0.001
2022	0.411	0.001

鄂尔多斯市产水量与碳储量以高产水量-高碳储量和低产水量-低碳储量的协同关系为主要空间分布格局,东胜区、康巴什区、乌审旗、鄂托克旗常年呈现这种协同关系的正相关分布,但局部呈现显著异质性,如准格尔旗呈现高产水量-低碳储量的特征,与整体协同趋势形成反差;东北部东胜区、康巴什区因建设用地扩张与降水不足的双重压力,地表硬化影响产汇流过程,植被退化降低碳储量,致使产水量与碳储量均处于较低水平,呈现低产水量-低碳储量的双低格局;乌审旗源于其良好植被覆盖、优质土壤及科学的生态保护措施,呈现高产水量-高碳储量协同效应。值得注意的是,统计显著的空间关联区($p<0.05$)仅占全域一部分,表明产水量与碳储量空间分布关系受多尺度影响因素非线性调控,如局

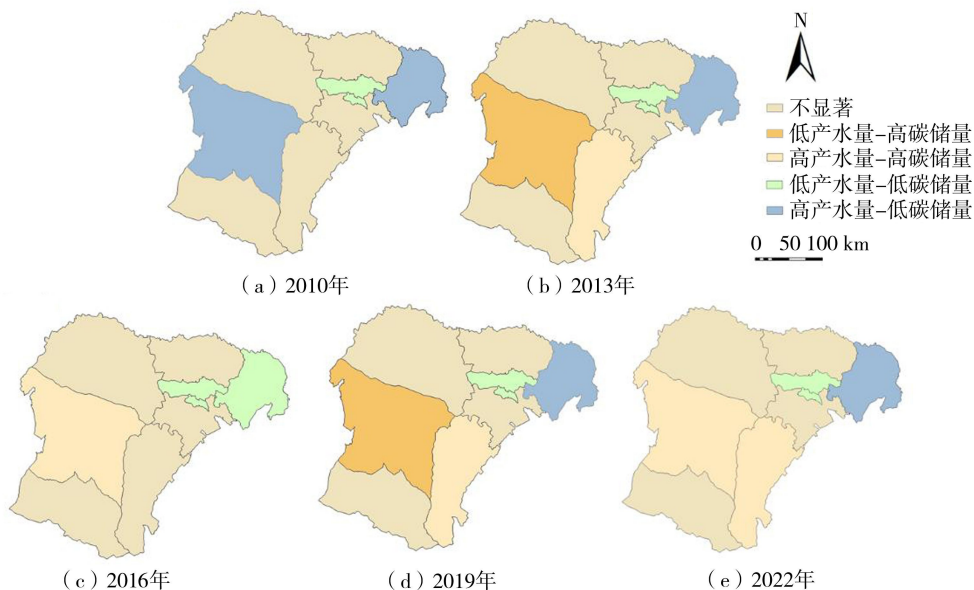


图2 Lisa 集聚图

部人类干扰可能打破大尺度自然协同机制。这一结果凸显了全域协同-局部权衡的复杂性,需差异化制定生态管理策略。在全域协同区强化生态保护,维护自然过程主导的机制,在人类活动密集区实施适应性调控,在关键过渡带建立动态监测体系,实行管控以缓冲生态压力。

3.4 产水量与碳储量影响因素分析

3.4.1 影响因素线性回归分析

本文基于生态系统服务协同机制理论,以产水量与碳储量为因变量,开展回归分析。自变量涵盖地形地貌、气候要素、植被指数、社会经济及土地覆被格局等多维驱动要素。采用方差膨胀因子(VIF, 阈值为 7.5)和显著性检验($\alpha = 0.05$)预筛选变量后,产水量影响因素中 DEM(VIF 为 95.602)、土壤种类(VIF 为 24.95)存在严重多重共线性,坡向($p = 0.066$)、人口密度($p = 0.325$)、NDVI($p = 0.091$)未通过显著性检验,最终保留降水量(VIF 为 1.316, $p < 0.001$)、蒸散发(VIF 为 1.630, $p < 0.001$)、土地利用类型(VIF 为 6.310, $p = 0.041$)、坡度(VIF 为 1.228, $p < 0.001$)、碳储量(VIF 为 1.253, $p < 0.001$) 5 个主要影响因素;碳储量影响因素中 DEM(VIF 为 94.908)、土壤种类(VIF 为 119.421)共线性严重, GDP($p = 0.464$)、坡向($p = 0.734$)、人口密度($p = 0.053$)未达显著水平,最终筛选出 NDVI(VIF 为 1.168, $p < 0.001$)、产水量(VIF 为 2.089, $p < 0.001$)、土地利用类型(VIF 为 6.281, $p = 0.013$)与年降水量(VIF 为 1.335, $p < 0.001$) 4 个主要影响因素。

3.4.2 GTWR 模型性能检验

本文采用校正决定系数(R^2)衡量模型的解释力,并以赤池信息准则(AIC)量化模型效能。通过

对比普通最小二乘法(OLS)、GWR 和 GTWR 3 种建模方法,验证 GTWR 模型的性能,结果表明(表 7), GTWR 模型在解析时空异质性方面具有显著优势。

表 7 产水量与碳储量影响因素的模型诊断结果对比

模型	产水量		碳储量	
	AIC	R^2	AIC	R^2
OLS	5 421.14	0.955	5 627.09	0.998
GWR	5 266.03	0.990	5 487.44	0.999
GTWR	5 256.28	0.995	5 469.15	0.999

3.4.3 产水量影响因素时空演变分析

图 3 为鄂尔多斯市产水量影响因素在时空维度上的变化趋势,土地利用类型、碳储量和蒸散发是产水量变化的主要影响因素。

a. 土地利用类型对产水量的影响空间分异显著。南部乌审旗、鄂托克前旗呈现负向影响,东北部区域在早期表现为正向影响但逐渐减弱,这可能与当地植被覆盖变化对地表渗透的影响有关^[31]。

b. 碳储量对产水量的影响总体呈现负向影响,并且这种影响自南向北逐渐增强。2010 年鄂托克前旗与伊金霍洛旗曾短暂表现出正向影响,但到 2022 年整个区域已全面呈现负向影响。

c. 蒸散发对产水量的影响主要表现为负向影响,负向影响梯度自乌审旗向北至达拉特旗递增,并在 2022 年达到峰值,这与同期东胜区、康巴什区建设用地快速扩张导致的不透水面面积增加存在显著关联^[32]。

d. 坡度对产水量的影响在 2010—2022 年以负向影响为主导,但 2016 年和 2019 年在杭锦旗出现短暂的正向影响区,值得注意的是,康巴什区在整个研究期持续保持坡度负影响高值特征,从空间演变趋势来看,东胜区及周边区域的坡度负向影响呈现

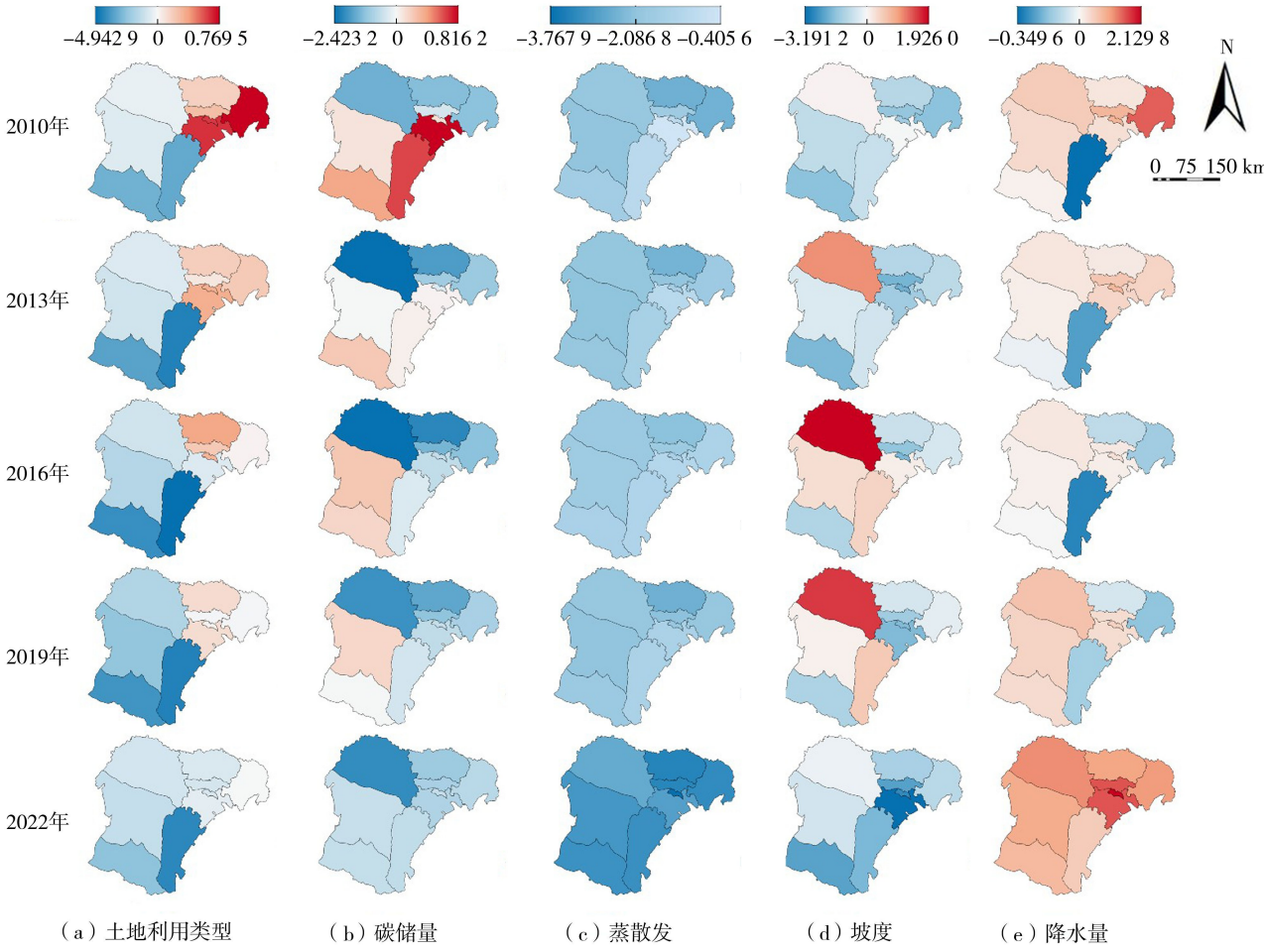


图3 产水量影响因素回归系数的时空演变

持续增强趋势,而杭锦旗、鄂托克旗等地的负向影响则存在波动。

e. 降水量对产水量的影响以正向为主,但存在空间分异。中部区域正向影响相对较强,2010—2019年部分区域曾出现负向影响,2022年全区域转为正向并显著增强。

3.4.4 碳储量影响因素时空演变分析

图4为鄂尔多斯市碳储量影响因素在时空维度上的变化趋势,土地利用类型与产水量是碳储量变化的主要影响因素。

a. 土地利用类型变化对碳储量的影响呈现东西分异特征,西部杭锦旗、鄂托克旗表现为正向影响高值区,而东部准格尔旗、伊金霍洛旗、乌审旗则以负向影响为主。值得注意的是,准格尔旗因煤炭开采等人类活动干扰^[33],长期保持负向影响高值区的特征,凸显高强度土地利用对碳汇功能的显著抑制作用。

b. 产水量对碳储量的影响整体表现为负向影响,且空间分异显著,2010—2022年东北部达拉特旗、准格尔旗持续为负向影响高值区,而西南部鄂托克旗、鄂托克前旗的影响强度相对较低,这种空间格

局可能与区域植被覆盖和土壤水文特性的空间差异有关^[34]。

c. NDVI对碳储量的影响虽持续为正向影响,但其强度在研究期内呈现先降低后增加的趋势。空间分布上,东北部达拉特旗、东胜区为高值区,西南部鄂托克前旗则为低值区,这种差异可能受气候变化背景下植被空间分布的影响。

d. 降水量对碳储量的调控呈现西北与东南分异,西北部杭锦旗西部主要表现为负影响,东南部伊金霍洛旗、乌审旗东部则以正影响为主导,这一分布格局是区域降水量的时空波动及土地利用类型的演变共同驱动导致的。

3.4.5 产水量与碳储量相互作用分析

产水量与碳储量之间存在相互影响关系,这种关联性本质上源于两者对土地利用类型变化的共同响应及其生态系统服务功能的耦合机制。碳储量的估算以土地利用类型为基础,通过建立其与碳密度的对应关系,利用空间分析量化生态系统的碳储量。产水量的核算则通过土地利用类型关联降水量、蒸散发、土壤渗透系数等水文参数,结合降水-径流转化机制,实现区域产水量的空间异质性评估。土地

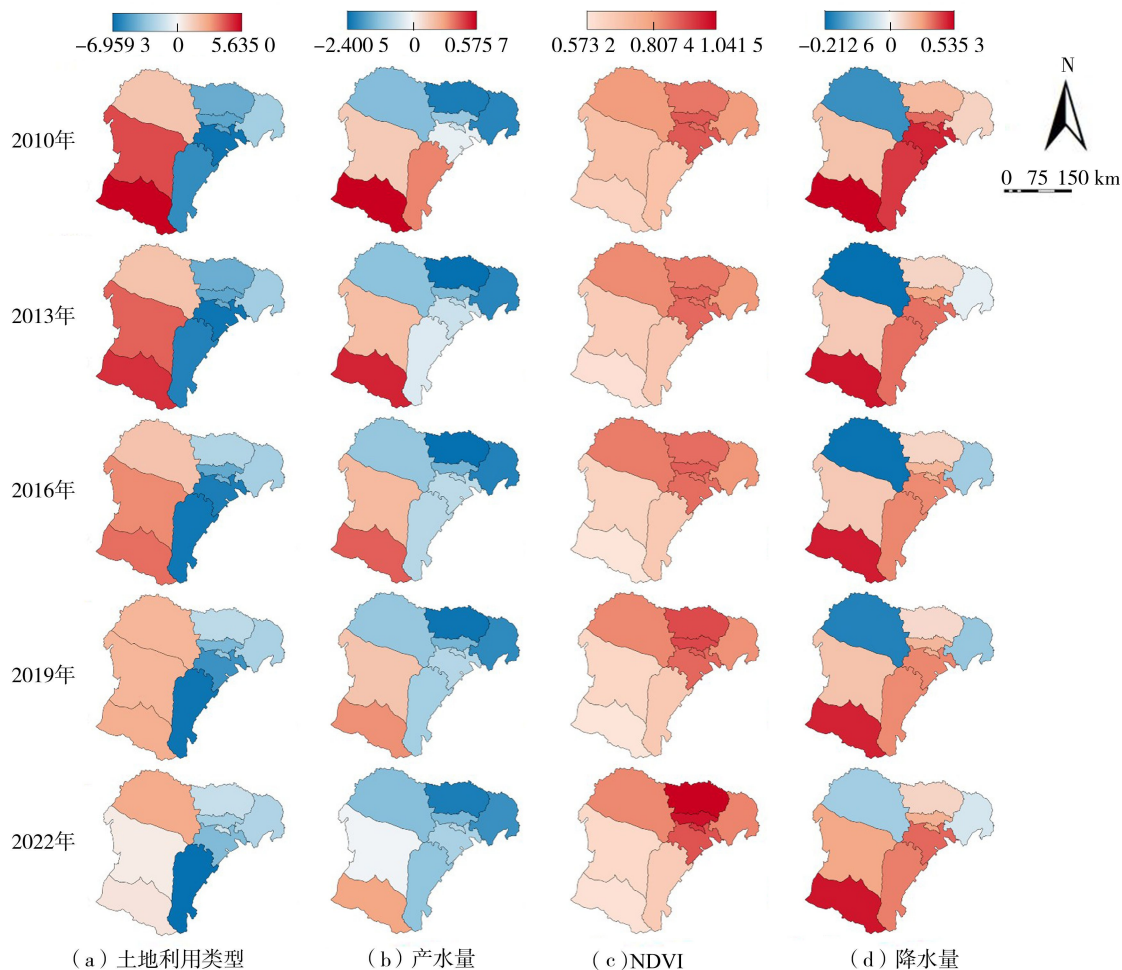


图4 碳储量影响因素回归系数的时空演变

利用类型演变直观体现碳源与碳汇的时空变化,也显著影响区域产水量的变化,当某区域林地占比提升时,既会通过植被增强碳汇能力,又会因植被蒸散发增强而减少地表产流。这种关系在甘肃省^[35]及石羊河流域^[36]的研究中得到验证。

4 结 论

a. 2010—2022 年碳储量与产水量的莫兰指数均值为 0.351,变化幅度较小。这表明碳储量与产水量在空间分布上整体相关性较弱,不过存在较为广泛的正相关聚集区域。

b. 2010—2022 年鄂尔多斯市产水量呈波动变化,多年平均产水量为 27.965 亿 m^3 ,主要受土地利用类型、蒸散发和碳储量影响;总碳储量增长了 0.383 亿 t,从 2010 年的 11.566 亿 t 增长到 2022 年的 11.949 亿 t,主要受土地利用类型和产水量影响。

参考文献:

[1] 王金凤,徐洁,徐基良,等. 黄河流域国家级自然保护区生态系统服务功能评估[J]. 北京林业大学学报,2024,46(7):90-100. (Wang Jinfeng, Xu Jie, Xu Jiliang, et al.

Evaluation of ecosystem service function of national nature reserves of the Yellow River Basin[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(7): 90-100. (in Chinese))

[2] 王蓓,赵军,胡秀芳. 石羊河流域生态系统服务权衡与协同关系研究[J]. 生态学报, 2018, 38(21): 7582-7595. (Wang Bei, Zhao Jun, Hu Xiufang. Analysis on trade-offs and synergistic relationships among multiple ecosystem services in the Shiyang River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(21): 7582-7595. (in Chinese))

[3] 胡志坚,刘如,陈志. 中国“碳中和”承诺下技术生态化发展战略思考[J]. 中国科技论坛, 2021(5): 14-20. (Hu Zhijian, Liu Ru, Chen Zhi. Strategic thinking on the ecological development of technology under China's "carbon neutrality" commitment[J]. Forum on Science and Technology in China, 2021(5): 14-20. (in Chinese))

[4] 祁玉馨,胡远东. 哈尔滨市产水量时空变化及其驱动力[J]. 水土保持通报, 2023, 43(6): 294-303. (Qi Yuxin, Hu Yuandong. Spatial-temporal variation and driving forces of water yield in Harbin City[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(6): 294-303. (in Chinese))

[5] 彭卓越,梁煜彬,方红远,等. 南水北调东线江苏-山东

- 段受水区的碳储量时空演变与驱动因子[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(6): 1080-1090. (Peng Zhuoyue, Liang Yubin, Fang Hongyuan, et al. Spatio-temporal evolution and influencing factors of carbon stock in water-receiving area of Jiangsu-Shandong section of Eastern Route of South-to-North Water Transfers Project [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(6): 1080-1090. (in Chinese))
- [6] Halder S, Das S, Basu S. Estimation of seasonal water yield using InVEST model: a case study from West Bengal, India [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2022, 15 (14): 1293.
- [7] Gashaw T, Worqlul A W, Dile Y T, et al. Evaluating InVEST model for simulating annual and seasonal water yield in data-scarce regions of the Abbay (Upper Blue Nile) Basin; implications for water resource planners and managers[J]. Sustainable Water Resources Management, 2022, 8(5): 170.
- [8] 常建波, 朱博文, 闫宝伟. 黄河流域产水量时空变化及归因分析[J]. 环境科学与技术, 2024, 47(8): 113-122. (Chang Jianbo, Zhu Bowen, Yan Baowei. Spatial and temporal variability of water yield in Yellow River Valley and attribution analysis [J]. Environmental Science & Technology, 2024, 47(8): 113-122. (in Chinese))
- [9] Meza-Mori G, Nematollahi S, Guerra C A A, et al. Integrating MaxEnt and InVEST modeling methods to identify priority areas for the conservation of emblematic and endemic wildlife in the Peruvian Tropical Andes[J]. Global Ecology and Conservation, 2025, 62: e03626.
- [10] Yang Xiaoyang, Wang Chunjuan, Liu Chao, et al. Assessing the spatio evolution of carbon sequestration and optimizing ecological restoration strategies using the InVEST model: a case study of the Yellow River Estuary, China[J]. Marine Environmental Research, 2025, 209: 107204.
- [11] 郑海岳, 王磊, 魏涛, 等. 基于 FLUS-InVEST 模型的淮南市土地覆盖模拟与碳储量评估[J]. 环境科学, 2025, 46(8): 4754-4764. (Zheng Haiyue, Wang Lei, Wei Tao, et al. Land cover simulation and carbon stock assessment in Huainan City based on FLUS-InVEST model [J]. Environmental Science, 2025, 46(8): 4754-4764. (in Chinese))
- [12] 丛中笑, 刘金花, 孙增禹, 等. 基于 PLUS 与 InVEST 模型 的 黄 河 流 域 九 省 (区) 碳 储 量 变 化 分 析 [J]. 人 民 黄 河, 2024, 46(12): 24-30. (Cong Zhongxiao, Liu Jinhua, Sun Zengyu, et al. Analysis of carbon stock changes in nine provinces (regions) of the Yellow River Basin based on PLUS and InVEST models[J]. Yellow River, 2024, 46(12): 24-30. (in Chinese))
- [13] 闫奕飞, 白强, 孙虎, 等. 黄河流域植被变化和产水服务的时空特征分析[J]. 水土保持学报, 2024, 38(1): 130-139. (Yan Yifei, Bai Qiang, Sun Hu, et al. Analysis of spatio-temporal characteristics of vegetation cover and water production services in the Yellow River Basin [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(1): 130-139. (in Chinese))
- [14] 左其亭, 吴青松, 马军霞, 等. “双碳”目标下水资源行为调控研究框架及展望[J]. 水资源保护, 2023, 39(1): 8-14. (Zuo Qiting, Wu Qingsong, Ma Junxia, et al. Research framework and prospects of water resource behavior regulation under carbon peak and carbon neutrality goals [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1): 8-14. (in Chinese))
- [15] 武文欢, 彭建, 刘焱序, 等. 鄂尔多斯市生态系统服务权衡与协同分析[J]. 地理科学进展, 2017, 36(12): 1571-1581. (Wu Wenhuan, Peng Jian, Liu Yanxu, et al. Tradeoffs and synergies between ecosystem services in Ordos City [J]. Progress in Geography, 2017, 36(12): 1571-1581. (in Chinese))
- [16] 王语馨, 郑颖, 高永, 等. 鄂尔多斯市典型生态系统服务时空演变特征及权衡/协同关系[J]. 应用生态学报, 2025, 36(6): 1661-1670. (Wang Yuxin, Zheng Ying, Gao Yong, et al. Spatio-temporal variations and trade-offs/ synergies of typical ecosystem services in Ordos City [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025, 36(6): 1661-1670. (in Chinese))
- [17] Yan Fapeng, Wei Shangguan, Zhang Jing, et al. Depth-to-bedrock map of China at a spatial resolution of 100 meters [J]. Scientific Data, 2020, 7(1): Art2.
- [18] Li Mingyue, Liang Dong, Xia Jun, et al. Evaluation of water conservation function of Danjiang River Basin in Qinling Mountains, China based on InVEST model [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 286: 112212.
- [19] 王宏亮, 杜越洋, 吴健生, 等. 基于 PLUS-InVEST 模型的鄂尔多斯市土地利用模拟及碳储量评估[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2024, 55(6): 570-578. (Wang Hongliang, Du Yueyang, Wu Jiansheng, et al. Landuse scenario simulation and carbon storage assessment in ordos city based on PLUS-InVEST model [J]. Journal of Inner Mongolia University (Natural Science Edition), 2024, 55(6): 570-578. (in Chinese))
- [20] 王思楠, 吴英杰, 王宏宙, 等. 基于地理探测器的鄂尔多斯干旱时空变化驱动因素分析[J]. 干旱区研究, 2024, 41(12): 1981-1991. (Wang Sinan, Wu Yingjie, Wang Hongzhou, et al. Spatial and temporal drivers of drought analysis using the geodetector in Ordos [J]. Arid Zone Research, 2024, 41(12): 1981-1991. (in Chinese))
- [21] 安全. 基于渔网算法的喀斯特流域水系特征提取与地貌发育阶段识别研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2020.
- [22] 陶洁怡, 章锦河, 郭丽佳, 等. 三江源国家公园水源涵养服务时空演变特征及其驱动因素[J]. 生态学报, 2025, 45(3): 1226-1238. (Tao Jieyi, Zhang Jinhe, Guo Lijia, et

- al. Spatiotemporal change and driving factors of water conservation in Sanjiangyuan National Park [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(3): 1226-1238. (in Chinese))
- [23] 孙珉,徐长春,任正良,等.塔里木河流域产水量时空分布及驱动因素分析[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(8): 114-122. (Sun Qi, Xu Changchun, Ren Zhengliang, et al. Spatiotemporal variation in water yield and their underlying mechanisms in Tarim River Basin [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(8): 114-122. (in Chinese))
- [24] 杨洁,谢保鹏,张德罡.基于 InVEST 模型的黄河流域产水量时空变化及其对降水和土地利用变化的响应[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(8): 2731-2739. (Yang Jie, Xie Baopeng, Zhang Degang. Spatio-temporal variation of water yield and its response to precipitation and land use change in the Yellow River Basin based on InVEST model [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(8): 2731-2739. (in Chinese))
- [25] 李曼,吴东丽,何昊,等.1990—2020 年黄河流域碳储量时空演变及驱动因素研究[J]. *生态环境学报*, 2025, 34(3): 333-344. (Li Man, Wu Dongli, He Hao, et al. Spatio-temporal evolution and driving factors of carbon storage in the Yellow River Basin from 1990 to 2020 [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2025, 34(3): 333-344. (in Chinese))
- [26] 陈赛赛,孙艳玲,杨艳丽,等.三北防护林工程区植被景观格局变化分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(12): 85-90. (Chen Saisai, Sun Yanling, Yang Yanli, et al. Analysis on the vegetation landscape pattern changes in the Three-North Shelter Belt Program [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(12): 85-90. (in Chinese))
- [27] 郭彩霞,韩致文,李爱敏,等.库布齐沙漠生态治理与开发利用的典型模式[J]. *西北师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 53(1): 112-118. (Guo Caiyun, Han Zhiwen, Li Aimin, et al. The typical models of ecological management and development and utilization in the Hobq Desert [J]. *Journal of Northwest Normal University (Natural Science)*, 2017, 53(1): 112-118. (in Chinese))
- [28] 邓恩松,丁国梁,万亚筱.新时期鄂尔多斯市机电井取地下水管理思路[J]. *内蒙古水利*, 2024(3): 5-6. (Deng Ensong, Ding Guoliang, Wan Yaxiao. Management ideas for the exploitation and use of groundwater by electromechanical wells in Ordos in the new era [J]. *Inner Mongolia Water Resources*, 2024(3): 5-6. (in Chinese))
- [29] 多化豫,袁云梅.鄂尔多斯市退耕还林工程效益分析[J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2016, 37(4): 42-45. (Duo Huayu, Yuan Yunmei. Ordos City in 2014, returning farmland to forest project benefit analysis [J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2016, 37(4): 42-45. (in Chinese))
- [30] 李悦,赵红霞,胡尔查,等.毛乌素沙地生态系统碳储量时空变化及其驱动因素分析:以乌审旗为例[J]. *生态与农村环境学报*, 2025, 41(1): 99-113. (Li Yue, Zhao Hongxia, Hu Ercha, et al. Spatio-temporal dynamics and driving factors of carbon storage in the Mu Us Sandy Land: a case study in Wushen Banner [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2025, 41(1): 99-113. (in Chinese))
- [31] 何亮,梁海荣,李钢铁,等.近 20 年杭锦旗植被覆盖变化特征及驱动力分析[J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(5): 587-596. (He Liang, Liang Hairong, Li Gangtie, et al. Analysis on the characteristics of changes and driving forces of vegetation cover in Hangjin County in recent 20 years [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(5): 587-596. (in Chinese))
- [32] 张宇,陈宇轩,高志鹏,等.基于土地利用变化的鄂尔多斯市生态系统服务价值时空演化特征分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2025, 39(2): 131-140. (Zhang Yu, Chen Yuxuan, Gao Zhipeng, et al. Characteristics of spatio-temporal evolution of ecosystem service value in Ordos City based on land-use change [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2025, 39(2): 131-140. (in Chinese))
- [33] 刘雄,张万林,王霞.准格尔旗开发建设项目水土流失防治对策[J]. *中国水土保持*, 2000(5): 32-33. (Liu Xiong, Zhang Wanlin, Wang Xia. Countermeasures for soil and water loss prevention and control in development and construction projects in Zhungeer Banner [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2000(5): 32-33. (in Chinese))
- [34] 王俊枝,萨日盖,窦银银,等.2000—2022 年鄂尔多斯高原人类活动对植被覆盖变化的影响[J]. *西安理工大学学报*, 2025, 41(4): 509-516. (Wang Junzhi, Sa Rigai, Dou Yinyin, et al. Effects of human activities on vegetation cover changes in the Ordos Plateau during 2000-2022 [J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2025, 41(4): 509-516. (in Chinese))
- [35] 任玺锦,裴婷婷,陈英,等.基于碳密度修正的甘肃省土地利用变化对碳储量的影响[J]. *生态科学*, 2021, 40(4): 66-74. (Ren Xijin, Pei Tingting, Chen Ying, et al. Impact of land use change on carbon storage in Gansu Province based on carbon density correction [J]. *Ecological Science*, 2021, 40(4): 66-74. (in Chinese))
- [36] 赵亚茹,周俊菊,雷莉,等.基于 InVEST 模型的石羊河上游产水量驱动因素识别[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(12): 3789-3799. (Zhao Yaru, Zhou Junju, Lei Li, et al. Identification of drivers for water yield in the upstream of Shiyang River based on InVEST model [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(12): 3789-3799. (in Chinese))

(收稿日期:2025-06-07 编辑:熊水斌)

抽水蓄能电站侧式进/出水口调整段长度优化

高学平¹, 廉 想¹, 朱洪涛¹, 陈培伦², 王维娜², 刘殷竹¹

(1. 天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室; 2. 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司)

摘要:为优化抽水蓄能电站侧式进/出水口调整段长度,以亚布力抽水蓄能电站下水库侧式进/出水口为研究对象,在进/出水口总长度不变的前提下,采用数值模拟方法探讨调整段长度与扩散段长度之比对侧式进/出水口水力特性的影响。结果表明,对于出流工况,随着调整段长度与扩散段长度之比的增大,中孔拦污栅断面主流位置由孔口中上部逐渐降低至孔口底部,边孔拦污栅断面主流位置变化不明显;中孔和边孔拦污栅断面流速不均匀系数均呈先减小后增大的趋势;当调整段长度为扩散段长度的 50% 时,拦污栅断面流速不均匀系数最小,拦污栅断面无负流速。对于进流工况,进/出水口的各项水力指标基本不受调整段长度变化的影响。因此,在进/出水口总长度不变的情况下,当调整段长度为扩散段长度的 50% 时,进/出水口各项水力指标均相对更优。

关键词:抽水蓄能电站;侧式进/出水口;调整段;扩散段;水力特性;数值模拟

中图分类号:TV135 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2026)05-0067-07

Optimization of adjustment-section length for side inlet/outlet of pumped storage power plants//Gao Xueping¹, Lian Xiang¹, Zhu Hongtao¹, Chen Peilun², Wang Weina², Liu Yinzhu¹(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University; 2. POWERCHINA Beijing Engineering Corporation Limited)

Abstract: To optimize the adjustment-section length for the side inlet/outlet of a pumped storage power station, this paper takes the side inlet/outlet of the lower reservoir of the Yabuli Pumped Storage Power Station as its research object, and uses the numerical simulation method to discuss the influence of the ratio of the adjustment-section length to the diffusion-section length on the hydraulic characteristics of the side inlet/outlet, while keeping the total length of the inlet/outlet fixed. Under the outflow condition, the results show that as the ratio of adjustment-section to diffusion-section length rises, the mainstream position at the trash rack section of the middle channel gradually shifts from the upper-middle part of the orifice to the bottom of the orifice, while that of the side channel does not change significantly. The velocity non-uniformity coefficients at the trash rack section of both the middle and side channels first decrease and then increase. When the adjustment-section length is 50% of the diffusion-section length, the velocity non-uniformity coefficient at the trash rack section reaches its minimum, and there is no negative velocity at the trash rack section. Under the inflow condition, the hydraulic indices of the inlet/outlet are essentially unaffected by variations in adjustment-section length. Therefore, with the total length of the inlet/outlet fixed, all hydraulic indices of the inlet/outlet are relatively better when the adjustment-section length is 50% of the diffusion-section length.

Key words: pumped storage power plant; side inlet/outlet; adjustment section; diffusion section;hydraulic characteristics; numerical simulation

抽水蓄能电站以其突出的综合效益和工程实践优势,在电力系统调度中占据重要地位,为电网安全平稳运行提供了可靠保障^[1-2]。作为抽水蓄能电站输水系统的关键组成部分,进/出水口按照结构形式可分为侧式与竖井式两种,工程中以侧式进/出水口居多^[3-4]。侧式进/出水口是控制水流进水库的通道,具有双向过流的特点^[5],其主要由扩散段、调整

段、防涡梁段三部分组成^[6]。实际工程中,受地形条件及隧洞空间布局的制约,侧式进/出水口总长度一般调整余地较小。因此,在保证侧式进/出水口总长度不变的前提下,如何确定调整段长度以获得较优的进/出水口水力特性,是设计进/出水口必须考虑的问题。

扩散段对侧式进/出水口内部的水力特性存在

基金项目:国家自然科学基金项目(52179077)
作者简介:高学平(1962—),男,教授,博士,主要从事水工水力学研究。E-mail:xpgao@tju.edu.cn
通信作者:朱洪涛(1995—),男,助理研究员,博士,主要从事水工水力学研究。E-mail:htzhslx@tju.edu.cn

显著影响。扩散段的体型参数有扩散段长度、顶板扩张角、水平扩散角、内部分流隔墩间距等。刘殷竹等^[7]提出当扩散段长度为隧洞直径的 5.8 倍时,侧式进/出水口可不设调整段。顶板扩张角主要影响拦污栅断面垂向流速分布,顶板扩张角越小,扩散段内越不易产生流动分离,拦污栅断面越不容易出现负流速;顶板扩张角越大,拦污栅断面越容易出现负流速^[8-9]。一般在拦污栅断面孔口面积不变的情况下,扩散段采用较小的顶板扩张角和较大的水平扩散角可以获得更优的水力特性^[10]。扩散段内部分流隔墩间距和隔墩缩进方式分别影响进/出水口各孔口的流量分配和拦污栅断面流速分布。已有研究明确了较优的隔墩布置方案:中间的分流隔墩缩进隧洞直径的 50%^[11-12],而两侧的分流隔墩则无需缩进^[13-14]。

调整段位于扩散段之后,苏曼等^[15]认为调整段可以改善侧式进/出水口拦污栅断面流速分布的均匀性;刘帅等^[16]指出当调整段长度大于扩散段长度的 30%时可取得较好的水力特性,且调整段越长,拦污栅断面流速分布越均匀;Zhu 等^[17]认为调整段可以有效降低拦污栅断面的流速不均匀系数;韩立^[18]认为调整段可起到改善流速分布、平顺水流的作用。

综上所述,已有研究多聚焦于侧式进/出水口调整段或扩散段的单一体型参数对水力特性的影响,而并未探讨当侧式进/出水口总长度不变时,如何合理分配调整段长度与扩散段长度这一关键问题。因此,本文在保持侧式进/出水口总长度不变的前提下,采用数值模拟方法探讨调整段长度与扩散段长度之比对侧式进/出水口水力特性的影响,以确定抽水蓄能电站侧式进/出水口最优调整段长度。

1 研究对象

以亚布力抽水蓄能电站下水库侧式进/出水口为研究对象,该进/出水口体型结构如图 1 所示。扩散段长 39.0 m,调整段长 16.0 m,防涡梁段长 10.1 m;内设 3 个分流隔墩将进/出水口分为 4 个孔

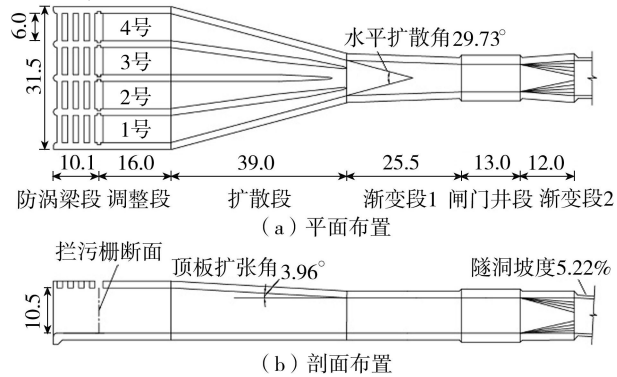


图 1 进/出水口体型结构(单位:m)

道,每个孔道拦污栅断面宽 6.0 m,高 10.5 m;水平扩散角为 29.73°,顶板扩张角为 3.96°;输水隧洞洞径为 7.8 m,隧洞坡度为 5.22%。参照孔口中心基准,死水位条件下淹没水深为 13.75 m。一般情况下,抽水蓄能电站侧式进/出水口调整段与扩散段总长在 50~60 m 之间,该进/出水口调整段与扩散段总长为 55 m,处于上述范围内。

2 模型建立与验证

2.1 控制方程及求解方法

连续性方程和雷诺方程分别为:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u'_i u'_j} \right) + f_i \tag{2}$$

式中: x_i, x_j 为坐标分量; $\bar{u}_i, \bar{u}_j$ 分别为 i 和 j 方向的速度时均量; t 为时间; ρ 为液体密度; $\bar{p}$ 为压强时均量; u'_i, u'_j 分别为 i 和 j 方向的速度脉动量; $\overline{\rho u'_i u'_j}$ 为雷诺应力; f_i 为作用于单位质量水体的体积力; μ 为动力黏滞系数。

由于式(2)中存在未知的雷诺应力项,方程组不封闭,故引入湍流模型^[19]完成方程组封闭后方可求解。鉴于湍流模型中的雷诺应力模型能在保证较高计算效率的同时,准确描述三维空间中的扩散输运过程^[20-21],适用于进/出水口的数值模拟计算。因此,本文选用雷诺应力模型针对雷诺应力张量的所有分量构造附加输运方程,然后联立求解雷诺方程、附加输运方程、湍动能和耗散率方程。雷诺应力模型的附加输运方程、湍动能和耗散率方程见文献^[22]。离散方法采用有限体积法^[23]。

2.2 计算区域及网格剖分

计算区域包括部分隧洞、侧式进/出水口、明渠反坡段和对称库区水域。固壁表面采用无滑移条件,库区边界给定水位,隧洞边界按流量给定平均流速。计算区域采用六面体结构化网格。扩散段分流隔墩头部区域实施多级渐进式网格加密,该区域网格尺寸为 0.01~0.10 m,其余区域网格尺寸为 0.35 m,网格总数约为 1 800 万个,计算区域及网格剖分如图 2 所示。

2.3 模型验证

选取已开展物理模型试验的枣庄山亭抽水蓄能电站侧式进/出水口进行数值模拟,将两者所取得的关键水力指标进行对比,以验证本文数值模拟方法的可靠性和准确性。该进/出水口体型参数如下:侧式进/出水口总长度为 76 m,其中扩散段长 47 m,调

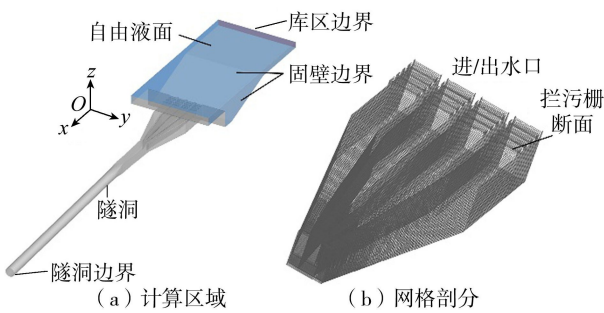


图2 计算区域及网格剖分

整段长 18 m, 防涡梁段长 11 m。水平扩散角为 29.45°, 顶板扩张角为 3.17°, 经渐变段、平直隧洞段、闸门井段后接坡度为 5.5% 的斜直隧洞。死水位条件下淹没水深为 14.32 m, 出流工况流量为 251.00 m³/s, 进流工况流量为 189.54 m³/s, 模型缩尺为 37.6。出流和进流工况下拦污栅断面流速分布试验值与数值模拟值的对比见图 3 (中、边孔拦污栅断面流速的试验值取自文献[24]), 结果表明数值模拟值与试验值的相对误差在 5% 以内, 验证了本文数值模拟方法的可靠性和准确性。

