

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

第四十六卷第二期

二〇二六年三月出版

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



# 水利水电科技进展

ADVANCES IN SCIENCE AND TECHNOLOGY OF WATER RESOURCES



2026年3月

第46卷 第2期  
Vol. 46 No. 2

## 《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	王金荣	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

- 1 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。
- 2 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。
- 3 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。
- 4 来稿要求和注意事项
  - (1) 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。
  - (2) 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。
  - (3) 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。
  - (4) 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。
  - (5) 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。
  - (6) 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。
  - (7) 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。
- 5 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。
- 6 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。
- 7 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。
- 8 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](mailto:jz@hhu.edu.cn) 或 [jz1981@vip.163.com](mailto: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2期

# 2026

2026年3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 突 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

## · 研究探讨 ·

- 高淳西部圩区水系连通变化对水环境的影响分析  
..... 高玉琴,王丽君,李媛媛,唐 静(1)
- 明渠弯道几何形态对水动力特性的影响研究  
..... 李 凯,曾 诚,陈 辰,王明辉,胡羽蝶,周 婕(12)
- 漩滚涌潮在变化地形上传播演变的数值模拟研究  
..... 喻仞石,屈 科,郑 伟,王 超,王 旭(22)
- 基于浑水渗流理论的堤坝管涌分析方法及验证  
..... 刘世隆,宋靖宇,党发宁,薛海斌,张雅敏,薛 宁(31)
- 基于改进人工鱼群-粒子群算法的梯级水库群多目标优化调度  
算法 ..... 张侃侃,赵海峰,王兆才(38)
- 基于多目标优化的敖江流域梯级水库水资源调度研究  
..... 翁 硕,林明财,林建锋,王 浩,谢皓南(46)
- 方形竖井空间主动土压力演化规律研究  
..... 徐 伟,李楠楠,张亚鹏,朱谭谭,邬 志,盛可鑫(55)

## · 工程技术 ·

- 数字孪生三江平原涝区管理平台构建与应用  
..... 刘永强,张 钰,孙昊聪(63)
- 基于数字图像技术的水资源计量数据实时采集系统研发及应用  
...陈 红,金鹏涛,马世斌,彭 真,周子靖,周宇飞,钟爱成(71)
- 蓄水条件下脉动注浆对黏土心墙坝应力与变形的影响  
..... 常留红,周佳瑶,  
廖 奕,胡鹏程,张国安,曾浩荣,Sadik Mohammad Nafis(76)
- 基于动态气囊边界改进的空气阀模型  
..... 赵 莉,杨晓春,颜建国,申虎贲(84)
- 基于低场核磁共振技术的非织造土工织物有效孔径测定  
..... 张宪雷,杨鹏鹏,马少帅(91)

## · 赣江尾閤工程专栏 ·

- 基于流量-水质 T-Copula 联合分布的赣江尾閤水系骨干河道氟  
化物水环境容量研究  
..... 杨 焯,褚克坚,秦 硕,叶福竹,顾 莉(97)
- 赣江尾閤工程运行前后底栖动物群落结构演变特征  
..... 胡小飞,  
吴挺峰,燕文明,张 奇,刘玉栋,周亚东,李皋翔,龚志军(106)
- 佛子岭水库 ..... 摄影:孟 凯(封面)

## CONTENTS

- Analysis of impacts of water system connectivity changes in the western polder area of Gaochun District on water environment ..... *Gao Yuqin, et al*( 1 )
- Study on influence of geometric morphology of open-channel bends on hydrodynamic characteristics ..... *Li Kai, et al*(12)
- Numerical simulation of propagation and evolution of vortical tidal bore on varying topography ..... *Yu Renshi, et al*(22)
- Analysis method and validation of dam piping based on muddy water seepage theory ..... *Liu Shilong, et al*(31)
- A multi-objective optimal operation algorithm of cascade reservoirs based on improved artificial fish swarm-particle swarm optimization algorithm ..... *Zhang Kankan, et al*(38)
- Research on water resources operation of cascade reservoirs in the Aojiang River Basin based on multi-objective optimization ..... *Weng Shuo, et al*(46)
- Study on evolution law of spatial active earth pressure for square shaft ..... *Xu Wei, et al*(55)
- Construction and application of a digital twin-based management platform for waterlogged area in the Sanjiang Plain ..... *Liu Yongqiang, et al*(63)
- Development and application of real-time water resources metering data acquisition system based on digital image technology ..... *Chen Hong, et al*(71)
- Influence of pulsating grouting on stress and deformation of clay core wall dam under impounding conditions ..... *Chang Lihong, et al*(76)
- An improved air valve model based on dynamic air-pocket boundaries ..... *Zhao Li, et al*(84)
- Determination of effective pore size of nonwoven geotextiles based on low-field nuclear magnetic resonance technology ..... *Zhang Xianlei, et al*(91)
- Research on fluoride water environmental capacity in main channels of the lower Ganjiang River network based on joint distribution of flow rate with water quality using T-Copula model ..... *Yang Xuan, et al*(97)
- Evolution characteristics of benthic macroinvertebrate community structure before and after operation of tail reach project of the Ganjiang River ..... *Hu Xiaofei, et al*(106)
- 

**Sponsor:** Hohai University

**Editor & Publisher:** Editorial Board of Advances in Science and Technology of Water Resources, Hohai University

**Editors-in-Chief:** Zheng Jinhai, Su Huaizhi

**ISSN** 1006 – 7647      **CN** 32 – 1439/TV

**Address:** 1 Xikang Road, Nanjing 210098, P. R. China

**E-mail:** jz@hhu.edu.cn

**http:** //jour.hhu.edu.cn

**Distributor:** China International Book Trading Corporation (P. O. Box 399, Beijing 100048, P. R. China)

**Issue Code:** BM2740      **CODEN:** SSKJAT

# 高淳西部圩区水系连通变化对水环境的影响分析

高玉琴<sup>1</sup>, 王丽君<sup>1</sup>, 李媛媛<sup>2</sup>, 唐静<sup>1</sup>

(1. 河海大学水利水电学院; 2. 水利部淮河水利委员会)

**摘要:**设计5种水系连通方案并定量评价了南京高淳西部圩区连通性,基于水文与水动力水质模型模拟了各方案下的水环境响应特征。结果表明:河道沟通(方案1)使漕塘西山河等河道水质显著改善,其氨氮、总磷、总氮年均质量浓度分别降低0.65、0.14、1.21 mg/L,说明河道沟通可加速污染物衰减;沟通撑龙港河与官溪河(方案2)虽使撑龙港河氨氮、总磷、总氮年均质量浓度分别降低0.84、0.15、0.90 mg/L,但引发固城湖、横溪河等河道水质轻微下降,说明当超出水体自净能力范围时,河道沟通将污染原本水质较好的水体;河道挖深(方案3)与河道拓宽(方案4)对水环境影响微弱;增加支流(方案5)可减少漆桥河水量,导致氨氮、总磷、总氮年均质量浓度分别上升0.11、0.02、0.04 mg/L,从而对下游的固城湖大湖区水环境造成负面影响。

**关键词:**水系连通;水环境;SWAT模型;MIKE11模型;高淳西部圩区

**Analysis of impacts of water system connectivity changes in the western polder area of Gaochun District on water environment**//Gao Yuqin<sup>1</sup>, Wang Lijun<sup>1</sup>, Li Yuanyuan<sup>2</sup>, Tang Jing<sup>1</sup>(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University; 2. The Huaihe River Commission of the Ministry of Water Resources)

**Abstract:** Five water system connectivity schemes were designed to quantitatively evaluate the connectivity of the western polder area of Gaochun District in Nanjing. Based on the hydrological, hydrodynamic, and water quality models, the water environmental response characteristics under each scheme were simulated. The results show that connecting river channels (scheme 1) significantly improved the water quality of rivers such as the Caotang Xishan River, with annual average mass concentrations of ammonia nitrogen, total phosphorus and total nitrogen in the Caotang Xishan River decreasing by 0.65, 0.14, and 1.21 mg/L, respectively, indicating that river channel connection can accelerate pollutant attenuation. Connecting the Chenglonggang River and Guanxi River (scheme 2) reduced annual average mass concentrations of ammonia nitrogen, total phosphorus, and total nitrogen in the Chenglonggang River by 0.84, 0.15, and 0.90 mg/L, respectively. However, it caused a slight decline in the water quality of Gucheng Lake and rivers such as the Hengxi River, indicating that when the self-purification capacity of the water body is exceeded, the channel connection will pollute originally good-quality water bodies. Deepening river channels (scheme 3) and widening river channels (scheme 4) have a weak impact on the water environment. Increasing tributaries (scheme 5) reduced the water volume of the Qiqiao River, leading to increases in annual average mass concentrations of ammonia nitrogen, total phosphorus and total nitrogen by 0.11, 0.02, and 0.04 mg/L, respectively, thereby negatively affecting the water environment of the lake area of Gucheng Lake downstream.