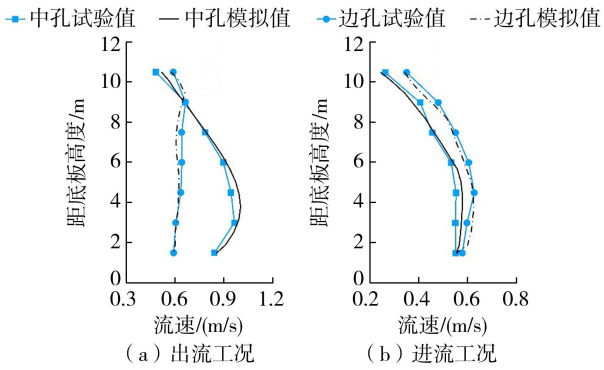


图3 拦污栅断面流速分布

2.4 计算工况

亚布力抽水蓄能电站下水库侧式进/出水口数值模拟以死水位为库区边界条件, 此时孔口中心淹没水深为 13.75 m。为探究最优调整段长度, 在侧式进/出水口孔口宽度与高度以及进/出水口总长度均保持不变的情况下, 设计了 9 组体型参数 (表 1), 其中调整段长度 L_1 与扩散段长度 L_2 之比 (L_1/L_2)

表1 进/出水口体型参数

编号	L_1/L_2	L_1/m	L_2/m	水平扩散角/(°)	顶板扩张角/(°)
1	0	0	55.0	21.31	2.81
2	0.1	5.0	50.0	23.39	3.09
3	0.2	9.2	45.8	25.47	3.37
4	0.3	12.7	42.3	27.50	3.65
5	0.4	15.7	39.3	29.51	3.93
6	0.5	18.3	36.7	31.50	4.21
7	0.6	20.6	34.4	33.49	4.49
8	0.7	22.6	32.4	35.43	4.76
9	0.8	24.4	30.6	37.37	5.04

变化范围为 0~0.8, 包含了 NB/T10072—2018《抽水蓄能电站设计规范》的推荐值 0.4。对各组体型参数所对应的进/出水口体型进行出流和进流工况下的数值模拟研究 (出流工况流量为 175.24 m³/s, 进流工况流量为 131.46 m³/s), 共计 18 组。

3 结果与分析

3.1 出流工况

3.1.1 拦污栅断面流速分布

为保证拦污栅结构安全, 拦污栅断面的流速宜均匀分布。由于进/出水口的体型对称, 本文以中孔 2 号、边孔 1 号为例进行研究。图 4 为出流工况下不同 L_1/L_2 时拦污栅断面中垂线流速分布 (y 为测点至进/出水口底板的高度, H 为孔口高度)。图 4 表明, 出流工况下中孔与边孔的拦污栅断面流速分布受 L_1/L_2 的影响并不相同。对于中孔而言, 随着 L_1/L_2 不断增大, 拦污栅断面最大流速位置即主流位置由孔口中上部逐渐降低至孔口底部; 当 $L_1/L_2 = 0.5$ 时, 主流位置居于孔口中部, 拦污栅断面流速分布基本上下对称; 当 $L_1/L_2 \leq 0.2$ 时, 拦污栅断面底部出现负流速; 当 $L_1/L_2 > 0.2$ 时, 拦污栅断面并未出现负流速。对于边孔而言, 断面最大流速位置变化并不明显, 拦污栅断面流速分布呈上部小底部大的变化趋势, 且随着 L_1/L_2 的增大, 该趋势越明显。另外, 边孔的拦污栅断面始终没有出现负流速。分析原因: 出流工况下水流经由隧洞段进入进/出水口内部时, 中孔流量较大, 当 $L_1/L_2 \leq 0.2$ 时, 由于调整段长度较小, 易在调整段底部形成回流区并产生负流速, 而随着调整段的延长, 水流经调整段后主流位置逐渐下移, 回流区范围逐渐减小, 故负流速消失。而边孔水流在平面上扩散更为充分, 调整段内不易产生回流区, 因此边孔拦污栅断面无负流速且主流位置变化不明显。

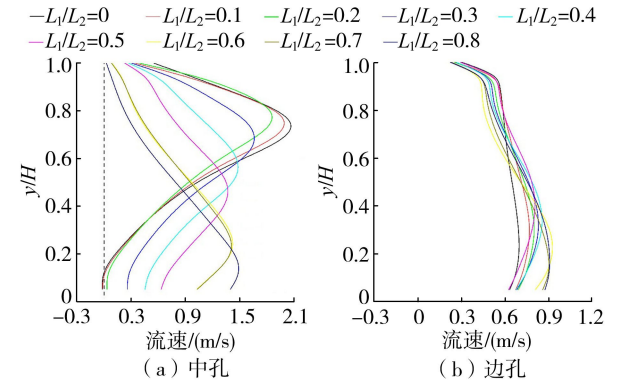


图4 出流工况拦污栅断面中垂线流速分布

NB/T 10072—2018《抽水蓄能电站设计规范》要求拦污栅断面的流速不均匀系数 (即断面流速最

大值与平均流速的数值比)应小于2。表2为出流工况下不同 L_1/L_2 时拦污栅断面中、边孔流速不均匀系数。由此可见,随着 L_1/L_2 的增大,中、边孔拦污栅断面流速不均匀系数均呈先减小后增大的趋势。当 $L_1/L_2 \geq 0.3$ 时,中、边孔流速不均匀系数均小于2,当 $L_1/L_2 = 0.5$ 时,中、边孔流速不均匀系数均为各体型方案中的最小值,分别为1.66和1.29。分析原因:当 L_1/L_2 小于0.5时,随着 L_1/L_2 不断增大,调整段对流速不均匀系数的改善效果显著;当 L_1/L_2 大于0.5时,因扩散段长度较短,水流难以充分扩散,即使调整段长度有所增大,也无法有效降低流速不均匀系数; $L_1/L_2 = 0.5$ 为调整段长度与扩散段长度之比的临界点,此时拦污栅断面流速分布最均匀,拦污栅断面流速不均匀系数最小。

表 2 出流工况拦污栅断面流速不均匀系数

L_1/L_2	中孔流速不均匀系数	边孔流速不均匀系数
0	2.48	1.82
0.1	2.41	1.75
0.2	2.27	1.61
0.3	1.99	1.47
0.4	1.76	1.40
0.5	1.66	1.29
0.6	1.80	1.45
0.7	1.78	1.52
0.8	1.98	1.58

3.1.2 进/出水口沿程流速分布

为分析不同 L_1/L_2 时进/出水口沿程流速分布规律,在扩散段与调整段内部选取若干典型断面,获取各断面的流速分布。典型断面确定如下:沿出流方向,以防涡梁末端为起点($x=0\text{ m}$),在扩散段与调整段内各选取4个典型断面。由于不同方案对应的扩散段长度和调整段长度各不相同,为便于比较,除选取扩散段始端、扩散段末端、调整段始端及调整段末端4个断面外,还在扩散段和调整段内部各选取2个断面,这2个断面分别将扩散段和调整段三等分。图5~7为出流工况下不同 L_1/L_2 时进/出水口沿程流速分布。由图可知,进/出水口内部扩散段与调整段中孔流速大于边孔流速。水流由隧洞进入扩散段后逐渐分流,断面平均流速逐渐减小;当水流进入调整段后,断面最大流速逐渐减小,断面流速分布趋于均匀。随着 L_1/L_2 的增大,中孔主流位置由上部移至下部,而边孔主流区变化不明显。

3.1.3 各孔口流量分配与水头损失

本文以孔口流量不均匀程度(实际流量与理想流量之差与理想流量之比)作为衡量各孔口流量分配均匀性的指标。图8为出流工况下不同 L_1/L_2 时进/出水口各孔口流量不均匀程度和水头损失系数。

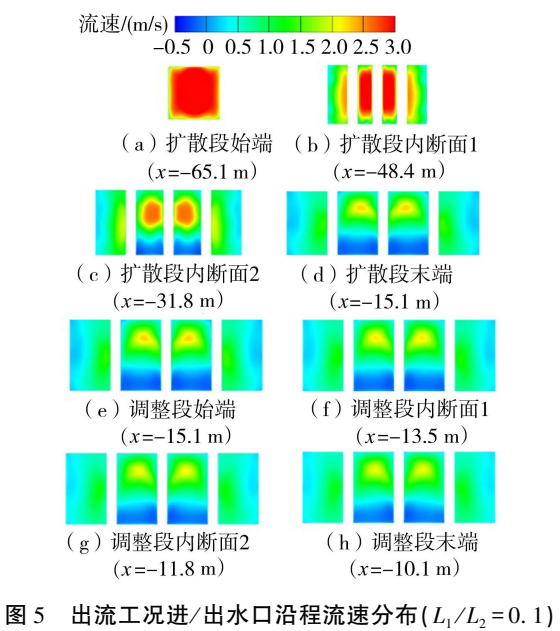


图 5 出流工况进/出水口沿程流速分布 ($L_1/L_2 = 0.1$)

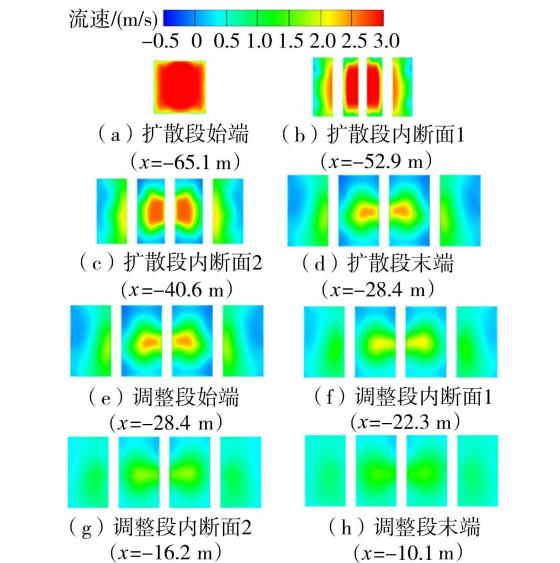


图 6 出流工况进/出水口沿程流速分布 ($L_1/L_2 = 0.5$)

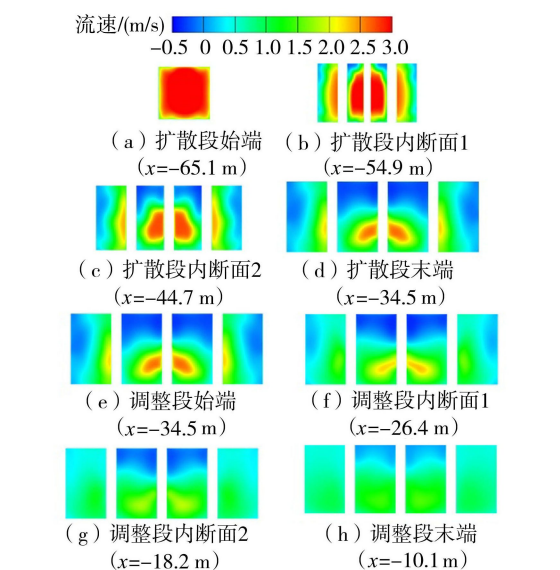


图 7 出流工况进/出水口沿程流速分布 ($L_1/L_2 = 0.8$)

1-1(边孔)、1-2(中孔)、1-3(中孔)、1-4(边孔)分别对应图1中1号、2号、3号、4号孔口。可见中、边孔流量不均匀程度受 L_1/L_2 变化的影响较小,各孔口流量不均匀程度均在10%以内。因此,出流工况下 L_1/L_2 的变化对各孔口流量分配影响很小。

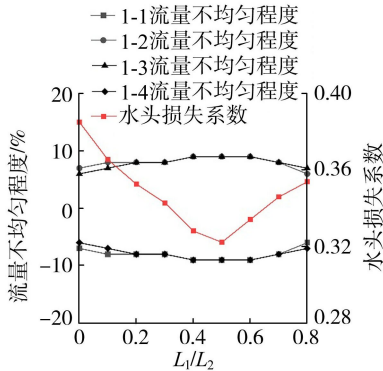


图8 出流工况进/出水口各孔口流量不均匀程度和水头损失系数

水头损失是影响电站经济效益的重要指标^[25-26]。为保证所选断面流速分布较为均匀,故选取扩散段上游1.5倍洞径处断面及库水位断面作为计算进/出水口水头损失的典型断面。在保持侧式进/出水口总长度不变的条件下计算不同 L_1/L_2 时的水头损失及水头损失系数,结果见图8。可知出流工况下水头损失系数随 L_1/L_2 增大先减小后增大,当 $L_1/L_2=0.5$ 时,水头损失系数最小。

3.2 进流工况

3.2.1 拦污栅断面流速分布

图9为进流工况下不同 L_1/L_2 时拦污栅断面中垂线流速分布,可知不同 L_1/L_2 时,中、边孔拦污栅断面流速分布基本重合,拦污栅断面主流位置均靠近孔口中下部,且孔口中下部流速分布较为均匀,孔口上部流速逐渐减小,且其数值几乎不随 L_1/L_2 增大而发生变化。

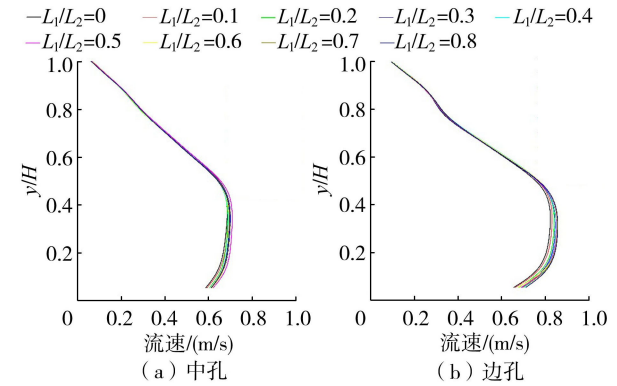


图9 进流工况拦污栅断面中垂线流速分布

表3给出了进流工况下不同 L_1/L_2 时中、边孔流速不均匀系数,可见随着 L_1/L_2 的增大,中、边孔流速不均匀系数变化并不明显。因此, L_1/L_2 的变

化并未对进流工况下拦污栅断面的流速分布产生明显影响。

表3 进流工况拦污栅断面流速不均匀系数

L_1/L_2	中孔流速不均匀系数	边孔流速不均匀系数
0	1.39	1.42
0.1	1.40	1.42
0.2	1.40	1.43
0.3	1.41	1.44
0.4	1.40	1.43
0.5	1.41	1.44
0.6	1.40	1.44
0.7	1.41	1.44
0.8	1.41	1.44

3.2.2 进/出水口沿程流速分布

分析计算结果可知,随着 L_1/L_2 的增大,中、边孔主流位置变化均不明显,沿程流速变化规律基本一致,流速分布较为均匀。水流由库区进入调整段后,断面流速无明显变化,而当水流进入扩散段后,由于水流收缩,断面流速分布趋于均匀,同时因断面面积不断减小,各孔口沿程平均流速随之增大。因此,进流工况下, L_1/L_2 对进/出水口内部流速分布基本无影响。图10为进流工况下 $L_1/L_2=0.5$ 时进/出水口沿程流速分布,可见各断面流速分布较为均匀,且流速沿调整段至扩散段递增,直观印证了上述规律。

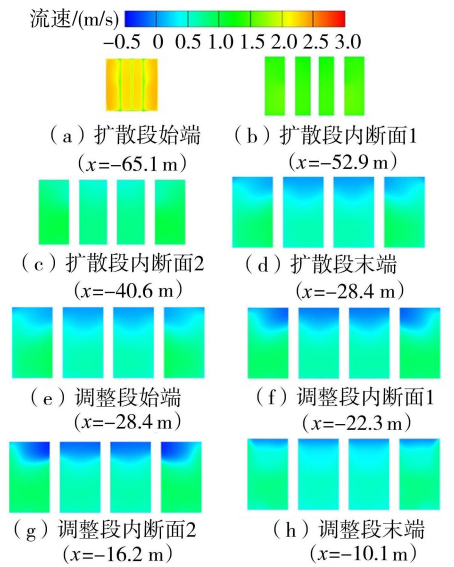


图10 进流工况进/出水口沿程流速分布($L_1/L_2=0.5$)

3.2.3 各孔口流量分配与水头损失

图11为进流工况下不同 L_1/L_2 时进/出水口各孔口流量不均匀程度和水头损失系数。由图11可知,随着 L_1/L_2 增大,各孔口流量不均匀程度无明显变化(变化范围均在10%以内)。因此,进流工况下 L_1/L_2 的变化对孔口流量分配影响很小。此外,在侧式进/出水口总长度不变的条件下,随着 L_1/L_2 的增大,进流工况下水头损失系数不断减小。分析其

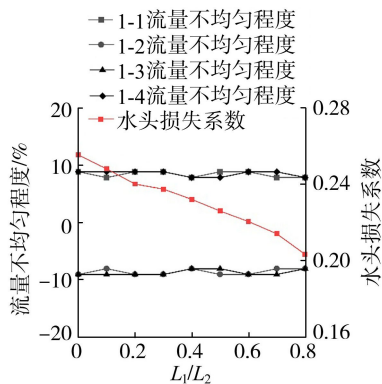


图 11 进流工况进/出水口各孔口流量不均匀程度和水头损失系数

原因:调整段沿程断面面积不变,沿程断面平均流速也不变,流速梯度变化很小,故水头损失较小;而扩散段因水流收缩,沿程断面平均流速不断增大,流速梯度变化较大,水头损失也较大。因此,在侧式进/出水口总长度不变的条件下,增大 L_1/L_2 可有效降低进/出水口的总水头损失。

4 讨论

NB/T 10072—2018《抽水蓄能电站设计规范》建议调整段长度取扩散段长度的 40%。本文研究表明,在侧式进/出水口总长度不变的条件下,当 $L_1/L_2=0.4$ (调整段长度取扩散段长度的 40%) 时,进/出水口各项水力指标满足设计要求,该结果与规范建议值吻合。然而,进一步分析表明,将比值优化为 $L_1/L_2=0.5$ (调整段长度为扩散段长度的 50%) 时,能够更为显著地均化拦污栅断面的流速分布,拦污栅断面流速不均匀系数进一步降低。此外,刘帅等^[16]通过保持扩散段长度不变、增大调整段长度开展相关研究,其做法使调整段与扩散段的总长度增大;而在实际工程中,侧式进/出水口的总长度通常不变。本文在调整段与扩散段总长度不变的条件下进行研究,核心变量为调整段长度与扩散段长度之比而非绝对长度,更符合工程实际。

5 结论

a. 出流工况下,拦污栅断面的流速分布受 L_1/L_2 影响显著。随着 L_1/L_2 不断增大,中孔拦污栅断面主流位置逐渐由孔口中上部降低至孔口底部,且中孔的负流速逐渐消失;边孔拦污栅断面的主流位置变化不明显;中、边孔拦污栅断面流速不均匀系数均先减小后增大。进流工况下, L_1/L_2 对拦污栅断面的流速分布基本无影响。

b. 无论是出流工况还是进流工况,随着 L_1/L_2 不断增大,各孔口流量不均匀程度均无明显变化。

出流工况下,水头损失系数随 L_1/L_2 增大呈先减小后增大的趋势;进流工况下,水头损失系数随 L_1/L_2 增大而持续减小。

c. 一定长度调整段的存在能降低拦污栅断面流速不均匀系数,改善拦污栅断面的流速分布,减小进/出水口的水头损失。然而,在进/出水口总长度一定的条件下,调整段并非越长越好。当调整段长度为扩散段长度的 50% 时,侧式进/出水口的各项水力指标均相对更优。

参考文献:

- [1] Kong Yigang, Kong Zhigang, Liu Zhiqi, et al. Pumped storage power stations in China: the past, the present, and the future [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 71: 720-731.
- [2] 周建平,杜效鹤,周兴波. 面向新型电力系统的水电发展战略研究[J]. 水力发电学报, 2022, 41(7): 106-115. (Zhou Jianping, Du Xiaohu, Zhou Xingbo. Study on hydropower development strategy for new power systems [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(7): 106-115. (in Chinese))
- [3] 高学平,朱洪涛,刘殷竹,等. 进出水口双向流动结构流速分布与脉动规律研究[J]. 水利学报, 2022, 53(6): 722-732. (Gao Xueping, Zhu Hongtao, Liu Yin Zhu, et al. Research on velocity distribution and fluctuation law of bidirectional flow structure of inlet/outlet [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(6): 722-732. (in Chinese))
- [4] 郑源,吴峰,周大庆. 现代抽水蓄能电站[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2021.
- [5] 郝荣国,吕明治,王可. 抽水蓄能电站工程技术[M]. 2 版. 北京:中国电力出版社, 2023.
- [6] 高学平. 抽水蓄能电站侧式进/出水口水力特性研究[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2024.
- [7] 刘殷竹,魏南疆. 扩散段长度对侧式进/出水口水力特性的影响[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(4): 79-85. (Liu Yin Zhu, Wei Nan Jiang. Effects of diffusion section length on hydraulic characteristics of side inlet/outlet [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(4): 79-85. (in Chinese))
- [8] 高学平,曾庆康,朱洪涛,等. 侧式进/出水口顶板扩张角对拦污栅断面流速分布影响规律研究[J]. 水利学报, 2024, 55(3): 301-312. (Gao Xueping, Zeng Qingkang, Zhu Hongtao, et al. Study on the influence of the expansion angle of the side inlet/outlet roof on the velocity distribution of the trash rack section [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55(3): 301-312. (in Chinese))
- [9] 王晨茜,张晨,张翰,等. 侧式进/出水口流动分离现象

- 研究[J]. 水力发电学报,2017,36(11):73-81. (Wang Chenxi,Zhang Chen,Zhang Han,et al. Flow separation in side inlets/outlets of pumped storage power stations[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2017,36(11):73-81. (in Chinese))
- [10] 高学平,罗畅,刘殷竹,等. 平面扩散角对侧式进/出水口水力特性的影响[J]. 水利水电科技进展,2025,45(3):1-7. (Gao Xueping, Luo Chang, Liu Yinzhu, et al. Influence of planar diffusion angle on hydraulic characteristics of lateral inlet/outlet[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2025,45(3):1-7. (in Chinese))
- [11] 高学平,马一鸣,刘殷竹,等. 侧式进/出水口各孔道流量分配差异及影响因素[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2024,57(6):633-641. (Gao Xueping, Ma Yiming, Liu Yinzhu, et al. Differences and influencing factors of flow distribution at each channel in side inlet/outlet[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology),2024,57(6):633-641. (in Chinese))
- [12] 徐准,吴时强. 抽水蓄能电站侧式进/出水口隔墩布置对水力特性的影响[J]. 水利水电科技进展,2020,40(3):21-27. (Xu Zhun, Wu Shiqiang. Influence of arrangement of division piers in lateral inlet and outlet of pumped storage plants on hydraulic characteristics[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2020,40(3):21-27. (in Chinese))
- [13] 孙双科,柳海涛,李振中,等. 抽水蓄能电站侧式进/出水口拦污栅断面的流速分布研究[J]. 水利学报,2007,38(11):1329-1335. (Sun Shuangke, Liu Haitao, Li Zhenzhong, et al. Study on velocity distribution behind the trashrack in lateral intake/outlet of pumped storage power station[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2007,38(11):1329-1335. (in Chinese))
- [14] 蔡付林,胡明,张志明. 双向水流侧式进出水口分流墩研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2000,28(2):74-77. (Cai Fulin, Hu Ming, Zhang Zhiming. Study on guide piers in flank inlet-outlet with double flow directions[J]. Journal of Hohai University (Natural Science),2000,28(2):74-77. (in Chinese))
- [15] 苏曼,高学平. 抽水蓄能电站进/出水口体型优化数值模拟[J]. 南水北调与水利科技,2011,9(5):95-98. (Su Man, Gao Xueping. 3D Numerical simulation of intake/outlet of pumped storage plant[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2011,9(5):95-98. (in Chinese))
- [16] 刘帅,李天国,黄晓龙,等. 调整段长度对抽水蓄能电站侧式进/出水口水力特性的影响[J]. 长江科学院院报,2025,42(11):96-102. (Liu Shuai, Li Tianguo, Huang Xiaolong, et al. Effect of adjustment section length on hydraulic characteristics of side inlet/outlet in a pumped storage power station[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute,2025,42(11):96-102. (in Chinese))
- [17] Zhu Hongtao, Gao Xueping, Liu Yinzhu, et al. Numerical and experimental assessment of the water discharge segment in a pumped-storage power station[J]. Energy,2023,265:126375.
- [18] 韩立. 抽水蓄能电站侧式进/出水口水力设计研究[J]. 水利水电科技进展,2002,22(6):23-26. (Han Li. Hydraulic design for side inlets and outlets of pumped storage power stations[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2002,22(6):23-26. (in Chinese))
- [19] 高学平. 高等流体力学[M]. 天津:天津大学出版社,2005.
- [20] Lu Liping, Zhong Luyang, Liu Yangwei. Turbulence models assessment for separated flows in a rectangular asymmetric three-dimensional diffuser[J]. Engineering Computations,2016,33(4):978-994.
- [21] 高学平,陈昊,孙博闻,等. 侧式进/出水口数值模拟湍流模型比较研究[J]. 水利水电技术,2020,51(11):109-116. (Gao Xueping, Chen Hao, Sun Bowen, et al. Comparative study on turbulence models for numerical simulation of lateral inlet/outlet[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2020,51(11):109-116. (in Chinese))
- [22] 高学平,陈思宇,朱洪涛,等. 反坡段对侧式进/出水口水力特性影响研究[J]. 水力发电学报,2021,40(5):87-98. (Gao Xueping, Chen Siyu, Zhu Hongtao, et al. Study on the influences of reverse slope section on hydraulic characteristics of side inlet/outlet[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2021,40(5):87-98. (in Chinese))
- [23] 金忠青. N-S 方程的数值解和紊流模型[M]. 南京:河海大学出版社,1989.
- [24] 天津大学. 枣庄山亭抽水蓄能电站工程下水库进/出水口水工模型试验研究报告[R]. 天津:天津大学,2024.
- [25] 高学平,陶文杰,朱洪涛,等. 侧式进/出水口水头损失系数多元线性回归分析[J]. 水力发电学报,2024,43(4):50-61. (Gao Xueping, Tao Wenjie, Zhu Hongtao, et al. Multiple linear regression analysis on head loss coefficients of side inlets and outlets[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2024,43(4):50-61. (in Chinese))
- [26] 张从联,朱红华,钟伟强,等. 惠州抽水蓄能电站上库进出水口水力学模型试验[J]. 水利水电科技进展,2004,24(6):13-16. (Zhang Conglian, Zhu Honghua, Zhong Weiqiang, et al. Hydraulic model test for inlets and outlets of head reservoir of Huizhou pumped-storage hydroplant[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2004,24(6):13-16. (in Chinese))

(收稿日期:2025-06-09 编辑:骆超)

基于毕达哥拉斯模糊云模型的大型灌区工程安全评价

岑威钧¹,王肖鑫²,李子阳³,翟来铮⁴,魏淑卿⁴,常东明⁴

(1. 河海大学水利水电学院; 2. 长江水利水电开发集团(湖北)有限公司; 3. 南京水利科学研究院;
4. 河南省赵口引黄灌区二期工程建设管理局)

摘要:在综合分析灌区建筑物组成、运行特点等基础上,从渠道工程风险、其他建筑物工程风险、暴雨洪水风险、地震及冰冻风险、运行管理风险 5 个方面入手,构建了包括渠坡滑坡、主体失稳、消能破坏、建筑物震损、历史险情等 20 个指标的大型灌区工程安全评价指标体系。引入序关系分析法和变异系数法对评价指标进行主观和客观赋权,并基于博弈论进行组合赋权,有效提升了指标赋权的准确性和可靠性。同时,在传统云模型中引入毕达哥拉斯模糊数,建立了适用于复杂灌区工程安全评价的毕达哥拉斯模糊云模型,并对河南省某大型灌区工程进行了评价研究。结果表明,该灌区工程综合安全评价指数为 0.857,安全等级判定为安全,应用毕达哥拉斯模糊云模型得到的安全评价结果具有较高的稳定性,为大型灌区工程安全评价提供了新途径。

关键词:大型灌区;安全评价;云模型;毕达哥拉斯模糊数;组合赋权

中图分类号:TV698.2⁺1 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2026)05-0074-07

Safety evaluation of large-scale irrigation district projects based on Pythagorean fuzzy cloud model//Cen Weijun¹, Wang Xiaoxin², Li Ziyang³, Zhai Laizheng⁴, Wei Shuqing⁴, Chang Dongming⁴ (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University; 2. Changjiang Water Resources and Hydropower Development Group Co., Ltd.; 3. Nanjing Hydraulic Research Institute; 4. Construction Management Bureau of the Phase II Project of Zhaokou Yellow River Diversion Irrigation District, Henan Province)

Abstract: Based on a comprehensive analysis of the structure composition and operational characteristics of irrigation districts, a safety evaluation indicator system for large-scale irrigation district projects was constructed from five aspects: channel engineering risk, risk of other structures, rainstorm and flood risk, earthquake and frost risk, and operation and management risk. The system includes 20 indicators, such as canal slope landslide, main structure instability, energy dissipation failure, structural seismic damage, and historical hazard events. The order relation analysis method and the coefficient of variation method were employed to calculate the subjective and objective weights of the evaluation indicators, respectively, and combined weighting was determined based on game theory, which effectively improved the accuracy and reliability of the indicator weighting. Furthermore, the Pythagorean fuzzy number was introduced into the traditional cloud model, and a Pythagorean fuzzy cloud model suitable for the safety evaluation of complex irrigation districts was established. Finally, the model was used to evaluate the safety of a large-scale irrigation district in Henan Province. The results show that the comprehensive safety index of the irrigation district is 0.857, classifying it as “safe”. The safety evaluation results derived from the Pythagorean fuzzy cloud model exhibit high stability, providing a novel method for safety evaluation of large-scale irrigation districts.

Key words: large-scale irrigation district; safety evaluation; cloud model; Pythagorean fuzzy number; combined weighting

根据水利部 2022 年公布的《全国大型灌区名录》,我国现有灌溉面积 2 万 hm² 及以上的大型灌区 449 处,有效灌溉面积达 1 640 万 hm²。大型灌区工程渠道线路长,灌区内建筑物数量众多且种类繁多,地质和环境条件复杂,加之现有大型灌区工程多建于 20 世纪 50—70 年代,灌区工程往往处于超期服役状态,其功能和效益难以充分发挥。因此,有必要对大型灌区工程进行综合安全评价,以便及时掌握灌区工程的整体运行状况,为工程的维修加固、改建扩建及功能提升提供技术支撑。

灌区工程由水源、引输配水建筑物及沟渠系统构成,系统覆盖范围广。现有灌区评价研究侧重于水资源利用率、土地适宜性、灌区生态环境等方面^[1-2],而从工程角度开展灌区安全评价的研究相对

较少。杨道富^[3]从安全性和耐久性方面剖析了灌区建筑物安全影响因素,提出了建筑物完好率这一评价指标以反映灌区工程安全状态。游黎等^[4]根据粗糙集理论和集成分析法建立了基于组合赋权的大型灌区工程运行状况评价模型。为了科学评价灌区工程安全性,可借鉴水闸、泵站、渠道等工程安全评价模型和评价方法。例如:李家田等^[5]根据水闸工程安全评价指标之间的关联性,建立了基于物元理论的水闸安全综合评价模型,为类似工程的安全评价和运行管理提供了新思路;武慧芳等^[6]结合泵站建筑物开裂、失稳等风险因素,构建了涵盖建筑物变形破坏程度、整体稳定性等维度的泵站安全评价指标体系,并给出了不同安全等级的维修养护标准;贡力等^[7]基于系统方法论构建了寒冷地区明渠安全评价模型,并采用熵权法确定指标权重,进而验证了评价模型的科学性与合理性。此外,一些新型的评价算法和评价模型也不断涌现并应用于实际工程中,例如云模型评价方法等。Zhang 等^[8]综合考虑了评价指标的随机性和空间异质性,提出了一种多维相似云模型评价方法,并将其应用于青藏高原的河流健康评价。Deng 等^[9]构建了基于云模型的城市道路拥堵评价模型,能较好地识别出路段的拥堵程度。Liao 等^[10]建立了基于云模型的电力变压器风险评估模型,可有效识别电力变压器故障的不确定性。

相比单一建筑物安全评价,灌区工程因建筑物类型众多且相互影响,传统云模型评价方法难以综合考量灌区不同建筑物的差异性,以及多风险因素引发的评价结果模糊性。为此,本文依托河南省某大型灌区工程,将可反映多因素不确定性的云模型和表征模糊性的毕达哥拉斯模糊集相结合,提出适用于大型灌区工程安全评价的毕达哥拉斯模糊云模型,并通过实例应用验证模型的科学性,以期为大型灌区工程安全评价提供一种切实可行的新途径。

1 大型灌区工程安全评价指标体系

首先,在梳理分析内蒙古河套灌区、山西汾河灌区、陕西洛惠渠灌区等国内多个大型灌区工程案例的基础上,研究灌区工程安全影响因素和风险成因。同时,依托河南省某大型灌区工程,通过实地调研、现场检测、计算分析及资料梳理,对大型灌区工程主要运行模式进行深入分析,归纳总结了影响大型灌区工程安全的各类风险因素。其次,针对灌区建筑物自身进行考察,以渠道为例,其作为灌区主要输水结构,常见的工程风险主要有渠坡滑坡、渠顶损毁、渗漏破坏等。对于灌区其他建筑物,如渡槽、倒虹吸、节制闸、分水闸等,虽然存在各自的结构特点和

运行条件,但其主要安全问题可以归纳为主体失稳、进出口段破坏、不均匀沉降、接触渗漏、老化剥蚀等。除了渠道工程风险、其他建筑物工程风险以外,灌区还可能遭遇暴雨洪水、地震、冰冻等自然灾害,且灌区的运行管理疏漏也可能引发灌区工程安全风险。综上,最终建立大型灌区工程安全评价指标体系(图1),包括渠道工程风险、其他建筑物工程风险、暴雨洪水风险、地震及冰冻风险、运行管理风险这5个一级评价指标,以及渠坡滑坡、主体失稳、消能破坏、建筑物震损、历史险情等20个二级评价指标。

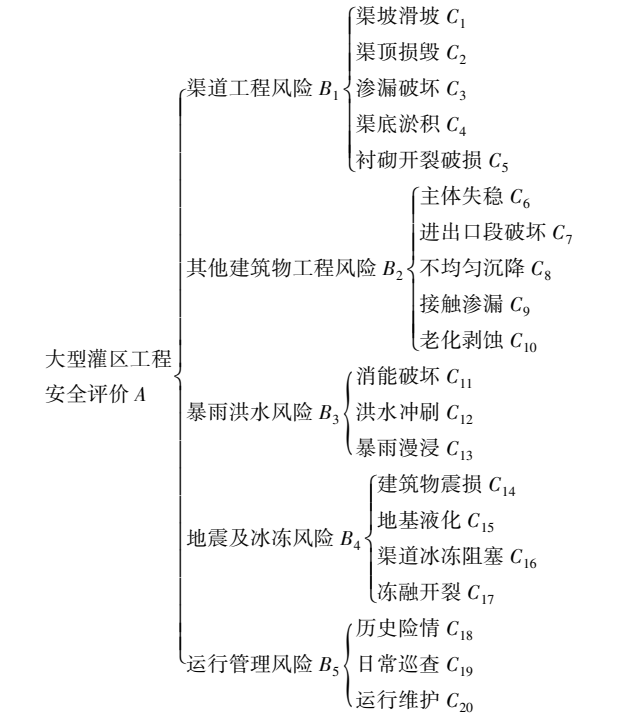


图1 大型灌区工程安全评价指标体系

对部分二级评价指标补充说明如下:考虑到河套平原、宁夏平原、黄河冲积平原等地区的灌区所引水源含沙量较高,长时间泥沙沉积造成渠道底部发生淤积,因此将渠底淤积 C_4 纳入评价指标体系中;衬砌开裂破损 C_5 针对的是采用混凝土或浆砌石等材料衬砌的渠道,若渠道未采取衬砌防护,则不考虑该评价指标;主体失稳 C_6 用于评价灌区建筑物的抗滑、抗浮、抗倾覆等失稳风险;在采用接触渗漏 C_9 进行安全评价时,灌区内不同建筑物的评价侧重点有所不同,以倒虹吸为例,应重点关注进出口闸室段的基底渗流以及建筑物外围结合带的异常渗流现象^[11];日常巡查 C_{19} 主要指对灌区建筑物开展必要的巡查工作,同时进行隐患记录和资料分析;运行维护 C_{20} 是指对灌区建筑物的金属结构和机电设备进行检查和维修,包括查看闸门是否锈蚀、卡阻以致无法正常启闭,检查电器控制设备是否失效等。

由于目前尚无灌区安全等级划分的相关规定,为了清晰描述灌区的具体安全状态,参照水闸、堤防

等工程的安全评价导则,同时结合灌区评价方面已有相关研究,将灌区工程安全评价等级划分为5类,分别为安全、较安全、基本安全、较危险和危险,相应的评分区间为(85,100]、(70,85]、(60,70]、(50,60]和(0,50]。

2 大型灌区工程安全评价的毕达哥拉斯模糊云模型

2.1 建模思路

图2为本文改进的大型灌区工程安全评价模型框架,涉及云模型、毕达哥拉斯模糊云模型、主客观赋权等关键内容,包含以下几个要点。

a. 建立毕达哥拉斯模糊云模型。考虑到云模型的3个云参数(期望 E_x 、熵 E_n 、超熵 H_e)反映了评价指标的模糊性与随机性,以及毕达哥拉斯模糊数的隶属度 $\mu_p(x)$ 和非隶属度 $v_p(x)$ 具有表征评价指标模糊性的特点,将云模型的3个云参数和毕达哥拉斯模糊数的隶属度和非隶属度相结合,建立了包含5个参数的毕达哥拉斯模糊云模型,所建模型能够表征安全评价的随机性和模糊性,进而采用安全评价指数对大型灌区工程进行安全评价。

b. 组合赋权确定评价指标权重。在构建大型灌区工程安全评价的毕达哥拉斯模糊云模型中,选取序关系分析法作为主观赋权方法。这是因为传统层次分析法难以构造判断矩阵且需要进行一致性检验,相较而言,序关系分析法无需构建判断矩阵及进行一致性检验,计算过程更为清晰简捷,因此更适用于评价指标较多的大型灌区工程安全评价体系^[12],其具体计算方法见文献[12]。选取变异系数法为客观赋权方法,该方法基于统计学原理计算系统内各指标的变化程度,通过变异系数来衡量评价指标的不确

定性,能够客观反映数据的变化程度,进而合理确定灌区工程各评价指标的相对重要程度^[13],具体计算方法见文献[13]。由序关系分析法和变异系数法分别得到主、客观权重后,引入博弈论理论进行灌区工程安全评价指标的组合赋权。该方法在兼顾多种赋权方法权重一致性的同时,实现了各指标组合权重与单一赋权方法所得权重之间的偏差最小化,从而有效提升灌区工程安全评价指标赋权的准确性和可靠性。

c. 根据计算结果确定灌区工程安全状态。求得各评价指标的组合权重后,采用逼近理想解法计算各层级指标的评价结果,并结合指标层的毕达哥拉斯模糊云参数,最终计算得出大型灌区工程安全评价结果。将5个安全等级(安全、较安全、基本安全、较危险、危险)对应的安全评价指数与大型灌区工程的安全评价指数进行对比,并结合相关检验指标评估灌区工程安全评价结果的可行性和稳定性,从而判断灌区工程的安全等级。