**Key words:** water system connectivity; water environment; SWAT model; MIKE11 model; the western polder area of Gaochun District

河湖水系是水资源、水环境的重要载体和生态系统的重要组成部分,也是社会发展的重要支撑<sup>[1]</sup>。人类活动导致河网水系连通格局显著改变,引发河湖间水文过程、水力联系、水资源分布和生态环境的相应变化<sup>[2-3]</sup>。部分河道的阻断或填埋切断了河流间的水力联系<sup>[4]</sup>,而污水、废物等随意排放会造成河湖淤塞萎缩、连通不畅。如何恢复和提升河湖水系连通性,有效提高水环境承载能力和水生

态自我修复能力,成为近年来的研究热点。

针对水系连通性,国外学者从水文过程、地貌景观及生物多样性等方面展开了研究,但河网水系变化研究仍处于起步阶段<sup>[5-8]</sup>。国内学者从理论上探讨了水系连通的定义、特征、分类、影响因素等,采用图论法、景观生态学法、水文水动力模拟法、指标分析法等评价水系连通性,但水系连通评价仍有待深化<sup>[9-13]</sup>。在水环境模拟方面多采用水动力水质模

**基金项目:**江西省水利科技重点项目(202527ZDKT22);江苏省水利科技项目(2023009)

**作者简介:**高玉琴(1978—),女,教授,博士,主要从事防洪减灾、水利规划与水利经济研究。E-mail: yqgao@hhu.edu.cn

型,而关于水环境对水系连通的响应,部分研究则局限于单一水系连通方案下的水环境特征分析<sup>[14-15]</sup>,虽有部分研究分析了多方案的水质改善效果,但未系统化方案的连通程度<sup>[16-18]</sup>。

本文以南京高淳西部圩区为研究对象,设计多种连通方案并评价其连通性,通过构建水文与水动力水质模型定量描述各方案下的水环境响应特征,以期改善水系连通和水环境状况提供参考。

## 1 研究区概况与数据来源

高淳区地处南京市的西南端,西部圩区位于高淳区中西部,面积 380 km<sup>2</sup>(图 1),属于水阳江-青弋江流域下游的平原河网区,水系发达,人口聚集,人与水环境矛盾突出。受人类活动影响,西部圩区水系连通不足,且水产养殖产生的面源污染较严重,水环境状况不佳,2020 年 12 个主要水体水质监测断面中,Ⅲ类以下水质断面有 5 个<sup>[19]</sup>。

本文构建水环境模型需要 DEM、土地利用、土

壤、水文气象、水工建筑物规模及调度规则信息、水质等数据,具体如表 1 所示。

## 2 研究方法

如图 2 所示,本文设计了不同水系连通方案,采用水系连通性评价模型评估其连通程度,并通过水文与水动力水质模型模拟不同连通方案下水环境响应特征。

### 2.1 连通情景设置

研究区河道连通性总体较好,但仍存在局部连通不畅及淤积问题。具体而言,漕塘河、漕塘西山河与漕塘东山河不连通,撑龙港河与官溪河不连通,狮树河末端与水阳江不连通;同时,狮树河、横溪河等 5 条河道平均淤深超过 0.8 m,而时家河、茅城河、砖墙河则在 0.4~0.6 m 之间。据此设定两种连通情景:情景 1 针对现存问题,实施河道沟通与清淤;情景 2 以水系形态特征为研究变量,增加河宽与支流数量。具体方案见表 2。

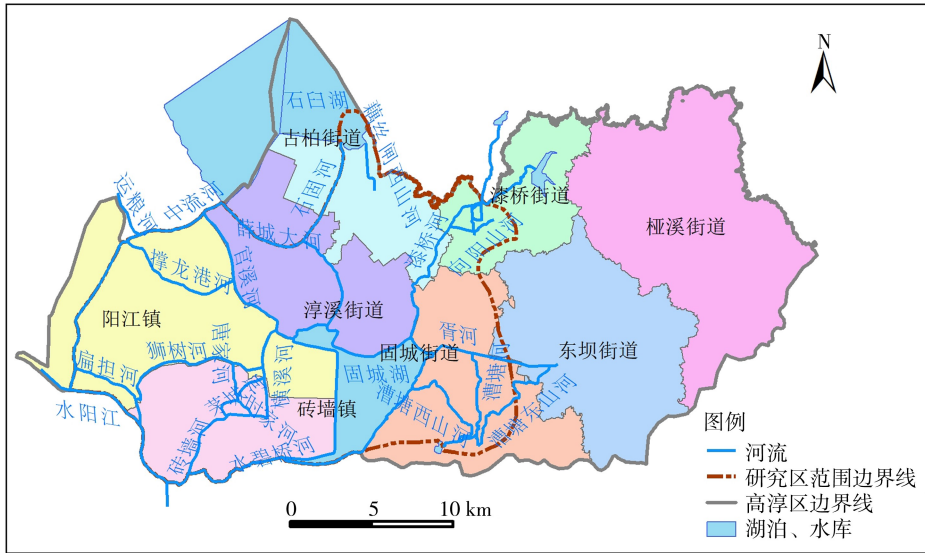


图 1 研究区范围

表 1 模型数据信息

模型	数据类型	来源	用途
SWAT 水文模型	DEM	91 卫图助手	模型构建
	土地利用	资源环境科学数据平台 ( <a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a> )	
	土壤类型	寒区科学大数据中心 ( <a href="http://www.bdc.ac.cn/">http://www.bdc.ac.cn/</a> )	
	气象	2010—2019 年马鞍山和芜湖的气象数据	
	降雨	2010—2019 年当涂、高淳等 19 个站点的逐日降雨数据	
	水文	2010—2019 年当涂和大蓉坊的实测逐日径流数据	模型率定与验证
MIKE11 HD 模块 (水动力模块)	水工建筑物规模及调度规则信息	杨家湾闸、水碧桥闸、茅东闸、薛城大河闸及蛇山泵站	河网文件设置
	水文	新河庄站和信村站实测流量、蛇山站实测水位数据 2017—2019 年高淳站和杨家湾闸上水位数据	边界条件设置 模型率定与验证
MIKE11 AD 模块 (对流扩散模块)	水质	点源污染和面源污染数据;2017—2019 年水碧桥站、水阳江大桥站、蛇山站、河定大桥站实测水质数据	水质内部、外部边界条件设置
		2017—2019 年漕塘河、官溪河、固城湖大小湖区、漆桥河、石固河、水碧桥河、胥河、中流河氨氮、总磷、总氮实测值	模型率定与验证

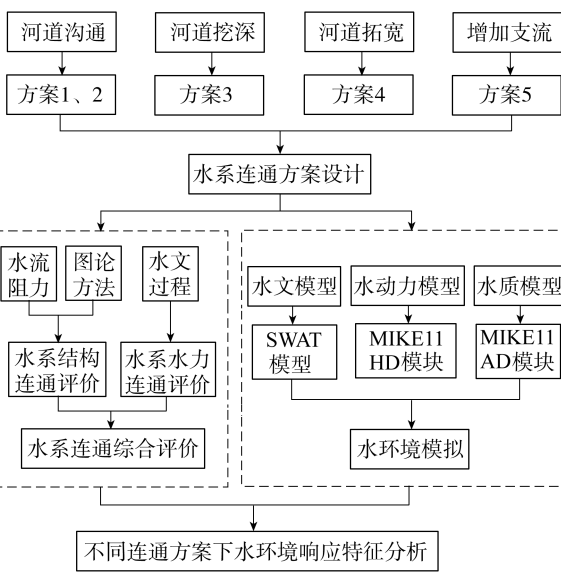


图2 技术路线

表2 水系连通方案设计

情景	方案	具体实施方案
情景1	方案1	沟通漕塘河、漕塘西山河、漕塘东山河;沟通狮树河与水阳江
	方案2	在方案1的基础上沟通撑龙港河与官溪河
	方案3	在方案2的基础上挖深淤积较深的河道,狮树河、横溪河、唐家河、扁担河与漕塘河在原有断面基础上河底高程降低0.8m,时家河、茅城河、砖墙河降低0.5m
情景2	方案4	在方案3的基础上拓宽横溪河、茅城河、时家河、唐家河、砖墙河的河道,在原有断面基础上河口拓宽1m
	方案5	在方案4的基础上增加漆桥河支流的河长,将未纳入模拟范围的港南南河、港南西河、港南东河、港南北河、朝阳圩东西大河等较小河道作为漆桥河支流纳入模拟范围,并连通这些河道

## 2.2 水系连通性评价模型

参考文献[20-22],本文从结构连通、水力连通和综合连通三方面定量评价水系连通性,同时修正水系连通性计算方法,计算水流阻力时水深和站点间水位差采用水文水动力模型的模拟结果,实现水系连通性的动态评价。

### 2.2.1 基于水流阻力与图论方法的水系结构连通评价

以流域内河源、节点和出口为顶点,以河链为边,建立以  $V$  为顶点集、 $E$  为边集的河网图模型  $G(V, E)$ 。用邻接矩阵  $R = (r_{ij})_{n \times n}$  表示河网图模型,  $r_{ij}$  表示顶点  $v_i$  与  $v_j$  之间的水流通畅程度。设置  $R$  为加权邻接矩阵,此时  $r_{ij}$  为顶点  $v_i$  和  $v_j$  的边权值。当顶点  $v_i$  和  $v_j$  之间无边直接相连或  $i=j$  时,  $r_{ij} = 0$ ; 当有多条边直接相连时,  $r_{ij}$  为多条直接相连边的权值之和。为考虑不同河道输水能力的差别,以水流阻力  $H$  的倒数作为边权值  $\omega$ ,计算公式为:

$$\omega = 1/H = \frac{1}{ln} \left[ \frac{(b + mh)h}{b + 2h\sqrt{1 + m^2}} \right]^{2/3} \quad (1)$$

式中:  $l$  为河长;  $n$  为曼宁糙率;  $b$  为河道底宽;  $m$  为边坡系数;  $h$  为水深。

由矩阵乘法得到  $R^k$ :

$$R^k = (r_{ij}^{(k)})_{n \times n} \quad (2)$$

其中

$$r_{ij}^{(k)} = \sum_{p=1}^n r_{ip}^{(k-1)} r_{pj}$$

式中:  $r_{ij}^{(k)}$  表示由顶点  $v_i$  出发经  $k-1$  个中间顶点到达顶点  $v_j$  的水流通畅度;  $p$  为顶点编号。

为避免水系结构连通性计算结果偏大,在河网概化过程中需对河道进行修正,将长度小于 150 m 和边权值大于 0.3 的河道与相邻河道合并<sup>[23]</sup>,然后建立水流通畅度矩阵  $F = (f_{ij})_{n \times n}$ :

$$f_{ij} = \begin{cases} \max r_{ij}^{(k)} & k = 1, 2, \dots, n - 1; i \neq j \\ 0 & i = j \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $f_{ij}$  为顶点  $v_i$  与  $v_j$  之间边权值的最大值。

河网中任一顶点的水流通畅度  $D_i$  和水系结构连通度  $D_s$  计算公式为:

$$D_i = \sum_{j=1}^n f_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j \neq i) \quad (4)$$

$$D_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i \quad (5)$$

### 2.2.2 基于水文过程的水系水力连通评价

因西部圩区属平原河网区,其水位变化与河网纵向连通性显著相关,且各站点间水位联系密切<sup>[24-25]</sup>,故以站点间水位差来评估水力连通程度。水系水力连通性  $D_h$  计算公式为:

$$D_h = 1 / (|\Delta Z| + 1) \quad (6)$$

式中:  $\Delta Z$  为相邻站点的水位差。

### 2.2.3 水系连通综合评价

采用最小-最大归一化方法对上述两种连通性计算结果进行处理后,将两者加权求和得到综合水系连通性  $D$ :

$$D = w_1 D'_s + w_2 D'_h \quad (7)$$

式中:  $D'_s$ 、 $D'_h$  分别为水系结构连通性和水力连通性的归一化结果;  $w_1$ 、 $w_2$  为对应权重,其和为 1,由河道功能属性、区域防洪排涝的重要程度等决定。

## 2.3 水环境模拟方法

水文模型模拟降雨径流过程,并以边界条件的形式向水动力模型传递流量过程或水位过程;水动力模型模拟河道水流运动,并向水质模型传递水流流态等变化情况;水质模型模拟污染物扩散过程,实现水质指标的模拟<sup>[26]</sup>。因此,本文基于 SWAT 水文模型和 MIKE11 HD 模块、AD 模块构建水文与水动力水质模型,反映研究区水环境变化情况。

### 3 模型构建与验证

#### 3.1 模型构建

##### 3.1.1 水文模型构建

因研究区缺乏出口流量数据且属于非自然流域边界,故选取研究区所在的青弋江-水阳江流域下游为模拟范围构建 SWAT 水文模型(图 3)。输入建模所需的地形、土地利用、土壤、水文气象等数据,以当涂站为流域总出口,设定集水面积阈值为 350 km<sup>2</sup>,共划分 27 个子流域和 278 个水文响应单元,选择月和日两个时间尺度进行水文过程模拟。

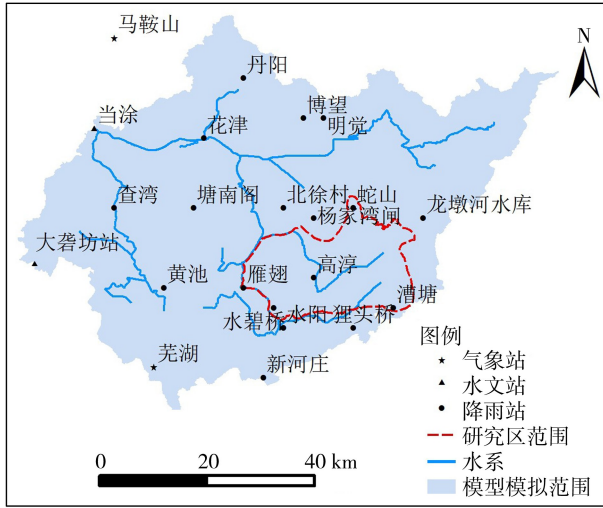


图 3 SWAT 模型模拟范围及站点分布

##### 3.1.2 水动力模型构建

采用 MIKE11 HD 模块对研究区水动力条件进行模拟。

**a. 河网及断面概化。**根据水系现状合理概化研究区河网,将固城湖分别以小湖区和大湖区进行河道概化(图 4)。将概化的水系矢量文件导入河网文件,并添加杨家湾闸、水碧桥闸、茅东闸、薛城大河闸与蛇山泵站。此外,根据相关规划及工程施工图概化相应河道断面。

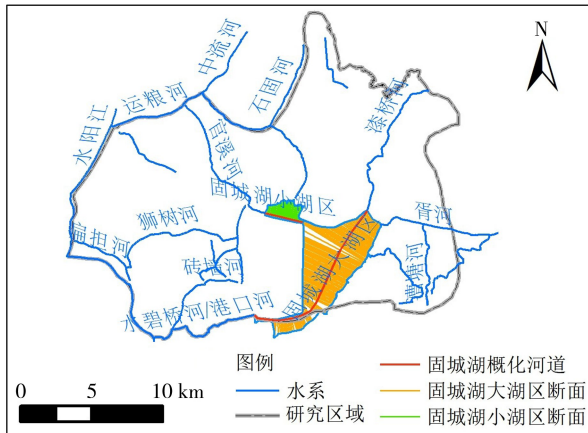


图 4 水系和湖泊概化结果

**b. 边界条件设置。**研究区边界主要包括水阳江上下游开边界,中流河、石固河入石臼湖开边界,漆桥河、漕塘西山河、漕塘河、漕塘东山河、狮树河上游开边界,胥河下游开边界,撑龙港河下游闭边界;其余均为点源汇流和分布源汇流边界。水阳江上游来水由新河庄站和信村站实测流量确定,石固河下游水位由蛇山站实测水位确定,水阳江、中流河、胥河下游出口设置为自由出流;其他河道上来水设置为 0,河道流量由降雨径流确定;各河道点源汇流和分布源汇流数据由其所在子流域降雨径流确定,通过 SWAT 模型模拟得到。

**c. 参数设置。**初始流量设置为 0;初始水位既不高于河底高程也不高于河堤高程;河道糙率结合研究区实际情况,通常在 0.025~0.04 之间,一般设置为 0.025。

##### 3.1.3 水质模型构建

采用 MIKE11 AD 模块对研究区水质变化过程进行模拟。

**a. 污染排放量计算。**参考《排放源统计调查产排污核算方法和系数手册》《南京市高淳区农村生活污水治理专项规划(2021—2025)公示》对研究区氨氮、总磷、总氮 3 种主要污染物排放量进行计算。参考相关研究<sup>[27-30]</sup>,采用产排污系数法核算面源污染排放量,计算范围包括种植业、禽兽养殖业、水产养殖业、农村生活污水和城镇生活污水,计算结果见表 3。