2.2 云模型

云模型能够刻画定量数值的随机不确定性,目前已广泛应用于多领域安全评价研究^[14-15]。设 U 为一个用数值表示的定量论域, C 为论域 U 上的定性概念,若定量值 x 为 C 的一次随机实现($x \in U$), x 对 C 的确定度 $\mu(x)$ 为具有稳定倾向的随机数($\mu(x) \in [0,1]$),则 x 在论域 U 上的分布称为云模型,记作 $C(x)$;每一个 x 称为一个云滴。

云模型包含期望 E_x 、熵 E_n 、超熵 H_e 等3个云参数,其中 E_x 为云滴在论域空间分布的中心值,用于反映灌区工程安全状态的预期; E_n 为定性概念随机性的度量,反映了能够代表这一定性概念的云滴的离散程度,用于评判评价结果的可信水平; H_e 为熵的不确定性度量,由熵的随机性和模糊性共同决定,

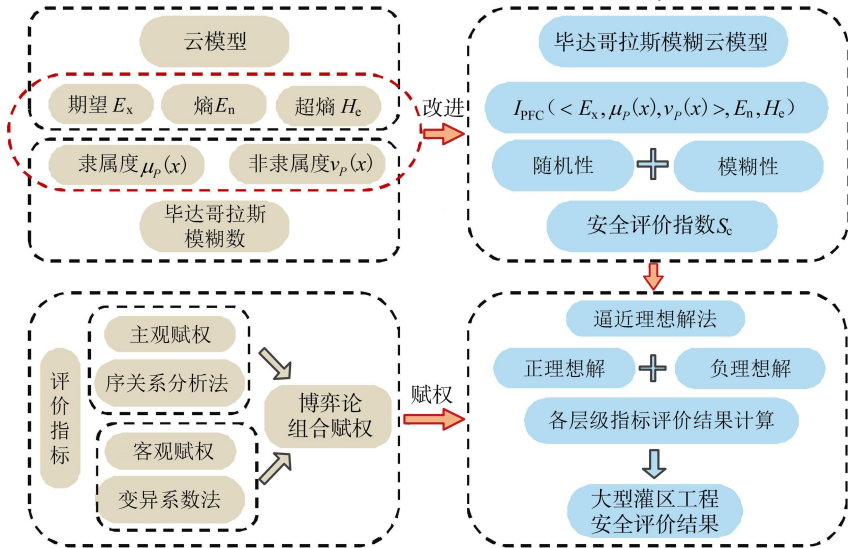


图2 大型灌区工程安全评价模型框架

用于描述评价结果的稳定程度。

2.3 毕达哥拉斯模糊集

毕达哥拉斯模糊集由 Yager^[16] 于 2014 年提出, 该集合放宽了直觉模糊集中隶属度和非隶属度之和必须小于或等于 1 的约束条件, 可以有效处理复杂系统中的不确定性和模糊性问题。毕达哥拉斯模糊集的定义如下:

$$P = \{ \langle x, \mu_p(x), v_p(x) \rangle \mid x \in U \} \quad (1)$$

式中: $\mu_p(x)$ 、 $v_p(x)$ 分别为 x 隶属于集合 P 的隶属度和非隶属度, $0 \leq \mu_p(x) \leq 1, 0 \leq v_p(x) \leq 1$, 且 $\mu_p^2(x) + v_p^2(x) \leq 1$ 。

序对 $(\mu_p(x), v_p(x))$ 称为毕达哥拉斯模糊数, 在实际应用中, 通常根据指标间的隶属度和非隶属度对评价对象进行评价。

2.4 毕达哥拉斯模糊云模型

云模型采用云发生器实现定量数值与定性描述的相互转换, 通过 3 个云参数表征评价过程中的不确定性, 从而更为直观地表示评价结果。在安全评价时, 部分评价指标的熵 E_n 和超熵 H_e 值过大可能会导致云滴出现较大程度离散, 即出现“雾化”现象。毕达哥拉斯模糊数 $(\mu_p(x), v_p(x))$ 中 $\mu_p(x)$ 和 $v_p(x)$ 分别表示不同评价指标与对应评价等级间的隶属度和非隶属度, 能够有效解决灌区评价指标的复杂模糊性。将能够考虑随机性的云模型和反映模糊性的毕达哥拉斯模糊集相结合, 构建毕达哥拉斯模糊云模型, 毕达哥拉斯模糊云可定义为 $C(\langle E_x, \mu_p(x), v_p(x) \rangle, E_n, H_e)$, 则第 i 个评价指标对应的毕达哥拉斯模糊云即可表示为 $C_i(\langle E_{xi}, \mu_{pi}(x), v_{pi}(x) \rangle, E_{ni}, H_{ei}) (i = 1, 2, \dots, m)$, 其中 m 为评价指标数量。采用逼近理想解法^[17] 对毕达哥拉斯模糊数进行求解, 通过计算各指标的毕达哥拉斯模糊数正、负理想解来判断指标间的相对重要程度, 具体步骤如下:

步骤 1 确定各指标层的毕达哥拉斯模糊云 $C_i(\langle E_{xi}, \mu_{pi}(x), v_{pi}(x) \rangle, E_{ni}, H_{ei}) (i = 1, 2, \dots, m)$, 引入序关系分析法和变异系数法对评价指标进行主观和客观赋权, 并基于博弈论实现组合赋权, 以确定各指标权重 w_i , 依次计算准则层和目标层的毕达哥拉斯模糊云, 计算公式如下:

$$I_{\text{PFC}}(\cdot) = \left(\langle \sum_{i=1}^m w_i E_{xi}, \frac{\sum_{i=1}^m w_i \mu_{pi} E_{xi}}{\sum_{i=1}^m w_i E_{xi}}, \frac{\sum_{i=1}^m w_i v_{pi} E_{xi}}{\sum_{i=1}^m w_i E_{xi}} \rangle, \sqrt{\sum_{i=1}^m w_i E_{ni}^2}, \sqrt{\sum_{i=1}^m w_i H_{ei}^2} \right) \quad (2)$$

式中: $I_{\text{PFC}}(\cdot)$ 为毕达哥拉斯模糊云聚合算子。

步骤 2 计算评价指标的正、负理想解:

$$C^+ = (\langle E_x^+, \mu_p^+, v_p^+ \rangle, E_n^+, H_e^+) = (\langle \max_{1 \leq i \leq m} E_{xi}, \max_{1 \leq i \leq m} \mu_{pi}, \max_{1 \leq i \leq m} v_{pi} \rangle, \max_{1 \leq i \leq m} E_{ni}, \max_{1 \leq i \leq m} H_{ei}) \quad (3)$$

$$C^- = (\langle E_x^-, \mu_p^-, v_p^- \rangle, E_n^-, H_e^-) = (\langle \min_{1 \leq i \leq m} E_{xi}, \min_{1 \leq i \leq m} \mu_{pi}, \min_{1 \leq i \leq m} v_{pi} \rangle, \min_{1 \leq i \leq m} E_{ni}, \min_{1 \leq i \leq m} H_{ei}) \quad (4)$$

式中: C^+ 、 C^- 分别为评价指标的正理想解和负理想解。

步骤 3 计算各评价指标 C_i 与正、负理想解的距离 d_i^+ 和 d_i^- , 计算方法见文献[18], 表达式为:

$$\begin{cases} d^{\pm} = d(C_i, C^{\pm}) = |(1 - \xi_1)\rho_i E_{xi} - (1 - \xi_2)\rho^{\pm} E_x^{\pm}| \\ \xi_1 = \frac{\sqrt{E_{ni}^2 + H_{ei}^2}}{\sqrt{E_{ni}^2 + H_{ei}^2} \sqrt{(E_n^+)^2 + (H_e^+)^2}} \\ \xi_2 = \frac{\sqrt{(E_n^+)^2 + (H_e^+)^2}}{\sqrt{E_{ni}^2 + H_{ei}^2} \sqrt{(E_n^+)^2 + (H_e^+)^2}} \\ \rho_i = \min\{\mu_{pi}, \sqrt{1 - v_{pi}^2}\} \\ \rho^{\pm} = \min\{\mu_p^{\pm}, \sqrt{1 - (v_p^{\pm})^2}\} \end{cases} \quad (5)$$

式中: ξ_1 、 ξ_2 分别为指标隶属系数和理想解隶属系数; ρ_i 、 $\rho^{\pm}$ 分别为指标偏离系数和理想解偏离系数。其他物理量符号含义见文献[18]。

基于各评价指标 C_i 与正、负理想解的距离 d_i^+ 和 d_i^- , 构建灌区工程安全评价指数 S_c 、 S_e 值越大, 表明该评价指标的安全状况越好, 据此可判定各评价指标的相对安全水平。 S_c 计算公式如下:

$$S_c = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (6)$$

3 实例应用

某引黄灌区二期工程位于河南省黄河南岸, 灌区设计灌溉面积为 1 470 km², 总土地面积为 2 174 km², 范围涉及郑州、开封、周口、商丘 4 个设区市, 包括中牟、通许、杞县、太康、柘城等 5 个县及开封市城乡一体化示范区、鼓楼区、祥符区 3 个区。灌区内包含渠道、渡槽、倒虹吸、节制闸、分水闸等水工建筑物。其中, 渠道 31 条(包括总干渠 1 条、干渠 9 条、分干渠 6 条和支渠 15 条)、渡槽 1 座、倒虹吸 9 座、路涵 41 座、节制闸 104 座、分水闸 49 座、退水闸 26 座。

本文收集了 56 项关键控制工程(包括渠道 10 条、渡槽 1 座、倒虹吸 5 座、路涵 10 座、水闸

30 座)的现场勘查与检测资料,主要数据来源于工程建设及管理单位。邀请 11 位行业权威专家对灌区工程安全评价体系中的 20 个评价指标进行打分,根据评分结果计算得到各指标对应的毕达哥拉斯模糊云参数。采用序关系分析法确定灌区工程安全评价指标的主观权重,采用变异系数法确定灌区工程安全评价指标的客观权重,根据博弈论计算得到主、客观权重的博弈权系数分别为 0.56 和 0.44,最终计算得到该灌区工程各评价指标的组合权重及毕达哥拉斯模糊云,结果见图 3 和表 1。

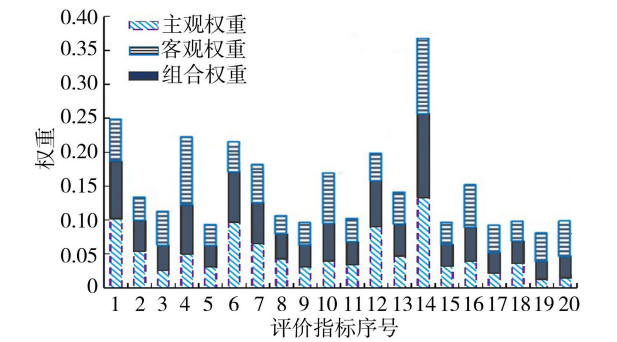


图 3 灌区工程安全评价指标权重

表 1 灌区工程安全评价指标毕达哥拉斯模糊云

评价指标	毕达哥拉斯模糊云
C_1	($\langle 88.3, 0.66, 0.52 \rangle, 1.554, 0.812$)
C_2	($\langle 83.8, 0.61, 0.52 \rangle, 1.955, 0.357$)
C_3	($\langle 78.7, 0.62, 0.48 \rangle, 2.306, 0.618$)
C_4	($\langle 81.6, 0.59, 0.51 \rangle, 2.156, 0.391$)
C_5	($\langle 84.5, 0.62, 0.49 \rangle, 1.504, 0.699$)
C_6	($\langle 80.9, 0.68, 0.51 \rangle, 1.905, 0.649$)
C_7	($\langle 82.0, 0.69, 0.45 \rangle, 2.507, 0.466$)
C_8	($\langle 76.9, 0.57, 0.48 \rangle, 2.607, 0.710$)
C_9	($\langle 80.7, 0.61, 0.50 \rangle, 2.707, 0.609$)
C_{10}	($\langle 80.2, 0.55, 0.48 \rangle, 2.055, 0.317$)
C_{11}	($\langle 89.5, 0.52, 0.56 \rangle, 1.755, 0.960$)
C_{12}	($\langle 92.5, 0.58, 0.52 \rangle, 2.507, 1.489$)
C_{13}	($\langle 91.4, 0.64, 0.51 \rangle, 1.705, 0.946$)
C_{14}	($\langle 87.9, 0.66, 0.49 \rangle, 2.607, 0.710$)
C_{15}	($\langle 92.5, 0.61, 0.52 \rangle, 1.634, 0.907$)
C_{16}	($\langle 88.2, 0.61, 0.52 \rangle, 2.306, 0.618$)
C_{17}	($\langle 76.5, 0.62, 0.49 \rangle, 1.504, 0.488$)
C_{18}	($\langle 84.9, 0.65, 0.53 \rangle, 2.607, 0.710$)
C_{19}	($\langle 92.8, 0.55, 0.59 \rangle, 2.206, 0.578$)
C_{20}	($\langle 89.6, 0.55, 0.48 \rangle, 2.517, 0.922$)

由图 3 和表 1 可见,主观权重中, C_1 、 C_6 、 C_{12} 、 C_{14} 等是影响大型灌区工程安全的重要因素。客观权重中, C_4 、 C_{10} 、 C_{14} 等对灌区工程安全影响较大。从组合权重来看, C_{14} 是影响灌区工程安全的重要因素。20 个评价指标中,除 C_3 、 C_8 、 C_{17} 之外,其余指标的期望均大于 80, C_8 的期望最小,为 76.9, C_{19} 的期望最大,达 92.8。毕达哥拉斯模糊云参数中, C_{11} 的隶属

度(0.52)小于非隶属度(0.56), C_{19} 的隶属度(0.55)小于非隶属度(0.59),其余 18 个评价指标的隶属度均大于非隶属度,表明 C_{11} 和 C_{19} 在评价过程中存在较大的模糊性。 C_{11} 、 C_{12} 等的超熵较高,表明这些评价指标更易受不确定性因素的影响。

结合指标层和准则层的权重以及指标层的毕达哥拉斯模糊云参数,根据式(2)计算得到各准则层的毕达哥拉斯模糊云: $B_1(\langle 84.0, 0.66, 0.51 \rangle, 1.904, 0.614)$ 、 $B_2(\langle 80.4, 0.63, 0.48 \rangle, 2.299, 0.557)$ 、 $B_3(\langle 91.5, 0.60, 0.52 \rangle, 1.988, 1.139)$ 、 $B_4(\langle 89.0, 0.63, 0.51 \rangle, 2.065, 0.670)$ 、 $B_5(\langle 88.8, 0.58, 0.53 \rangle, 2.466, 0.759)$,同时计算得出安全、较安全、基本安全、较危险、危险等级对应的安全评价指数分别为 0.824、0.698、0.592、0.135、0.050,并根据式(6)计算出指标层和准则层的安全评价指数。最终得出大型灌区工程安全评价目标层 A 的毕达哥拉斯模糊云为($\langle 85.8, 0.61, 0.51 \rangle, 2.098, 0.814$),相应的综合安全评价指数为 0.857。图 4 为准则层和目标层的毕达哥拉斯模糊云图,图 5 为指标层和准则层的安全评价指数。

由图 4 和图 5 可见,指标层中, C_3 和 C_8 评价等级为基本安全, C_4 、 C_9 、 C_{10} 、 C_{11} 、 C_{17} 这 5 个评价指标等级为较安全,各指标安全评价指数排序为: $C_8 < C_3 < C_{11} < C_{17} < C_{10} < C_9 < C_4$,其余 13 个指标均处于安全等级。20 个评价指标中,安全评价指数最高的是 C_{15} ,安全评价指数最低的是 C_8 。准则层中,各指标期望大小排序依次为 B_3 、 B_4 、 B_5 、 B_1 、 B_2 ,其中 B_3 的期望最高,为 91.5, B_2 的期望最低,为 80.4, B_5 的熵在 5 个准则层指标中最大,为 2.466,表明该指标的不确定性最高。准则层中, B_2 的安全评价指数最低,处于较安全等级,其余 4 个指标均为安全等级,5 个指标的安全评价指数排序依次为 $B_2 < B_1 < B_5 < B_4 < B_3$ 。大型灌区工程安全评价目标层 A 的毕达哥拉斯模糊云为($\langle 85.8, 0.61, 0.51 \rangle, 2.098, 0.814$),其熵和超熵均相对较小,表明灌区工程安全评价结果的可行性和稳定性均较高,最终计算得到目标层安全评价指数为 0.857,处于安全等级,结合灌区工程安全评价期望值 85.8,判定该引黄灌区二期工程的安全等级为安全,评价结果与灌区工程的实际情况基本吻合。

4 结 论

a. 在综合分析影响大型灌区工程安全的一系列风险因素基础上,建立了包含 5 个一级评价指标和 20 个二级评价指标的大型灌区工程安全评价指

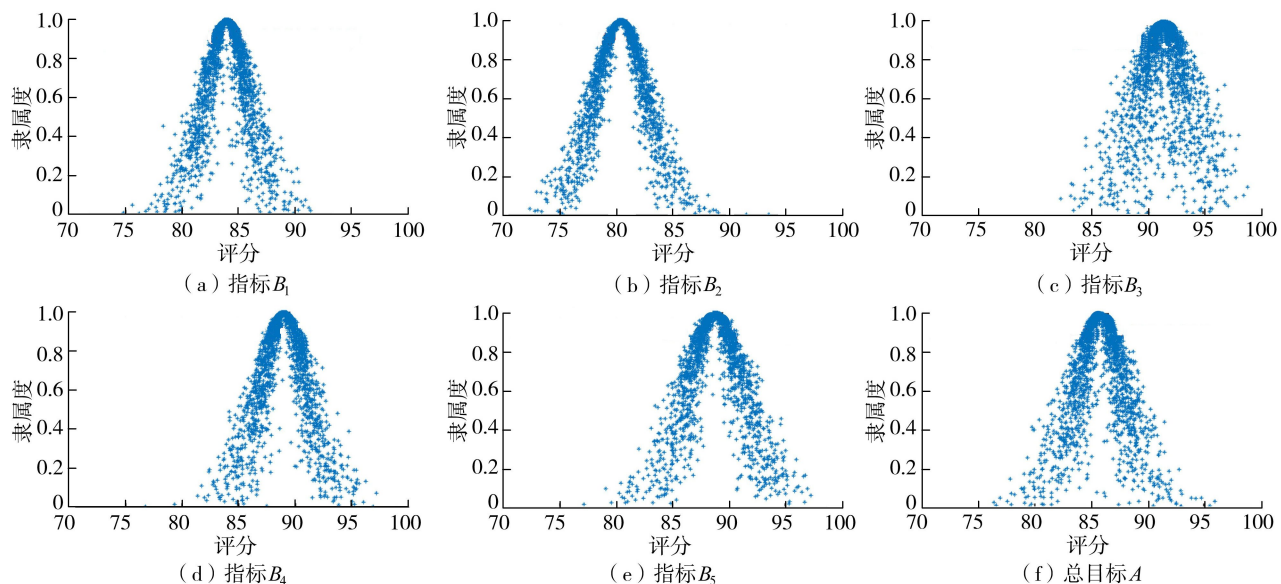


图 4 准则层和目标层的毕达哥拉斯模糊云图

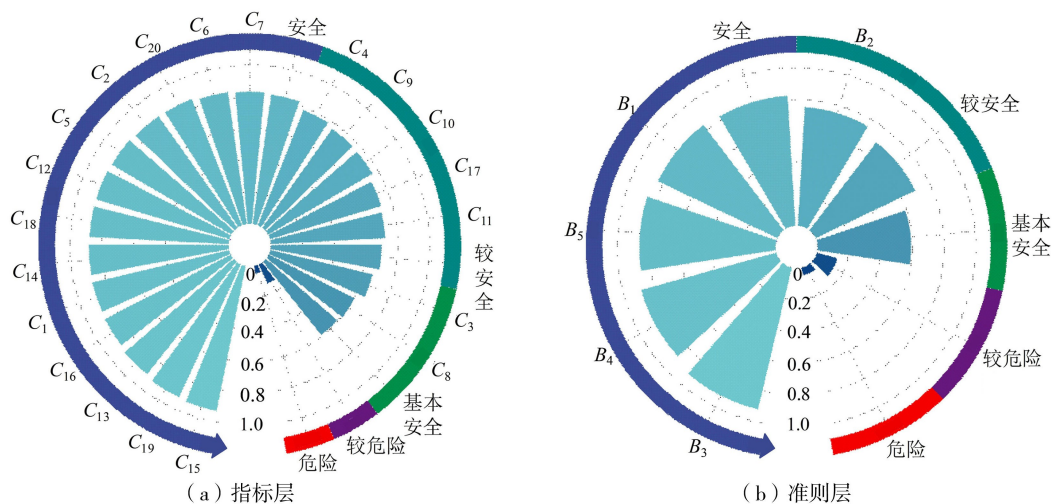


图 5 指标层和准则层的安全评价指数

标体系。分别采用序关系分析法和变异系数法进行主观和客观赋权,并通过博弈论实现组合赋权,有效提升了灌区工程评价指标赋权的准确性和可靠性。

b. 本文构建了适用于复杂灌区工程安全评价的毕达哥拉斯模糊云模型,相较于传统云模型,所构建的毕达哥拉斯模糊云模型能够表征评价指标的模糊性,所定义的安全评价指数反映了各评价指标的相对安全水平。

c. 将所构建的毕达哥拉斯模糊云模型应用于河南省某大型灌区工程。评价结果表明,除其他建筑物工程风险指标处于较安全等级外,其余一级指标的安全评价指数均处于安全等级,整个灌区工程的综合安全评价指数为 0.857,相应的工程安全等级为安全。同时,评价结果对应的熵和超熵数值均相对较小,表明评价结果具备良好的可信度与稳定性。

d. 由于大型灌区建筑物数量可观且种类繁多、

区域覆盖面积广、地质和环境条件复杂,不同灌区工程存在明显的差异化特征。本文构建的评价指标体系和毕达哥拉斯模糊云模型,可为同类型大型灌区工程安全评价提供一种新途径。后续可开展毕达哥拉斯模糊云模型的验证和改进研究。

参考文献:

[1] 庞爱萍,易雨君,李春晖. 基于生态需水保障的农业用水安全评价:以山东省引黄灌区为例[J]. 生态学报,2021,41(5):1907-1920. (Pang Aiping, Yi Yujun, Li Chunhui. Evaluation of agricultural water-use security with ecological water demand as a priority:a case study of the Yellow River estuary in Shandong Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(5):1907-1920. (in Chinese))

[2] 张泽中,李娜,刘发,等. 乡村振兴战略指导下的生态灌区建设与管理[J]. 水利水电科技进展,2020,40(2):1-5. (Zhang Zezhong, Li Na, Liu Fa, et al. Construction and management of ecological irrigation districts under

- guidance of rural revitalization strategy [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40 (2):1-5. (in Chinese))
- [3] 杨道富. 基于灌区建筑物完好率评估标准体系的研究[J]. 灌溉排水学报, 2005 (3): 57-61. (Yang Daofu. Study on the system of appraisal standards of intact rate of buildings in irrigation district [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2005 (3): 57-61. (in Chinese))
- [4] 游黎, 费良军, 武锦华. 基于集对分析法的大型灌区运行状况评价研究[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28 (2): 132-135. (You Li, Fei Liangjun, Wu Jinhua. Study on evaluation of current condition of large-scale irrigation areas based on the set pair analysis [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28 (2): 132-135. (in Chinese))
- [5] 李家田, 苏怀智. 基于联系数的水闸安全综合评价物元模型与实现方法[J]. 长江科学院院报, 2018, 35 (10): 88-91. (Li Jiatian, Su Huaizhi. Matter-element model of sluice safety assessment based on connection number safety based on cloud model [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35 (10): 88-91. (in Chinese))
- [6] 武慧芳, 陆立国, 王红雨. 宁夏引黄灌区泵站建筑物安全评价研究[J]. 人民黄河, 2015, 37 (5): 143-148. (Wu Huifang, Lu Ligu, Wang Hongyu. Security evaluation of pumping station buildings to Ningxia Yellow River irrigation area [J]. Yellow River, 2015, 37 (5): 143-148. (in Chinese))
- [7] 贡力, 路瑞琴, 靳春玲, 等. 基于博弈-改进可拓理论的寒冷地区长距离明渠冬季运行安全评价[J]. 自然灾害学报, 2019, 28 (6): 81-92. (Gong Li, Lu Ruiqin, Jin Chunling, et al. Winter operation safety evaluation of long distance water diversion channels in cold areas based on game-improved extension theory [J]. Journal of Natural Disasters, 2019, 28 (6): 81-92. (in Chinese))
- [8] Zhang Z, Li Y, Wang X, et al. Assessment of river health based on a novel multidimensional similarity cloud model in the Lhasa River, Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Hydrology, 2021, 603: 127100.
- [9] Deng Z, Huang D, Liu J, et al. An assessment method for traffic state vulnerability based on a cloud model for urban road network traffic systems [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 99: 1-14.
- [10] Liao R, Bian J, Yang L, et al. Cloud model-based failure mode and effects analysis for prioritization of failures of power transformer in risk assessment [J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2013, 23 (7): 1-19.
- [11] 王媛, 刘佳豪, 郝泽嘉, 等. 基于 AHP-云模型的大型输水倒虹吸安全综合评价[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42 (2): 79-84. (Wang Yuan, Liu Jiahao, Hao Zejia, et al. Comprehensive safety evaluation of large water conveyance inverted siphon based on AHP-cloud model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42 (2): 79-84. (in Chinese))
- [12] 董庆兴, 李赛, 张大斌, 等. 基于匹配属性相似度的应急决策方案推荐方法[J]. 控制与决策, 2016, 31 (7): 1247-1252. (Dong Qingxing, Li Sai, Zhang Dabin, et al. Emergency decision response plan recommendation method based on similarity of matched attributes [J]. Control and Decision, 2016, 31 (7): 1247-1252. (in Chinese))
- [13] 杨子桐, 黄显峰, 方国华, 等. 基于改进云模型的南水北调东线工程效益评价[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41 (4): 60-66. (Yang Zitong, Huang Xianfeng, Fang Guohua, et al. Benefit evaluation of eastern route of South-to-North Water Transfer Project based on improved cloud model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41 (4): 60-66. (in Chinese))
- [14] 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))
- [15] 何杨杨, 苏怀智. 考虑规范分级的水闸安全云评价方法[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40 (2): 29-35. (He Yangyang, Su Huaizhi. Cloud assessment method of sluice safety considering specification classification [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40 (2): 29-35. (in Chinese))
- [16] Yager R R. Pythagorean membership grades in multicriteria decision making [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2014, 22 (4): 958-965.
- [17] 屈吉鸿, 陈南祥, 黄强, 等. 改进的逼近理想解在地下水资源承载力评价中的应用[J]. 水利学报, 2008, 39 (12): 1309-1315. (Qu Jihong, Chen Nanxiang, Huang Qiang, et al. Improved TOPSIS method for evaluating groundwater carrying capacity [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39 (12): 1309-1315. (in Chinese))
- [18] Zhou J, Su W, Baleže T, et al. Multiple criteria group decision making considering symmetry with regards to the positive and negative ideal solutions via the Pythagorean normal cloud model for application to economic decisions [J]. Symmetry, 2018, 10 (5): 1-15.

(收稿日期: 2025-05-20 编辑: 骆超)

800 MW 级混流式水轮机小波动瞬变过程研究

耿清华¹, 邓玮琪¹, 廖祥波², 张海库¹, 陈岳嘉³, 王文全³

(1. 大唐水电科学技术研究院有限公司; 2. 三峡金沙江云川水电开发有限公司禄劝乌东德电厂; 3. 四川大学水利水电学院)

摘要:为揭示水轮机频繁小波动瞬变过程对水电机组水力稳定性的影响机制,采用一维-三维耦合方法,对某 800 MW 级混流式水轮机负荷从额定功率的 55.6% 上升至 61.2% 的瞬变过程开展了全流道数值模拟,重点分析了导叶调节瞬变过程、转轮和尾水管区域的涡系演化规律与压力脉动特性。结果表明:随着导叶开度增加,流量平稳增长,轴向力因水锤效应产生突变,径向力受导叶调节扰动的影响,呈现典型的低幅值脉动特性(但幅值明显大于稳定运行工况);随着负荷增加,转轮叶道涡尺度逐渐减小,当负荷为额定功率的 61.2% 时,叶道涡基本消散,尾水管涡带经历了从单涡带结构到尾水管中心稳定双涡带结构的演变;负荷增加期间机组受到水锤、涡结构演化和动静干涉频率耦合的影响,产生了 $0.11f_n$ 、 $0.21f_n$ 、 $0.85f_n$ 、 $15f_n$ 等高幅值的频率成分。

关键词:混流式水轮机;小波动瞬变过程;叶道涡;尾水管涡带;压力脉动

中图分类号:TV734.1;TK79 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2026)05-0081-07

Study on small fluctuation transient process in an 800 MW-class Francis turbine//Geng Qinghua¹, Deng Weiqi¹, Liao Xiangbo², Zhang Haiku¹, Chen Yuejia³, Wang Wenquan³ (1. Datang Hydropower Science and Technology Research Institute Co., Ltd.; 2. Luquan Wudongde Power Plant, Three Gorges Jinsha River Yunchuan Hydropower Development Co., Ltd.; 3. College of Water Resources and Hydropower, Sichuan University)

Abstract: To reveal the influence mechanism of frequent small-fluctuation transient processes on the hydraulic stability of hydroelectric units, a 1D-3D coupling method was adopted to conduct a full-passage numerical simulation of the transient process of an 800 MW-class Francis turbine when its load increased from 55.6% to 61.2% of the rated power. This study focused on the guide vane regulation transient process, the vortex evolution laws in the runner and draft tube regions, and the pressure pulsation characteristics. The results show that as the guide vane opening increases, the discharge grows steadily, the axial force undergoes a sudden change due to the water hammer effect, and the radial force, affected by the guide vane regulation disturbance, exhibits typical low-amplitude pulsation characteristics, though its amplitude is significantly larger than that under steady operating conditions. As the load increases, the scale of the inter-blade vortex gradually decreases. When the load reaches 61.2% of the rated power, the inter-blade vortex basically dissipates, and the draft tube vortex rope evolves from a single vortex rope structure into a stable double vortex rope structure at the center of the draft tube. During the load-increasing process, the unit is affected by the coupling of water hammer, vortex structure evolution, and rotor-stator interaction frequency, generating high-amplitude frequency components such as $0.11f_n$, $0.21f_n$, $0.85f_n$, and $15f_n$.

Key words: Francis turbine; small fluctuation transient process; inter-blade vortex; vortex rope in draft tube; pressure pulsation

面向国家“双碳”战略目标,在构建以新能源为主体的新型电力系统进程中,需要发挥水电可再生、灵活调节及惯性支撑的优势^[1-2]。为适应高比例新能源并网带来的运行挑战,水轮发电机组需调整运行模式,以满足长时间偏工况运行和频繁负荷调节的工程需求。在机组负荷变动频次激增的条件下,

水锤效应和转轮区及尾水管内涡带演化所诱发的宽频带、高幅值压力脉动相互耦合^[3-5],形成非稳态水力激振现象。这一现象不仅对转轮、叶片、导叶、轴系等机组关键部件的结构疲劳寿命构成威胁,也给电网的暂态稳定性带来了潜在风险^[6]。

现有研究主要采用试验和数值模拟方法,重点

基金项目:国家自然科学基金项目(52179087);中国长江电力股份有限公司资助项目(Z522302016)

作者简介:耿清华(1984—),男,正高级工程师,博士,主要从事水力发电技术研究。E-mail:419596470@qq.com

通信作者:王文全(1977—),男,教授,博士,主要从事多场耦合力学方面的研究。E-mail:wwqquan@126.com

关注机组振动、压力脉动以及涡结构演化等问题。张杨等^[7]归纳了非稳态流动引发机组振动的主要因素,包括机械不平衡力、过流部件水力激励(如压力脉动和水力不平衡)及电磁力。Sotoudeh 等^[8]通过粒子图像测速技术揭示了尾水管内涡流运动可同时激发低频与高频压力脉动。Mössinger 等^[9]引入网格运动算法,精确模拟了水轮机过渡过程,并探讨了采用一维-三维耦合方法模拟水轮机上游水力系统的必要性。舒依娜等^[10]采用特征线法求解了动态摩阻水锤模型,发现该模型可以精准仿真整个瞬变过程中水锤压力的波动峰值与周期。Zhou 等^[11]基于数值模拟研究指出,过渡工况下转轮入口处的涡流结构受攻角变化主导,该类涡旋主要分布于叶片前缘、后缘及流道中段区域,并显著改变了叶片表面的压力载荷分布。郑小波等^[12]通过数值模拟进一步证实,非设计工况下转轮流道内的不稳定涡流结构会诱发高幅值压力脉动,且工况偏离设计点越远,流动失稳程度越加剧。李宇光等^[13]在对增负荷过程的监测中发现,转轮区域存在 0.1 倍转频的低频脉动与 3 倍转频的高频脉动,两者呈现耦合作用。李洪彬等^[14]研究了旋流泵增负荷过程,发现高湍动能从叶片入口向叶片出口偏移。任雅婧^[15]研究发现,小波动过程中转轮叶片吸力面出现片状附着涡结构,当负荷降至 65% 额定功率时,提前生成的叶道涡导致吸力面压力梯度突变,同时尾水管扩散段回流分离现象加剧,直锥段水力损失显著增大。

目前,小波动稳定性分析均是结合完整的输水发电系统开展研究,以反映水道系统对机组运行稳定性的影响,很少侧重于机组本体的流道特性。本文通过建立一维-三维耦合计算框架,对 800 MW 级混流式机组的小波动瞬变过程进行了数值仿真,旨在揭示其非稳态涡系演化规律及多频压力脉动传递特性,以期为 800 MW 级机组的水力稳定性设计与负荷调节策略优化提供理论依据。

1 研究对象和方法

1.1 研究对象

某 800 MW 级混流式水轮机整体计算域如图 1 所示,计算模型采用整机全流道结构,涵盖上游水库、长 588 m 的上游引水隧道、进口直径为 11.5 m 的蜗壳、28 个固定导叶、28 个活动导叶、直径为 9 m 的转轮(15 个叶片)、进口直径为 8.5 m 的尾水管、长 710 m 的下游尾水隧道,调压室以及水库。该机组额定功率为 850 MW,额定水头为 137 m,额定转速为 90.91 r/min。

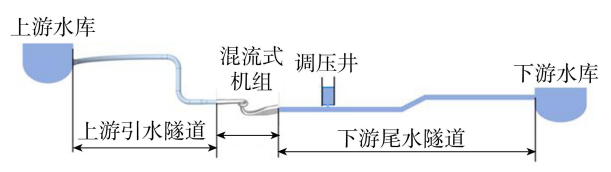


图 1 800 MW 级混流式水轮机整体计算域示意图

1.2 数值计算方法

采用重叠布置法^[16]耦合一维管路系统和三维水轮机模型,将耦合边界上的压力和流量值作为三维计算域的边界条件进行数据交互。一维管路系统采用特征线法求解,并基于软件提供的二次开发接口编写用户自定义函数建立计算模型,在每个三维时间步迭代完成后,一维系统随之更新。一维模型的正、负特征线方程分别为:

$$Q_i = C_m - C_a H_i \quad (1)$$

$$Q_i = C_n + C_a H_i \quad (2)$$

其中 $C_m = Q_A + \frac{gA}{a}H_A - \frac{f}{2DA}\Delta t Q_A |Q_A|$

$$C_n = Q_B + \frac{gA}{a}H_B - \frac{f}{2DA}\Delta t Q_B |Q_B|$$

$$C_a = \frac{gA}{a}$$

式中: Q_i 为通过节点 i 的流量; H_i 为节点 i 的水头; C_m 、 C_n 、 C_a 为特征线法的中间计算常数; Q_A 为上一时间步正特征线流量; Q_B 为上一时间步负特征线流量; H_A 为上一时间步正特征线水头, H_B 为上一时间步负特征线水头; g 为当地重力加速度; A 为管道横截面积; a 为水击波速; f 为摩擦系数; D 为管道直径; Δt 为时间步长,取 0.05 s。

调压室计算过程中,将连续方程、能量方程与特征方程联立,迭代求得水头和流量。单次迭代中,给定水头初值 H_i ,先根据特征方程求得管道流量,再由管道连续方程求得流入调压室的流量,随后利用式(3)确定流量关系,由式(4)更新调压室水位,最后结合式(5)完成 H_i 的迭代更新。具体方程如下:

$$Q_1 = Q_2 + Q_s \quad (3)$$

$$H_s = H_{s0} + \frac{Q_s + Q_{s0}}{2A_s}\Delta t \quad (4)$$

$$H_1 = H_2 = H_i \quad (5)$$

$$H_i = R_s Q_s |Q_s| + H_s \quad (6)$$

式中: Q_1 为当前时间步调压室入口管道流量; Q_2 为当前时间步调压室出口管道流量; Q_s 为当前时间步调压室流量; H_s 为当前时间步调压室水位; Q_{s0} 和 H_{s0} 分别为当前时间步上一时刻的调压室流量和水头; A_s 为调压室断面面积; H_1 为调压室入口管道水头; H_2 为调压室出口管道水头; R_s 为阻抗孔口流阻损失系数。

水轮机三维流场基于有限体积法计算,计算时,先采用 SST $k-\omega$ 湍流模型进行稳态计算直至收敛,再转用瞬态计算,从而有效缩短瞬态计算达到稳定的时间。鉴于变负荷工况下水轮机转轮、尾水管等区域存在流动分离与强旋转涡带,瞬态计算采用 DES 湍流模型,在主流分离区(如涡核、尾流区)自动切换为 LES 模式,直接解析涡带摆动、二次流演化等大尺度湍流结构,从而规避 RANS 模型处理强非稳态流动时的过度耗散问题。在近壁区保持 RANS 模式(如 SST $k-\omega$ 模型),以避免 LES 模式在壁面边界层的极高网格分辨率要求。一维计算域与三维计算域的上、下游耦合边界分别设置在蜗壳进口前和尾水管出口后的直管段,并选取曲率变化较小的截面。导叶开启过程采用动网格方法实现;稳态计算采用多重参考系模型处理转轮旋转,瞬态计算采用滑移网格方法处理转轮与固定部件的相对运动。

1.3 网格划分及计算准确性验证

基于 ANSYS Workbench 平台的 Mesh 模块,采用分区混合网格策略以提高计算精度。根据几何特性与流动特征差异,在规则区域(固定及活动导叶、尾水管)采用结构化网格,在复杂曲面(蜗壳、转轮)采用非结构网格。为捕捉近壁涡结构演化,对关键部位进行局部加密,将双列叶栅、转轮叶片和尾水管直锥段的边界层网格层数分别设置为 15、10 和 20 层。局部网格细节如图 2 所示。

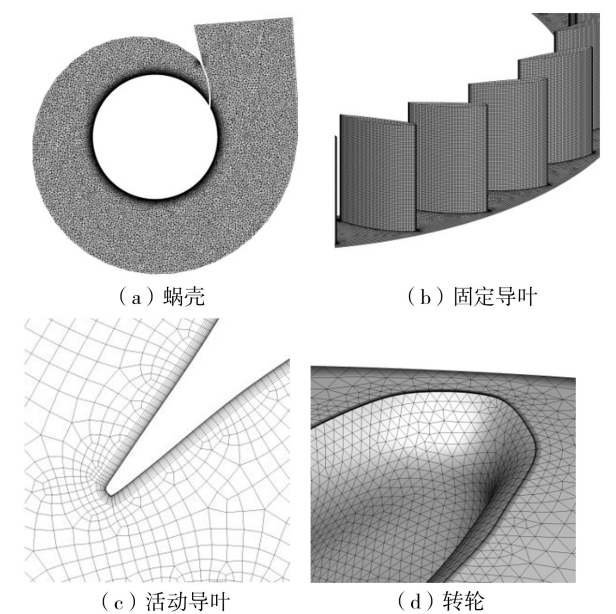


图2 水轮机局部网格细节

本文将压力脉动无量纲化,以无量纲数 C_p 代表压力脉动水头占总水头的大小,并作为准确性验证的指标,其计算公式为:

$$C_p = \frac{p - \bar{p}}{\rho gh} \times 100\% \tag{7}$$

式中: p 为计算所得压力值; $\bar{p}$ 为计算所得压力值的平均值; ρ 为水体密度; h 为实际运行水头。

根据某电站小波动过程试验数据,选取机组负荷由额定功率的 55.6% 上升至 61.2% 的增负荷过程进行研究,导叶动作时间为 2 s。为验证增负荷过程计算的准确性,将增负荷过程中尾水管进口壁面压力试验结果与数值模拟结果进行对比(图 3), $t = 2.9$ s 时导叶开始动作, $t = 4.9$ s 时导叶制动。由于数值模拟时导叶开度设置为线性上升,而试验过程中导叶受调速器自动控制,呈小幅波动上升态势,因此试验曲线和模拟曲线存在一定差异。总体来看,试验与数值模拟压力脉动趋势相同,脉动峰峰值误差低于试验实际运行水头的 5%。从整个瞬变过程的压力响应幅值和主要特征来看,数值模拟与试验结果吻合,反映的物理规律一致。