表 3 研究区面源污染排放量 单位:t

年份	氨氮	总磷	总氮
2017	572.87	115.09	1118.80
2018	601.68	112.94	1143.42
2019	644.41	113.40	1141.90

**b. 边界条件设置。**设置水质外部边界条件需给出所有组分的质量浓度,其中狮树河、水阳江、中流河、漆桥河、漕塘河、漕塘西山河和漕塘东山河的入口各组分质量浓度设为 0,水阳江入、出口分别采用 2017—2019 年水碧桥站和水阳江大桥站实测水质数据,石固河和胥河的出口分别采用 2017—2019 年蛇山站和河定大桥站实测水质数据。内部边界条件则输入表 3 数据。

**c. 参数设置。**河道初始质量浓度为实测水质质量浓度的平均值;扩散系数初步拟定为 5~20 m<sup>2</sup>/s 之间,然后通过模型率定确定;衰减系数结合水质实测数据进行率定。

### 3.2 模型率定与验证

#### 3.2.1 SWAT 模型

将当涂与大蓉坊的实测流量作为青弋江-水阳

江流域的出口流量,并根据模拟范围占该流域的面积比,计算获得模拟范围的出口流量。

以2010年为模型预热期,2011—2014年为率定期,2015—2019年为验证期。采用SWAT-CUP中的SUFI-2算法对模型参数进行敏感性分析,最终确定了一个最优模型参数取值。采用纳什效率系数(NSE)和决定系数( $R^2$ )评估模型的模拟精度,径流模拟结果见图5。表4显示率定期和验证期 $R^2$ 和NSE均在0.6以上,表明该模型可用于研究区水文模拟。

表4 SWAT模型径流模拟评价结果

模拟期	月流量		日流量	
	$R^2$	NSE	$R^2$	NSE
率定期	0.7574	0.7550	0.6491	0.6483
验证期	0.7364	0.7030	0.6847	0.6519

### 3.2.2 MIKE11 HD 模块

模拟期为2017年1月1日至2020年1月1日,时间步长为1h,对研究区水动力条件进行模拟。以2017—2019年高淳站水位、杨家湾闸上水位进行率定与验证,其评价结果见表5,水位模拟结果见图6,率定期和验证期 $R^2$ 和NSE均在0.6以上,

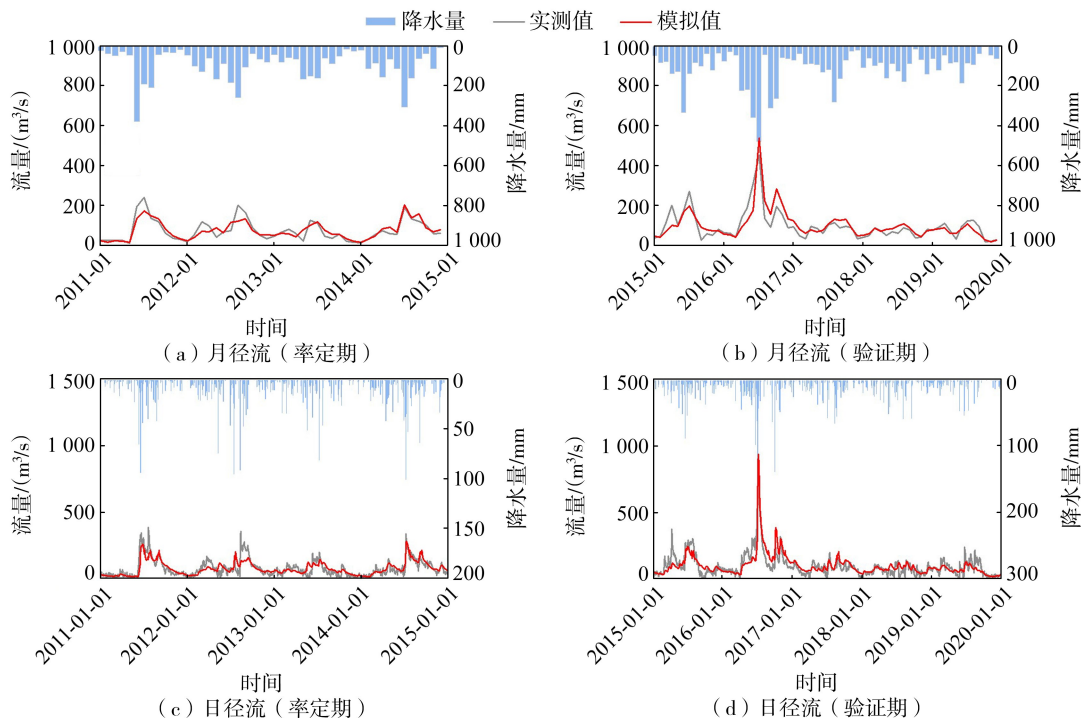


图5 不同尺度下率定期与验证期径流模拟结果

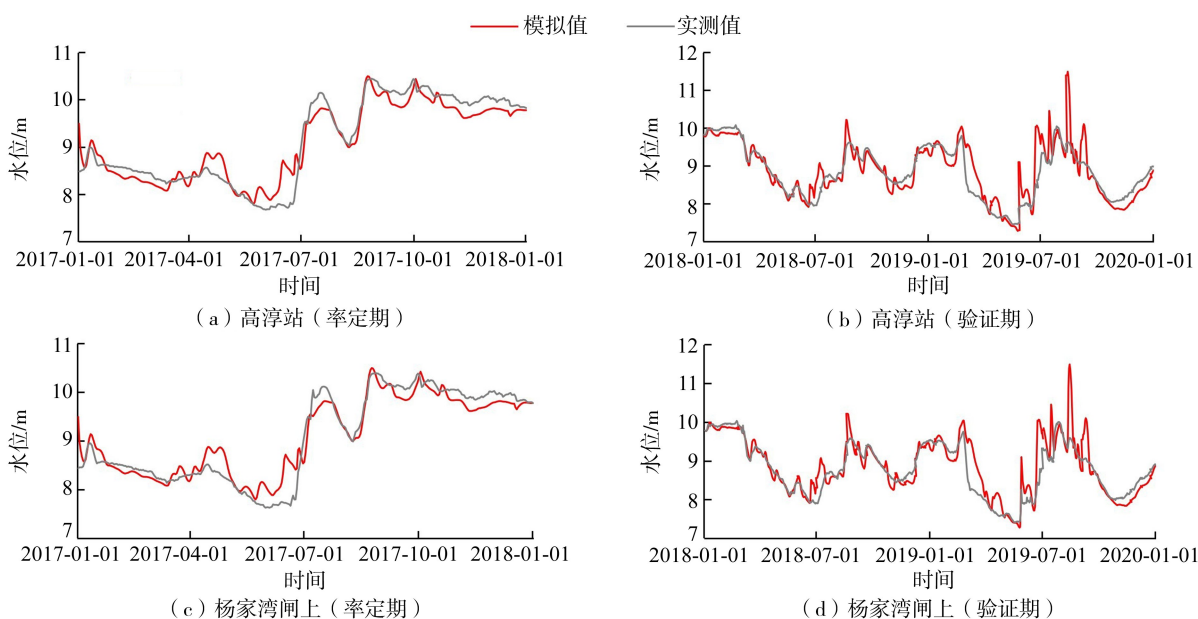


图6 一维水动力模型模拟与实测水位过程线

适用于研究区水动力条件模拟。

表5 一维水动力模型模拟评价结果

模拟期	高淳站水位		杨家湾闸上水位	
	R <sup>2</sup>	NSE	R <sup>2</sup>	NSE
率定期	0.9287	0.9152	0.9327	0.9191
验证期	0.7622	0.7208	0.7641	0.7119

### 3.2.3 MIKE11 AD 模块

选取部分实测水质断面对河道扩散系数和衰减系数进行率定,确定河道扩散系数为 14 m<sup>2</sup>/s,湖泊扩散系数为 8 m<sup>2</sup>/s,氨氮衰减系数为 0.01~0.38 d<sup>-1</sup>,总磷衰减系数为 0.01~0.60 d<sup>-1</sup>,总氮衰减系数为 0.01~0.30 d<sup>-1</sup>。研究区一维水质模型模拟评价结果见表6,超过40%的模拟值与实测值之间的相对误差小于30%,超过60%的模拟值与实测值之间的相对误差小于50%。代表断面污染物模拟值与实测值基本吻合,模型可用于研究区水质模拟,其中漆桥河模拟效果如图7所示。

表6 一维水质模型模拟评价结果

河道	相对误差小于30%的占比/%		相对误差小于50%的占比/%	
	率定值	验证值	率定值	验证值
漕塘河	33.33	49.28	61.11	62.32
官溪河	47.22	69.44	69.44	87.50
固城湖大湖区	30.56	36.11	52.78	61.11
固城湖小湖区	52.78	41.67	80.56	59.72
漆桥河	47.22	68.06	77.78	91.67
石固河	25.00	37.50	52.78	55.56
水碧桥河	44.44	26.39	63.89	44.44
胥河	30.56	26.39	41.67	55.56
中流河	44.44	36.11	69.44	58.33

## 4 结果与分析

### 4.1 不同连通方案的水质影响范围分析

以2017—2019年为模拟期,基于23条河道的23个水质代表点,评估不同水系连通方案对氨氮、总磷和总氮3种主要污染物的影响。为提升效率,通过分析相邻方案间污染物质量浓度变化率界定水质影响范围。若上一方案至下一方案的变化率大部分在-1%~1%之间,则判定该河道不受下一方案影响。

响。各方案水质影响范围如下:①方案1影响扁担河、漕塘东山河、漕塘河、漕塘西山河、官溪河、固城湖大湖区、固城湖小湖区、横溪河、茅城河、漆桥河、石固河、时家河、狮树河、水碧桥河、水阳江、唐家河、薛城大河、胥河、砖墙河;②方案2影响扁担河、漕塘东山河、漕塘河、漕塘西山河、撑龙港河、官溪河、固城湖大湖区、固城湖小湖区、横溪河、茅城河、漆桥河、石固河、时家河、狮树河、水碧桥河、唐家河、薛城大河、胥河、运粮河、中流河、砖墙河;③方案3影响扁担河、漕塘东山河、漕塘河、漕塘西山河、撑龙港河、固城湖大湖区、横溪河、茅城河、漆桥河、时家河、狮树河、水碧桥河、唐家河、薛城大河、胥河、砖墙河;④方案4对各河道无影响;⑤方案5影响固城湖大湖区、漆桥河。可见方案1~3影响多条河道,方案5影响范围仅限漆桥河和固城湖大湖区,而方案4影响水质效果不显著,因此后续分析予以剔除。

### 4.2 不同连通方案的水系连通性评价

研究区河道规模差异较大,一级河道行洪排涝功能的重要性高,参考相关研究成果<sup>[31-32]</sup>,取水系结构连通性权重为0.7、水力连通性权重为0.3,各方案的水系连通性计算结果如表7所示,水系连通性变化率如表8所示。在采取各种措施后,综合水系连通性由0.4674提升到0.4743,提升1.48%,增幅有限。方案1因狮树河与水阳江连通引发内河水位下降,水系连通性降低;方案2因打通断头萎缩的撑

表7 不同连通方案的水系连通性

指标	未连通	方案1	方案2	方案3	方案5
水系结构连通性	0.4414	0.4366	0.4398	0.4357	0.4573
水系水力连通性	0.5281	0.4721	0.4806	0.4509	0.5138
综合水系连通性	0.4674	0.4472	0.4520	0.4403	0.4743

表8 不同连通方案水系连通性变化率

指标	变化率/%			
	未连通与方案1	方案1与方案2	方案2与方案3	方案3与方案5
水系结构连通性	-1.09	0.73	-0.93	4.96
水系水力连通性	-10.60	1.80	-6.18	13.95
综合水系连通性	-4.32	1.07	-2.59	7.72

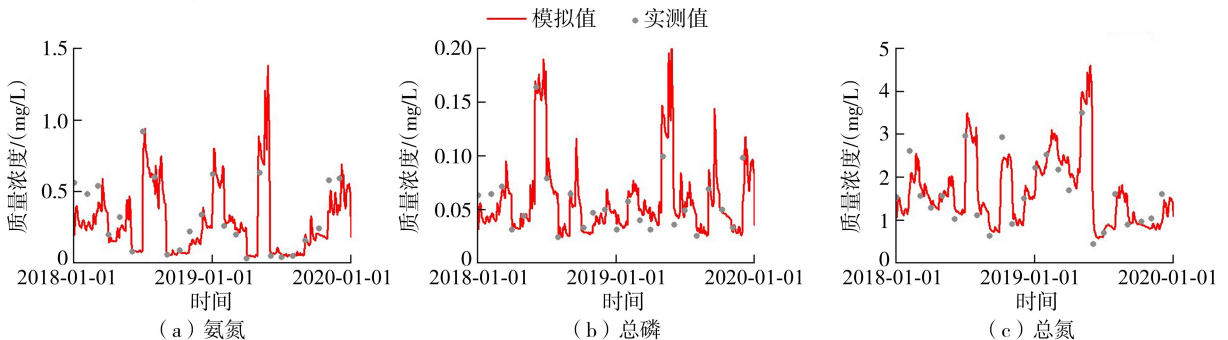


图7 漆桥河验证期污染物模拟值与实测值对比

龙港河,使其连通性更好且减小与官溪河的水位差,水系连通性小幅提升;方案3挖深河道导致采取连通措施的河道水位下降,水系连通性降低;方案5通过增加支流提升槽蓄容量,水系连通性得到提升。表8结果表明,各方案对水系水力连通性的影响程度大于水系结构连通性,这与方案实施后水位变化有关。

### 4.3 不同连通方案的水质变化特征

#### 4.3.1 时间变化特征

对2017—2019年23条河道在各连通方案下主要污染物的变化情况进行模拟,结果如图8所示。整体上,多数河道氨氮和总磷质量浓度呈年际下降趋势,总氮质量浓度多呈先降后升态势。不同连通方案的水质改善效果对比表明:

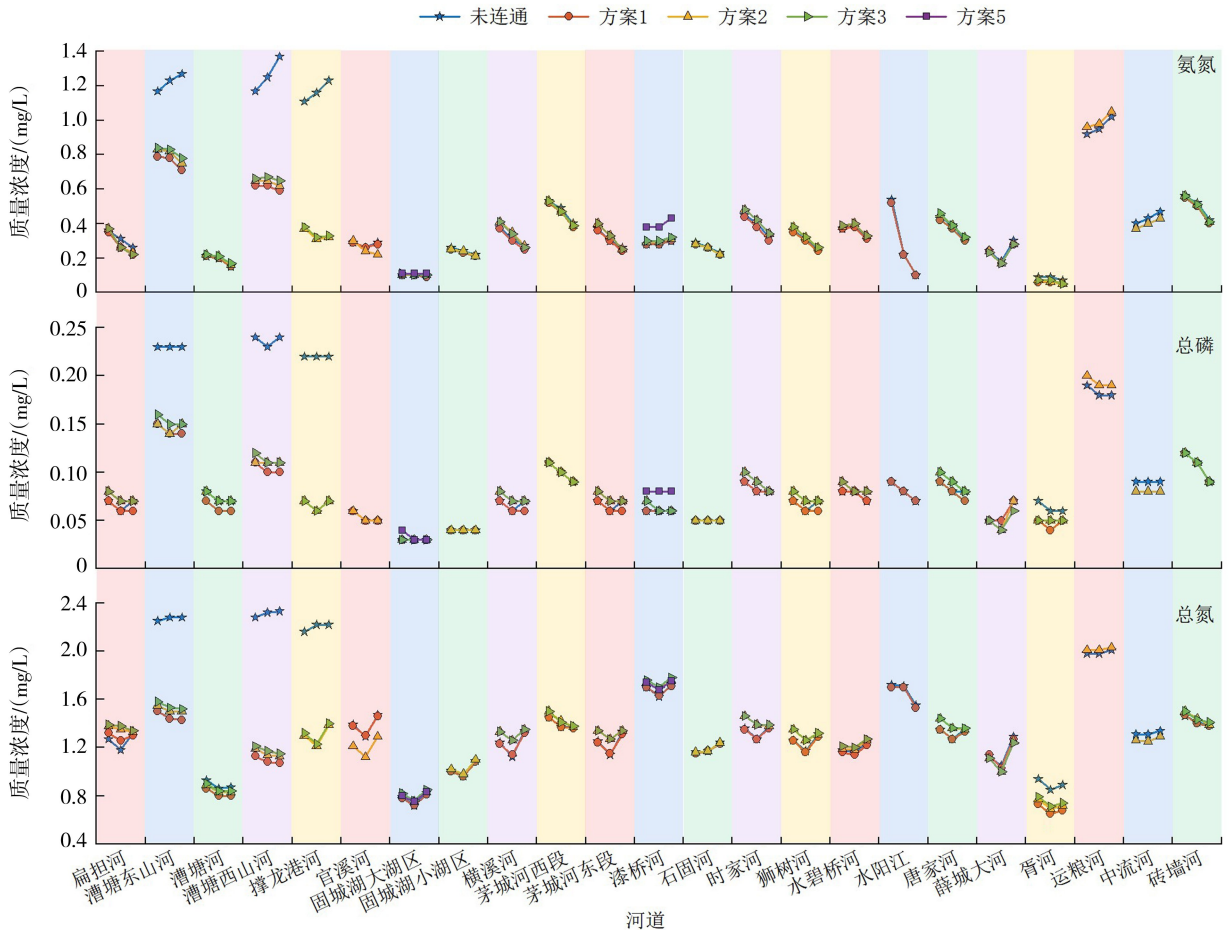
**a.** 方案1沟通漕塘河、漕塘西山河、漕塘东山河后,漕塘西山河和漕塘东山河水质显著改善,改善幅度呈逐年上升趋势,其中2017年、2018年、2019年漕塘西山河的氨氮质量浓度分别下降0.55、0.63、0.78 mg/L,总磷分别下降0.13、0.13、0.14 mg/L,总氮分别下降1.15、1.24、1.26 mg/L;胥河、漕塘河水质亦有所改善,表明节点连通可促进水体流动,加速污染物衰减。沟通扁担河与水阳江后,