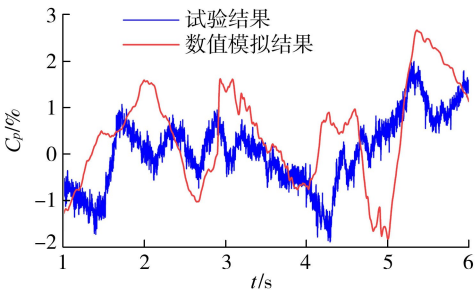


图3 尾水管测点壁面试验与数值模拟结果对比

2 结果与分析

2.1 外特性

图 4 为水轮机负荷从额定功率的 55.6% 上升至 61.2% 的小波动瞬变过程中,导叶开度、流量以及转轮受力的动态响应特性,其中 F_x 和 F_y 为两个相互正交方向的径向力分量, F_z 为转轮轴向受力。当 $t < 2.9$ s 时,导叶开度维持恒定。导叶动作始于 $t = 2.9$ s,并于 $t = 4.9$ s 完成。在此期间,伴随导叶开度的增大,机组流量从初始的 $348.6 \text{ m}^3/\text{s}$ 平稳上升至 $388.9 \text{ m}^3/\text{s}$ 。转轮径向力在零值附近波动,整体呈正弦变化趋势,这反映了转轮在非对称流场下的基本受力状态。此阶段的径向力虽然保持正弦特征,但其变化曲线没有稳态工况平滑,表现为叠加了更多、更密集的低幅值压力脉动分量。这种低幅值脉动特性主要源于增负荷过程引发的转轮域及下游尾水管涡动力学行为的改变。涡带形态、位置和强度的演化诱发了强烈的低频压力脉动,该脉动传递并作用于转轮域,干扰了原有的径向力模式。转轮轴向力高于径向力约三个数量级,是转轮受力的主导分量,且对导叶动作表现出高度敏感性。在导叶启动瞬间,轴向力发生了显著的阶跃,从 283 790 kN 急剧跃升至 285 545 kN。相应地,在导叶动作终止瞬

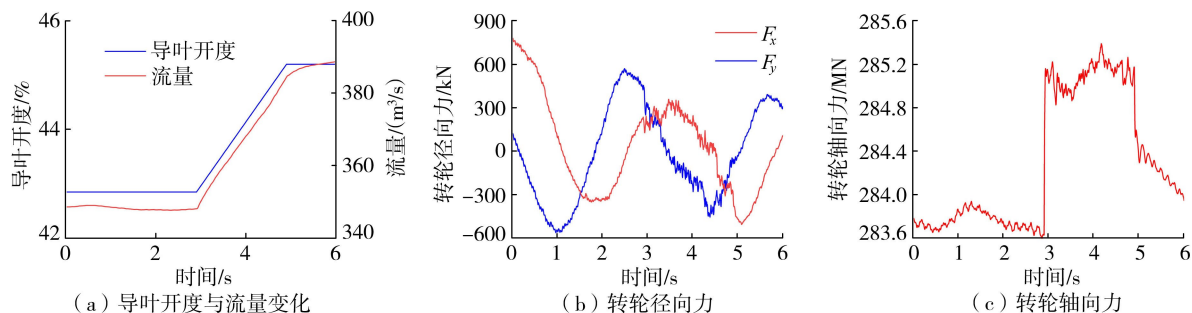


图4 增负荷过程外特性变化

间,轴向力也出现了陡降。瞬时阶跃和陡降现象主要是由导叶快速动作导致流道内水流动量剧变所引发的水锤效应所致。在增负荷时,导叶开度增加瞬间,导叶上游区域出现显著的负水锤效应,导叶下游区域出现正水锤效应,导致转轮轴向力瞬时阶跃;而在导叶动作终止瞬间,导叶上游区域出现显著的正水锤效应,导叶下游区域出现负水锤效应,导致下游转轮轴向力瞬时陡降。此外,在整个2s的增负荷持续期内,轴向力与径向力类似,同样存在明显的低幅值压力脉动特性。在此瞬态过程中,轴向力主要受到两种核心水力激励的作用:由涡带演化产生的低频压力脉动和由导叶快速调节水流引起的水锤压力波。两者的耦合作用共同塑造了轴向力的复杂动态响应特性。

2.2 转轮流动特性

图5为基于 Q 准则识别的转轮涡结构等值面图,该图清晰地呈现了水轮机小波动瞬变过程中转轮内部涡结构的动态演化特征。初始状态($t=1.9$ s)对应55.6%额定功率的稳态工况点,此工况点偏离设计工况最远,流道内可观察到强烈的叶道涡现象,在多个相邻叶道内同时存在大尺度的涡结构。该涡结构主要源于来流攻角与叶片设计攻角的严重不匹配,导致水流在叶片头部吸力面发生剧烈流动分离。分离后的高速水流卷吸形成管状涡结

构,该涡核主要分布在叶片吸力面附近并沿吸力面发展,其影响范围向下延伸至转轮底部区域,紊动流态已扩展至整个转轮流道。随着增负荷过程开始,导叶开度逐步增大,进入转轮的流量增加,水流在叶片头部的入射攻角趋向合理,头部撞击效应减弱,流动分离强度降低,形成的管状涡结构尺度持续减小。至小波动结束时刻($t=4.9$ s),叶道内的涡结构逐渐消散、合并,叶道涡演化为单个、小尺度的涡结构,仅存在于局部区域,其强度和影响范围大幅降低。当负荷升至额定功率的61.2%时,叶道涡现象相较于55.6%额定功率工况得到一定抑制,转轮内叶道涡已不明显。

图6和图7分别展示了转轮叶片压力面与吸力面在增负荷过程中的表面压力分布特征及其动态演变规律。叶片压力面沿流动方向(从前缘到尾缘)呈现持续、平顺的递减趋势,整个压力面未出现局部压力突增或突降现象,压力面流态整体附着良好。与压力面形成鲜明对比,吸力面尾缘附近区域存在局部不规则低压区,该异常低压现象主要源于该区域复杂的涡流结构。这些强涡旋具有显著的卷吸效应,使得其核心区域压力明显降低。同时,涡结构的非定常演化和脱落严重扰乱了叶道内原本应连续、稳定的压力梯度分布。该现象与图5所示吸力面附近涡结构的存在及其强度高度相关。随着负荷增

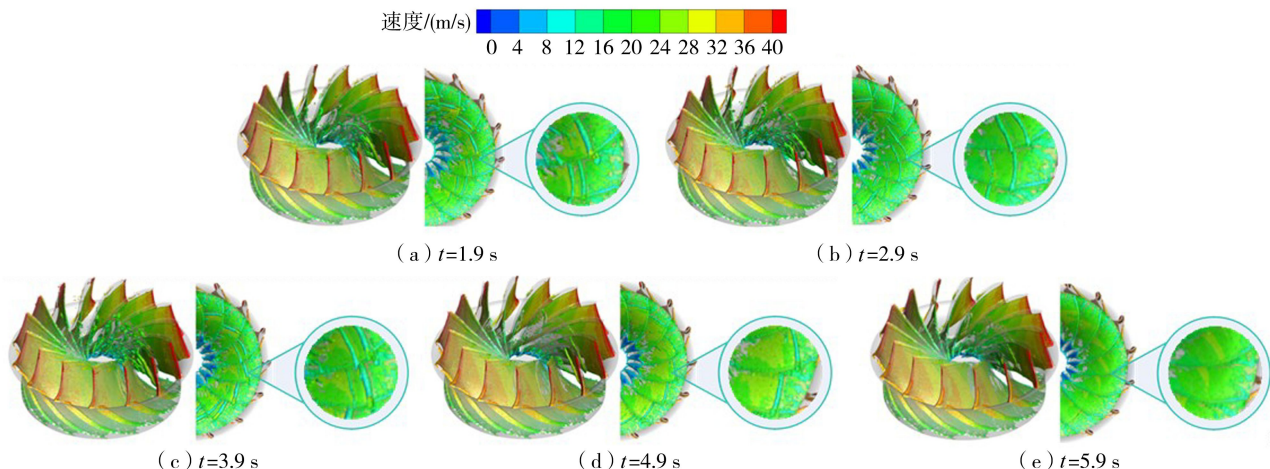


图5 转轮涡结构演化

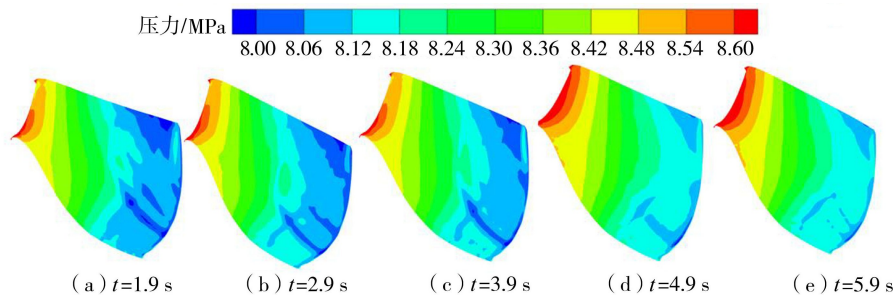


图6 转轮叶片压力面压力

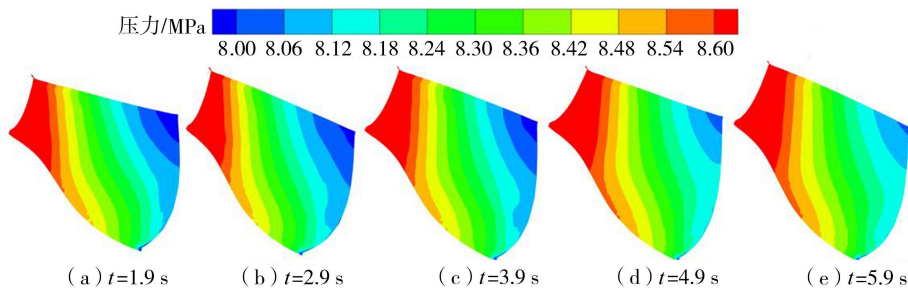


图7 转轮叶片吸力面压力

加,叶片表面整体压力水平均呈上升趋势,且随着来流条件改善,吸力面尾缘的流动分离与强涡旋生成得到有效抑制,叶片吸力面压力分布趋向均匀。

2.3 尾水管流动特性

图8揭示了水轮机小波动瞬变过程中尾水管锥管段内部涡结构的演化规律。初始稳态工况尾水管周向速度占比大,涡结构呈现环绕壁面的分布特征,整体流态不稳定且紊乱,形成较强的压力脉动源。随着流量增加,水流轴向速度分量提升,导致近壁区的贴壁涡结构数量显著减少且强度减弱。在流道中心区域,由于增大的流量和旋转速度分量提供了旋流强度与角动量,涡结构开始聚合、发展,其尺度呈增大趋势。在小波动过程中期,锥管中心区域观测到一个连续且稳定发展的大尺度螺旋形涡带,其外

围伴生一个强度较弱但结构分明的次级涡带结构。在锥管进口段局部区域,仍可观察到尚未完全消散的贴壁涡,但其影响范围已缩小。到达目标负荷点时,尾水管涡结构演化为典型且稳定的双涡带形态。两个涡带在锥管中心区域并行向下游发展。该双涡带结构是在特定部分负荷工况下,水流旋转分量与轴向分量的相对关系发生调整,并与尾水管几何约束共同作用形成的典型非线性涡动力学现象。

2.4 压力脉动特性

整体计算域测点位置布置如图9所示,其中SC1表示蜗壳进口壁面测点,R1和R2表示沿流向的转轮测点,SV1表示固定导叶测点,GV1表示活动导叶测点,VL1表示无叶区测点,DT1表示尾水管进口壁面测点,DT2表示尾水管锥管段中段壁面测点。

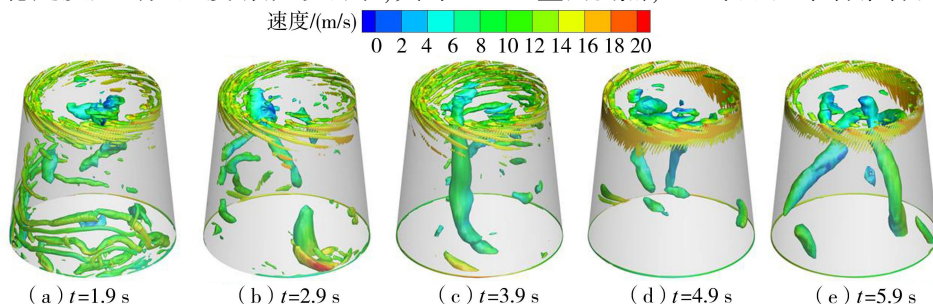


图8 尾水管涡结构演化

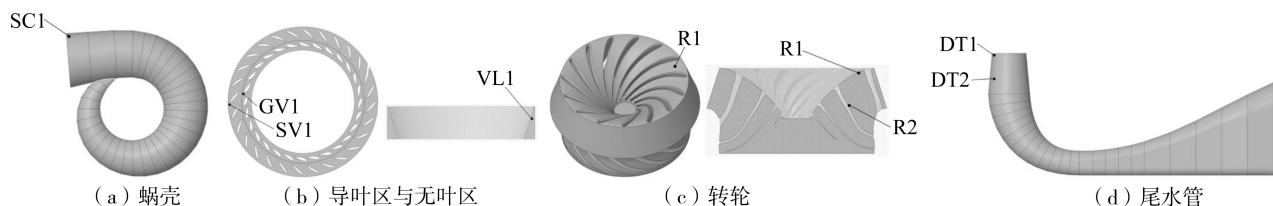


图9 测点布置

图 10 和图 11 展示了从蜗壳至尾水管进口壁面布置的一系列测点在小波动瞬变过程中的压力脉动响应特征。在蜗壳与固定导叶区域,各测点压力波形高度相似,在额定功率的 55.6% 和 61.2% 这两个稳态工况点,压力脉动幅值较低,流态相对稳定。导叶启动与停止时刻均观测到压力突变,这是导叶启闭引发水锤压力波的直接体现。在整个小波动瞬变过程的持续期,压力脉动幅值明显放大。频谱分析揭示其主频集中在 $0.11f_n$ (f_n 为转轮的转频,即单位时间内转轮的旋转次数),该低频成分主要由导叶快速调节引发的水锤效应产生。越靠近活动导叶的测点,其 $0.11f_n$ 频率的脉动幅值越高。这证实了活动导叶扰动为水锤压力波的主要激发源,且脉动能量在向上游传播过程中存在衰减。活动导叶区与无叶区压力信号复杂性增加,活动导叶与转轮叶片的相对运动激发强烈的叶片通过频率,其频率为 $15f_n$ (转轮叶片数为 15),导叶动作引发的水锤压力波和涡结构演化以及局部流动分离产生的低频压力脉动

在此区域叠加。活动导叶区测点主频为 $0.11f_n$ (幅值为 0.60%), $15f_n$ 成分幅值较高 (0.18%)。无叶区测点主频迁移至 $0.21f_n$ (幅值为 0.86%), 同时 $15f_n$ 成分依然显著 (幅值为 0.15%)。转轮区域不同位置的测点波形形态相似,但存在固定相位差,在小波动过程中,表现为压力幅值增大且低频脉动成分波动更密集。两个测点主频为 $0.11f_n$ (幅值较高,分别为 1.10% 和 0.78%), 表明水锤压力波能有效传播至转轮域并产生强激励。在 $0.85f_n$ 附近存在突出的高幅值脉动 (幅值分别为 0.82% 和 0.73%)。此频率成分与转轮叶道内自身涡结构的演化密切相关,是转轮内部局部流动失稳的标志,且几乎不向上下游传播。在 $28f_n$ 处仍可检测到微弱信号,与活动导叶数量为 28 有关。尾水管进口锥管段壁面,动静干涉的影响在此区域最为明显, $15f_n$ 附近频率成分的幅值达到峰值 (为 1.40%)。尾水管中的低频段压力脉动以 $0.21f_n$ 为主导,其幅值通常也较高,该频率是尾水管涡带旋进运动的特征频率。

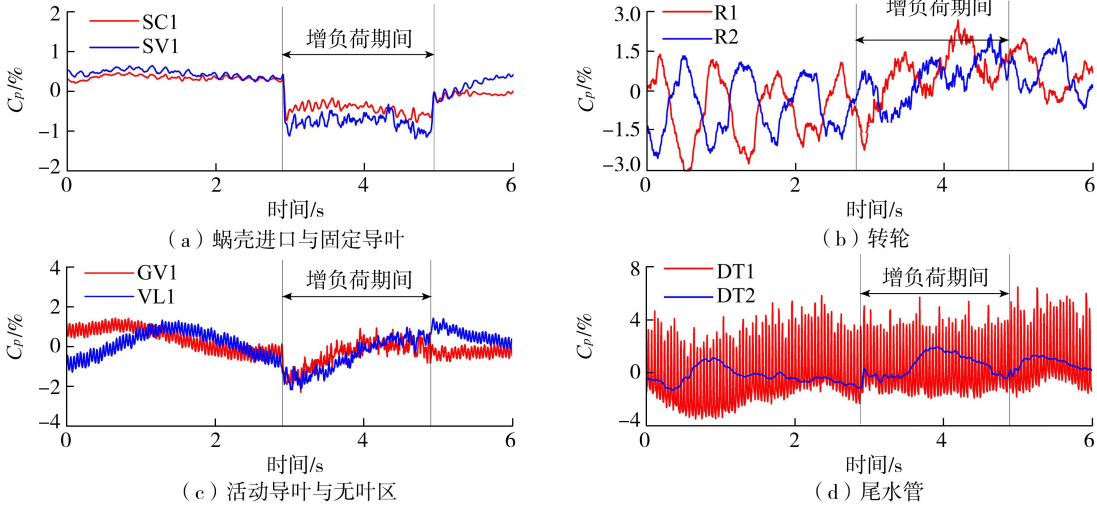


图 10 压力时域图

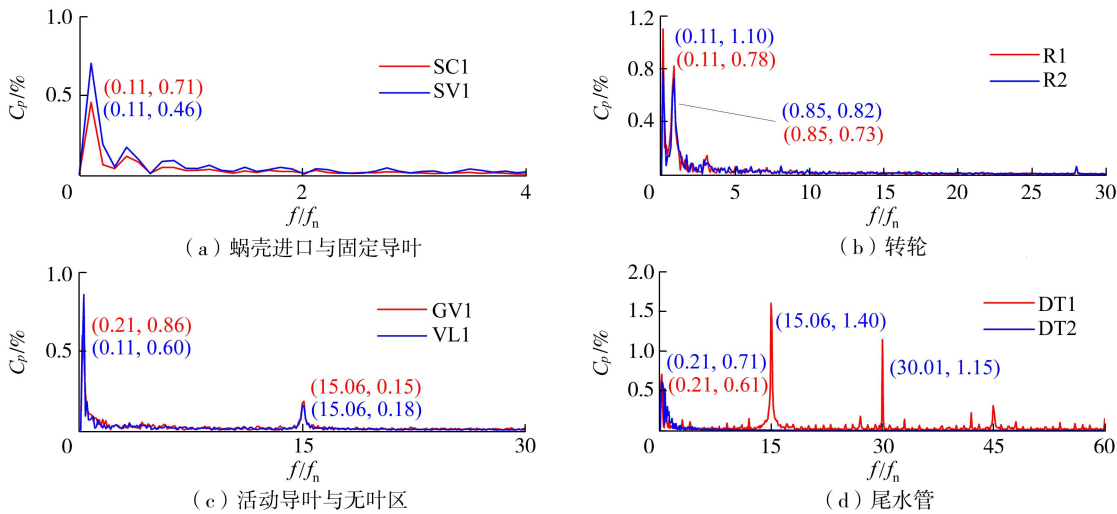


图 11 压力频谱图

3 结 论

- a. 小波动瞬变过程中,虽然流量平稳上升,但导叶启动和停止瞬间轴向力会产生突变,同时,轴向力和径向力的脉动幅值均高于相应稳定工况。水锤效应与涡致脉动的叠加作用加剧了转轮受力的不平衡性。
- b. 负荷为额定功率的 55.6%时,叶片吸力面前缘的流动分离呈现多叶道大尺度管状涡特征。随着负荷增加,管状涡尺度持续减小。尾水管近壁涡逐渐减弱,涡结构向锥管中心聚合,最终形成并排行向下发展的双涡带结构。
- c. 压力脉动呈现多源耦合特征,转轮域的 $0.85f_n$ 高幅值脉动与尾水管双涡带的 $0.21f_n$ 低幅值脉动是诱发机组振动的主因。动静干涉主要影响转轮以及尾水管进口。导叶动作产生的水锤波穿透性强,可向上游传播至蜗壳。

参考文献:

[1] 王文全,郭涛,王秀,等. 水力发电机组水力稳定性研究进展与挑战[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2024,49(4): 179-190. (Wang Wenquan, Guo Tao, Wang Xiu, et al. Progress and future challenges in stability research of hydroelectric units [J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science), 2024,49(4): 179-190. (in Chinese))

[2] 王立平,马实一,郭旭,等. 风电光伏发电抽水蓄能联合优化调度方法[J]. 水利经济, 2024, 42(6): 58-63. (Wang Liping, Ma Shiyi, Guo Xu, et al. Wind power-photovoltaic power generation-pumped storage joint optimal scheduling method [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024,42(6): 58-63. (in Chinese))

[3] Zheng X B, Sun S H, Wang Z R, et al. Study on partial load vortex and pressure pulsation characteristics of Francis turbine [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2752: 012018.

[4] 付晓龙. 抽水蓄能机组过渡过程压力脉动形成机理及转轮水推力控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.

[5] Hu Zanao, Cheng Yongguang, Liu Demin, et al. Broadening the operating range of pump-turbine to deep-part load by runner optimization[J]. Renewable Energy, 2023, 207: 73-88.

[6] 陈益民,程文超,周建旭,等. 白鹤滩水电站输水发电系统水力干扰稳定性分析[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(5): 78-84. (Chen Yimin, Cheng Wenchao, Zhou Jianxu, et al. Stability analysis on hydraulic disturb in water conveyance and hydropower system of Baihetan Hydropower Station [J]. Advances in Science and Technology of Water

Resources, 2022, 42(5): 78-84. (in Chinese))

[7] 张杨,宋轩,孙一然,等. 宝泉电站机组振动稳定性分析[J]. 水电站机电技术, 2019, 42(5): 8-12. (Zhang Yang, Song Xuan, Sun Yiran, et al. Analysis of unit vibration stability of Baoquan Hydropower Station [J]. Mechanical & Electrical Technique of Hydropower Station, 2019, 42(5): 8-12. (in Chinese))

[8] Sotoudeh N, Maddahian R, Cervantes M J. Investigation of Rotating Vortex Rope formation during load variation in a Francis turbine draft tube [J]. Renewable Energy, 2020, 151: 238-254.

[9] Mössinger P, Jester-Zürker R, Jung A. Francis-99: transient CFD simulation of load changes and turbine shutdown in a model sized high-head Francis turbine [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2017, 782: 012001.

[10] 舒依娜,刘兆峰,夏修萍,等. 排水管网泵群系统动态摩阻水锤仿真模拟[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(3): 32-39. (Shu Yina, Liu Zhaofeng, Xia Xiuping, et al. Numerical simulation of water hammer with dynamic friction in pump group systems of drainage pipe networks [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(3): 32-39. (in Chinese))

[11] Zhou Feng, Li Qifei, Xin Lu. Analysis of vortex evolution in the runner area of water pump turbine under runaway conditions [J]. Processes, 2023, 11(7): 2080.

[12] 郑小波,张军智,孙龙刚,等. 混流式水轮机小开度区工况转换过程瞬态流特性分析[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2023, 38(6): 917-925. (Zheng Xiaobo, Zhang Junzhi, Sun Longgang, et al. Analysis of transient flow characteristics of Francis turbine during transition process in small opening condition [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2023, 38(6): 917-925. (in Chinese))

[13] 李宇光,郑小波,李可瑶. 贯流式水轮机增负荷过程的动态特性研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2024, 22(4): 9-16. (Li Yuguang, Zheng Xiaobo, Li Keyao. Dynamic characteristics analysis of tubular turbine during load increase [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2024, 22(4): 9-16. (in Chinese))

[14] 李洪彬,蒋爽,陈星宇,等. 旋流泵内部不稳定流动数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(3): 28-33. (Li Hongbin, Jiang Shuang, Chen Xingyu, et al. Numerical simulation of internal unsteady flows in a vortex pump [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(3): 28-33. (in Chinese))

[15] 任雅婧. 混流式水轮机变负荷过程的动态响应研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2024.

[16] Zhang Xiaoxi, Cheng Yongguang. Simulation of hydraulic transients in hydropower systems using the 1-D-3-D coupling approach [J]. Journal of Hydrodynamics, 2012, 24(4): 595-604.

(收稿日期: 2025 - 06 - 28 编辑: 俞云利)

弯道斜向入流对单孔水闸水力特性的影响

张涛涛^{1,2}, 徐林万², 肖 洋^{1,2,3,4,5}, 高 杰², 袁 康², 田 帅⁶

(1. 苏州科技大学环境科学与工程学院; 2. 河海大学水利水电学院;
3. 河海大学水利部水循环与水动力系统重点实验室; 4. 河海大学长江保护与绿色发展研究院;
5. 河海大学水灾害防御全国重点实验室; 6. 扬州市勘测设计研究院有限公司)

摘要:为揭示弯道斜向入流对单孔水闸水力特性的影响机制,以淮河入海水道二河枢纽水闸为例,构建三维水动力数值模型,模拟并分析了 30°、45°、60°、75°入流角度下的闸前流场结构及水位变化规律,建立了考虑入流角度、弗劳德数和宽深比等因素影响的斜向入流水闸综合流量系数计算公式。结果表明:纵向流速“凹岸小、凸岸大”的分布特征随入流角度的增大而更加显著,入流角度为 30°~75°时弯道出口断面凹、凸岸流速差占断面平均流速的比例由 16.5%最高增至 84.3%;不同流量情况下断面环流强度随入流角度的变化存在差异;弯道出口断面水位呈现凹岸高、凸岸低的横向分布,入流角度为 30°~75°时凹、凸岸水位差占断面平均水位的比例由 1.3%最高增至 30.7%,水流惯性对环流的抑制作用随入流角度增大而降低;在同流量条件下,水闸综合流量系数随入流角度增加呈递减趋势,建立的水闸综合流量系数计算公式得出的值与实际值的平均相对误差为 2.01%,总体精度较高。

关键词:单孔水闸;斜向入流;水力特性;流量系数;弯道

中图分类号:TV131.4 文献标志码:A 文章编号:1006-7647(2026)05-0088-08

Effect of oblique inflow at bends on hydraulic characteristics of a single-orifice sluice//Zhang Taotao^{1,2}, Xu Linwan², Xiao Yang^{1,2,3,4,5}, Gao Jie², Yuan Kang², Tian Shuai⁶ (1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University; 3. Key Laboratory of Water Cycle and Hydrodynamic System, Ministry of Water Resources, Hohai University; 4. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University; 5. State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University; 6. Yangzhou Survey and Design Institute Co., Ltd.)

Abstract: To reveal the mechanism by which oblique inflow at bends affects the hydraulic characteristics of a single-orifice sluice, a three-dimensional hydrodynamic numerical model is constructed using the Erhe Hub Sluice on the Huaihe River Seaward Waterway as a case study. The flow field structure and water level variation patterns upstream of the sluice are simulated and analyzed under inflow angles of 30°, 45°, 60°, and 75°. A formula for calculating the comprehensive discharge coefficient of the sluice under oblique inflow conditions is established, considering factors such as inflow angle, Froude number, and width-to-depth ratio. The results indicate that the longitudinal velocity distribution pattern of lower velocities on the concave bank and higher velocities on the convex bank intensifies with increasing inflow angle. When the inflow angle ranges from 30° to 75°, the ratio of the velocity difference between the concave and convex banks to the mean cross-sectional velocity at the bend outlet increases from 16.5% to a maximum of 84.3%. The variation of cross-sectional circulation intensity with inflow angle differs under different discharge conditions. The water level at the bend outlet cross-section exhibits a lateral distribution with higher levels on the concave bank and lower levels on the convex bank. When the inflow angle ranges from 30° to 75°, the ratio of the water level difference between the concave and convex banks to the mean cross-sectional water level increases from 1.3% to a maximum of 30.7%, and the inhibitory effect of flow inertia on circulation decreases with increasing inflow angle. Under identical discharge conditions, the comprehensive discharge coefficient of the sluice decreases with increasing inflow angle. The average relative error between the actual values and the values calculated from the established formula for the comprehensive discharge coefficient of the sluice is 2.01%, demonstrating generally high accuracy.

Key words: single-orifice sluice; oblique inflow; hydraulic characteristics; flow coefficients; bends

基金项目:国家自然科学基金项目(52309102,52379075);国家自然科学基金长江联合基金项目(U2240209);水利部重大科技项目(SKS-2022124)

作者简介:张涛涛(1992—),男,副教授,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:ztt714521@163.com

为确保流域防洪安全、水资源供给和生态健康,我国已建成数十万座水闸,这些水闸在历年水安全实践中发挥了坚实的保障作用^[1]。在自然河道或人工渠道中,水闸常因上游河道弯曲而面临斜向入流情况,这种非正向入流模式易引发闸前流态紊乱、横向流速分量增大及局部旋涡等现象^[2-3],导致使用传统正向入流理论计算的泄流量与实际产生偏差,严重影响水闸泄流能力和工程安全。

针对斜向入流对水闸水力特性的影响,国内外学者开展了大量研究。水闸斜向入流可以分成两种情况:一种是水闸自身倾斜布置,即上游河道与来流相对平顺,但为提高过流能力或考虑与下游河道平顺衔接^[4],将水闸斜交布置;另一种是水闸轴线与河道正交,但受上游河道形态影响,导致闸前入流与水闸轴线斜交。针对第一种情况,Tuyen^[5]通过物理模型试验发现,斜交堰有效长度随倾角增大显著增加,而流量系数略有下降,综合作用下泄流能力提升,淹没出流时能量损失较大;王仕筠^[6]提出了考虑堰高与交角关系的流量系数公式,指出斜交堰行近流速水头更大,交角减小会加剧水舌干扰,从而降低流量系数;扈霖等^[4]的水槽试验结果表明,斜交实用堰的行近流速随流量和交角的增大而提高,主流在堰前偏转但未形成回流区,并建立了流量系数计算公式。侧堰是斜交堰的一种极端情况,部分学者也开展了相关研究。例如:王佳伟等^[7-8]通过原型观测与数值模拟提出了矩形薄壁侧堰半经验流量公式;迟颖等^[9-10]指出侧向进流会降低溢洪道泄流能力;Vatankhah^[11]基于恒定比能假设建立了梯形渠道侧堰水面线的椭圆积分预测模型;Azimi 等^[12]采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型与 VOF 方法,揭示了圆形渠道侧堰中分流面由底部向水面扩展的规律。对于上游弯道导致斜向入流的情形,目前直接针对闸前斜向入流水力特性的研究仍相对有限,已有成果多集中于弯道水力学特性。例如:戴文鸿等^[13]对弯道内纵向流速分布与横向环流结构进行了总结,指出水流进入弯道后凸岸流速增大、凹岸流速减小,并形成表层流向凹岸、底层流向凸岸的环流结构;熊毅等^[14]分析表明弯道会导致龙口流速分布不均。近年来,部分学者开始关注弯道下游衔接水闸的流动结构调整及水力响应特征。例如:许东明^[15]通过物理模型试验,研究了弯道河流对泄洪闸过流能力的影响,发现弯道离心力作用导致凸岸闸孔过流能力显著降低,并提出了缓解离心力效应、提升整体泄流能力的闸室布置优化方案;于佳敏^[16]针对铜城闸上游三岔河口弯道引发的进流偏斜与大角度偏流问题,结合数值模拟与物理模型试验,系统比较了翼墙优化、闸前

底坎及弯道抛石等整流措施的效果,表明在弯道区域设置抛石可有效抑制分流与拖曳作用,改善进流流态并减轻凹岸冲刷。

综上所述,现有研究主要针对斜交堰、侧堰等几何倾斜堰体的斜向入流特性,而对于弯道斜向入流条件下水闸水力特性和泄流规律的认识仍相对有限。本文以淮河入海水道二期工程的二河枢纽水闸为研究对象,采用数值模拟方法,考虑不同弯道入流角度,对闸前弯道内的流态、水位变化以及水闸综合流量系数公式开展研究,以期为二河枢纽水闸的泄流能力复核提供支撑,同时为类似水闸枢纽的设计和优化提供参考。

1 工程概况

二河枢纽地处淮河入海水道与淮沭新河交汇处,作为淮河入海水道二期工程的首级枢纽及洪泽湖核心行洪口门,其泄流能力直接关系到淮河-洪泽湖系统的防洪安全、水资源配置与生态保护。二河枢纽布置如图 1 所示,枢纽上游河道存在天然弯道,原二河闸共设 35 孔(单孔净宽 10.0 m),闸室总宽 402.0 m,闸底板高程 8.0 m,设计泄洪能力为 5270 m³/s。为扩大淮河下游洪水出路并提高洪泽湖防洪标准,新建 18 孔二河越闸(单孔净宽 10.0 m),闸底板高程 8.0 m,扩建后枢纽总设计流量、校核流量分别达 1.0 万、1.3 万 m³/s。

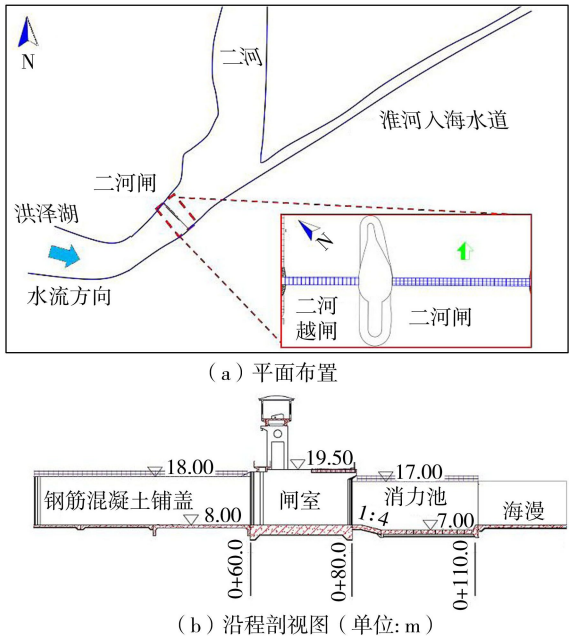


图 1 二河枢纽布置示意图

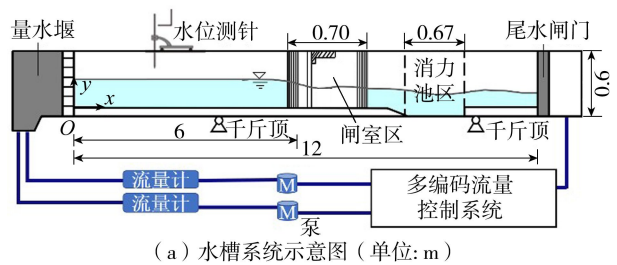
2 研究方法

二河枢纽水闸为多孔闸结构,各闸孔结构对称,运行工况一致,入流方向一致,流态具有高度相似

性,单孔水闸的研究可为整个枢纽提供参考。基于此共性特征,本文以二河枢纽的单孔水闸为研究对象,主要通过数值模拟开展研究,其中数学模型通过物理模型试验结果进行验证。

2.1 物理模型

本次试验以洪泽湖下游二河闸为原型,基于单孔闸门全开、正向进水条件下的实际运行工况建立物理模型。该模型为正态模型,按重力相似准则设计,几何比尺为30。将单孔水闸置于长、宽、高分别为12、0.6、0.6 m的水槽中,闸前过渡段长6.0 m,闸室段长0.7 m,消力池段长0.67 m,水槽系统示意图如图2(a)所示。水闸模型模拟一个完整闸孔(含净宽及两侧半个闸墩厚度),闸孔净宽33.3 cm,两侧半个闸墩厚度均为3.3 cm,如图2(b)所示。水槽进口处设置整流装置,确保水流均匀。流量、水位和断面中心线的流速分别由西门子管道电磁流量计、水位测针、旋桨流速仪测定。闸门上游和下游各设1个流速仪。闸室、过渡段、消力池区各设1个水位测针。



(b) 水闸模型实物图
图2 物理模型示意图

2.2 数学模型

本文采用 Fluent 软件建立三维水动力数值模型,采用雷诺应力模型(RSM)封闭湍流项,并结合VOF方法追踪自由水面,模拟不同入流角度下的水流运动过程。

2.2.1 计算区域和网格划分

选取单个闸门进行建模分析,计算区域如图3所示,x轴为顺水流方向,y轴为横向,z轴为垂向。模型边界为:底部、左右边壁设为壁面,上游设为流量边界,下游设为水位边界。考虑计算精度,为精确

捕捉自由液面,对闸室与消力池区域进行网格加密,如图3所示。采用六面体网格划分区域,近壁区边界层增长因子为1.2。为进行网格无关性验证,采用3种不同网格尺寸的模型进行模拟计算,分别为A类(网格尺寸为0.2 m)、B类(网格尺寸为0.2~0.4 m)和C类(网格尺寸为0.2~0.5 m)。图4展示了不同网格尺寸情况下沿程中心线流速分布计算结果,可以看出,3种网格尺寸下计算结果差异较小。考虑计算资源和效率,采用C类网格,最小网格边长为0.2 m,最大网格边长为0.5 m,总网格数约56万。

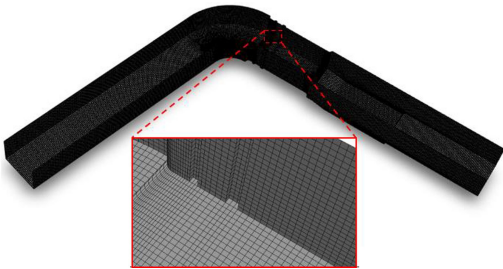


图3 计算区域网格

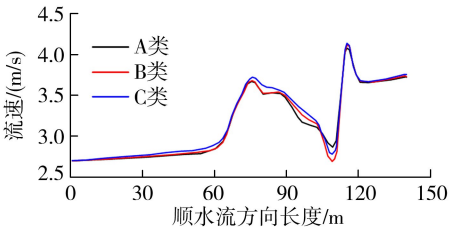


图4 不同网格尺寸下x方向流速分布

2.2.2 数学模型验证

采用20年一遇流量工况(单孔闸实际泄流量为56.60 m³/s,下边界水位为1.572 m,按照几何比尺缩放后进行试验)水槽试验结果对数学模型进行验证。将水槽试验数据缩尺换算为原型数据后,与数值模拟沿程水位和断面中心流速进行对比,结果如图5所示。由图5可知,模拟水位与试验值吻合程度较高,最大误差不超过0.08 m,模拟流速分布与试验结果较为一致,最大误差不超过0.13 m/s,平均相对误差为2.5%,验证效果满足JTS/T 231—2021《水运工程模拟试验技术规范》的要求。模型纵向依次布设60 m长的混凝土铺盖、20 m长的闸室、30 m长的消力池和30 m长的海漫。沿程流速存在两个峰值,分别位于消力池入口处和消力池尾坎处,后者流速较大,主要是由于消力池尾部存在1 m高的尾坎,此处发生水跌,水位较消力池入口处低,过流面积缩减3 m²,故峰值流速大。

2.3 工况设置

根据二河枢纽水闸的进流特点,设计5个入流角度和4个流量级别,共20个工况。入流角度包括 $\theta=0^\circ、30^\circ、45^\circ、60^\circ、75^\circ$,流量级别包括300年一遇