一定程度上改善了狮树河、扁担河的水质,而水阳江水质无明显变化,表明在干流自净能力范围内,干支流沟通会改善支流水环境,且对干流水环境影响较小。

**b.** 方案2改善了撑龙港河、官溪河和中流河的水环境,以撑龙港河为最,2017年、2018年、2019年氨氮质量浓度分别下降0.74、0.85、0.91 mg/L,总磷分别下降0.15、0.16、0.15 mg/L,总氮分别下降0.86、1.01、0.83 mg/L。但扁担河、固城湖、横溪河、茅城河、漆桥河、时家河、狮树河、水碧桥河、唐家河和运粮河污染物质量浓度有轻微升高,可能是因为连通后超出局部水体自净能力的范围。

**c.** 方案3对河道水环境影响不显著。方案5增加漆桥河支流后,漆桥河和固城湖大湖区污染物质量浓度上升。与未采取连通措施相比,2019年漆桥河氨氮、总磷、总氮质量浓度分别升高0.13、0.02、0.03 mg/L,固城湖大湖区分别升高0.01、0、0.01 mg/L。此现象或源于污染物扩散速率低于水体流动速率。

基于上述显著影响,进一步开展河道水质年内变化分析。如图9所示,方案1显著改善了漕塘东



注:每段折线的3个数据点从左到右分别表示2017年、2018年、2019年的质量浓度。

图8 不同水系连通方案下各河道主要污染物质量浓度年际变化

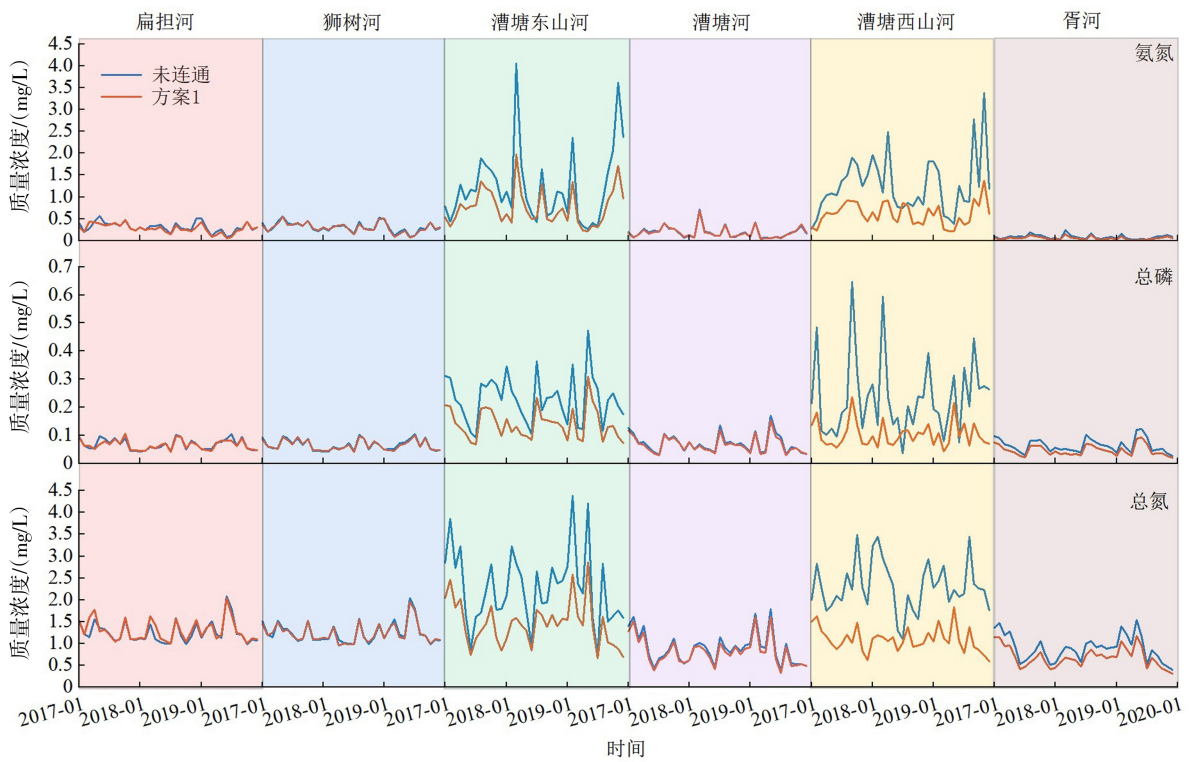


图9 方案1水质改善情况

山河和漕塘西山河水质,胥河污染物质量浓度也有所下降,但对扁担河、狮树河和漕塘河水质改善有限。以未连通状态下排行前五的漕塘东山河、漕塘西山河氨氮质量浓度峰值为例(表9),随着氨氮质量浓度峰值的降低,方案1改善效果也降低。结合图9变化趋势,表明方案1的削峰作用在污染物质量浓度较高的峰值处更明显。

表9 方案1对氨氮的削峰作用 单位:mg/L

河道	时间	未连通 质量浓度	方案1 质量浓度	质量浓度 削减量
漕塘东山河	2018-03	4.05	1.97	2.08
	2019-11	3.61	1.72	1.89
	2019-02	2.36	1.35	1.01
	2017-08	1.89	1.36	0.53
	2018-08	1.64	1.29	0.35
漕塘西山河	2019-11	3.39	1.37	2.02
	2019-09	2.79	0.96	1.83
	2018-04	2.48	0.92	1.56
漕塘西山河	2018-01	1.96	0.66	1.30
	2017-09	1.91	0.90	1.01

如图10所示,撑龙港河水环境明显改善,污染物质量浓度大幅降低,氨氮、总磷、总氮月最大降幅分别达4.51、0.39、2.43 mg/L,这与撑龙港河沟通后水流状态变好有关。因官溪河在方案2实施范围内,其水质改善效果优于中流河。中流河月污染物质量浓度均降低,但幅度不大,氨氮、总磷、总氮最大降幅分别为0.08、0.01、0.11 mg/L;官溪河月污染物质量浓度有时会高于未连通状态,就降低的情况而言,其氨氮、总磷、总氮最大降幅分别为0.35、0.04、

0.52 mg/L。相同月份数据对比,官溪河总氮降幅高于中流河总氮降幅的月份占85.29%,高出0.02~0.41 mg/L。

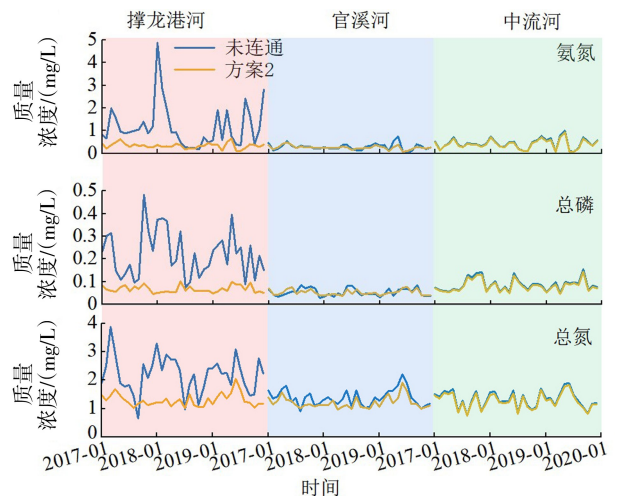


图10 方案2水质改善情况

由图11可见,漆桥河污染物质量浓度轻微上升,进而其下游固城湖大湖区出现水质波动。从年内变化来看,以2017—2019年各年6—9月的月均质量浓度平均值作为丰水期质量浓度,1—3、10—12月的月均质量浓度平均值作为枯水期质量浓度,计算漆桥河在未连通和方案5下的主要污染物质量浓度及其变化率,结果如表10所示。漆桥河丰水期污染物质量浓度变化率小于枯水期,表明丰水期恶化程度较低,进一步说明径流量大小对水质有较大影响。

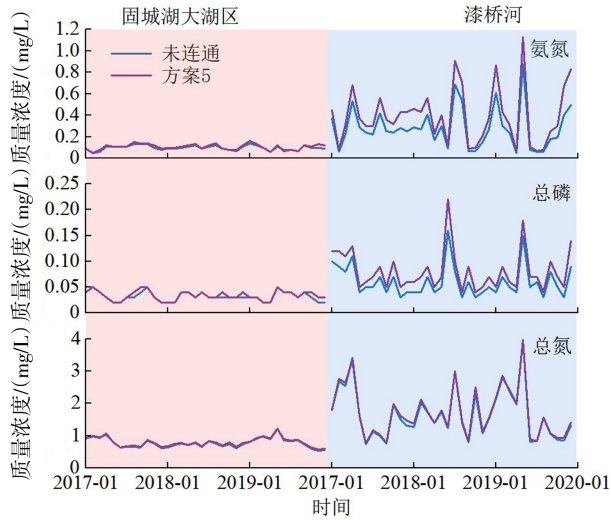


图 11 方案 5 水质改善情况

#### 4.3.2 空间变化特征

对 2017—2019 年各方案下主要污染物质量浓度求多年均值,结果如表 11 所示。

未采取连通措施前,研究区氨氮质量浓度变化范围为 0.08(胥河)~1.26 mg/L(漕塘西山河),总磷质量浓度为 0.03(固城湖大湖区)~0.24 mg/L(漕塘西山河),总氮质量浓度为 0.78(固城湖大湖

区)~2.31 mg/L(漕塘西山河),漕塘东山河、漕塘西山河、撑龙港河和运粮河的主要污染物质量浓度与其他河道相比较为高。主要污染物最大质量浓度均出现在漕塘西山河,最低质量浓度主要在固城湖大湖区,固城湖湖区的污染物质量浓度总体上小于河道。

采取各种连通措施后,除漕塘东山河、漕塘西山河、撑龙港河、漆桥河外,大部分河道的主要污染物质量浓度变幅不大。方案 1 显著改善了漕塘东山河和漕塘西山河水质,漕塘东山河氨氮、总磷、总氮质量浓度分别降低 0.46、0.09、0.81 mg/L,漕塘西山河分别降低 0.65、0.14、1.21 mg/L。方案 2 明显改善了撑龙港河水质,其氨氮、总磷和总氮质量浓度分别降低 0.84、0.15、0.90 mg/L。方案 5 使漆桥河氨氮、总磷和总氮质量浓度小幅升高,与未采取连通措施相比分别升高 0.11、0.02、0.04 mg/L。

## 5 结论

a. 各连通方案实施后,研究区综合水系连通性由 0.4674 提升至 0.4743,总体增幅有限。方案 1 因狮树河与水阳江连通引发内河水位下降,综合水系连通性降低 4.32%;方案 2 打通撑龙港河使其连

表 10 漆桥河主要污染物质量浓度及其变化率

水文期	氨氮质量浓度/(mg/L)			总磷质量浓度/(mg/L)			总氮质量浓度/(mg/L)		
	未连通	方案 5	变化率/%	未连通	方案 5	变化率/%	未连通	方案 5	变化率/%
丰水期	0.241	0.319	32.38	0.063	0.082	29.71	1.190	1.215	2.17
枯水期	0.285	0.420	47.54	0.056	0.077	38.91	1.786	1.854	3.81

表 11 各河道主要污染物质量浓度

单位:mg/L

河道	氨氮质量浓度				总磷质量浓度				总氮质量浓度			
	未连通	方案 1	方案 2	方案 5	未连通	方案 1	方案 2	方案 5	未连通	方案 1	方案 2	方案 5
扁担河	0.31	0.28	0.29	0.29	0.07	0.07	0.07	0.07	1.26	1.30	1.35	1.37
漕塘东山河	1.22	0.76	0.80	0.82	0.23	0.14	0.15	0.15	2.27	1.46	1.52	1.54
漕塘河	0.19	0.18	0.20	0.20	0.07	0.07	0.07	0.07	0.89	0.82	0.85	0.86
漕塘西山河	1.26	0.61	0.64	0.66	0.24	0.10	0.11	0.11	2.31	1.10	1.15	1.18
撑龙港河	1.17	1.17	0.33	0.35	0.22	0.22	0.07	0.07	2.20	2.20	1.30	1.32
官溪河	0.28	0.28	0.26	0.26	0.05	0.05	0.05	0.05	1.38	1.38	1.21	1.22
固城湖大湖区	0.10	0.10	0.10	0.11	0.03	0.03	0.03	0.03	0.78	0.77	0.80	0.79
固城湖小湖区	0.24	0.23	0.23	0.24	0.04	0.04	0.04	0.04	1.02	1.01	1.04	1.04
横溪河	0.32	0.31	0.34	0.34	0.07	0.06	0.07	0.07	1.23	1.23	1.31	1.31
茅城西段	0.47	0.46	0.46	0.47	0.10	0.10	0.10	0.10	1.40	1.39	1.43	1.43
茅城东段	0.31	0.30	0.33	0.33	0.07	0.06	0.07	0.07	1.24	1.24	1.32	1.32
漆桥河	0.29	0.29	0.30	0.40	0.06	0.06	0.06	0.08	1.68	1.68	1.73	1.72
石固河	0.26	0.25	0.25	0.26	0.05	0.05	0.05	0.05	1.19	1.18	1.19	1.19
时家河	0.39	0.38	0.42	0.41	0.08	0.08	0.09	0.09	1.34	1.33	1.41	1.41
狮树河	0.31	0.30	0.32	0.32	0.07	0.07	0.07	0.07	1.25	1.24	1.31	1.31
水碧桥河	0.36	0.35	0.37	0.38	0.08	0.08	0.08	0.08	1.19	1.17	1.21	1.22
水阳江	0.29	0.28	0.28	0.28	0.08	0.08	0.08	0.08	1.66	1.64	1.65	1.65
唐家河	0.38	0.36	0.39	0.39	0.08	0.08	0.09	0.09	1.32	1.32	1.39	1.39
薛城大河	0.24	0.23	0.23	0.23	0.06	0.05	0.05	0.05	1.16	1.14	1.12	1.12
胥河	0.08	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.89	0.69	0.73	0.75
运粮河	0.96	0.96	1.00	1.00	0.18	0.18	0.19	0.19	1.99	1.99	2.02	2.02
中流河	0.43	0.43	0.40	0.40	0.09	0.09	0.08	0.08	1.32	1.32	1.27	1.27
砖墙河	0.50	0.48	0.49	0.50	0.11	0.10	0.11	0.11	1.42	1.41	1.44	1.45

通性提高并减小与官溪河的水位差,连通性提升 1.07%;方案 3 清淤措施使相应河道水位下降,连通性降低 2.59%;方案 5 通过增加支流提升槽蓄容量,连通性提升 7.72%。

b. 连通情景 1 下,方案 1 显著改善漕塘西山河、漕塘东山河水质,其中漕塘西山河氨氮、总磷、总氮年均质量浓度分别降低 0.65、0.14、1.21 mg/L,表明河道沟通可加速污染物衰减,且在污染物质量浓度较高的峰值处,方案 1 的削峰作用更明显。方案 2 打通撑龙港河,使其污染物年均质量浓度分别降低 0.84、0.15、0.90 mg/L,但引发部分河道质量浓度升高,表明当超出水体自净能力范围时,河道沟通会污染原本水质较好的水体;同时,因官溪河在方案 2 实施范围内,其水质改善效果优于中流河。方案 3 挖深河道对水环境影响不显著。

c. 连通情景 2 下,方案 4 拓宽河道对水环境影响不显著。方案 5 增加支流导致漆桥河氨氮、总磷、总氮年均质量浓度分别上升 0.11、0.02、0.04 mg/L,进而对下游固城湖大湖区造成负面影响。此外,漆桥河丰水期污染物质量浓度变化率小于枯水期,表明丰水期恶化程度较低,进一步说明径流量大小对水质有较大影响。

#### 参考文献:

[ 1 ] 丁洋,赵进勇,张晶,等. 河湖水系生态连通工程技术体系构建[J]. 中国农村水利水电, 2022(4): 120-126. (Ding Yang, Zhao Jinyong, Zhang Jing, et al. Construction of engineering technology system for ecological connectivity of river and lake systems [J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(4): 120-126. (in Chinese))