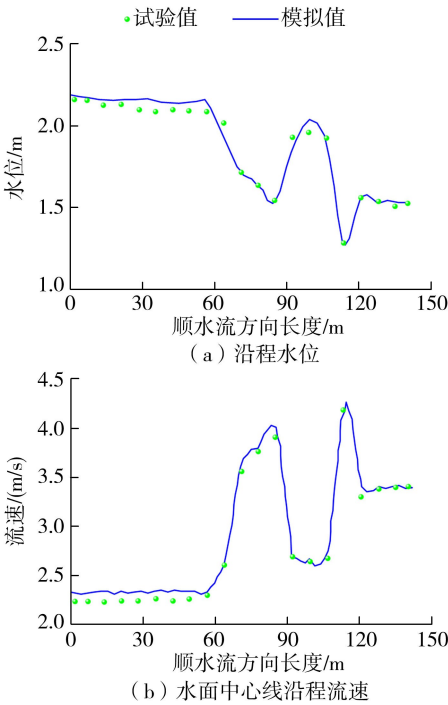


图5 数值模拟与水槽试验结果对比

($Q = 188.68 \text{ m}^3/\text{s}$, 设计洪水流量)、100 年一遇 ($Q = 132.08 \text{ m}^3/\text{s}$)、50 年一遇 ($Q = 94.34 \text{ m}^3/\text{s}$)、20 年一遇 ($Q = 56.60 \text{ m}^3/\text{s}$), 流量均为单孔水闸的泄流量, 具体工况设置见表 1。在上游来流弯道段, 按照角度均匀布置 4 个监测断面: C1、C2、C3、C4, 如图 6 所示。

表 1 工况设置

工况	$\theta/^\circ$	$Q/(\text{m}^3/\text{s})$	下游水位/m	工况	$\theta/^\circ$	$Q/(\text{m}^3/\text{s})$	下游水位/m
1	0	188.68	3.489	11	45	94.34	2.118
2	0	132.08	2.655	12	45	56.60	1.572
3	0	94.34	2.118	13	60	188.68	3.489
4	0	56.60	1.572	14	60	132.08	2.655
5	30	188.68	3.489	15	60	94.34	2.118
6	30	132.08	2.655	16	60	56.60	1.572
7	30	94.34	2.118	17	75	188.68	3.489
8	30	56.60	1.572	18	75	132.08	2.655
9	45	188.68	3.489	19	75	94.34	2.118
10	45	132.08	2.655	20	75	56.60	1.572

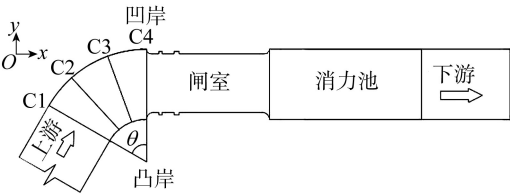


图6 监测断面示意图

3 结果与分析

3.1 闸前流速分布及特性

为分析弯道引起的斜向入流对闸前流场的影响,以流量 $Q = 56.60 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $Q = 188.68 \text{ m}^3/\text{s}$ 工况

为例,研究不同斜向入流角度下闸前弯道 C1~C4 断面的流速分布特征。图 7 和图 8 分别为两种流量和 4 个入流角度情况下各断面纵向流速 v_x 的分布云图和二次流的矢量图。结果表明,随着水流从 C1 断面进入弯道,受下游弯道几何形态的影响,C1 断面流速分布不均匀,弯道断面纵向流速呈现“凹岸小、凸岸大”的分布特征,最大纵向流速靠近凸岸,从 C1 至 C4 断面,最大纵向流速位置逐渐向凹岸偏移,这与前人矩形弯道断面^[17]和梯形弯道断面^[18]情况下的计算结果一致。上述结果与天然弯曲河道有所差异,主要原因在于本研究采用矩形过流断面,断面形状规整且水位相对较低,而天然弯道中凹岸冲刷、凸岸淤积的地形特征使得水动力轴线更加贴近凹岸。同时,受弯道离心力的影响,各断面二次流形成逆时针主环流,表层水流从凸岸向凹岸运动,底层水流从凹岸向凸岸运动。入流断面 C1 的流速矢量主要从凹岸指向凸岸,而 C2 和 C3 断面处于弯道中段,环流特征更加明显。通过对各横断面的法向涡量积分,计算断面涡通量 Γ ,以此量化二次环流的强度,数值如图 7 和图 8 所示。沿程变化表明,随着断面逐渐靠近闸门,不同流量情况下环流强度逐渐增大。随入流角度增大,大流量情况下 ($Q = 188.68 \text{ m}^3/\text{s}$) 紊动强烈,同一断面最大纵向流速无明显变化规律,环流强度在入流角度为 60° 时达到最大值后开始衰减;小流量情况下 ($Q = 56.60 \text{ m}^3/\text{s}$),同一断面的最大纵向流速在入流角度为 60° 时达到最大值后开始衰减,环流强度无明显变化规律。

C4 断面靠近水闸,其流速大小与分布直接影响水闸的泄流能力,图 9 为不同工况下 C4 断面的垂线平均流速沿横断面的分布情况。结果表明:在相同流量下,断面平均流速随入流角度增大未呈现显著规律性变化;然而,凹凸岸流速差(凸岸最大流速与凹岸最小流速之差)则随入流角度增大而显著增加。此规律在大流量工况(图 9(d))下表现最为明显:当入流角度从 30° 增至 75° 时,流速差由 0.6 m/s (占断面平均流速的 16.5%) 升至 2.9 m/s (占比 84.3%),绝对值增幅达 383.3% 。结合前述流场分析可知,入流角度增大导致 C4 断面的横向环流呈现不同的变化特征,这种流速分布的变化对水闸泄流能力产生了重要的影响。具体而言,流速分布不均匀程度的加剧与横向环流的增强共同导致局部能量损失增加,从而降低了水闸的泄流能力。

3.2 闸前水位分布与变化

除流速分布外,闸前水位分布同样是影响水闸泄流能力的关键因素,邻近水闸的 C4 断面水位直接决定了闸前水位。图 10 为不同工况下 C4 断面的

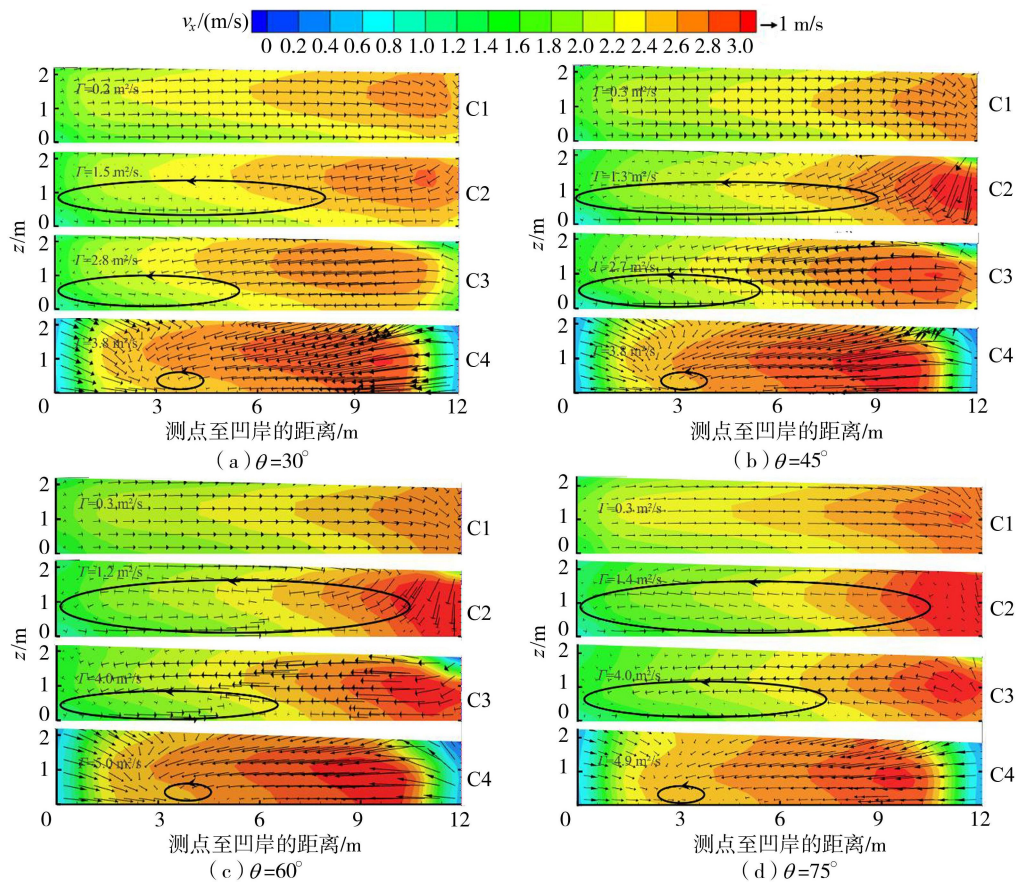


图7 $Q = 56.60 \text{ m}^3/\text{s}$ 工况下闸前弯道断面纵向流速云图和横向流速矢量图

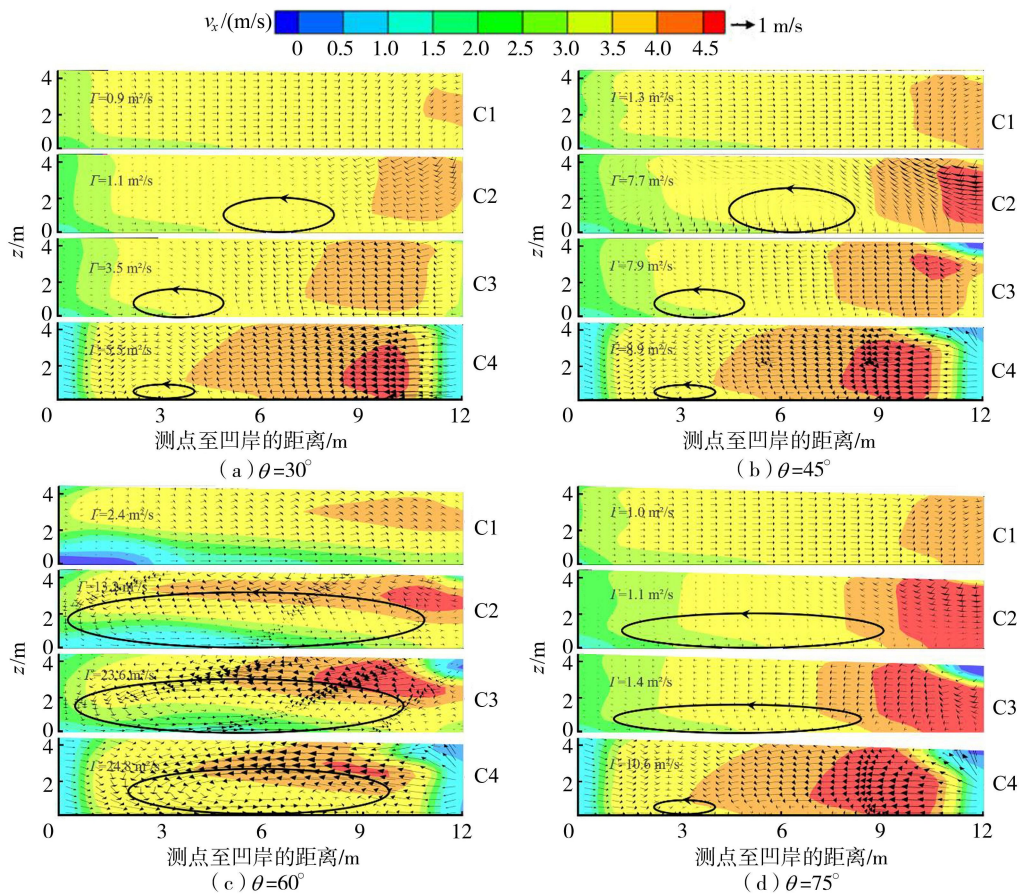


图8 $Q = 188.68 \text{ m}^3/\text{s}$ 工况下闸前弯道断面纵向流速云图和横向流速矢量图

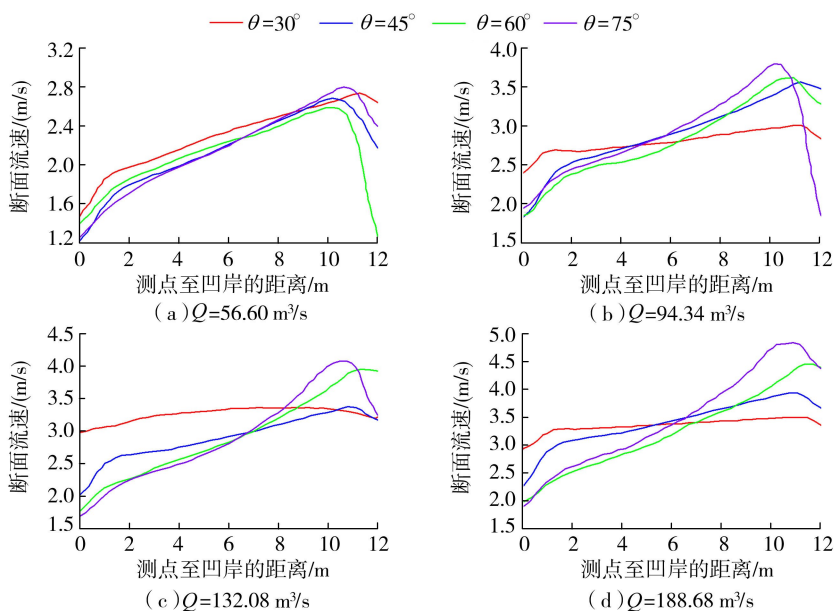


图9 不同工况下 C4 断面流速变化

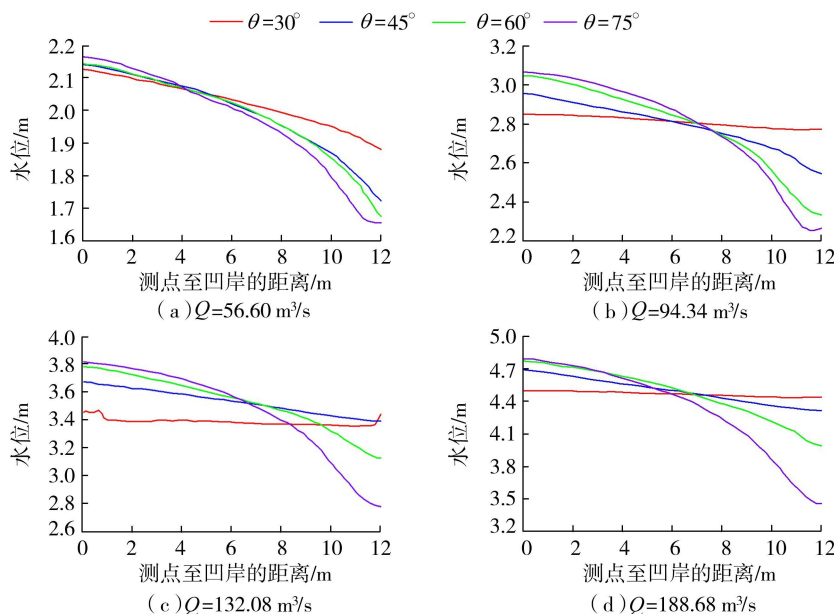


图10 不同工况下 C4 断面水位变化

水位沿横断面的分布情况。由图 10 可知,受弯道环流影响,C4 断面水位呈现凹岸高、凸岸低的横向非均匀分布。在相同流量下,断面平均水位随入流角度增大未呈现显著规律性变化;然而,凹凸岸水位差(凹岸最高水位与凸岸最低水位之差)随入流角度增大而显著增大。此规律在大流量工况(图 10(d))下尤为明显:当入流角度从 30° 增至 75° 时,水位差由 0.1 m (占断面平均水位 1.3%) 升至 1.3 m (占比 30.7%)。图 11 为横向水位比降与单宽流量和弗劳德数之间的关系,可以看出,不同入流角度下横向水位比降随流量和弗劳德数的变化趋势有所差异:随流量和弗劳德数的增大,横向水位比降从小角度下的降低趋势逐渐转变为大角度下的增大趋势。这一现象表明,在小角度条件下,流量和弗劳

德数增大所带来的水流惯性增强在一定程度上抑制了横向环流的发育;相反,在大角度条件下,流量和弗劳德数增大进一步强化了已十分显著的离心力作用,导致横向环流及相应的水位比降持续增强。以上结果表明,入流角度的增大不仅加剧了横向水位分布的不均匀性,更改变了水流惯性对横向环流的作用机制,其抑制作用逐渐削弱。凹凸岸显著的水位差将导致闸孔有效过流断面的形心发生偏移,增大泄流压力并降低泄流能力。针对斜向入流引起的横向水位分布不均问题,可以在凹岸设置导墙并向前延伸,迫使水流提前转向,使其在进入闸前引渠时就得到调整,从而减少闸前横向比降;也可以在闸前引渠中设置分流墩或导流堤,进而破坏大尺度的横向环流,将水流分割成多股,引导其平稳进入各闸孔。

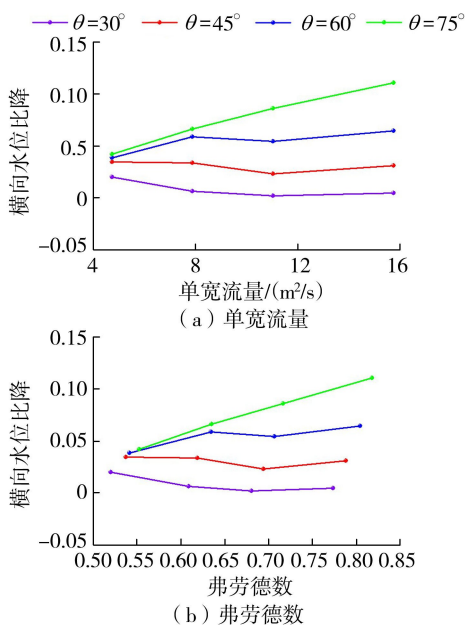


图 11 C4 断面横向水位比降与单宽流量、弗劳德数的关系

3.3 综合流量系数变化特征

根据数值模拟计算结果,利用堰流公式反推可得到不同工况下的综合流量系数。从水闸综合流量系数与入流角度的关系曲线(图 12)可以看出,相同流量条件下,流量系数随入流角度的增大均呈单调递减趋势。结合前述流场和水位分析可知,随入流角度增大,闸前二次环流尺寸显著增大,流速分布不均匀程度加剧,致使水流紊动加剧和能量耗散增大,同时断面横向水位分布不均匀程度加剧,较大水位差使得过流断面形心偏移,降低水闸过流能力,最终导致流量系数随入流角度增大而降低。当入流角度为 0° 时,流量系数基本不随流量的变化而变化,这是由于 0° 时,闸前无二次环流作用,水流仅受岸坡与闸墩的阻力作用,此时造成的局部水头损失较小,总体流量系数维持在 $0.365 \sim 0.370$ 。

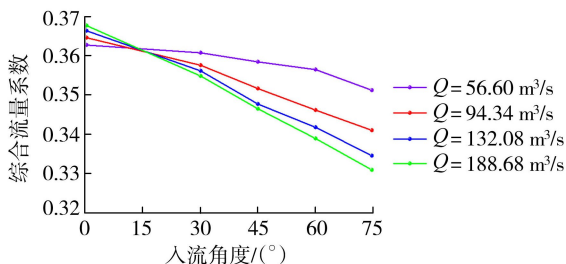


图 12 综合流量系数与入流角度的关系

流量增大导致闸前行近断面平均流速增加,进而水位壅高,导致水深略有变化。弗劳德数可以综合表征水流惯性力与重力作用的相对强弱。弗劳德数较高时,水流湍动加剧,涡旋耗能显著,边界层分离现象更为明显,导致局部水头损失增大,进而降低流量系数。此外,闸前行近断面的宽深比 (B/h) 作

为表征水流横向约束条件的关键参数,亦可能通过改变流速分布与涡旋尺度对流量系数产生影响。因此,综合流量系数表达式需要考虑入流角度、弗劳德数、宽深比的影响。Ranga Raju 等^[19]针对矩形堰提出了 $m = 0.81 - 0.6Fr$ 的综合流量系数半经验公式。在此基础上,本文进一步探讨了入流角度和宽深比对综合流量系数的影响,采用 $\cos\theta$ 反映横向环流的影响,并提出斜向入流情况下综合流量系数的计算公式:

$$m = a + bFr + cB/h + d\cos\theta \quad (1)$$

式中: a 、 b 、 c 、 d 均为修正系数。

利用 20 组模拟数据,采用 C3 断面平均水位和平均流速进行计算,通过多元线性回归确定修正系数,最终拟合得到综合流量系数的计算公式:

$$m = 0.142 + 0.164Fr + 0.018B/h + 0.049\cos\theta \quad (2)$$

拟合决定系数 R^2 为 0.932。流量系数实测值与公式计算值的对比如图 13 所示,最大相对误差为 5.23%,平均相对误差为 2.01%,表明该公式可以较好地预测 $0^\circ \sim 75^\circ$ 弯道斜向入流条件下的水闸综合流量系数。

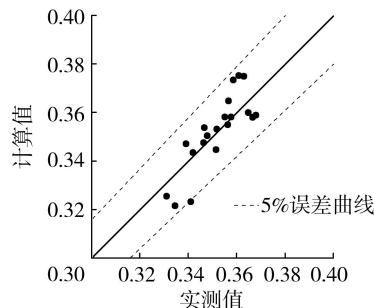


图 13 综合流量系数实测值与计算值的对比

4 结 论

a. 弯道斜向入流使闸前流场纵向流速呈现“凹岸小、凸岸大”的分布特征,最大纵向流速出现在凸岸;横断面二次流在弯道离心力作用下形成逆时针主环流,表层水流从凸岸向凹岸运动,底层水流从凹岸向凸岸运动。随入流角度增大,大流量情况下,同一断面环流强度在入流角度为 60° 时达到最大值后开始衰减;小流量情况下,同一断面的最大纵向流速在入流角度为 60° 时达到最大值后开始衰减;弯道进出口断面凹凸岸流速差大幅提升,其占断面平均流速的比例由 16.5% 最高增至 84.3%。

b. 弯道斜向入流使弯道出口断面水位呈现凹岸高、凸岸低的横向分布,且不均匀性随入流角度增大而加剧。相同流量下,凹凸岸水位差随入流角度增大显著升高,其占断面平均水位的比例由 1.3%

最高增至 30.7%,水流的惯性对横向环流的抑制作用随入流角度增大逐渐削弱。

c. 弯道斜向入流导致水闸综合流量系数随入流角度增大而降低。本文建立的考虑入流角度、弗劳德数和宽深比影响的流量系数计算公式能够较为准确地预测 0°~75°弯道入流角度范围内水闸的泄流能力。

参考文献:

[1] 中华人民共和国水利部. 中国水利统计年鉴 2020[M]. 北京:中国水利水电出版社,2020:39.

[2] 李凯,曾诚,陈辰,等. 明渠弯道几何形态对水动力特性的影响研究[J]. 水利水电科技进展,2026,46(2):12-21. (Li Kai, Zeng Cheng, Chen Chen, et al. Study on influence of geometric morphology of open-channel bends on hydrodynamic characteristics[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2026,46(2):12-21. (in Chinese))

[3] 胡呈维,余明辉,渠庚. 急弯段水流能量输运与耗散特性试验研究[J]. 工程力学,2025,42(4):253-264. (Hu Chengwei, Yu Minghui, Qu Geng. The experimental study of the characteristics on flow energy transport and dissipation in sharply curved bends [J]. Engineering Mechanics,2025,42(4):253-264. (in Chinese))

[4] 扈霖,张耀哲,王文娥. 斜交实用堰泄流能力及水力特性的试验研究[J]. 水力发电学报,2018,37(11):56-64. (Hu Lin, Zhang Yaozhe, Wang Wen'e. Experimental study on discharge capacity and hydraulic characteristics of oblique practical weirs [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2018,37(11):56-64. (in Chinese))

[5] Tuyen N B. Flow over oblique weirs [D]. Delft: Delft University of Technology,2006.

[6] 王仕筠. 斜交堰的水力特性[J]. 江西水利科技,1997,23(1):30-33. (Wang Shijun. The hydraulic characteristic of skew weirs [J]. Jiangxi Hydraulic Science & Technology,1997,23(1):30-33. (in Chinese))

[7] 王佳伟. 矩形渠道薄壁侧堰试验研究与数值模拟[D]. 咸阳:西北农林科技大学,2015.

[8] 王莹莹,王文娥,胡笑涛,等. 矩形渠道薄壁侧堰水力特性试验及数值模拟[J]. 水力发电学报,2016,35(1):70-78. (Wang Yingying, Wang Wen'e, Hu Xiaotao, et al. Experimental and numerical studies on hydraulic characteristics of sharp-crested side weirs in rectangular channels[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2016,35(1):70-78. (in Chinese))

[9] 迟颖. 侧堰溢洪道泄流能力的理论计算与模型试验成果分析与探讨[J]. 水利建设与管理,2015,35(1):19-21. (Chi Ying. Analysis and discussion on theoretical calculation and model test result of side weir spillway discharge capacity [J]. Water Conservancy Construction

and Management,2015,35(1):19-21. (in Chinese))

[10] 张桂铭,覃晓凤,张绪进,等. 侧向进流溢洪道泄流能力模型试验研究[J]. 中国水运,2023,23(24):107-109. (Zhang Guiming, Tan Xiaofeng, Zhang Xujin, et al. Model test study on discharge capacity of side inflow spillway [J]. China Water Transport,2023,23(24):107-109. (in Chinese))

[11] Vatankhah A R. Briefing: water surface profile over side weir in a trapezoidal channel [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management,2012,165(5):247-252.

[12] Azimi H, Hadad H, Shokati Z, et al. Discharge and flow field of the circular channel along the side weir [J]. Canadian Journal of Civil Engineering,2015,42(4):273-280.

[13] 戴文鸿,苗伟波,高嵩,等. 弯道水流运动及床面变形数值模拟研究进展[J]. 南水北调与水利科技,2014,12(3):121-126. (Dai Wenhong, Miao Weibo, Gao Song, et al. Development of study on numerical simulation of meandering river flow and bed deformation[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2014,12(3):121-126. (in Chinese))

[14] 熊毅,胡志根,陆贺,等. 弯曲河道立堵截流口水力特性分析[J]. 水利学报,2017,48(2):184-192. (Xiong Yi, Hu Zhigen, Lu He, et al. Study on hydraulic characteristics of end-dumping closure-gap in curve river [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2017,48(2):184-192. (in Chinese))

[15] 许东明. 弯道河势拦河闸坝过流特性的研究[J]. 福建水力发电,2023(1):4-6. (Xu Dongming. A study on the flow characteristics of sluice dams in curved river regimes [J]. Fujian Hydropower,2023(1):4-6. (in Chinese))

[16] 于佳敏. 铜城闸进水流态优化研究[D]. 扬州:扬州大学,2023.

[17] 杨鑫,李兴国,孙雪岚,等. 基于 CFD 的簇状刚性植被弯道水流水力特性研究[J]. 中国农村水利水电,2025(4):31-38. (Yang Xin, Li Xingguo, Sun Xuelan, et al. Hydraulic characteristics of cluster rigid vegetation bend flow based on CFD [J]. China Rural Water and Hydropower,2025(4):31-38. (in Chinese))

[18] 李倩,马黎,余明辉,等. 凹岸边坡型式对急弯河道水力特性影响的数值模拟[J]. 水科学进展,2023,34(4):599-609. (Li Qian, Ma Li, Yu Minghui, et al. Numerical simulation of effect of outer bank slope types on the hydraulic characteristics in sharp bends[J]. Advances in Water Science,2023,34(4):599-609. (in Chinese))

[19] Ranga Raju K G, Prasad B, Grupta S K. Side weir in rectangular channel[J]. ASCE Journal of the Hydraulics Division,1979,105(5):547-549.

(收稿日期:2025-06-27 编辑:俞云利)

某工程排沙洞弧形工作闸门后流道空蚀破坏成因的试验研究

向品宇¹, 宋铨焘², 邓 军²

(1. 四川大学水利水电学院; 2. 四川大学山区河流保护与治理全国重点实验室)

摘要:结合国内某工程排沙洞运行过程中弧形闸门出口侧墙空蚀破坏的实例,采用水力学模型试验方法,研究了不同开度运行条件下弧形闸门出口区域的水流特性及壁面压力特性,并对空蚀破坏的成因进行了深入分析。结果表明:弧形闸门全开时,掺气设施运行情况良好,不易发生空蚀破坏;弧形闸门局开时,出口水流横向扩散角增大,侧空腔长度迅速缩短,水流冲击区下游压力迅速降低,致使该区域水流空化数较小,并伴有侧墙清水区,从而加剧空蚀破坏风险;清水区的范围与破坏范围基本一致。

关键词:高速水流;弧形闸门;突扩突跌掺气设施;空蚀破坏;压力;流速

中图分类号:TV131.3

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2026)05-0096-06

Experimental study on causes of cavitation erosion damage in flow passage downstream of a radial service gate in a sediment flushing tunnel of a project//Xiang Pinyu¹, Song Tanta², Deng Jun² (1. College of Water Resources and Hydropower, Sichuan University; 2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University)

Abstract: Based on a case of cavitation erosion damage on the sidewalls at the outlet of a radial gate during the operation of a sediment flushing tunnel in a domestic hydraulic project, hydraulic model tests were conducted to study the flow characteristics and wall pressure characteristics in the outlet region of the radial gate under different opening conditions, and the causes of cavitation erosion damage were thoroughly analyzed. The results show that when the radial gate is fully open, the aeration facility operates well and cavitation erosion damage is unlikely to occur. When the radial gate is partially open, the lateral diffusion angle of the outlet flow increases, the length of the side cavity shortens rapidly, and the pressure downstream of the flow impingement zone drops rapidly, resulting in a relatively small cavitation number in this region and the presence of a clear-water zone on the sidewall, which intensifies the risk of cavitation erosion damage. The extent of the clear-water zone is basically consistent with that of the damage zone.

Key words: high-speed flow; radial gate; sudden expansion and drop aeration facility; cavitation damage; pressure; flow velocity

高坝工程中的泄水建筑物通常采用有压接无压明流隧洞的设计形式。弧形闸门挡水能力强,能够保障水流平顺通过,可适应不同水头条件和施工环境,因而常被选为有压出口闸门的优选类型。但高坝工程运行过程中,水流具有水头高、流量大、流速快等特点,容易导致工作闸门后流道侧墙发生空蚀破坏^[1-2]。研究表明,掺气是防止高速水流空蚀破坏的有效办法^[3-5],已在工程实践中得到了普遍应用^[6-8]。弧形闸门一般设置突扩突跌掺气设施,如龙羊峡水电站泄洪底孔、东江水电站二级放空洞、三峡工程泄洪深孔等^[9]。在弧形闸门出口的底板和侧

墙同步设置掺气坎,使有压出口水流在底部及两侧形成稳定的掺气空腔。该布置不仅能满足掺气减蚀的要求,还有利于改善弧形闸门的止水条件^[10-11]。

但是,当弧形闸门由全开变为局开时,局部流态恶化,严重时甚至引起掺气设施失效。张建民等^[12]研究发现,当弧形闸门全开时,空腔形态良好,当弧形闸门变为局开时,侧空腔长度明显缩短,侧墙存在清水区。肖兴斌等^[13]结合工程实例,认为侧扩大小会影响水翅,进而影响侧墙压力。Ma等^[14]采用数值模拟方法对空腔长度的影响因素进行了研究,指出跌坎高度和侧扩宽度与空腔长度具有相关性。此

基金项目:国家自然科学基金区域创新发展联合基金项目(U23A20668)

作者简介:向品宇(2005—),男,博士研究生,主要从事水利工程研究。E-mail:1529648514@qq.com

通信作者:邓军(1973—),男,教授,博士,主要从事工程水力学研究。E-mail:djhao2002@scu.edu.cn

外,随着底空腔长度的缩短,水流冲击侧墙形成的下方水翅更容易进入底空腔,进而引发底空腔回水,最终减弱其掺气减蚀的能力^[15]。

本文以国内某排沙洞弧形闸门有压出口侧墙空蚀破坏的工程实例为依托,通过水力学模型试验,研究了弧形闸门在不同开度及水位条件下出口区域的水流特性与壁面压力特性,对其空蚀破坏的原因进行了深入研究和分析,以期为待建工程有压出口弧形闸门下游段体型设计以及已建工程掺气减蚀设施的优化改良提供理论依据与技术参考。

1 工程概况

该工程排沙洞需兼顾部分泄洪任务,为保证排沙洞有压段内水流流速不突破 15 m/s 的限制,高水头运行时排沙洞弧形闸门长期处于局开运行状态。运行资料显示,闸门全开时间约占总运行时间的 31.2%,闸门局开且相对开度大于 0.5 的运行时间占比为 61.1%,即弧形闸门长期处于大开度局开运行状态。排沙洞工作水头较高,闸门运行过程中水头在 82 m 以上的时间约占 61.1%。另外,运行过程中闸门开度变化频繁。2021 年,弧形闸门共运行 18 个周期,闸门变动共 70 次。综上可知,闸门运行期间,局开工况居多,工作水头较高,且开度调节频繁。

2021 年 10 月 20 日的检修发现,排沙洞工作闸门(桩号 0+970)跌坎下游混凝土侧墙出现了严重的空蚀破坏(图 1),破坏区起始桩号 0+974,长 13.5 m,宽 0.95~1.90 m,最大深度约 0.60 m。空蚀破坏发生后,于 2021 年 10 月 21—24 日对破坏区域进行了抢修,但后续运行中仍多次出现空蚀破坏。

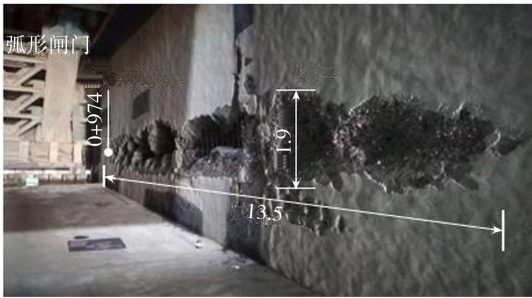


图 1 排沙洞弧形闸门下游侧墙空蚀破坏情况(单位:m)

2 研究方法

2.1 试验模型

试验模型基于该工程泄洪排沙洞布置,主要由圆形有压隧洞、闸室、弧形闸门和矩形泄槽明渠组成,如图 2 所示,闸门局部开启时水流流态如图 3 所示。模型全部采用有机玻璃制作,其中明渠段水力坡度 $i=0.12$ 。该模型为按重力相似准则构建的正

态试验模型,几何比尺为 1:20,相应比例尺为:长度比例尺 $\lambda_L=20$,流速比例尺 $\lambda_v=\lambda_L^{0.5}=4.47$,流量比例尺 $\lambda_Q=\lambda_L^{2.5}=1788.85$,压强比例尺 $\lambda_p=\lambda_L=20$,时间比例尺 $\lambda_t=\lambda_L^{0.5}=4.47$,糙率比例尺 $\lambda_n=\lambda_L^{1/6}=1.65$ 。圆形有压隧洞断面直径为 6.5 m,弧形工作闸门孔口尺寸为宽 4.4 m、高 4.5 m。门孔两侧突扩长度 $b=0.8$ m,跌坎高度 $t=0.96$ m,跌坎下游两侧设有通气竖井,水流经过时,在突扩突跌处形成空腔,通过通气竖井进行供气。

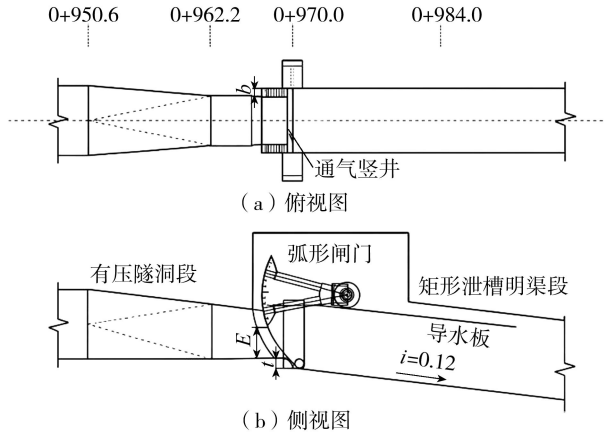


图 2 排沙洞体型布置

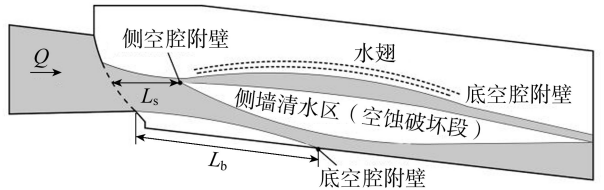


图 3 闸门局开时水流流态

根据工程运行情况,该排沙洞 2018—2022 年运行水头范围为 $H=55\sim125$ m,闸门开度变化范围为 $E=0\sim4.35$ m,相对开度 $e=0\sim1$,最大流量约为 $500\text{ m}^3/\text{s}$,闸门出口断面弗劳德数 $Fr=v/(gE)^{0.5}$,其中 g 为重力加速度。根据排沙洞运行资料,制定了如表 1 所示的试验工况,通过对预设工况进行水力学模型试验,得到不同闸门开度和水流条件下的排沙洞泄洪流量。试验中,流量 Q 采用矩形薄壁堰并配合测针进行量测。同时,分别测量不同闸门开度和水流条件下弧形闸门下游底空腔长度 L_b 、侧空腔长度 L_s 、底板压力 P_b 、侧墙压力 P_s 及沿程平均流速 v ,并据此计算空化数 σ ,以综合分析出口区域的水力学特性,进而探明空蚀破坏的原因。

2.2 试验仪器及方法

侧空腔长度、底空腔长度和沿程自由水面高度通过钢尺测量,取多次测量的平均值;侧墙和底板时均压力和脉动压力通过成都泰斯特公司研发的 CY-201 型压阻式数字压力传感器测量,该传感器量程为 20 kPa,精度为 1.0%,与传感器搭配的

表 1 试验工况

相对开度	水位/m	流量/(m^3/s)	出口流速/(m/s)	Fr
0.375	230	191	26.7	6.7
0.375	255	220	30.7	7.7
0.375	275	241	33.6	8.4
0.500	230	252	26.4	5.7
0.500	255	290	30.4	6.6
0.500	275	318	33.3	7.2
0.625	230	322	27.0	5.2
0.625	255	371	31.1	6.0
0.625	275	406	34.0	6.6
0.750	230	402	28.0	5.0
0.750	255	462	32.3	5.7
0.750	275	506	35.3	6.3
0.875	230	490	29.3	4.8
0.875	255	564	33.8	5.5
0.875	275	617	36.9	6.1
1.000	196	439	23.0	3.5
1.000	200	459	24.0	3.7
1.000	207	494	25.9	4.0

Smartsensor 压力数据处理软件可显示压力时域变化过程,压力数据通过软件中读取的压力时均值得到。侧墙压力测点自桩号 0+970 起,共 12 组,每 2 m 设置一组测点,同一组测点沿垂直方向均匀布置,间距

0.5 m;底板压力测点自桩号 0+977 起,共 12 个测点,沿底板中轴线布置,相邻测点间距 1 m。试验前对压力探头的采样时间和采样频率进行了验证,最终选定的采样时间为 20 s,采样频率为 200 kHz。通过针式掺气浓度流速仪测量侧墙附近的水流流速,流速测点距离侧墙 0.2 m,在侧空腔附壁点下游布置测量断面,测点沿高程方向均匀布置。该设备主要通过掺气探针针尖采集电信号,分析气泡通过针尖和水流通过针尖的信号差异,从而计算得出气泡流速,探针采样频率为 80 kHz,采样时间为 20 s。

3 结果与分析

3.1 空腔特性及流态变化规律

各闸门开度和水头条件下,弧形闸门突扩突跌掺气设施下游水流流态具有不同的特征。如图 4 所示,当弧形闸门全开时,水流平稳,无明显水翅,侧空腔长度约为 10 m,底空腔长度约为 15 m,无明显清水区,掺气设施运行良好。当弧形闸门局开时,水流横向扩散角增大,冲击侧墙后存在明显向上水翅,底空腔无明显变化,侧空腔长度显著减小,减小至

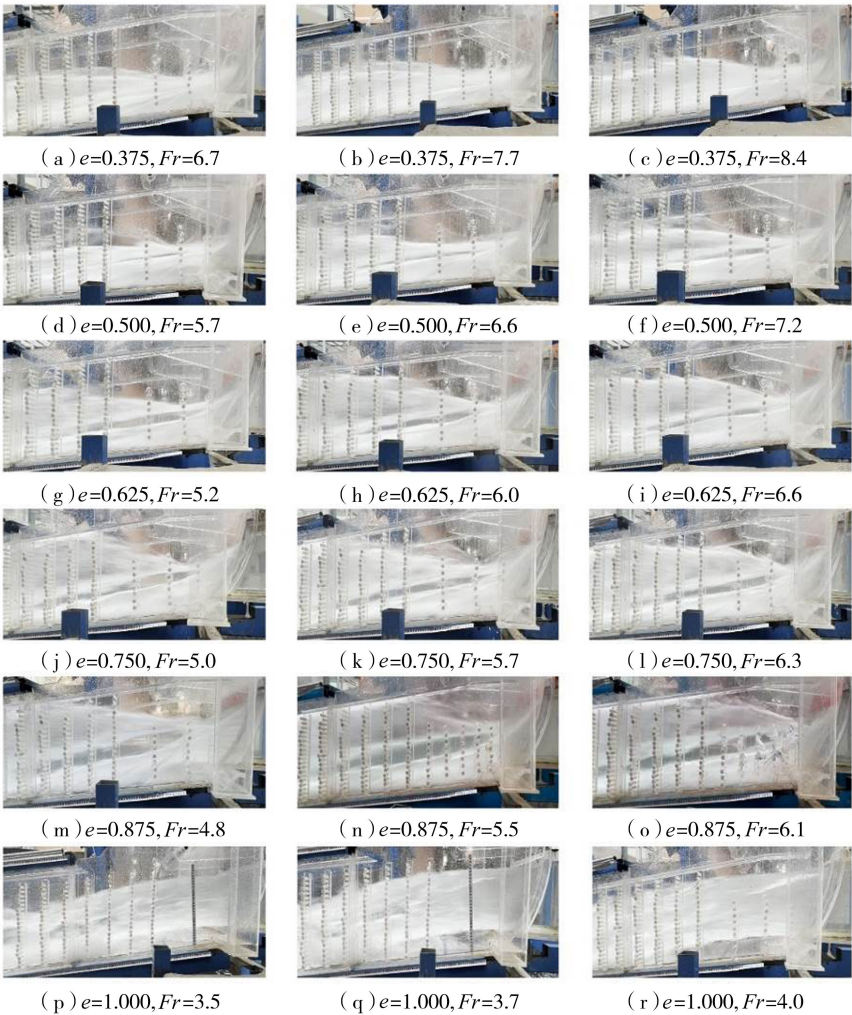


图 4 弧形闸门各开度水流流态

1.8 m 左右。当闸门开度较小($e=0.375$)时,水流厚度较小,表面自掺气效果明显,无明显清水区;当闸门开度较大($e\geq 0.500$)时,存在明显清水区,清水区对应桩号 0+970 至 0+990,掺气效果差,对工程不利。

图 5 揭示了水流条件对空腔长度的影响规律。闸门全开和局开时,底空腔长度随水流 Fr 均近似呈线性关系。闸门全开时, $R^2=0.99$, 闸门局开时, $R^2=0.92$, L_b 为 14.0~20.0 m, 如图 5(a) 所示。但是,弧形闸门由全开变为局开后,侧空腔长度 L_s 明显缩短,闸门全开时 L_s 约为 10 m, 闸门局开时 L_s 约为 1.0~2.0 m, 局开时开度对侧空腔长度影响较小, 如图 5(b) 所示。

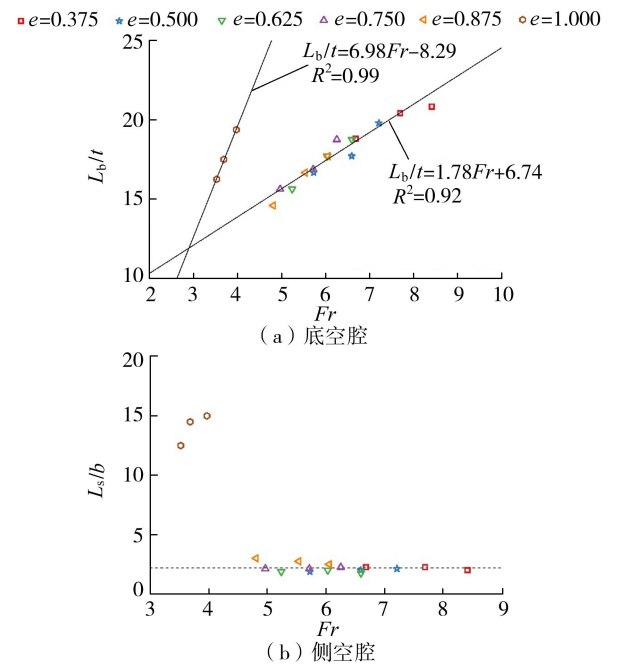


图 5 空腔长度变化

3.2 壁面压力

试验所得底板压力分布结果如图 6 所示。闸门开度较小时,压力分布较稳定,在 $e=0.375$ 、 $Fr=8.4$ 条件下,沿程底板压力 P_b 最大值为 4.65 m,最小值为 1.23 m,在冲击区并未出现压力显著增大的现象;闸门开度较大及全开时, P_b 明显增大,且 P_b 随着闸门开度的增加而增加,例如在 $e=1.000$ 、 $Fr=4.0$ 条件下,冲击区上游 P_b 从 1.06 m 快速上升,冲击区 P_b 达 10.19 m,随着水流反弹和回落,冲击区下游沿程 P_b 随之在 4.38~5.33 m 间波动。

图 7 为侧墙压力分布情况。由图 7 可知,闸门全开时(图 7(a)),侧墙压力 P_s 不存在负压,反弹区压力略微增大,随后压力减小,如在 $Fr=3.5$ 的水流条件下, P_s 从 0.50 m 上升至 2.94 m,随后降至 1.02 m,整体侧墙压力波动较小,无明显突变区域,对工程的不利影响较小;闸门局开时(图 7(b)),碰

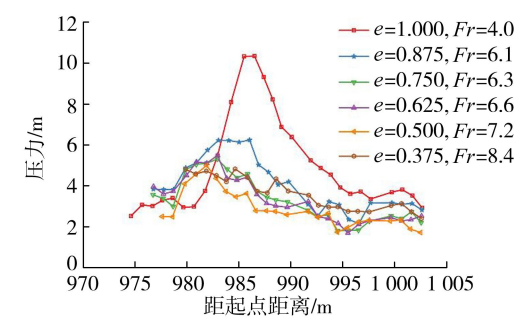


图 6 底板压力变化

撞区 P_s 显著增大,以 $e=0.625$ 、 $Fr=6.6$ 的工况为例,冲击区 P_s 剧烈上升至 4.79 m,随后 P_s 迅速减小至 0.47 m,工况 $e=0.375$ 、 $Fr=8.4$ 时甚至出现负压 (-0.17 m),这段区域整体上出现了较大压力梯度变化,形成明显的冲击高压区和反弹低压区,增大了发生空化空蚀的风险。反弹低压区与清水区的位置与排沙洞侧墙出现空蚀破坏断面的桩号基本一致。

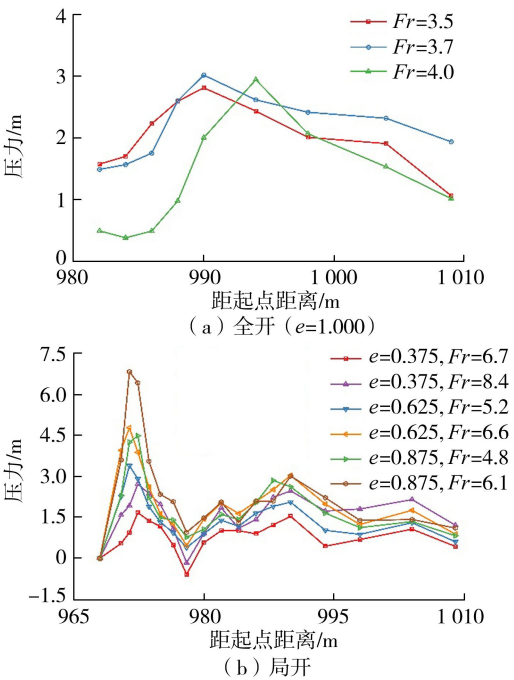


图 7 闸门全开和局开时侧墙压力变化

3.3 空化数

试验过程中测得各工况平均流速结果如图 8 所示。由图 8 可知,闸门下游各断面流速分布均匀,但闸门局开和全开存在明显区别,全开时流速范围为 23.70~26.90 m/s,局开时流速相对较大,变化范围也相对增大,达 31.12~44.56 m/s,发生空蚀破坏的风险上升。

水流空化数根据时均压力和流速计算:

$$\sigma = \frac{P_s + h_a - h_v}{v^2/2g} \tag{1}$$

式中: P_s 为测点位置侧墙压力; v 为测点断面的平均流速; h_v 为水的汽化压强,计算时取 0.24 m 水柱; h_a

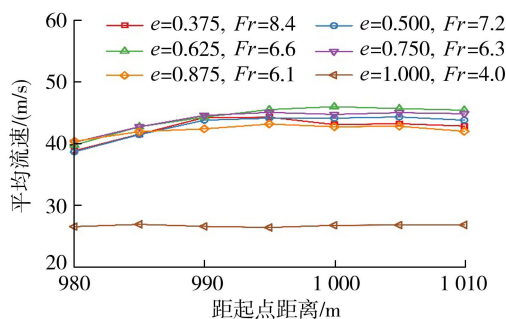


图8 沿程平均流速

为当地大气压强, $h_a = 10.33 - H/900$; H 为当地海拔; g 为重力加速度, 取 9.81 m/s^2 。

各工况沿程平均空化数计算结果如图9所示, 空化数越小, 表示空化现象越容易发生。由图9可知, 闸门全开时, 各断面空化数为 $0.29 \sim 0.44$, 均大于 0.2 , 故发生空蚀破坏的风险较小, 闸门局开时, 绝大多数工况下空化数小于 0.2 , 易发生空蚀破坏, 部分工况 ($e=0.750$, $Fr=5.0$) 下空化数略大于 0.2 , 但这些工况下闸门下游存在明显清水区, 对应桩号为 $0+972$ 至 $0+990$, 该区域掺气效果差, 并且水流流速较大, 达 35.26 m/s , 发生空蚀破坏的风险较大。因此, 闸门局开时, 下游极易发生空蚀破坏。

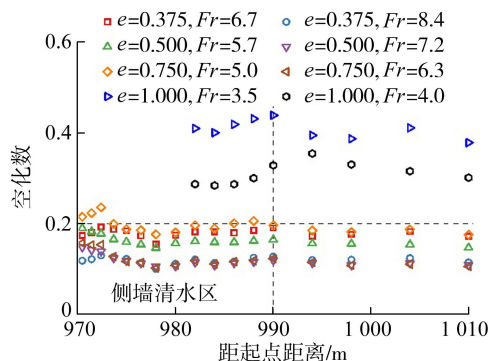


图9 侧墙空化数变化

综上所述, 该工程弧形闸门下游侧墙发生空蚀破坏的原因主要有: 闸门局开时, 高速水流冲击边墙导致桩号 $0+970$ 至 $0+990$ 段侧墙压力变化剧烈, 侧空腔长度显著缩短, 水流空化数多低于 0.2 , 虽然底空腔仍能发挥作用, 但是整体掺气效果变差, 容易发生空蚀破坏。同时, 闸门局开时, 尤其是大开度 ($e \geq 0.500$) 情况下, 侧墙存在明显清水区, 表明高速水流基本无掺气, 极易发生空蚀破坏。结合该工程运行情况, 闸门大开度局开 ($e \geq 0.500$) 且高水头工作时间较长时, 闸门开度变动频繁, 侧墙常处于不利水流条件下, 空蚀破坏风险显著增加。

4 结论

a. 闸门全开时, 突扩突跌型掺气设施发挥了良

好的作用, 空腔形态良好, 各工况下无明显清水区, 侧墙压力无明显突变区域, 且空化数均大于 0.2 , 发生空蚀破坏的风险较小。

b. 闸门局开时, 水流受到闸门压迫, 出射时横向扩散角增大, 侧空腔长度显著减小, 形成了高压冲击区和低压反弹区, 导致出现明显的侧墙清水区, 水流空化数小于 0.2 。其中, 底空腔长度随水流条件变化存在明显规律, 表现为 Fr 与空腔长度的一次函数关系。闸门开度较大时, 存在较厚的清水区, 该区域无掺气, 水流流速大, 侧墙压力低, 极易发生空蚀破坏; 小开度时, 出射水流较薄, 表面自掺气效果明显, 清水区范围较小, 与大开度情况相比, 发生空蚀破坏的风险较小, 但仍有破坏的可能性。该结论与工程实际破坏情况基本一致。

参考文献:

- [1] 薛伟, 陈昭运. 空蚀破坏的微观过程研究[J]. 大电机技术, 2003(6): 40-43. (Xue Wei, Chen Zhaoyun. The study on the micro-course of the cavitation erosion[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2003(6): 40-43. (in Chinese))
- [2] 张云莲. 泄水建筑物的空蚀破坏和防止方法[J]. 腐蚀与防护, 2001, 22(8): 343-345. (Zhang Yunlian. The cavitation damage of sluicing structure and the preventing methods[J]. Corrosion & Protection, 2001, 22(8): 343-345. (in Chinese))
- [3] 郭军, 张东, 刘之平, 等. 大型泄洪洞高速水流的研究进展及风险分析[J]. 水利学报, 2006, 37(10): 1193-1198. (Guo Jun, Zhang Dong, Liu Zhiping, et al. Achievements on hydraulic problems in large spillway tunnel with a high head and large discharge flow and its risk analysis[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(10): 1193-1198. (in Chinese))
- [4] 朱春英, 凌霄, 刘杰, 等. 小浪底工程明流洞掺气减蚀设计研究[J]. 水力发电, 2001(2): 23-26. (Zhu Chunying, Ling Xiao, Liu Jie, et al. Research on aerated cavitation erosion reduction design in tunnel of Xiaolangdi Project[J]. Water Power, 2001(2): 23-26. (in Chinese))
- [5] Pfister M, Hager W H. Chute aerators. I: air transport characteristics[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 136(6): 352-359.
- [6] 肖兴斌. 掺气减蚀设施的研究与应用综述[J]. 长江水利教育, 1996, 13(1): 55-59. (Xiao Xingbin. Overview of research and application of aeration corrosion reduction facilities[J]. Journal of Changjiang Institute of Technology, 1996, 13(1): 55-59. (in Chinese))
- [7] 高昂, 吴时强, 王芳芳, 等. 掺气减蚀技术及掺气设施研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(2): 86-94. (Gao Ang, Wu Shiqiang, Wang Fangfang, et al. Research

progress of aeration cavitation reduction technology and aeration devices[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2019,39(2):86-94. (in Chinese))

[8] Fuhrhop H, Schulz H E, Wittenberg H. Solution for spillway chute aeration through bottom aerators [J]. International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements,2014,2(3):298-312.

[9] 周赤,何勇,廖仁强. 三峡工程泄洪深孔突扩跌坎式掺气的试验研究[J]. 长江科学院院报,1997,14(2):2-6. (Zhou Chi, He Yong, Liao Yongqiang. Experimental studies on aerator with vertical drop and lateral sudden enlargement form for Three Gorges Project's outlets[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1997,14(2):2-6. (in Chinese))

[10] 王伟,邓军,卫望汝. 高水头弧形闸门出口侧墙空化特性及掺气减蚀研究 [J]. 工程科学与技术,2025,57(2):84-92. (Wang Wei, Deng Jun, Wei Wangru. Cavitation characteristics and aeration mitigation for the sidewall of a radial gate in a high-head tunnel [J]. Advanced Engineering Sciences,2025,57(2):84-92. (in Chinese))

[11] Zhang Jianmin, Chen Jiangang, Xu Weilin, et al. Three-dimensional numerical simulation of aerated flows downstream sudden fall aerator expansion-in a tunnel[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B,2011,23(1):71-80.

[12] 张建民,许唯临,王伟,等. 高水头冲沙放空洞边墙空蚀破坏原因探讨 [J]. 水力发电学报,2010,29(5):197-201. (Zhang Jianmin, Xu Weilin, Wang Wei, et al. Cavitation damage to sidewalls in a sand flushing tunnel under high head [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2010,29(5):197-201. (in Chinese))

[13] 肖兴斌,王才欢,王业红. 弧形闸门突扩跌坎式通气减蚀研究进展综述[J]. 长江科学院院报,2000(5):1-4. (Xiao Xingbin, Wang Caihuan, Wang Yehong. Review on study of aerators with sudden lateral enlargement and bottom drop at taintor gate region[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2000(5):1-4. (in Chinese))

[14] Ma Xudong, Dai Guangqing, Yang Qing, et al. Analysis of influence factors of cavity length in the spillway tunnel downstream of middle gate chamber outlet with sudden lateral enlargement and vertical drop aerator[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B,2010,22(5):680-686.

[15] 李宏娟,薛玉林. 弧形闸门突扩跌坎泄洪放空洞受损修复研究[J]. 水电站机电技术,2023,46(4):95-97. (Li Hongjuan, Xue Yulin. Study on damage repair of radial gate sluice discharge cavity with sudden enlargement and falling bucket [J]. Mechanical & Electrical Technique of Hydropower Station,2023,46(4):95-97. (in Chinese))

(上接第 26 页)

[24] Gylltoft K. Fracture mechanics models for fatigue in concrete structures [D]. Luleå: Luleå Tekniska Universitet,1983.

[25] Horii H, Shin H C, Pallewatta T M. Mechanism of fatigue crack growth in concrete [J]. Cement and Concrete Composites,1992,14(2):83-89.

[26] Hillerborg A, Modéer M, Petersson P E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements [J]. Cement and Concrete Research,1976,6(6):773-781.

[27] Petersson P E. Crack Growth and development of fracture zones in plain concrete and similar materials [R]. TVBM 1006, Lund: Division of Building Materials, University of Lund,1981.

[28] Liaw B M, Jeang F, Du J J, et al. Improved nonlinear model for concrete fracture [J]. Journal of Engineering Mechanics,1990,116(2):429-445.

[29] Foote R M L, Mai Y W, Cotterell B. Crack growth resistance curves in strain-softening materials [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids,1986,34(6):593-607.

[30] Ottosen N S, Ristinmaa M. Enhanced fictitious crack model accounting for material drawn into the cohesive zone: physically based crack closure criterion [J]. International Journal of Fracture,2016,199(2):199-211.

[31] 傅剑平,慕遂峰,白绍良. 高应变状态下混凝土的非等应变幅重复受压性能试验研究 [J]. 工程力学,2006,23(11):145-152. (Fu Jianping, Mu Suifeng, Bai Shaoliang. Cyclic loading tests on behavior of concrete subjected to large compressive strains of different amplitude [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23 (11): 145-152. (in Chinese))

[32] GB/T 50152—2012 混凝土结构试验方法标准[S].

[33] 卫军,李松林,董荣珍,等. 考虑残余变形影响的混凝土疲劳损伤本构模型[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2016,43(7):57-61. (Wei Jun, Li Songlin, Dong Rongzhen, et al. Fatigue damage constitutive model of concrete considering the effect of residual deformation [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016,43(7):57-61. (in Chinese))

[34] Wang Limin, Xu Shilang, Zhao Xiqiang. Analysis on cohesive crack opening displacement considering the strain softening effect [J]. Science in China Series G,2006,49(1):88-101.

[35] Paris P, Erdogan F. A critical analysis of crack propagation laws [J]. Journal of Basic Engineering,1963,85(4):528-533.

(收稿日期:2025-07-05 编辑:俞云利)

基于 BIM+知识库的深基坑施工质量虚实增强巡检方法

刘 涵^{1,2}, 刘东海¹, 李 欣¹, 王 东³, 易传斌³

(1. 天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室; 2. 中国三峡建工(集团)有限公司; 3. 四川川交建设集团有限公司)

摘要:针对传统人工巡检在深基坑施工质量管理中存在的时效性差、可视化程度低且过度依赖人员经验等问题,提出了一种融合增强现实(AR)、建筑信息模型(BIM)和知识库技术的深基坑施工质量巡检方法。该方法借助图像辅助和点云配准技术,实现了 AR 环境中 BIM 模型与施工现场的高精度注册,解决了虚拟模型与真实场景间的高精度配准问题;以建立的语义丰富的深基坑 BIM 模型为载体构建了耦合 BIM 的巡检信息知识库,并开发了施工质量虚实增强智能巡检系统,实现了虚实场景融合、多源知识调用和可视化反馈等辅助巡检功能。工程实例验证结果表明,该方法具有良好的有效性和实用性,可为深基坑施工质量的智能化与精细化管理提供可靠的技术手段。

关键词:深基坑施工;质量巡检;增强现实;BIM;知识库

中图分类号:TU74 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2026)05-0102-08

Virtual-real augmented inspection method for deep foundation pit construction quality based on BIM and knowledge base//Liu Han^{1,2}, Liu Donghai¹, Li Xin¹, Wang Dong³, Yi Chuanbin³(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University; 2. China Three Gorges Construction Engineering Corporation; 3. Sichuan Chuanjiao Construction Group Co., Ltd.)

Abstract: To address the limitations of traditional manual inspection in construction quality control of deep foundation pits, including poor timeliness, limited visualization, and excessive reliance on inspectors' experience, a construction quality inspection method integrating augmented reality (AR), building information modeling (BIM), and knowledge base technologies is proposed. Image-assisted localization and point cloud registration techniques are employed to achieve high-precision registration between the BIM model and the construction site in an AR environment, thereby enabling accurate alignment of the virtual model with the real-world scene. A semantically enriched BIM model for deep excavations is established and used as the information carrier to construct a BIM-integrated knowledge base for quality inspection. An intelligent virtual-real augmented construction quality inspection system is developed, providing inspection assistance through virtual-real scene integration, multi-source knowledge retrieval, and visual feedback. Validation through an engineering case study demonstrates that the proposed method is effective and practical, providing a reliable technical approach for intelligent and refined quality management of deep excavation construction.

Key words: deep foundation pit construction; quality inspection; augmented reality; BIM; knowledge base

深基坑施工^[1]广泛应用于水利水电、地下交通和高层建筑等工程中,其施工工艺的复杂性和施工条件的多变性对质量管理构成严峻挑战,质量巡检是确保施工质量的关键环节。传统巡检模式主要依赖人员经验,通过查阅大量工程资料对施工质量作出判断。此外,由于施工现场环境的碎片化和杂乱性,许多待检部位常被遮挡而难以检测^[2],加之缺乏先进的可视化增强手段,影响了巡检结果的可靠

性。近年来,建筑信息模型(BIM)、人工智能(AI)等技术手段在工程巡检领域得到了广泛应用^[3],为克服常规基坑施工质量巡检的局限性创造了有利条件。

国内外学者在施工质量巡检方法改进方面进行了大量的探索。例如:赵先琼等^[4]集成激光扫描仪、编码器及计算机等设备,提出了基于计算机视觉的盾构施工质量巡检方法;姜骞等^[5]针对变电站场

景,利用巡检机器人开展自主巡检,并依据机器人云台相机获取巡检图像,为运维人员的决策提供辅助支持;Ma 等^[6]基于计算机视觉构建了缺陷识别模型,辅助管理人员分析混凝土施工质量问题。此外,以传感器技术^[7]、物联网技术^[8]、BIM 技术^[9]为代表的先进技术手段也促进了施工质量巡检的数字化与自动化。

AI 技术在巡检领域中的应用已成为近年来的研究热点^[10]。一方面,知识图谱^[11]、知识库^[12]等工具被用于优化知识的利用方式,有效提升了施工现场巡检效率,如张天鸿等^[13]利用知识库实现了特定灌浆知识的管理,有效提高了生产效率并降低了人力成本。另一方面,虚拟现实(VR)^[14]、增强现实(AR)^[15]、混合现实(MR)^[16]等虚拟技术凭借其可视化增强能力,有助于拓展巡检人员的感知能力,提升工程对象的可视化程度,如 Zhou 等^[17]提出在隧道施工过程中使用 AR,辅助质量检查员检测管片位移并进行工程检验,大幅提高了质量巡检效率。

上述研究为巡检知识的应用及 AR 可视化巡检提供了有效途径。然而现有 AR 巡检方法多侧重于利用虚拟模型辅助建筑物外观检查,在多源信息融合方面存在不足,也未将 BIM 模型与巡检知识进行耦合应用。此外,基于 AR 的巡检方法在化工、机械、电气等领域展现了较高的可靠性与适用性,并取得了良好的检查效果^[2],但在工程施工领域,基于 AR 的质量巡检仍处于起步阶段,尚缺乏有效的智能巡检方法。

本文提出了一种基于 BIM+知识库的深基坑施工质量虚实增强巡检方法。该方法通过融合图像辅助识别与点云配准,实现了 BIM 模型与真实场景的精确注册;结合 BIM 与质量巡检知识,建立了语义丰富的施工 BIM 模型和巡检信息知识库,并开发了施工质量虚实增强辅助巡检系统,可为工程施工质量管理提供新的技术手段。

1 总体技术框架

本文提出的基于 BIM+知识库的深基坑施工质量虚实增强巡检方法由 3 个步骤构成:

- a. 巡检人员佩戴 AR 可视化设备,在施工现场布置辅助定位图片,通过融合图像辅助空间定位与点云配准的三维注册方法,将 BIM 模型精确注册到工程现场。
- b. 构建待巡检建筑物的设计 BIM 模型,并耦合多源巡检信息知识,建立 BIM 关联巡检信息知识库。
- c. 开发远程管理系统与移动巡检系统。远程

管理系统具有巡检任务发布、知识库管理、巡检结果管理等功能,为现场施工质量智能检查提供数据支持;移动巡检系统具有任务接收、模型定位、AR 可视化、质量问题实时反馈等功能,实现虚实融合场景的增强巡检,对知识库的调取与质量知识进行可视化展示,引导巡检人员按照知识库要求对现场施工质量进行检查对比,并将检查结果进行实时反馈,帮助现场质量管理人员弥补经验和技术缺陷。

2 融合图像辅助定位与点云配准的三维注册方法

在深基坑施工场景中,由于存在大量交叉空间结构(如连续支护与临时支撑的交错)、非均匀光照条件(地下工程导致的照度变化)以及动态施工要素(施工机械运作时的扰动),直接基于视觉的特征识别易因局部纹理重复与几何特征退化导致注册失败。因此,采用融合图像辅助定位与点云配准的三维注册方法可以兼顾复杂施工环境下模型注册的精度与计算效率。该方法包括图像识别辅助空间定位和点云配准模型注册两个阶段:①利用现场布置的图片标识物快速确定巡检人员位置、待注册 BIM 模型及其大致空间范围,为后续点云配准提供初始位置约束,避免大范围无初值搜索;②在初始定位基础上进行点云粗配准与精确配准,并通过点云特征筛选和迭代收敛控制降低计算量,最终实现 BIM 模型与实际施工场景的精确注册。

2.1 基于图像识别的空间定位

深基坑工程现场由于施工条件与作业环境易变,现场选择标识物困难;人为设置标识物因其易识别性、可控制性而被广泛应用于 AR 场景中^[18]。为提高识别效率,通过在工程现场人为布置图片标识物,辅助进行空间定位。巡检人员通过 AR 设备扫描现场图片标识物,确定匹配的模型与空间位置。主要步骤为:①预定义虚拟模型与标识物间相对位置,在施工现场相应位置布置标识物图片;②在施工现场利用移动 AR 设备对标识物进行扫描,定位巡检人员位置;③识别图片标识物,获取虚拟模型信息,实现图片标识物与模型的匹配;④将虚拟模型叠加到标识物相对位置处,实现真实场景与 BIM 模型的匹配定位。

图片标识物识别通过基于计算机视觉(CV)的方法实现,包括图像预处理、特征提取和特征匹配^[19]。本文利用集成了 OpenCV 的图像识别算法,以尺度不变(SIFT)和加速稳健(SURF)特征检测器识别源数据库中的对象,完成图像识别配准工作,从而实现辅助空间定位。

此外,图像识别辅助定位除用于确定巡检人员位置及匹配 BIM 模型外,还为后续点云配准提供了有效的初始空间约束。通过预定义图片标识物与 BIM 模型之间的相对位置关系,可先将待配准模型限定在现场目标区域附近,从而避免直接采用点云算法在大范围施工场景中进行搜索。采用“先定位、后配准”的处理方式能够有效缩小点云配准的搜索空间,减少后续初始配准和精确配准的计算量,有助于提高现场巡检过程中三维注册的处理效率。

2.2 基于点云配准的模型注册

通过标识物识别确定匹配的模型及空间位置后,需获取准确的位姿转换矩阵,将 BIM 模型按照精确的位姿参数注册到真实场景中。点云配准算法常被用于将虚拟模型精确配准到真实场景^[20],其步骤为:①获取现场点云与 BIM 模型点云;②通过点云配准算法进行配准;③迭代得到精确的转换矩阵;④将模型按照转换矩阵精确注册到真实场景,完成模型注册。

2.2.1 点云初始配准

将 BIM 模型点云作为源点云 $P_i(i=1,2,\cdots,n)$,现场扫描获取的点云作为目标点云 $Q_j(j=1,2,\cdots,m)$, m 和 n 分别表示两个点集的数量规模,通过点云初始配准后使两个点云大致对齐。选择两个点云上的端点 A 及点云上 A 点的最近点 B 和最远点 C ,并基于这 3 个特征点构造相应的 3 个特征向量,以此特征向量来描述点云,完成初始点云配准。如图 1 所示,所取的特征向量分别为端点 A 到最近点 B 和最远点 C 的特征向量 n_1 、 n_2 ,以及两个特征向量的向量和 n_3 :

$$n_3 = n_1 + n_2 \tag{1}$$

因此,由特征向量组成的目标点云特征向量集 n_q 及源点云特征向量集 n_p 表示如下:

$$\begin{cases} n_q = (n_1, n_2, n_3)^T \\ n_p = (n'_1, n'_2, n'_3)^T \end{cases} \tag{2}$$

式中: n'_1 、 n'_2 、 n'_3 为源点云对应的 3 个特征向量。

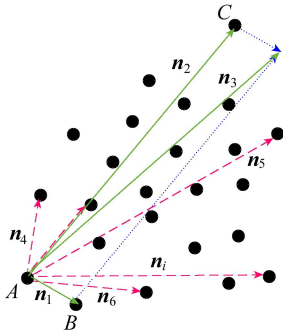


图 1 点云特征向量构建

经过点云初始配准后,源点云和目标点云实现大致重合,即通过旋转矩阵 R_1 和平移矩阵 T_1 进行变换后,两特征向量集实现重合,即:

$$n_q R_1 + T_1 = n_p \tag{3}$$

求解旋转矩阵 R_1 和平移矩阵 T_1 ,将源点云按照上述的旋转、平移矩阵变换至目标点云坐标系下,实现两组点云空间对齐,以此将变换后的源点云作为初始配准后点云 P'_i 。

2.2.2 点云精确配准

为实现模型的精确配准,获取模型对齐现场的精确变换参数,将初始配准后点云与源点云进行精确配准,从而获取精确的转换矩阵。为在保证模型注册精度的同时降低大规模现场点云参与迭代最近点(ICP)迭代所带来的计算开销,本文针对现场扫描点云数据量较大的特点,采用 PCA+ICP 的精确配准方法。传统 ICP 需要在迭代过程中不断建立两组点云之间的对应关系,当点云规模较大时,最近邻搜索及距离计算会占用较多计算资源。为此,先利用主成分分析法(PCA)提取并筛选两组点云的主要几何特征,剔除冗余数据。后续 ICP 仅基于筛选后的有效点云进行对应点搜索和误差计算,从而有效降低单次迭代计算量,提高精确配准效率。算法具体步骤如下:

- a. 输入初始配准后点云和源点云。
- b. 利用 PCA 对两点云中的特征点进行筛选,获得降维后的点云。
- c. 构造精确配准转换旋转矩阵 R_2 和平移矩阵 T_2 ,求解得出误差函数最小的最优变换矩阵。
- d. 计算配准后目标点云和源点云之间的平均距离 d 。
- e. 迭代过程设置双重终止准则:当源点云与目标点云间对应点的平均欧氏距离小于预设收敛阈值时,判定配准收敛并终止迭代;若迭代次数达到预先设定的最大迭代次数,则强制终止迭代,否则返回步骤 a,直至满足收敛条件。
- f. 对源点云按照转换矩阵进行变换,得到新的对应点云。

综上,巡检人员利用 AR 移动设备扫描现场目标点云,BIM 模型转换点云则作为源点云存储在数据库中,通过点云配准后,输出配准后的点云。点云配准完成后,同时输出旋转矩阵 R_2 、平移矩阵 T_2 ,按照式(4)将 BIM 模型精确注册到施工现场:

$$(x_0, y_0, z_0) R_2 + T_2 = (x, y, z) \tag{4}$$

式中: (x_0, y_0, z_0) 表示初始位置; (x, y, z) 表示配准完成后所处的位置。

点云精确配准算法中两点云对应点平均距离收

收敛阈值 d 设为 0.001 m, 最大迭代次数 $N_{\max}$ 设为 1000 次。但是, 1000 次仅为算法在未收敛情况下的最大迭代上限; 在实际计算过程中, 当对应点平均欧氏距离达到 0.001 m 的预设收敛阈值时, 迭代提前终止, 因此, 实际迭代次数通常小于最大迭代次数^[2]。算法迭代完成后, 输出点云配准的旋转、平移矩阵参数, 并作为 BIM 模型到工程现场精确位姿变换的参数, 实现模型与建筑物的虚实融合。从计算过程来看, 本文的三维注册方法通过图像标识物识别先获得模型的大致空间位置, 以减小点云配准搜索范围; 在此基础上利用特征向量完成初始对齐, 进一步为 ICP 提供较优初值; 随后采用 PCA 降低参与精确配准的数据规模, 并通过收敛阈值和最大迭代次数双重终止准则控制迭代过程。上述处理避免了对完整现场点云进行无约束、全局和长时间迭代配准, 有助于提高三维注册过程的计算效率。

3 耦合 BIM 的多源巡检信息知识库构建

深基坑工程具有施工环境复杂、风险因素多、时空效应显著等特点, 其质量与安全巡检对象不仅包括围护结构、支撑体系等实体构件, 还涉及地下水控制、基坑变形及周边环境影响等专业内容。不同施工阶段的巡检对象、巡检指标及判定依据存在差异。为了在巡检过程中实时调用巡检知识信息, 需将巡检知识与 BIM 模型关联, 构建 BIM 关联的多源巡检信息知识库, 从而在 AR 场景中实现知识引导质量巡检。BIM 关联的巡检信息知识库构建分为两步, 即语义丰富的 BIM 模型构建和巡检信息知识库构建。

3.1 语义丰富的 BIM 模型构建

为实现 BIM 模型与质量巡检知识信息的关联, 需对当前 BIM 模型的语义信息进行扩展, 添加相应的工程信息, 结合深基坑工程巡检对象及知识组织特点, 选取工程类型和实体部位作为 BIM 模型的关键扩展语义参数。其中, 工程类型与实体部位信息从施工图纸、施工组织设计及深基坑专项施工方案等施工文件中提取, 并写入对应 BIM 模型中的具体构件, 形成语义丰富的深基坑 BIM 模型。

在深基坑工程中, 实体部位按照主要巡检对象进行划分, 包括围护结构、支撑体系、立柱体系、降排水系统等, 并可进一步细分至具体构件。例如: 围护结构可细分为地下连续墙、排桩、冠梁等; 支撑体系可细分为混凝土支撑、钢支撑、围檩等; 降排水系统可细分为降水井、排水沟和集水井等。通过建立具有深基坑专业特征的实体部位分类, 使 BIM 构件能够与相应的巡检知识建立明确的语义映射关系。

本文的 BIM 模型以 IFC (industry foundation classes) 文件格式进行存储。IFC 格式作为一种开放标准, 可实现建设项目在设计、施工和运营阶段的数据交换和共享。在 IFC 架构中, BIM 构件的属性可作为直接属性与 BIM 实体进行关联。为此在模型中新增表示工程信息的属性集“Pset ProjInfo”, 属性集中包括“ProjType”(工程类型)、“ProjPart”(实体部位)两个参数, 参数的表示形式均为字符串; 新增的属性集通过关系实体与构件实体关联。对于每一个构件都将包含补充的工程信息、实体部位两类参数。补充的工程类型、实体部位信息和构件编号、构件名称、族信息等 BIM 模型的构件信息组成 BIM 信息表单。

以深基坑支撑体系为例, 当某 BIM 构件为钢支撑时, 其“ProjType”定义为“深基坑工程”, “ProjPart”定义为“支撑体系-钢支撑”; 当构件为地下连续墙时, 其“ProjPart”定义为“围护结构-地下连续墙”。由此, 每一个巡检相关构件均包含相应的工程类型及实体部位信息。扩展后的工程类型、实体部位信息与 GUID(构件唯一编号)、构件名称、族信息等共同组成 BIM 信息表单, 为后续深基坑专业巡检知识与 BIM 构件的自动关联提供数据基础。

3.2 巡检信息知识库构建

3.2.1 巡检信息知识存储

深基坑工程巡检知识具有多源性和专业性, 其知识来源主要包括相关标准规范、设计文件、专项施工方案以及施工技术要求等。根据深基坑现场巡检需求, 知识内容主要涉及围护结构、支撑体系、降排水系统及基坑周边环境等对象, 其巡检内容包括构件外观及施工质量、围护结构变形、支撑体系状态、地下水及渗漏情况、坑底异常和周边环境变形等。为协助巡检人员快速、合理地利用巡检知识, 需设计相应的人机交互机制, 构建巡检信息知识库, 使巡检人员能够高效利用巡检知识。本文基于 SQL Server 进行知识库构建, 耦合 BIM 的质量巡检信息知识库包括 BIM 信息和质量巡检知识两部分内容。

质量巡检信息知识库中共有 6 个字段, 见表 1, 以知识条例的编号 (ID) 作为主键, 其他提取的内容包括构件唯一编号 (GUID)、工程类型、实体部位、依据、质量知识, 其中工程类型、质量知识不可为空值。而为了适用知识库中较长的字段情况, 选定数据类型为 varchar 以保证完整显示。

例如, 对于“支撑体系-钢支撑”对象, 可在 Quality knowledge 字段中存储支撑连接状态、构件变形及异常情况巡检知识, 并在 Basis 字段中记录对应的标准规范或专项施工方案; 对于“围护结

表 1 质量巡检信息知识库表结构

字段名称	字段含义	类型
ID	编号	int
Project_type	工程类型	varchar(255)
Component_position	实体部位	varchar(255)
Quality knowledge	质量知识	varchar(255)
Basis	依据	varchar(255)
GUID	构件唯一编号	char

构-地下连续墙”,则存储墙面质量、接缝、渗漏及异常变形等巡检知识。通过上述组织方式,将通用规范条文进一步转化为面向深基坑具体实体对象的巡检知识。

为实现 BIM 构件信息与质量信息知识之间的关联,利用字符特征匹配来计算两个表单中相同变量工程类型、实体部位的相似度,实现 BIM 构件与质量知识的匹配。其中相似度匹配计算公式为:

$$S_{kj} = \frac{\mathbf{w}_k^T \cdot \mathbf{w}_j}{\|\mathbf{w}_k\| \|\mathbf{w}_j\|}$$
 (5)

式中: $\mathbf{w}_k$ 为质量知识中检索到的第 k 个关键词的词向量; $\mathbf{w}_j$ 为 BIM 信息中提取到的第 j 个同类关键词的词向量; S_{kj} 为词 k 和 j 之间的相似度。通过关键词语义之间的匹配,对质量知识表单和 BIM 信息表单进行自动组合,合并为耦合 BIM 的巡检质量知识信息,实现知识库的存储。知识库间的链接关系如图 2 所示,其中主键(PK)用来唯一标识表中的每一条记录,保证数据的唯一性,外键(FK)用来建立表与表之间的关联,保证数据的引用完整性。

3.2.2 巡检信息知识查询

在深基坑施工现场应用中,需在虚实融合场景中选择 BIM 模型构件,通过构件包含的属性信息调取关联的质量巡检知识来进行巡检,即通过 BIM 构件中包含的信息进行质量知识查询。因模型构件名称可能存在重复情况,而构件的 GUID 具有唯一性,故可作为查询的起点。首先查询 BIM 模型构件的

GUID,从而获取工程类型、实体部位等信息;然后在质量知识库中基于工程类型、实体部位进行知识检索。

当巡检人员在 AR 场景中选择某一钢支撑构件时,系统根据 GUID 识别该构件,并获取“深基坑工程-钢支撑”的语义信息,随后在知识库中检索与钢支撑相对应的连接状态、构件变形及异常状态等巡检内容和相应依据,从而实现“现场构件—BIM 属性—专业巡检知识”的定向关联。对于地下连续墙、降水井等其他深基坑巡检对象,则采用相同机制调取相应的围护结构质量、渗漏水或降排水等专业知识。

此外,BIM 模型构件中的工程类型和构件部位信息由人工编辑,其定义层级可能存在差异。例如,工程类型中的“地基与基础工程”可能被定义为“地基基础工程”;实体部位中的“脚手架”可能进一步细分为“立杆”和“斜支撑”等。为确保知识查询的准确性,在巡检信息知识库中应统一这些层级差异。具体而言,设立“Project_type”字段用于存储工程类型相关的信息,设立“Component_position”字段用于存储实体部位的信息。在进行知识查询时,检索逻辑被设定为从工程到部位的顺序进行匹配:首先匹配工程类型,然后匹配实体部位。若未匹配到相关内容,则将其归类为通用知识。例如,当“钢支撑”未检索到特定知识时,可进一步检索“支撑”的通用巡检要求;若仍未检索到,则调用基坑工程层级的通用巡检知识。这种分层级的检索逻辑不仅能提高查询的准确性,还能确保知识库的结构清晰,便于维护和扩展。

4 施工质量虚实增强辅助巡检系统开发

深基坑施工质量虚实增强辅助巡检系统包括远程管理系统和移动巡检系统两部分。远程管理系统

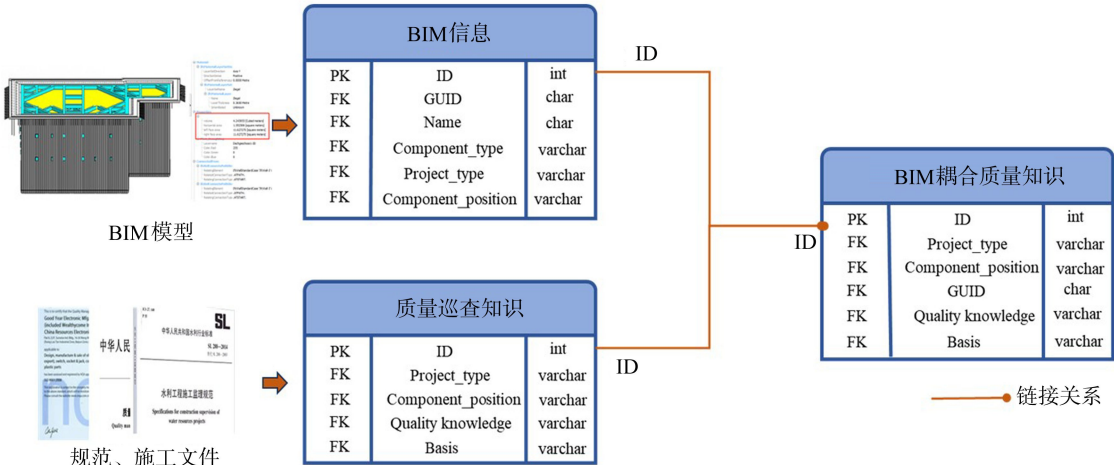


图 2 知识库间链接关系

发现建筑实体与模型或质量标准不符等问题时,通过点击“质量问题”按钮,通过语音描述问题(自动转换成文本),同时对质量问题进行现场拍照、对问题部位进行标注,如图 3(c)所示。问题记录完成后,点击保存按钮进入问题列表,核实无误后,可点击上传。问题详细描述、现场图片等记录信息将上传至远程数据库,并同步至远程系统中的巡检结果管理模块。

5 工程实例验证

以某在建的深基坑工程为例,其建筑平面面积为 585.20 m²,深度为 32.90 m。首先,按照设计文件构建施工 BIM 模型,并获取 BIM 模型构件信息;收集工程质量巡检的相关文件,以此作为巡检质量信息知识的基础文件,提取质量巡检过程中需要的巡检知识信息。基于上述提炼的知识,按照 3.2 节中的构建流程完成耦合 BIM 的巡检知识库构建;保存模型各种属性信息(包括 GUID、构件名称、ID 等信息),设计增强现实虚拟巡检环境与功能界面。此外,为了使模型能准确注册到工程现场,巡检人员根据远程管理系统中提示的图片位置,在工程现场张贴标识物图片,工程现场环境与二维码布置如图 4 所示。

质量巡检过程中,巡检人员佩戴 Trimble XR10 混合现实头盔(以 HoloLens 2 为内核的现场使用设备),根据眼镜扫描现场环境以及二维码,调取巡检数据库中的信息,匹配 BIM 模型,准确注册虚拟模型到真实场景。显示终端最终以 AR 形式展示施工

质量巡检虚实融合场景,同时以智能虚拟按键的形式展示巡检过程中的各项功能,三维注册平均时间约为 46 ms。此外,具体展示还包括所有功能模块,如图 5 所示。系统将设计尺寸参数以模型形式展示,可直观对比实际建筑与设计参数之间的差距,辅助巡检人员发现质量问题。现场人员通过查询 BIM 模型关联的巡检知识信息(图 3(b)),通过知识信息辅助完成关键部位的检查,系统反应时间均小于 3 ms。

巡检人员发现质量问题后,根据图 3(c)的步骤对质量问题进行记录,同步上传至管理端系统,如图 6 所示。管理人员也可以通过关联的项目信息联系现场人员进行督促整改。

此外,将结果与同一项目中相同施工位置的传统人工巡检方法进行对比分析。13 名经验丰富的现场巡检人员利用 BIM+AR 方法与传统巡检方法进行了巡检,并从可视化、使用便捷性和对巡检的帮助性 3 个方面对两种巡检方法进行了对比评价,在每个评价维度中选择其认为表现更优的巡检方法。

结果表明,与传统巡检方法相比,BIM+知识库的虚实融合辅助巡检方法有效提升了可视化水平,提供了更便捷的知识查询与问题反馈方式,有助于巡检人员高效、准确地完成巡检。但是,仍然存在一名经验丰富的巡检人员认为巡检系统在增强现实场景中操作不灵敏,该问题可通过简单的混合现实手势培训解决。此外,5 名巡检人员认为该系统在使用过程中避免了传统巡检方法易忽略的质量缺陷,提高了巡检的准确性。



图 4 深基坑施工现场



图 5 系统现场应用场景



图6 上传巡检中发现的质量问题

6 结 语

本文提出了一种融合 BIM、AR 与知识库的深基坑施工质量智能辅助巡检方法,通过标识物图像获取初始空间位置,并结合点云配准实现 BIM 模型与施工现场的精确注册,增强了施工质量检测单元的可视化能力,有效改善了隐蔽部位的巡检效果;在此基础上,依据质量知识与 BIM 构件之间的关联关系,采用语义特征相似度计算实现构件信息与质量知识的匹配,构建耦合 BIM 的质量巡检知识库,为巡检过程提供了知识支撑,从而降低了因人员经验和认知不足导致的巡检偏差;进一步开发了施工质量虚实增强辅助巡检系统,并在实际深基坑工程中开展了应用验证。结果表明,该系统能够实现 BIM 模型与真实施工场景的虚实融合,辅助巡检人员快速获取相关质量知识,并依据质量要求开展现场检查、问题记录与实时反馈,验证了所提出三维注册方法及知识驱动巡检机制的可靠性与适用性。

参考文献:

[1] 晏莉,杨海涛,崔云龙,等. 富水粉砂地层深基坑底部注浆加固数值模拟分析[J]. 水利水电科技进展,2022,42(4):80-86. (Yan Li, Yang Haitao, Cui Yunlong, et al. Numerical simulation analysis of grouting reinforcement at bottom of a deep foundation pit in water-rich silt stratum [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(4):80-86. (in Chinese))

[2] Liu Han, Liu Donghai, Chen Junjie. Depth-informed point cloud-to-BIM registration for construction inspection using augmented reality[J]. Advanced Engineering Informatics, 2024,62:102867.

[3] 刘婷,张社荣,李志竑,等. 基于字符级 CNN 的调水工程巡检文本智能分类方法[J]. 水力发电学报,2021,40(6):89-98. (Liu Ting, Zhang Sherong, Li Zhihong, et al. Intelligent text classification method for water diversion project inspection based on character level CNN [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40 (6) : 89-98. (in Chinese))

[4] 赵先琼,邓凯,张亚洲,等. 大直径盾构隧道成型质量巡

检方法研究[J]. 工程科学学报,2024,46(2):365-375. (Zhao Xianqiong, Deng Kai, Zhang Yazhou, et al. Molding quality inspection method for large-diameter shield tunnels [J]. Chinese Journal of Engineering, 2024, 46 (2) : 365-375. (in Chinese))

[5] 姜骞,刘亚东,严英杰,等. 面向高变倍场景的变电站巡检机器人云台相机对准方法[J]. 中国电机工程学报, 2024,44(8):3337-3346. (Jiang Qian, Liu Yadong, Yan Yingjie, et al. Substation inspection robot PTZ camera alignment method for high zoom scenes[J]. Proceedings of the CSEE,2024,44(8):3337-3346. (in Chinese))

[6] Ma Guofeng, Wu Ming, Wu Zhijiang, et al. Single-shot multibox detector- and building information modeling-based quality inspection model for construction projects [J]. Journal of Building Engineering,2021,38:102216.

[7] Bae J H, Han S U. Vision-based inspection approach using a projector-camera system for off-site quality control in modular construction: experimental investigation on operational conditions [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2021,35(5):04021012.

[8] Wu Haitao, Zhong Botao, Li Heng, et al. On-site construction quality inspection using blockchain and smart contracts [J]. Journal of Management in Engineering, 2021,37(6):04021065.

[9] 龚健,包腾飞,陈知渊,等. 基于 BIM 技术的地下空间曲线钢管分段排布算法[J]. 水利水电科技进展,2022,42(5):108-114. (Gong Jian, Bao Tengfei, Chen Zhiyuan, et al. A BIM technology-based algorithm for steel pipe segmentation arrangement of underground space curves [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(5):108-114. (in Chinese))

[10] Shin H J, Cha H S. Proposing a quality inspection process model using advanced technologies for the transition to smart building construction [J]. Sustainability, 2023, 15 (1) : 815.

[11] Tian Dan, Li Mingchao, Shi J, et al. On-site text classification and knowledge mining for large-scale projects construction by integrated intelligent approach [J]. Advanced Engineering Informatics, 2021, 49: 101355.

(下转第 122 页)

考虑社会-经济-生态效益的衡邵干旱走廊水-能源-粮食纽带系统多目标优化调控研究

周光青¹,王新奎^{1,2},蒋昌波^{1,2},隆院男^{1,2},宋昕熠^{1,2},黄春福¹

(1.长沙理工大学水利与海洋工程学院; 2.洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室)

摘要:面对资源协同优化与区域高质量发展的严峻挑战,以衡邵干旱走廊为研究对象,立足县域基本单元,基于 NSGA-III 算法,构建了兼顾社会、经济、生态效益的现状年及规划年水-能源-粮食纽带系统多目标优化模型。通过熵权法-TOPSIS 综合评价法筛选不同水文年的最优配置方案,并借助地理探测器识别影响区域目标效益的关键驱动因子。结果表明:现状年供水量每提升 1%可驱动综合效益增长 3.875%~7.650%,通过调整种植结构与水资源再分配,可缓解部门间资源竞争现状,实现社会、经济、生态效益的协同增效;规划年平水年通过种植结构优化与水资源再分配,年内粮食产量可达 928.85 万 t,超出人均标准 24%,同时 COD 排放量下降 9.8%;枯水年可通过压缩高耗水作物种植面积维持粮食安全阈值,年内粮食产量超出人均标准 12.9%;驱动效应方面,平水年表现较为分散,而枯水年显著集中,多因子协同作用对社会-经济-生态效益变化的解释力显著增强,其中水资源供给保障与资源配置公平性的协同作用是衡邵干旱走廊目标效益演变的关键机制。

关键词:水-能源-粮食纽带;多目标优化;资源配置;种植结构优化;衡邵干旱走廊

中图分类号:TV213.4;F326.11 文献标志码:A 文章编号:1006-7647(2026)05-0110-13

Study on multi-objective optimization and regulation of water-energy-food nexus system in the Hengyang-Shaoyang Arid Corridor considering social, economic, and ecological benefits//Zhou Guangqing¹, Wang Xinkui^{1,2}, Jiang Changbo^{1,2}, Long Yuannan^{1,2}, Song Xinyi^{1,2}, Huang Chunfu¹(1. School of Hydraulic and Ocean Engineering, Changsha University of Science & Technology; 2. Key Laboratory of Dongting Lake Aquatic Eco-Environmental Control and Restoration of Hunan Province)

Abstract: Facing the severe challenges of synergistic resource optimization and regional high-quality development, a multi-objective optimization model for the water-energy-food nexus system at the county scale was developed for the Hengyang-Shaoyang Arid Corridor. The model was constructed based on the NSGA-III algorithm by considering social, economic, and ecological benefits under current and future scenarios. The optimal allocation schemes under different hydrological years were identified using the entropy weight-TOPSIS method, and key drivers affecting regional benefits were explored using the Geodetector. The results showed that a 1% increase in water supply could increase the comprehensive benefits by 3.875% to 7.650% in the current scenario. By optimizing crop structures and reallocating water resources, competition among sectors was alleviated, achieving synergistic improvements in social, economic, and ecological benefits. Under the future normal-flow scenario, crop structure optimization and water redistribution increased annual grain production to 9.2885 million tons, exceeding the per capita standard by 24%, while reducing COD emissions by 9.8%. Under the dry-year scenario, the food security threshold can be maintained by reducing the planting area of high-water-consumption crops, with annual grain production exceeding the standard by 12.9%. Regarding driving effects, influencing factors were more dispersed in normal-flow years but became significantly concentrated in dry years. The explanatory power of multi-factor synergistic effects on social, economic, and ecological benefit variations was substantially enhanced, indicating that the synergistic effect between water supply security and resource allocation equity was the key mechanism driving the evolution of target benefits in the Hengyang-Shaoyang Arid Corridor.

Key words: water-energy-food nexus; multi-objective optimization; resource allocation; crop planting structure optimization; the Hengyang-Shaoyang Arid Corridor

基金项目:湖南省自然科学基金青年科学基金项目(2025JJ60264);国家资助博士后研究人员计划项目(GZC20232242);湖南省水利科技项目(XSKJ2023059-38);长沙理工大学研究生实践创新项目(CLSJCX24029)

作者简介:周光青(2000—),女,硕士研究生,主要从事水文与水资源研究。E-mail:2025402426@qq.com

通信作者:王新奎(1996—),男,讲师,博士,主要从事水资源系统规划研究。E-mail:xkwang@csust.edu.cn

水资源、能源和粮食是人类实现社会-经济-生态环境可持续发展的基本保障^[1]。然而,随着气候变暖加剧以及城市化进程的不断加快,有限资源与不断增长的资源需求之间的冲突愈发严重。国际可持续发展研究所的报告显示,至 21 世纪中叶,人类对粮食和能源需求的增幅将分别达到 50% 和 35%,而水资源供给缺口将扩大至 40%^[2]。粮食与能源需求的增长和水资源供给短缺之间的矛盾将成为当今社会人类面临的最大挑战^[3-4],如何通过种植结构调整与资源再分配推动水资源、能源与粮食的协同发展已成为国内外科学界关注的热点问题。水、能源与粮食三者并非独立存在,而是组成了一种相互关联、相互依存、相互制约的复杂纽带系统^[5]。传统针对单一资源系统的研究范式已无法有效应对可持续发展视角下复合型系统间纽带关系的复杂性^[6]。因此,亟须深入探索水-能源-粮食纽带(WEF Nexus)系统间的交互机制与协同优化调控,以实现社会、经济和生态效益之间的协调与平衡,从而缓解区域水资源短缺、能源约束与粮食危机。

自 2011 年波恩会议系统性地提出水-能源-粮食纽带研究框架以来^[7],不同机构与组织对其内在机理进行了阐释与完善^[8-10],国内外学者对水-能源-粮食系统开展了大量研究,主要差异体现在以下 3 个方面:①研究方法多样化,主要涵盖数据包络分析(DEA)、生命周期评估(LCA)、投入产出模型、足迹分析、计量经济模型以及系统动力学(SD)等。例如:Zhang 等^[11]提出了动态 DEA 模型和空间 Durbin 模型,揭示了中国水-能源-粮食系统效率特征及温度影响,强调子系统的关联优化;Li 等^[12]构建了可靠性-协调性-弹性指标体系,结合 Copula 函数揭示了黄河流域水-能源-粮食系统安全风险及协同韧性提升需求;王雨等^[13]基于 SD 建立了水-能源-粮食纽带仿真模型,针对黑龙江省的 4 种不同发展情景,提出了水-能源-粮食的优化配置方案。②研究内容侧重点不同,主要聚焦于水-能源-粮食纽带的互馈关系、系统模拟与情景分析、耦合风险、协调度评价以及优化调控等方面。例如:王慧敏等^[14]构建了“水-能源-粮食-经济社会”系统模型,定量刻画了山东省水-能源-粮食之间的“压力-状态-响应”(PSR)关系;Kamrani 等^[15]构建了基于农业水分配系统绩效的评估模型,对伊朗 Rudasht 灌区的水-能源-粮食纽带关系进行了综合评价;王璐琪等^[16]构建了安全综合指标体系,结合耦合协调度模型和障碍度模型分析了京津冀地区水-能源-粮食系统的安全性和影响因素;Sánchez-Zarco 等^[17]提出了一种融合 LCA 的循环经济优化方法,构建了多目标优化模型以协

调墨西哥的区域水-能源-粮食系统安全与生态足迹。③研究尺度多样,空间尺度上涵盖了全球、国家、省域、城市、流域等多个层次,其中大尺度研究占据主导地位^[9]。例如:Simpson 等^[18]构建了涵盖 21 项指标的国家层级 WEF Nexus 指数,评估了 181 个国家水-能源-粮食系统的协同与权衡特征;Covarrubias^[19]提出了“城市纽带”概念框架,从社会-物质视角解析了水-能源-粮食纽带系统的内在耦合机制;Bakhshianlamouki 等^[20]基于 SD 构建了乌鲁米耶湖流域水-能源-粮食系统模型,模拟了多项生态修复措施对资源系统的联动效应。尽管近年来有关水-能源-粮食纽带的研究在不断深入,但传统的资源管理模型通常侧重于单个维度,如水力发电^[21]、城市供水系统^[22]、作物分配与用水机制^[23]、灌溉用水^[24]等要素,难以捕捉资源之间的耦合特征,整体系统优化空间受限。城市系统中水、能源和粮食资源的高效管理亟需一种能够兼顾社会、经济与生态效益的综合性协同优化方法,这种多视角策略对于实现多目标协同优化至关重要^[25]。然而,现有研究主要集中于省级或流域尺度,针对县域尺度的水-能源-粮食纽带系统协同调控研究仍显不足,亟须构建适用于县域尺度的建模框架,以揭示并量化各子系统之间的权衡关系与协同机制。

衡邵干旱走廊位于江南丘陵与云贵高原过渡地带,土壤以红壤为主,质地黏重且透水性差,生态脆弱。受气候与地形的共同影响,衡邵干旱走廊干旱事件频发,再加上无控制性骨干水源工程,使得该区域面临水资源分布不均、季节性缺水和工程性缺水等现实问题^[26]。区域内虽建有 4 616 座水库,但其中 98% 为小型水库,总库容仅占全省的 12.4%,且空间分布不均,整体抗旱能力偏弱。因此,本文从县域单元出发,以 2022 年为现状年,构建兼顾社会、经济与生态效益的水-能源-粮食纽带多目标优化模型,并采用 NSGA-III 多目标遗传算法进行求解。在此基础上,以 2030 年为规划年,针对不同来水频率情景,开展区域水、能源与粮食资源的优化配置,并结合熵权法-TOPSIS 综合评价法筛选各水文年的最优配置方案,以期为推动衡邵干旱走廊实现水-能源-粮食纽带系统的统筹优化提供理论基础。

1 研究区概况和数据来源

1.1 研究区概况

衡邵干旱走廊(图 1)位于湖南省中部,介于 25°40'N~28°14'N、109°50'E~113°16'E 之间,覆盖衡阳市、邵阳市、娄底市全境以及永州市北部的新田县、祁阳县等共 33 个县级行政区。研究区总面积约

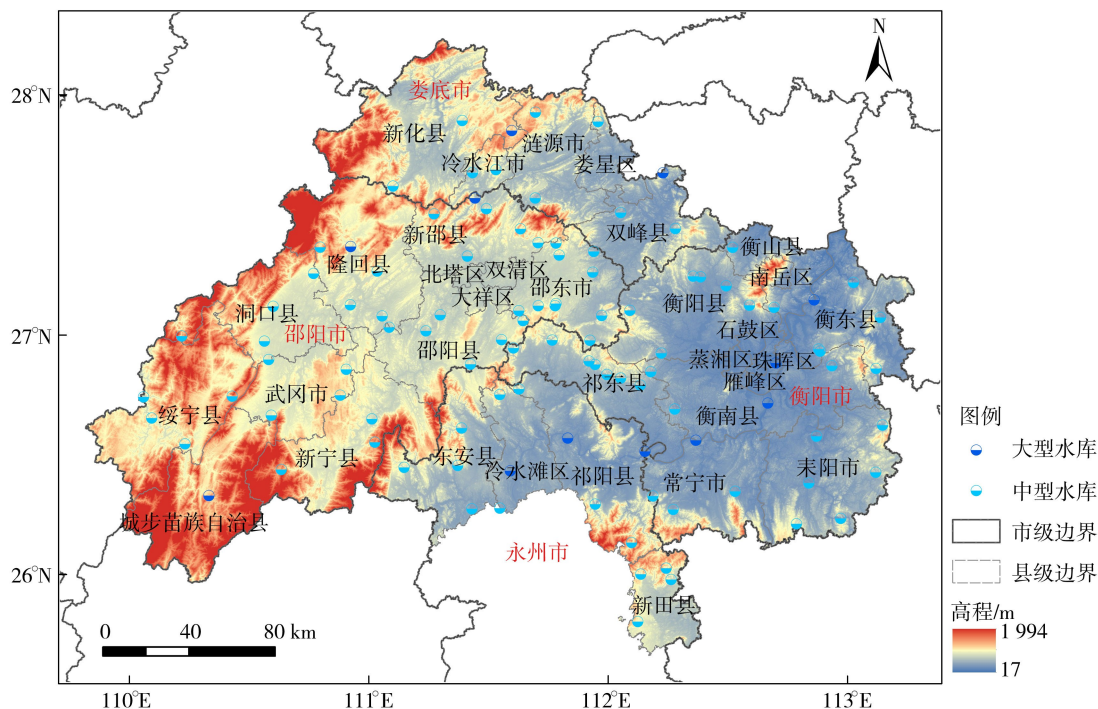


图1 衡邵干旱走廊区域概况

5.12 万 km^2 , 占湖南省总面积的 24.2%^[27]。地形以丘陵、盆地为主, 地势整体西高东低、南高北低, 四面环山, 东有罗霄山脉, 西有雪峰山脉, 南有南岭, 北部囊括南岳衡山等, 形成了衡阳、邵阳盆地。衡邵干旱走廊属于亚热带季风气候, 降水季节分配不均、年际变化明显, 年均降水量为 1 384 mm^[28]。夏季由于太平洋的暖湿气流受到高山阻挡, 导致气流下沉, 易形成酷热干燥的环境。该区域主要作物为水稻、玉米、大豆、薯类, 其中双季稻以一年两熟为主, 中稻、玉米和油菜均为一年一熟。

1.2 数据来源

收集了衡邵干旱走廊地区 2022 年 33 个县域的水资源、农业生产、人口需求、水库装机容量以及能源消耗等数据。其中, 水资源数据来源于衡阳市、邵阳市、娄底市、永州市的水资源公报; 区县人口、作物种植面积、粮食产量数据来源于湖南省统计局 (<https://tjj.hunan.gov.cn>); 化肥使用量、农膜使用量数据来源于《全国农产品成本收益资料汇编》; 大中型水库装机容量数据来源于湖南省库区移民事务中心 (<https://hnym.hunan.gov.cn>); 能源消耗数据引用自文献[29]。能源消耗数据集提供了 1997—2017 年中国市县尺度的能源消耗信息 (<https://figshare.com>)。采用线性外推方法将该数据延伸至 2022 年, 并通过湖南省统计年鉴中的地市级能源消耗总量数据对外推结果进行校正。此外, 根据文献[30-31]确定作物含水量、人均粮食需求定额、部门供水效益系数等参数。单价与成本参数依据《全国

农产品成本收益资料汇编》中提供的亩产量、亩总成本及产品平均出售价格等信息换算得到。

2 研究方法

2.1 多目标优化模型

2.1.1 模型建立

2.1.1.1 目标函数

a. 社会效益。基尼系数反映不同区域的空间均衡性, 数值越小表示分配越平等。按 0~0.2、0.2~0.3、0.3~0.4、0.4~0.5、0.5~1 划分为绝对平均、比较平均、相对合理、差距较大和差距悬殊 5 个等级。本文选用人口-水资源、人口-能源、人口-粮食基尼系数表征社会效益, 并通过等权重处理以衡量人口、水资源、能源和粮食配置的空间均衡程度:

$$G = \frac{G_w + G_e + G_f}{3} \quad (1)$$

式中: G 为综合基尼系数; G_w 、 G_e 、 G_f 分别为人口-水资源、人口-能源和人口-粮食基尼系数。模型以 G 最小为社会效益优化目标。

b. 经济效益。本文采用各分区的粮食经济效益 ($E_{\text{粮食}}$)、水量经济效益 ($E_{\text{水资源}}$) 及能源经济效益 ($E_{\text{能源}}$) 最大作为经济目标的量化指标:

$$\max E_{\text{粮食}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N (Y_{nt} P_{ni} \mu_i - C_{nt}) A_{int} \quad (2)$$

$$\max E_{\text{水量}} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \alpha_{ij} \left[\sum_{k=1}^K (b_{ijk} - c_{ijk}) W_{ijk} \right] \quad (3)$$

$$\max E_{\text{能源}} = 0.4895 \sum_{r=1}^R 8760 W_{Er} C_r \quad (4)$$

式中: Y_{nt} 为评估年 t 作物 n 的单位产量, kg; P_{nt} 为评估年 t 作物 n 的单价, 元/kg; μ_i 为分区 i 的供水保证率; C_{nt} 为评估年 t 作物 n 的灌溉单位综合成本, 元/kg; A_{int} 为评估年 t 分区 i 作物 n 的种植面积, hm^2 ; I 为研究区的总分区数; J 为总用水部门数量; K 为总可利用水源数量; α_{ij} 为分区 i 用水部门 j 的用水公平系数; b_{ijk} 、 c_{ijk} 、 W_{ijk} 分别为水源 k 向分区 i 用水部门 j 供水量的效益系数 (元/ m^3)、费用系数 (元/ m^3) 和供水量 (m^3); W_E 为单位发电量所需的水量, $\text{m}^3/(\text{kW} \cdot \text{h})$; C_r 为水库 r 的设备容量, kW; R 为大中型水库数量; 0.4895 为湖南省 2022 年各月的电价均值, 元/(kW·h)。能源数据基于各市区水资源公报中万元国内生产总值用水量占比 (火电不折算) 进行折算处理, 并采用 1 t 标煤对应 8137 kW·h 的换算方式对能源进行约束。粮食数据根据 2022 年《全国农产品成本收益资料汇编》中各类作物的总成本、总产量及售价计算, 得到水稻、玉米、大豆、薯类折粮的单位综合成本分别为 2.87、2.44、5.88、5.40 元/kg, 单价分别为 2.83、2.69、5.23、4.76 元/kg。

c. 生态环境效益。化学需氧量 (COD) 是指处理水体中氧化物质所需的强氧化剂含量, 可在一定程度上表征水体污染程度。因此, 本文将区域水资源系统中 COD 排放总量 (E_{COD}) 最小作为生态环境目标:

$$\min E_{\text{COD}} = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J 0.01\beta_{ij}\rho_{ij}W_{ijk} \quad (5)$$

式中: β_{ij} 为分区 i 部门 j 的污水排放系数; ρ_{ij} 为分区 i 用水部门 j 污水处理厂二级出水单位废水排放量中 COD 污染因子的质量浓度, mg/L。

2.1.1.2 约束条件

a. 承载能力约束: 区域水资源配置量不得超过供水工程的最大输水能力。

b. 供水约束: 水资源配置过程中应优先满足除农业部门以外的各用水部门的供水保障率。

c. 需水约束: 各用水部门的水资源配置量应满足其最低需水量, 同时不超过最大需水限制。

d. 种植面积约束: 各区域不同作物种植面积应满足作物最小和最大种植规模限制。

e. 粮食安全约束: 农业生产配置需确保不同区域粮食产量达到人口规模对应的基本粮食需求标准, 其中人均粮食需求定额按照我国不低于 400 kg 的标准计算^[32]。

f. 非负约束: 模型中所有涉及水、能源、粮食的变量都应大于等于 0。

2.1.1.3 决策变量

多目标优化模型的决策变量主要包括两类: 各分区不同水源向生活、工业、农业、服务业和生态等用水部门的供水量 W_{ijk} 以及各分区不同作物的种植面积 A_{int} 。其中, W_{ijk} 用于刻画水资源在不同水源、分区、用水部门之间的配置关系, A_{int} 则用于反映农业生产结构在空间与作物类型上的调整特征。

2.1.2 模型求解

2.1.2.1 模型概化

根据《湖南省“十四五”水安全保障规划》、省内水资源配置工程实践及“生活与生态优先保障”的配置原则, 本文取生活、生态、服务业、工业、农业用水供水保证率分别为 90%、90%、80%、80%、60%。根据《湖南省取水许可和水资源费征收管理办法》中的水资源供应规定“少量取水的限额为每户每月 180 m^3 的地表水或 80 m^3 的地下水”, 确定了地表水、地下水供水量系数分别为 0.7 和 0.3; 2030 年衡邵干旱走廊用水参照各市水资源管理用水总量红线进行约束, 不超过 972679.7 万 m^3 ; 研究区内大中型水库对区域水资源利用起决定性作用, 其总库容占比超过 80%。因此本文仅选取衡邵干旱走廊内 106 座大中型水库, 设定水轮机效率及发电机效率不低于 90%, 取综合效率 η 为 0.81, 据此推算单位发电需水量。供水优先级根据湖南省“十四五”水资源配置及供水规划的要求执行, 确定用水优先顺序为生活用水、生态用水、服务业用水、工业用水、农业用水。

2.1.2.2 模型参数

a. 水源 i 向用水部门 j 的供水次序系数 φ_j :

$$\varphi_j = \frac{1 + m_{\max} - m_j}{\sum_{j=1}^J (1 + m_{\max} - m_j)} \quad (6)$$

式中: $m_{\max}$ 为供水次序序号最大值; m_j 为用水部门 j 的供水次序序号。生活、生态、服务业、工业与农业用水的供水次序系数分别为 0.33、0.27、0.20、0.13、0.07。

b. 效益系数与费用系数。生活用水与生态用水的效益系数通常难以精确量化, 本文参考文献[33-34], 对其赋予较高权重并对生活与生态用水取相同值, 均为 500 元/ m^3 。农业灌溉用水效益系数参考农田灌溉水有效利用系数和效益分摊系数计算^[35], 其中效益分摊系数依据《湖南省“十三五”新增 150 万亩高效节水灌溉面积实施方案》取 0.3, 计算得到农业灌溉用水效益系数为 20 元/ m^3 。工业用水效益系数采用万元工业增加值用水定额的倒数确定^[36], 万元工业增加值用水量来源于 2022 年《湖

南省水资源公报》，计算得到工业效益系数为 296 元/m³。服务业用水效益系数按服务业增加值与用水量之比确定^[37]，服务业增加值来源于《湖南省 2022 年国民经济和社会发展统计公报》，用水量取自同一水资源公报，计算得到服务业用水效益系数为 450 元/m³。费用系数则基于各市州现状年水价均值，并结合相关研究取值^[34,38-39]综合确定，最终确定生活、生态、工业、农业与服务用水费用系数分别为 2.89、2.89、2.90、0.50、3.60 元/m³。

c. 用水部门排放污染物的质量浓度和污染物排放系数。依据 GB 18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》和 GB 50318—2017《城市排水工程规划规范》，结合衡邵干旱走廊实际用水结构及污水处理水平确定各部门单位废水 COD 质量浓度和污染物排放系数，暂不考虑生态用水排污。最终确定生活、工业、服务业单位废水 COD 质量浓度均为 120 mg/L，农业单位废水 COD 质量浓度为 150 mg/L；生活、农业、工业、服务业污水排放系数分别取 0.8、0.1、0.6、0.8。

2.1.2.3 需水预测

基于 2022 年基础数据，采用定额法对 2030 年衡邵干旱走廊需水量进行预测，预测结果见表 1。

2.2 地理探测器

地理探测器模型是一种探究各类现象的驱动力和影响因子以及多因子交互作用的统计学方法^[40]。该方法无需预设线性关系假设，且不受多重共线性影响，能够更稳健地识别各驱动因子对目标效益的解释力^[41]。本研究采用地理探测器的因子探测和交互作用探测两个模块量化水-能源-粮食系统驱动因子对目标（社会、经济和生态）效益的影响：①通

过 q 统计值衡量系统驱动因子对目标效益的贡献率；②比较单因子 q 值与两因子叠加后的 q 值，识别不同影响因子之间交互作用的强弱和类型。

地理探测器的输入数据要求自变量为类型量。这表明在自变量为数值量的情况下，需要提前进行离散化处理。本研究采用自然间断法^[42]对各驱动因子数据进行离散，并将因子交互作用划分为非线性减弱、单因子非线性减弱、独立、双因子增强、非线性增强 5 类。

2.3 研究框架

本文以县域为基本单元，构建综合考虑社会、经济与生态效益的水-能源-粮食纽带多目标优化模型。以 2022 年为现状年，结合区域用水结构与资源约束，采用 NSGA-III 多目标遗传算法求解帕累托最优解集。同时，预测不同来水频率（ $P = 50\%$ 、 $P = 75\%$ ）情景下 2030 年规划年下的资源供需格局，开展多部门用水配置与作物种植结构优化，结合熵权法-TOPSIS 综合评价法对不同水文年的配置结果进行综合评价与排序，确定最优配置策略。在此基础上，采用地理探测器量化各驱动因子对目标效益的解释力，并识别不同因子组合对目标效益的增强效应及其作用类型。

3 结果与分析

3.1 现状年模型验证与性能评估

根据 2022 年统计数据，衡邵干旱走廊的综合基尼系数为 0.316，粮食经济效益为 49.26 亿元，水量经济效益为 2 680.06 亿元。受限于能源数据完整性，能源效益取水库满发状态下的理论最大值 20.26 亿元，总经济效益上限为 2 749.58 亿元，年内

表 1 2030 年衡邵干旱走廊各县(市、区)用水部门需水量预测结果 单位:万 m³

县(市、区)	生活	工业	农业		服务业	生态	县(市、区)	生活	工业	农业		服务业	生态
			$P = 50\%$	$P = 75\%$						$P = 50\%$	$P = 75\%$		
珠晖区	0.22	0.41	0.30	0.34	0.28	0.04	隆回县	0.53	0.34	2.70	3.12	0.25	0.04
雁峰区	0.15	0.82	0.08	0.09	0.19	0.03	洞口县	0.38	0.40	2.16	2.43	0.20	0.03
石鼓区	0.16	0.25	0.11	0.12	0.20	0.03	绥宁县	0.17	0.35	0.78	0.98	0.08	0.01
蒸湘区	0.21	0.48	0.11	0.13	0.26	0.04	新宁县	0.27	0.20	1.89	2.19	0.14	0.02
南岳区	0.04	0.03	0.09	0.10	0.21	0.01	城步苗族自治县	0.13	0.13	0.60	0.62	0.06	0.01
衡阳县	0.50	0.64	4.10	4.58	0.35	0.03	武冈市	0.37	0.23	2.02	2.33	0.19	0.03
衡南县	0.44	0.75	4.20	4.92	0.36	0.03	邵东市	0.44	1.59	2.79	3.13	0.24	0.03
衡山县	0.18	0.36	1.25	1.50	0.14	0.01	冷水滩区	0.28	0.76	1.93	2.06	0.23	0.07
衡东县	0.29	0.59	2.05	2.29	0.24	0.02	祁阳县	0.40	0.71	4.07	4.79	0.17	0.04
祁东县	0.46	0.74	3.02	3.54	0.36	0.03	东安县	0.27	0.37	3.01	3.30	0.11	0.02
耒阳市	0.55	1.14	2.68	3.15	0.46	0.04	新田县	0.16	0.17	0.77	0.86	0.06	0.01
常宁市	0.39	0.84	2.78	3.24	0.33	0.02	娄星区	0.33	2.11	0.82	0.95	0.24	0.10
双清区	0.17	0.54	0.22	0.27	0.18	0.03	双峰县	0.37	0.81	2.26	2.70	0.11	0.04
大祥区	0.18	0.32	0.34	0.41	0.18	0.03	新化县	0.54	1.00	2.46	2.75	0.30	0.06
北塔区	0.06	0.14	0.16	0.19	0.06	0.01	冷水江市	0.18	2.14	0.36	0.40	0.13	0.03
新邵县	0.36	0.42	1.72	2.02	0.17	0.02	涟源市	0.45	0.98	2.31	2.53	0.14	0.05
邵阳县	0.43	0.37	3.19	3.76	0.21	0.03							

总供水量为 84.46 亿 m³。以上述实测数据为基础,系统验证多目标优化算法在现状年情景下的有效性与鲁棒性。经过多次数值测试,设置种群规模为 500,进化迭代次数为 1000 次,交叉算子采用模拟二进制交叉,交叉率为 0.8,变异率为 0.05,分布指数为 20。为深入分析各目标的相对重要性,消除单位和量级差异对优化结果产生的影响,在求解得到帕累托最优解集后,对各目标函数值进行归一化处理,并采用熵权法确定各目标指标权重,结合 TOPSIS 方法对优化方案进行综合评价,筛选综合最优方案。优化结果显示,各方案供水总量范围为 85.87 亿~91.69 亿 m³,其中综合基尼系数由 0.316 降至 0.276~0.302,降幅为 4.4%~12.7%,验证了模型通过调整资源分配可有效增强区域协同性;经济效益提升至 2 843.9 亿~3 254.3 亿元,较现状年实际产值增长 3.4%~18.4%,凸显了模型对经济目标的优化潜力;年内 COD 排放量控制在 1.22 万~1.41 万 t,虽缺乏原始数据对比,但其结果符合 GB 8978—1996《污水综合排放标准》要求。进一步量化分析表明,供水量每提升 1%可驱动综合效益增长 3.875%~7.650%,这一结果验证了模型通过优化粮食种植结构和水资源配置,能够显著提升水-能源-粮食系统的协调性。此外,模型在现状年情景下的稳健性验证,为后续规划年(2030 年)不同来水频率情景下的优化配置奠定了可靠基础。

3.2 规划年多情景下优化结果分析

3.2.1 目标效益优化结果

规划年采用基尼系数、经济效益和 COD 排放量作为评价指标,从 500 组非劣解中筛选出平水年和枯水年相对最优的配置方案,通过熵权法-TOPSIS 综合评价法得出综合效益最优方案为 S1、S5,其中平水年社会效益、经济效益、生态环境效益的权重分别为 0.33、0.27、0.39,枯水年分别为 0.31、0.40、0.29;方案 S2、S3、S4 和 S6、S7、S8 分别代表平水年和枯水年中社会效益、经济效益和生态环境效益最优的配置方案。枯水年各方案综合基尼系数为 0.240~0.264,

经济效益为 2 991.3 亿~3 211.3 亿元,COD 排放量为 0.825 万~0.884 万 t;平水年各方案综合基尼系数为 0.259~0.278,经济效益为 3 273.5 亿~3 408.6 亿元,COD 排放量为 1.159 万~1.204 万 t。

根据不同方案下的多目标效益结果(表 2)和多目标优化帕累托前沿三维图(图 2),可得到典型优化方案的目标权衡关系,结果如下:①社会效益、经济效益和生态效益之间存在协同与竞争并存的关系。其中,生态效益与社会效益、经济效益均成反比,表明生态效益提升需要在经济发展和资源公平配置方面进行一定协调;社会效益与经济效益成正比,即经济效益提升时资源配置公平性也随之提高。单一目标的优化难以同时实现其他目标的最优,需要通过多目标协调优化实现纽带系统综合效益提升。②平水年与枯水年情景下综合基尼系数、经济效益和 COD 排放量 3 个优化目标之间的协调关系存在明显差异。平水年的优化方案较为均衡,所得到的帕累托前沿分布均匀,且范围较广,体现了各目标之间的合理协调;而枯水年面临更为严峻的资源压力和环境负担,导致帕累托前沿相对更加收敛,优化范围相对缩小,经济效益与生态效益的牺牲较为显著。③在不同水文情景下,模型均能有效求解水-能源-粮食纽带多目标协调优化问题,表明该模型能够为区域水资源管理、能源优化调度及粮食安全保障提供强有力的技术支持。

3.2.2 不同情景优化方案下水量分配优化

平水年 S1、S2、S3、S4 的总供水量分别为 89.48 亿、89.70 亿、90.63 亿、88.68 亿 m³,其中地表水供水量占比为 84%,地下水供水量占比为 16%;枯水年不同方案的总供水量分别为 76.79 亿、79.20 亿、81.43 亿、76.02 亿 m³,其中地表水供水量占比为 86%,地下水供水量占比为 14%。缺水率可反映区域干旱情况,参考 SL 424—2008《旱情等级标准》,各县市区缺水等级如图 3 所示。在平水年的优化方案中,无旱、轻旱、中旱、重旱、特旱发生的占比分别为 0.41、0.05、0.15、0.19、0.20,无旱和轻旱主要发生在邵阳市西南地区以及娄底市东部,重

表 2 规划年衡邵干旱走廊不同方案、不同水文年多目标效益

方案	水文年	目标	社会效益	总经济效益/亿元	COD 排放总量/万 t
S1	平水年	综合效益最优	0.259	3 273.5	1.203
S2	平水年	社会效益最优	0.259	3 292.8	1.204
S3	平水年	经济效益最优	0.271	3 408.6	1.192
S4	平水年	生态效益最优	0.278	3 401.6	1.159
S5	枯水年	综合效益最优	0.244	2 991.3	0.837
S6	枯水年	社会效益最优	0.240	3 155.0	0.862
S7	枯水年	经济效益最优	0.255	3 211.3	0.884
S8	枯水年	生态效益最优	0.264	3 165.7	0.825

● 综合最优方案 ● 社会效益最优方案 ● 经济效益最优方案 ● 生态效益最优方案

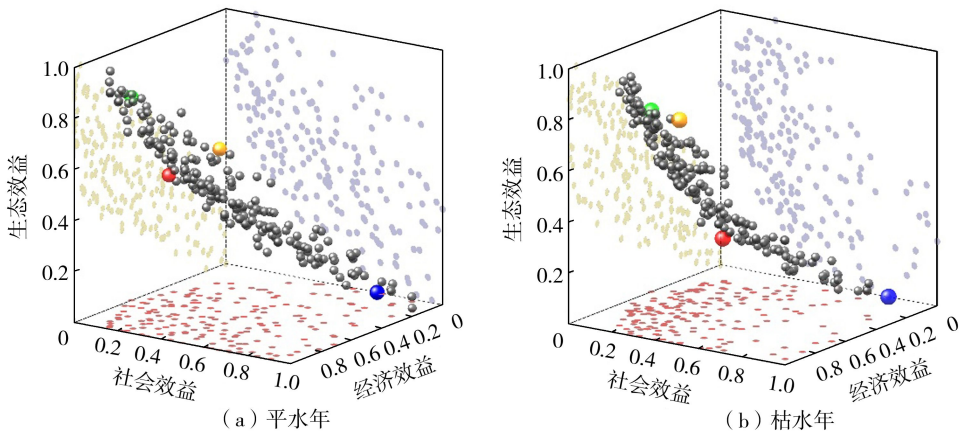


图2 规划年衡邵干旱走廊不同水文年多目标优化帕累托前沿结果

干旱等级 无旱 轻旱 中旱 重旱 特旱

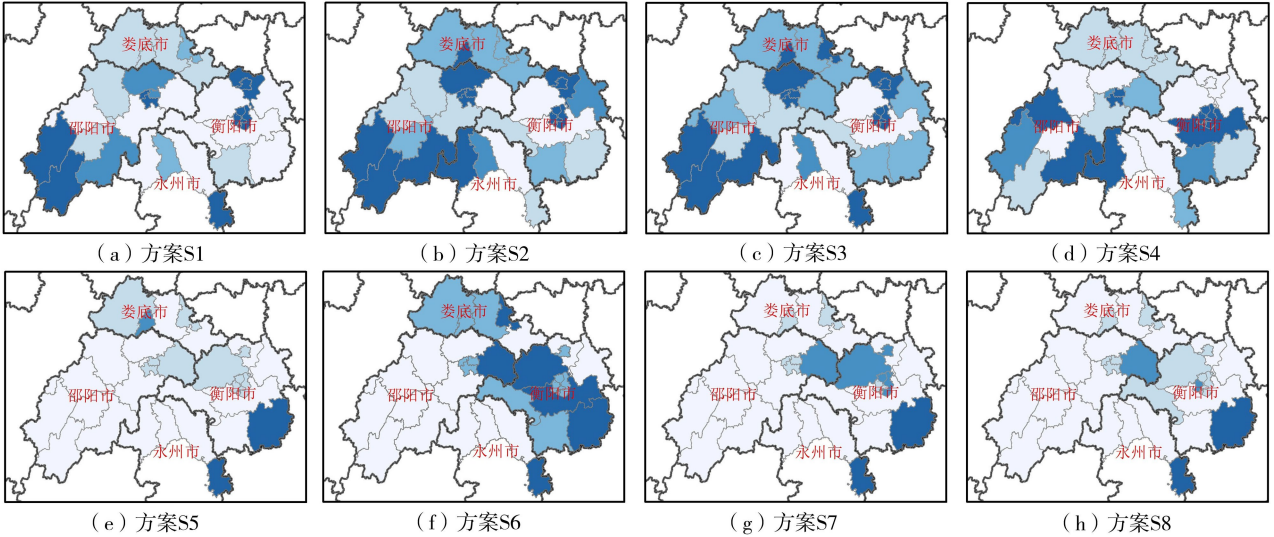


图3 衡邵干旱走廊不同水文年缺水等级对比分析

旱主要发生在娄底市、衡阳市市辖区周边县区、邵阳市市辖区周边县区以及永州北部的新田县、祁阳县；在枯水年的优化方案中，无旱、轻旱、中旱、重旱、特旱发生的占比分别为 0.09、0.00、0.06、0.32、0.53。重旱发生区域在 S6、S7、S8 方案中加剧为特旱，干旱分布区域大体一致。该研究结果与杨扬等^[43]对该区域干旱等级的分析结果一致。

综上可知，优化后得到各水平年的综合效益最优方案 S1、S5 表现较优，因此本文选择 S1 与 S5 分

别作为平水年和枯水年的最典型方案进行分析，典型方案的部门供水量以及缺水量如表 3 所示。由表 3 可知：①平水年方案 S1 的整体缺水率为 7.1%，其中生活、工业、农业、服务业、生态部门的缺水率分别为 0、0、22%、0、0；枯水年方案 S5 的整体缺水率为 26.7%，其中生活、工业、农业、服务业、生态部门的缺水率分别为 0%、16.6%、41%、0%、6.7%。对于农业供水量的调高主要考虑在建的犬木塘水库工程覆盖衡邵干旱走廊的邵阳、永州、衡阳和娄底 4 市 8

表3 不同水文年综合效益最优方案下不同部门供水、粮食产量及发电情况

水文年	地区	生活供水量/亿 m ³	工业供水量/亿 m ³	农业供水量/亿 m ³	服务业供水量/亿 m ³	生态供水量/亿 m ³	缺水量/亿 m ³	粮食产量/万 t	水库发电量/亿 kW·h
平水年	衡阳市	4.42	7.31	15.39	4.09	0.35	3.54	304.48	46.54
	邵阳市	4.28	5.05	15.05	2.31	0.30	2.32	343.51	
	永州市北部	1.77	4.96	8.72	0.92	0.27	0.82	150.02	
	娄底市	1.91	5.78	5.57	0.83	0.21	0.45	130.84	
枯水年	衡阳市	4.28	5.90	13.60	3.59	10.66	4.28	222.38	37.74
	邵阳市	4.17	4.56	13.62	2.05	7.54	4.17	265.77	
	永州市北部	1.70	3.27	7.24	0.93	5.41	1.70	149.06	
	娄底市	1.87	3.89	4.51	0.66	4.62	1.87	106.00	

县,可缓解走廊中心地带的灌溉缺水现状。②S1、S5方案的区域大中型水库发电量分别为46.54亿、37.74亿kW·h。相比之下,平水年在资源调配和目标实现上更具优势,其发电效率提升幅度高于枯水年,优化潜力更为显著。枯水年则受资源限制显著,目标竞争性更强,需通过精准调度和优先级分配实现局部效益提升。由于水库发电量主要受降水量、上游来水量和地下水供给等因素的影响,不同水文年的水库发电量变化较小,发电量变化所引起的经济效益波动幅度不超过0.1%。综合分析显示,在平水年和枯水年,大中型水库均能保持较高的发电效益,其稳定性在现状年的优化配置基础上得到了进一步提升。③衡邵干旱走廊作为粮食生产基地,粮食作物种植面积变化较小,仅在2016年急剧下降后呈小幅度波动。S1、S5方案农业部门实际供水量分别为44.73亿、38.96亿m³,供水率分别为78%、59%,较现状年总产量909.56万t分别增产2.07%、-18.33%。平水年粮食系统的经济效益略有上升,但粮食生产所产生的经济效益在整体经济目标效益中的占比仅为1.2%~1.3%,粮食产量减少对经济效益的贡献不足0.1%。在对农业部门进行调整时,平水年、枯水年人口-粮食基尼系数的最大波动幅度也仅为0.067、0.064,因此,优先满足其他4个部门的供水需求对整个系统的总体目标效益影响较小。

3.2.3 种植结构优化结果

为切合国家“粮食安全”与“双碳”战略需求,提高农业用水效率并兼顾系统多目标优化,模型引入了粮食作物种植结构调整模块。已有研究表明,衡邵干旱走廊农业用水占区域总供水量的50%以上,区域缺水的主要原因为工程蓄水能力不足和农业灌溉需水量未能得到满足^[44],不同作物在耗水量、产出效益等方面差异显著,直接影响系统目标的实现。为确保粮食安全和种植结构的合理性,模型参考2022年湖南省统计年鉴,设定各分区主要作物总种植面积的上下限为±10%。在综合最优水资源配置基础上,协同作物种植结构优化与资源配置,提升系统整体效益、降低生态压力。

不同水文年粮食产量与种植面积变化情况如表4所示。从作物种植结构来看,与种植结构优化前相比,平水年种植面积均呈小幅上升趋势,增幅为3.8%,粮食产量达928.85万t,超出人均粮食占有量标准24%。枯水年种植面积均呈下降趋势,降幅为16.90%,粮食产量为743.21万t,超出人均粮食占有量标准12.9%。此外,种植结构优化不仅改善了水资源配置效率,同时降低了区域污染物排放水

平,与2022年现状配置方案相比,规划年平水年、枯水年综合效益最优方案COD排放量分别下降9.8%、37.3%。平水年与枯水年的种植面积变化反映了气候变化对水资源配置的影响,枯水年优化空间受限,调整水稻等高耗水作物的面积有助于缓解水资源供需矛盾;从空间格局来看,衡邵干旱走廊的4个分区的面积变化趋势存在一定的差异(图4),其中,永州市因丘陵地形多且农田水利设施薄弱,灌溉用水保证率较低,导致其水-粮食状态较为滞后。尽管该地区作物种植面积呈下降趋势,但其占比相对较小,对总体的影响有限。相比之下,衡阳市、娄底市和邵阳市的水资源利用效率较高,但均面临水资源匮乏问题。平水年、枯水年粮食作物分别产生经济效益51.78亿、41.57亿元。其中平水年水稻、玉米、大豆、薯类种植面积增幅分别为4%、4%、8%、6%,总种植面积为148.373万hm²;枯水年水稻、玉米、大豆、薯类种植面积降幅分别为17%、16%、96%、12%,总种植面积118.697万hm²。对比现状年与规划年4种作物种植面积的变化程度可以发现,水稻种植面积变化最大,其次是玉米和大豆,最后是薯类。其中平水年水稻种植面积增加4.222万hm²,枯水年水稻种植面积下降21.002万hm²,薯类种植面积平水年仅增加0.251万hm²,枯水年减少0.483万hm²。大豆作为高耗水但低产的粮食作物在枯水年其种植面积被大量减少,占比下降96%。综上所述,规划期应优化调整种植结构,做到平水年“提单产,增面积”,枯水年保持“稳单产,降面积”,向《湖南省“十四五”农业农村现代化规划》的种植要求看齐。

表4 不同水文年粮食产量与种植面积变化情况

分区	现状年种植面积/万hm ²	现状年粮食产量/万t	规划年粮食产量/万t	
			平水年	枯水年
衡阳市	46.500	301.19	304.48	222.38
邵阳市	50.312	318.32	343.51	265.77
永州市	24.310	151.69	150.02	149.06
娄底市	21.818	138.36	130.84	106.00
合计	142.941	909.56	928.85	743.21

水稻是研究区最主要的粮食作物,具有高耗水、低耗能的特点,可作为适应不同水文情势的重要调节农作物。同时,水稻的产量和经济效益相对较高,在保障区域粮食安全的前提下,可适度提高其种植比例。相较之下,红薯耐旱耐瘠,玉米适应性强,对全域农业用水压力较小,适合在红壤、黄壤分布较广的邵阳市和娄底市生长,在枯水年可减少衡阳市、永州市这2类作物的种植面积。因此,衡邵干旱走廊的粮食作物种植结构总体调控趋势为:枯水年耕地结构基本保持稳定,平水年适当增加水稻种植面积、调减旱作物种植比例。

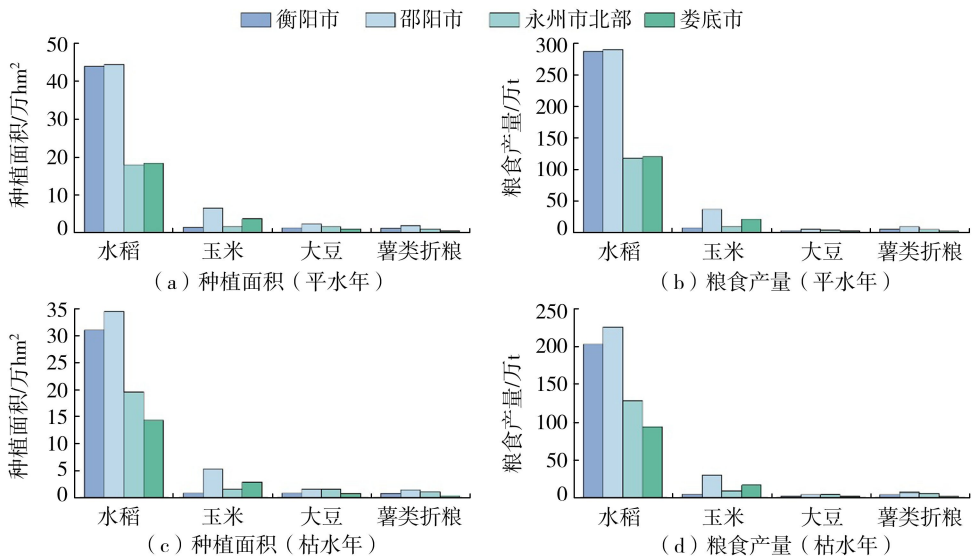


图4 不同水文年各粮食作物种植面积与粮食产量优化结果

3.3 关键驱动因子分析

考虑区域干旱特征、目标函数构成、指标代表性以及因子间相对独立性,选取了粮食总产量、总种植面积、缺水率、农业供水量、地表水供水量、地下水供水量、人口-水资源基尼系数和人口-粮食基尼系数共8个驱动因子。其中,粮食总产量和总种植面积反映粮食生产规模,地表水供水量、地下水供水量和农业供水量反映水资源配置格局,人口-水资源基尼系数和人口-粮食基尼系数反映分配公平性。此外,根据SL 424—2008《旱情等级标准》,城市旱情指标宜采用城市干旱缺水率,其定义为干旱期内日缺水量与正常日供水量的比值。因此,本文选取缺水率指标表征衡邵干旱走廊的水资源约束与干旱胁迫特征。

图5直观地显示了不同规划年(平水年、枯水年)下单个因子对目标(社会、经济和生态)效益的影响大小。结果显示,不同水文年下关键驱动因子对三类目标效益的主导机制存在显著差异。在平水年,三类效益的解释力整体较高,且驱动因子贡献分

布相对均衡。社会效益主要受“公平性与配置格局”因子主导,其中人口-粮食基尼系数、人口-水资源基尼系数和农业供水量的解释力最为突出,贡献率分别达到81.9%、71.7%和66.4%,表明社会效益对资源与粮食分配公平高度敏感。经济效益方面,人口-水资源基尼系数的贡献率最高(61.0%),农业供水量(30.9%)和地下水供水量(22.4%)次之,反映经济效益主要受水资源分配公平性及供水保障水平影响。生态效益则对区域干旱程度以及供水结构表现出高度敏感性,缺水率、农业供水量和地表水供水量的贡献率分别为81.5%、79.0%和78.1%。同时,粮食总产量和总种植面积仍保持中等解释力,说明农业生产强度通过用水规模及相关排放过程对生态效益具有持续影响。

在枯水年,三类效益的主控因子结构发生明显转变,驱动作用高度集中。社会效益几乎完全由人口-粮食基尼系数主导,其贡献率高达92.1%,人口-水资源基尼系数和地下水供水量的作用显著减弱,

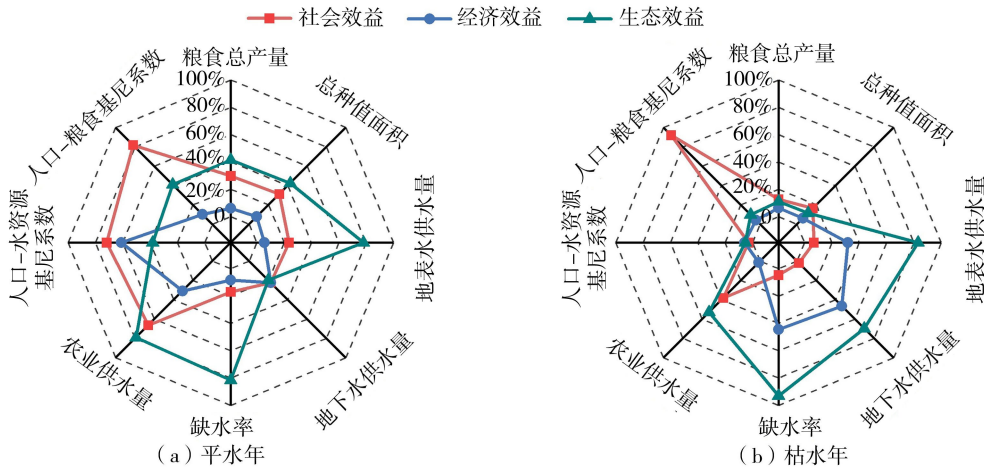


图5 不同水文年单个影响因子对社会、经济和生态效益的贡献率

表明社会差异主要体现为粮食分配格局变化。经济效益转为“供给-短缺”驱动模式,地下水供水量(46.5%)和缺水率(44.5%)成为最关键因子,地表水供水量(31.7%)次之,反映经济系统对水资源短缺和非常规供给的依赖显著增强。生态效益对水资源约束的敏感性进一步放大,缺水率的贡献率高达92.9%,同时地表水供水量、地下水供水量和农业供水量均保持较高解释力,显示生态系统在枯水情景下对水资源供需变化具有高度脆弱性。

不同水文年下双因子交互作用对衡邵干旱走廊不同目标效益的影响如图6所示。其中, $C_1 \sim C_8$ 分别代表粮食总产量、作物总种植面积、地表水供水量、地下水供水量、缺水率、农业供水量、人口-水资源基尼系数和人口-粮食基尼系数,红色方框表示对目标效益具有最大解释力的交互作用因子组,数值表示双因子交互作用对目标效益的最大贡献率。结果表明,在不同水文年和目标效益下,衡邵干旱走廊关键驱动因子的交互作用普遍显著强于单因子效应,表明区域社会-经济-生态目标效益的变化具有

明显的多因子耦合特征。在社会效益方面,粮食公平与水资源公平的协同作用始终占据主导地位。以平水年为例,人口-粮食基尼系数和人口-水资源基尼系数的单因子解释力分别为81.9%和71.7%,其交互作用后解释力提升至96.0%,成为对社会效益影响最显著的因子组合;枯水年该交互作用的解释力仍高达95.3%。这一结果表明,衡邵干旱走廊社会效益的变化并非由单一公平因素驱动,而是由粮食分配公平与水资源配置公平的共同作用所决定。在经济效益与生态效益方面,农业供水量与缺水率构成的交互作用因子组在平水年和枯水年均表现出最强解释力,反映经济与生态系统对水资源供给强度及供需缺口变化的高度敏感性。这表明在不同水文情景下,农业用水保障与水资源短缺程度的耦合作用是影响区域经济运行效率和生态系统稳定性的关键约束因素。从交互作用类型来看,研究区不同水文年下各驱动因子组合对目标效益的影响均表现为双因子增强特征,说明任意两个驱动因子的协同作用均可显著提高对目标效益的解释力。

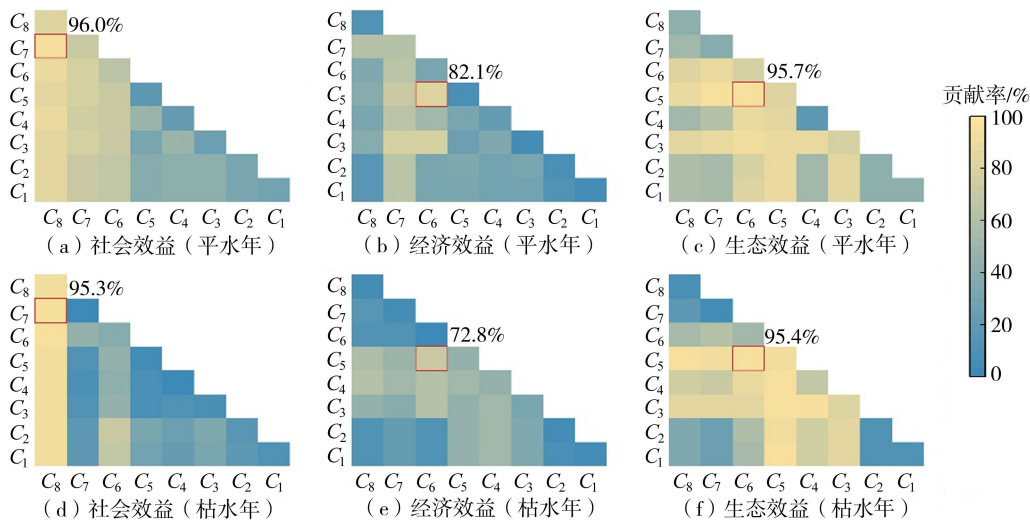


图6 不同水文年双因子交互作用对社会、经济和生态效益的影响

4 结 论

- a. 在2022年现状年,供水量每提升1%可驱动综合效益增长3.875%~7.650%,说明通过调整种植结构与水资源再分配能显著缓解部门间资源竞争,促进社会公平性与经济效率的协同提升。
- b. 社会、经济和生态效益目标间存在显著权衡关系。平水年侧重保障生活与生态用水,粮食产量提升至928.85万t,超出人均标准24%,COD排放量控制在1.21万t以内,较现状年下降9.8%;枯水年压缩高耗水作物面积,水稻种植面积减少17%,在资源约束下维持粮食安全,粮食产量仍超人均标准12.9%。

- c. 平水年驱动因子作用较为分散、差异较小,而枯水年驱动效应显著集中,主导因子更加突出。相较之下,多因子综合作用会增强对衡邵干旱走廊社会-经济-生态效益变化的贡献,且为双因子增强类型。其中,人口-粮食基尼系数和人口-水资源基尼系数、农业供水量和缺水率构成的关键因子组合,在平水年和枯水年情景下均表现出显著的交互增强效应,表明水资源供给保障与资源配置公平性的协同调控是决定区域目标效益水平的核心机制。
- d. 未来研究可在现有模型框架上引入情景化气候变化参数与经济社会发展情景,对需水演变过程进行动态刻画,以提升模型在中长期规划中的适用性;同时,可进一步细化水源结构描述,将小型水

库群及地下水补给过程纳入统一调度体系,以更准确地反映区域水资源系统的调蓄能力与韧性特征。部分参数在后续研究中可通过实地调查或多源观测数据进行校准,从而进一步提高模型参数取值的现实一致性与结果可靠性。此外,在保持 NSGA-III 算法高效性的基础上,未来可结合分层优化或降维策略,提升模型在更精细空间尺度或更复杂政策组合情景下的求解能力,进一步增强研究成果在精细化管理和政策制定中的应用潜力。

参考文献:

[1] 贺正齐,周到,张振扬,等. 基于 PSR 与云模型的重要耕地后备资源区水资源-能源-粮食协同安全评价[J]. 水利经济,2025,43(1):26-31. (He Zhengqi, Zhou Dao, Zhang Zhenyang, et al. Evaluation of water-energy-food synergistic security in important reserve resource for arable land regions based on PSR and cloud model[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2025, 43(1): 26-31. (in Chinese))

[2] 许秋阳. 长春都市圈水-能源-粮食关联系统绿色效率评价及优化策略研究[D]. 黄石:湖北师范大学,2024.

[3] Conway D, van Garderen E A, Deryng D, et al. Climate and southern Africa’s water-energy-food nexus[J]. Nature Climate Change,2015,5(9):837-846.

[4] 林志慧,刘宪锋,陈瑛,等. 水-粮食-能源纽带关系研究进展与展望[J]. 地理学报,2021,76(7):1591-1604. (Lin Zhihui, Liu Xianfeng, Chen Ying, et al. Water-food-energy nexus: progress, challenges and prospect[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(7): 1591-1604. (in Chinese))

[5] 王晶,赵美茹,高紫妍,等. 京津冀水能粮生态系统脆弱性与经济韧性脱钩分析[J]. 水利经济,2025,43(6):72-80. (Wang Jing, Zhao Meiru, Gao Ziyang, et al. Decoupling analysis of water-energy-food-ecology system vulnerability and economic resilience in the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Journal of Economics of Water Resources,2025,43(6):72-80. (in Chinese))

[6] 王恒,方兰. 中国水-能源-粮食纽带系统安全水平与全要素生产率时空耦合协调发展关系分析[J]. 水资源保护,2023,39(1):150-157. (Wang Heng, Fang Lan. Spatial-temporal coupling coordination relationship between the security level of water-energy-food nexus system and total factor productivity in China [J]. Water Resources Protection,2023,39(1):150-157. (in Chinese))

[7] Tan Zuowen, Li Han, Song Qiran, et al. Synergistic optimization and interaction evaluation of water-energy-food-ecology nexus under uncertainty from the perspective of urban agglomeration[J]. Sustainable Cities and Society, 2025,124:106291.

[8] Leck H,Conway D,Bradshaw M,et al. Tracing the water-energy-food nexus: description, theory and practice [J]. Geography Compass,2015,9(8):445-460.

[9] Li Jianxuan,Liu Sijing,Zhao Yizhao,et al. Water-energy-food nexus and eco-sustainability: a three-stage dual-boundary network DEA model for evaluating Jiangsu Province in China [J]. International Journal of Computational Intelligence Systems, 2021, 14(1): 1501-1515.

[10] Melo F P L, Parry L, Brancalion P H S, et al. Adding forests to the water-energy-food nexus [J]. Nature Sustainability,2021,4(2):85-92.

[11] Zhang Lina, Ji Zhanghanyu, Fu Shengrong, et al. Water-energy-food nexus efficiency and its factor analysis in China:a dynamic series-loop DDF model[J]. Journal of Cleaner Production,2024,436:140524.

[12] Li Wei, Jiang Shan, Zhao Yong, et al. A copula-based security risk evaluation and probability calculation for water-energy-food nexus [J]. Science of the Total Environment,2023,856:159236.

[13] 王雨,王会肖,杨雅雪,等. 黑龙江省水-能源-粮食系统动力学模拟[J]. 水利水电科技进展,2020,40(4):8-15. (Wang Yu, Wang Huixiao, Yang Yaxue, et al. System dynamics simulation of WEF nexus in Heilongjiang Province [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2020,40(4):8-15. (in Chinese))

[14] 王慧敏,洪俊,刘钢. “水-能源-粮食”纽带关系下区域绿色发展政策仿真研究[J]. 中国人口·资源与环境,2019,29(6):74-84. (Wang Huimin, Hong Jun, Liu Gang. Simulation research on different policies of regional green development under the nexus of water-energy-food [J]. China Population, Resources and Environment, 2019, 29(6):74-84. (in Chinese))

[15] Kamrani K,Roozbahani A,Hashemy Shahdany S M. Using Bayesian networks to evaluate how agricultural water distribution systems handle the water-food-energy nexus [J]. Agricultural Water Management,2020,239:106265.

[16] 王璐琪,姜珊,刘红卫,等. 京津冀地区水-能源-粮食系统安全耦合协调发展特征评价[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2024,22(1):12-23. (Wang Luqi, Jiang Shan, Liu Hongwei, et al. Evaluation of coupling and coordinated development characteristics of water-energy-food system security in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2024,22(1):12-23. (in Chinese))

[17] Sánchez-Zarco X G, Ponce-Ortega J M. Water-energy-food-ecosystem nexus: an optimization approach incorporating life cycle, security and sustainability assessment[J]. Journal of Cleaner Production,2023,414:137534.

[18] Simpson G B,Jewitt G P W,Becker W,et al. The water-

- energy-food nexus index: a tool to support integrated resource planning, management and security[J]. *Frontiers in Water*, 2022, 4: 825854.
- [19] Covarrubias M. The nexus between water, energy and food in cities: towards conceptualizing socio-material interconnections[J]. *Sustainability Science*, 2019, 14(2): 277-287.
- [20] Bakhshianlamouki E, Masia S, Karimi P, et al. A system dynamics model to quantify the impacts of restoration measures on the water-energy-food nexus in the Urmia lake Basin, Iran[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 708: 134874.
- [21] 赵林明, 杨海燕, 贾树枝, 等. 基于监测数据的水力发电系统人工神经网络建模[J]. *水利水电技术*, 2011, 42(1): 73-75. (Zhao Linming, Yang Haiyan, Jia Shuzhi, et al. Monitoring data based artificial neural network modeling of hydropower generation system[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2011, 42(1): 73-75. (in Chinese))
- [22] Capodaglio A G, Olsson G. Energy issues in sustainable urban wastewater management: use, demand reduction and recovery in the urban water cycle[J]. *Sustainability*, 2020, 12(1): 266.
- [23] Davis K F, Rulli M C, Seveso A, et al. Increased food production and reduced water use through optimized crop distribution[J]. *Nature Geoscience*, 2017, 10(12): 919-924.
- [24] Kang Shaozhong, Hao Xinmei, Du Taisheng, et al. Improving agricultural water productivity to ensure food security in China under changing environment: from research to practice[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 179: 5-17.
- [25] Su Yuxin, Liu Yahong, Huo Lijuan, et al. Research on optimal allocation of soil and water resources based on water-energy-food-carbon nexus[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 450: 141869.
- [26] 李淑雅. 衡邵娄干旱走廊干旱成因研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2022.
- [27] 谭军, 赵伟明, 黄草. 湖南省衡邵娄干旱走廊干旱防治措施适度性评价研究[J]. *中国防汛抗旱*, 2024, 34(7): 69-75. (Tan Jun, Zhao Weiming, Huang Cao. Study on the suitability evaluation of drought prevention and control measures in the Hengyang-Shaoyang-Loudi arid corridor of Hunan Province[J]. *China Flood & Drought Management*, 2024, 34(7): 69-75. (in Chinese))
- [28] 符静, 秦建新, 黎祖贤, 等. “衡邵干旱走廊”历史降雨量时空特征及趋势分析[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(8): 3097-3106. (Fu Jing, Qin Jianxin, Li Zuxian, et al. Spatial-temporal distribution pattern and trend analysis of rainfalls in the “Heng Shao drought corridor”[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(8): 3097-3106. (in Chinese))
- [29] Chen Jiandong, Liu Jialu, Qi Jie, et al. City- and county-level spatio-temporal energy consumption and efficiency datasets for China from 1997 to 2017[J]. *Scientific Data*, 2022, 9(1): 101.
- [30] 王澎喆, 赵志轩, 吴皓天, 等. 基于分层需水的水资源均衡配置研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2024, 35(4): 56-65. (Wang Pengzhe, Zhao Zhixuan, Wu Haotian, et al. Research on balanced allocation of water resources based on stratified water demand[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2024, 35(4): 56-65. (in Chinese))
- [31] 李泽宇, 赵喜萍, 李剑平, 等. 基于改进粒子群算法的阳泉市水资源优化配置研究[J]. *华北水利水电大学学报 (自然科学版)*, 2024, 45(5): 15-21. (Li Zeyu, Zhao Xiping, Li Jianping, et al. Research on optimal allocation of water resources in Yangquan City based on improved particle swarm optimization[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2024, 45(5): 15-21. (in Chinese))
- [32] 秦长海, 王明, 赵勇, 等. 新中国成立以来中国粮食生产多元要素驱动定量研究[J]. *清华大学学报 (自然科学版)*, 2024, 64(10): 1746-1758. (Qin Changhai, Wang Ming, Zhao Yong, et al. Quantitative study on the key driving factors of grain production in China from 1949 to 2020[J]. *Journal of Tsinghua University (Science & Technology)*, 2024, 64(10): 1746-1758. (in Chinese))
- [33] 孙凯悦, 牛最荣, 王建旺, 等. 面向供水对象转型的引大入秦工程水资源优化配置研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2023, 34(3): 93-100. (Sun Kaiyue, Niu Zuirong, Wang Jianwang, et al. Optimal allocation of water resources from Datong River-to-Qinwangchuan Basin Water Diversion Project addressing water supply object transformation[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2023, 34(3): 93-100. (in Chinese))
- [34] 陈海枫. 宿州市水资源承载力评价及优化配置[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2024.
- [35] 黄生志, 闫俊, 郭怿, 等. 面向关中地区水网韧性提升的水库群优化调配研究[J]. *水资源保护*, 2025, 41(5): 258-267. (Huang Shengzhi, Yan Jun, Guo Yi, et al. Optimization and allocation of reservoir groups for enhancing the resilience of water network in Guanzhong area[J]. *Water Resources Protection*, 2025, 41(5): 258-267. (in Chinese))
- [36] 方国华, 宋子奇, 廖涛, 等. 跨流域引调水工程供水效益量化分析[J]. *水利经济*, 2021, 39(1): 15-19. (Fang Guohua, Song Ziqi, Liao Tao, et al. Quantitative analysis of water supply benefits of inter-basin water diversion projects[J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2021, 39(1): 15-19. (in Chinese))
- [37] 刘欣, 赵雪花, 武雯昱, 等. 基于 NSGA-II + ARSBX 算法

- 的太原市水资源优化配置[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(1): 79-86. (Liu Xin, Zhao Xuehua, Wu Wenyu, et al. Optimal allocation of water resources based in Taiyuan City on NSGA-II + ARSBX algorithm [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(1): 79-86. (in Chinese))
- [38] 吴山, 高瑞忠, 王英杰, 等. 水网联通情境下鄂尔多斯市多水源-多用户-多目标水资源优化配置[J]. 水资源保护, 2025, 41(6): 176-185. (Wu Shan, Gao Ruizhong, Wang Yingjie, et al. Multi-source, multi-user and multi-objective optimal allocation of water resources under context of water network connection in Ordos City [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(6): 176-185. (in Chinese))
- [39] 陶洁, 王沛霖, 王辉, 等. 基于 A-NSGA-III 的引江济淮工程河南段水资源优化配置研究[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(6): 111-119. (Tao Jie, Wang Peilin, Wang Hui, et al. Research on water resources optimal allocation in Henan Section of Yangtze River to Huaihe River Water Diversion Project based on A-NSGA-III algorithm [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(6): 111-119. (in Chinese))
- [40] Wang Jinfeng, Li Xinhua, Christakos G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(1): 107-127.
- [41] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134. (Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134. (in Chinese))
- [42] Jenks G F. The data model concept in statistical mapping [J]. International Yearbook of Cartography, 1967, 7: 186-190.
- [43] 杨扬, 赵伟明, 胡颖冰, 等. “衡邵娄干旱走廊”干旱时空演变特征分析[J]. 干旱气象, 2023, 41(4): 550-559. (Yang Yang, Zhao Weiming, Hu Yingbing, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of drought in the “Heng-Shao-Lou drought corridor” [J]. Journal of Arid Meteorology, 2023, 41(4): 550-559. (in Chinese))
- [44] 刘元沛, 盛东, 山红翠, 等. 衡邵干旱走廊典型灌区水资源优化调度研究[J]. 湖南水利水电, 2016(5): 52-56. (Liu Yuanpei, Sheng Dong, Shan Hongcui, et al. Optimal operation of water resources in a representative irrigation district of the Heng-Shao Drought Corridor [J]. Hunan Hydro & Power, 2016(5): 52-56. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-06-19 编辑: 俞云利)

(上接第 109 页)

- [12] 樊启祥, 孙洪昕, 雷振, 等. 大型梯级水电项目开发知识管理研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(1): 102-109. (Fan Qixiang, Sun Hongxin, Lei Zhen, et al. Knowledge management in project development of large cascaded hydropower projects [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(1): 102-109. (in Chinese))
- [13] 张天鸿, 王晓玲, 余红玲, 等. 基于大语言模型的灌浆工程知识服务系统[J]. 水利学报, 2025, 56(1): 130-142. (Zhang Tianhong, Wang Xiaoling, Yu Hongling, et al. Grouting works knowledge service system based on large language model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2025, 56(1): 130-142. (in Chinese))
- [14] Li Xiao, Yi Wen, Chi H L, et al. A critical review of virtual and augmented reality (VR/AR) applications in construction safety [J]. Automation in Construction, 2018, 86: 150-162.
- [15] Jiang Junjie, Yang Zhile, Wu Chengke, et al. A compatible detector based on improved YOLOv5 for hydropower device detection in AR inspection system [J]. Expert Systems with Applications, 2023, 225: 120065.
- [16] Lee D, Nie Guangyu, Han K. Vision-based inspection of prefabricated components using camera poses: addressing inherent limitations of image-based 3D reconstruction [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 64: 105710.
- [17] Zhou Ying, Luo Hanbin, Yang Yiheng. Implementation of augmented reality for segment displacement inspection during tunneling construction [J]. Automation in Construction, 2017, 82: 112-121.
- [18] Chen Junjie, Fu Yonglin, Lu Weisheng, et al. Augmented reality-enabled human-robot collaboration to balance construction waste sorting efficiency and occupational safety and health [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 348: 119341.
- [19] Andrews C M, Henry A B, Soriano I M, et al. Registration techniques for clinical applications of three-dimensional augmented reality devices [J]. IEEE Journal of Translational Engineering in Health and Medicine, 2021, 9: 4900214.
- [20] Ahn H, Lee C, Kim M, et al. Applicability of smart construction technology: prioritization and future research directions [J]. Automation in Construction, 2023, 153: 104953.

(收稿日期: 2025-06-04 编辑: 俞云利)