[ 2 ] 刘丹,王烜,李春晖,等. 水文连通性对湖泊生态环境影响的研究进展[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(7): 1702-1715. (Liu Dan, Wang Xuan, Li Chunhui, et al. Eco-environmental effects of hydrological connectivity on lakes: a review [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(7): 1702-1715. (in Chinese))

[ 3 ] 黄草,陈叶华,李志威,等. 洞庭湖区水系格局及连通性优化[J]. 水科学进展, 2019, 30(5): 661-672. (Huang Cao, Chen Yehua, Li Zhiwei, et al. Optimization of water system pattern and connectivity in the Dongting Lake area [J]. Advances in Water Science, 2019, 30(5): 661-672. (in Chinese))

[ 4 ] 李原园,徐震,黄火键,等. 农村水系生态环境主要问题与对策浅析[J]. 中国水利, 2021(3): 13-16. (Li Yuanyuan, Xu Zhen, Huang Huojian, et al. Main eco-environmental problems and countermeasures of rural water system [J]. China Water Resources, 2021(3): 13-

16. (in Chinese))

[ 5 ] Ward J V. An expansive perspective of riverine landscapes: pattern and process across scales [J]. GAIA: Ecological Perspectives for Science and Society, 1997, 6(1): 52-60.

[ 6 ] Pringle C. What is hydrologic connectivity and why is it ecologically important? [J]. Hydrological Processes, 2003, 17(13): 2685-2689.

[ 7 ] Poole G C, Stanford J A, Running S W, et al. Multiscale geomorphic drivers of groundwater flow paths: subsurface hydrologic dynamics and hyporheic habitat diversity [J]. Journal of the North American Benthological Society, 2006, 25(2): 288-303.

[ 8 ] Harvey J, Gooseff M. River corridor science: hydrologic exchange and ecological consequences from bedforms to basins [J]. Water Resources Research, 2015, 51(9): 6893-6922.

[ 9 ] 陈森林,毛玉鑫,李丹,等. 基于逻辑规范的水系连通定义及分类[J]. 水科学进展, 2021, 32(6): 890-902. (Chen Senlin, Mao Yuxin, Li Dan, et al. Research on the definition and classification of interconnected water systems based on logic norms [J]. Advances in Water Science, 2021, 32(6): 890-902. (in Chinese))

[ 10 ] 张欧阳,熊文,丁洪亮. 长江流域水系连通特征及其影响因素分析[J]. 人民长江, 2010, 41(1): 1-5. (Zhang Ouyang, Xiong Wen, Ding Hongliang. Drainage connectivity characteristics and influential factors of Yangtze River Basin [J]. Yangtze River, 2010, 41(1): 1-5. (in Chinese))

[ 11 ] 李凯轩,李志威,胡旭跃,等. 洞庭湖区水系连通工程指标体系与评价方法[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(6): 6-10. (Li Kaixuan, Li Zhiwei, Hu Xuyue, et al. An index system and evaluation method for water network connection projects in Dongting Lake area [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(6): 6-10. (in Chinese))

[ 12 ] 柳恒,李志威,胡旭跃,等. 洞庭湖区典型水系连通工程优化分析[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(1): 91-96. (Liu Heng, Li Zhiwei, Hu Xuyue, et al. Connectivity analysis and optimization of typical river-lake connection projects in Dongting Lake area [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(1): 91-96. (in Chinese))

[ 13 ] 陆永军,赵雅慧,左利钦,等. 弱混合陆相河口三角洲水文连通性研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(5): 129-140. (Lu Yongjun, Zhao Yahui, Zuo Liqin, et al. Research progress on hydrological connectivity in weakly mixed land-dominated estuarine deltas [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(5): 129-140. (in Chinese))

[ 14 ] 胡亚伟,常东明,高子乐,等. 黄河下游引黄灌区水系连

- 通条件下水环境变化效应模拟[J]. 人民黄河, 2023, 45 (8): 1-5. (Hu Yawei, Chang Dongming, Gao Zile, et al. Simulation of variation effect of water environment under water system connectivity in Yellow River downstream irrigation area [J]. Yellow River, 2023, 45 (8): 1-5. (in Chinese))
- [15] 陈雪峰. 博斯腾湖北岸水系连通对大湖区水环境影响分析[J]. 水利技术监督, 2024 (1): 171-174. (Chen Xuefeng. Analysis of impact of north bank water system connection of Bosten Lake on water environment of the great lakes region [J]. Technical Supervision in Water Resources, 2024(1): 171-174. (in Chinese))
- [16] 徐芸蔚, 李一平, 赵海洲, 等. 水系连通改善入海闸控河流水质效果评估: 以练江流域为例[J]. 四川环境, 2023, 42 (1): 47-54. (Xu Yunwei, Li Yiping, Zhao Haizhou, et al. Evaluation of water system connection on improving water quality of river controlled by sea gate: a case study of river network in Lianjiang River [J]. Sichuan Environment, 2023, 42(1): 47-54. (in Chinese))
- [17] 封琼, 毕忠飞, 汪惠, 等. 宜兴新城区水系连通方案研究[J]. 水力发电, 2022, 48 (5): 15-21. (Feng Qiong, Bi Zhongfei, Wang Hui, et al. Study on the water system connection scheme of Yixing New Urban Area [J]. Water Power, 2022, 48(5): 15-21. (in Chinese))
- [18] 刘晋, 胡永辉, 刘夏. 多目标协同下水系连通调度模拟[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(6): 15-23. (Liu Jin, Hu Yonghui, Liu Xia. Simulation on water system connected dispatching under multi-object cooperation [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2022, 39 (6): 15-23. (in Chinese))
- [19] 冷湘梓, 蒋晓威, 叶懿安, 等. 基于格网 GIS 的流域水生态承载力评价研究: 以高淳西部圩区为例[J]. 江苏科技信息, 2023, 40 (11): 72-75. (Leng Xiangzi, Jiang Xiaowei, Ye Yian, et al. Evaluation of watershed water ecological carrying capacity based on grid GIS: taking the western polder area of Gaochun district as an example [J]. Jiangsu Science and Technology Information, 2023, 40(11): 72-75. (in Chinese))
- [20] 高玉琴, 刘云苹, 闫光辉, 等. 秦淮河流域水系结构及连通度变化分析[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40 (5): 32-39. (Gao Yuqin, Liu Yunping, Yan Guanghui, et al. Analysis on variation of water system structure and connectivity of Qinhuai River Basin [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40 (5): 32-39. (in Chinese))
- [21] Gao Yuqin, Liu Yunping, Lu Xiaohua, et al. Change of stream network connectivity and its impact on flood control [J]. Water Science and Engineering, 2020, 13 (4): 253-264.
- [22] 诸发文, 陆志华, 蔡梅, 等. 太湖流域平原河网区水系连通性评价[J]. 水利水运工程学报, 2017 (4): 52-58. (Zhu Fawen, Lu Zhihua, Cai Mei, et al. Evaluation of river network connectivity in plain area of Taihu Basin [J]. Hydro-Science and Engineering, 2017 (4): 52-58. (in Chinese))
- [23] 刘云苹. 水系连通性对区域洪涝灾害影响研究[D]. 南京: 河海大学, 2020.
- [24] Deng Xiaojun, Xu Youpeng, Han Longfei. Impacts of human activities on the structural and functional connectivity of a river network in the Taihu Plain [J]. Land Degradation & Development, 2018, 29 (8): 2575-2588.
- [25] Deng Xiaojun, Xu Youpeng, Han Longfei, et al. Spatial-temporal changes in the longitudinal functional connectivity of river systems in the Taihu Plain, China [J]. Journal of Hydrology, 2018, 566: 846-859.
- [26] 张婷, 徐彬鑫, 康爱卿, 等. 流域水文、水动力、水质模型联合应用研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41 (3): 11-19. (Zhang Ting, Xu Binxin, Kang Aiqing, et al. Advances in joint application of hydrology, hydrodynamics and water environment models in river basins [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(3): 11-19. (in Chinese))
- [27] 于鹏飞. 半干旱内陆河生态安全评估研究-以锡林河为例[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2021.
- [28] 刘李凌君. 黑龙江省水环境容量测算方法及应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [29] 李萍. 岷江大桥断面-岷江东青交界断面水环境容量研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- [30] 怀红燕, 冯爱萍, 朱南华诺娃. 基于 DPeRS 模型的上海地区面源污染评估[C]//中国环境科学学会 2022 年科学技术年会: 环境工程技术创新与应用分会场论文集(二). 南昌: 中国环境科学学会环境工程分会, 2022: 410-417.
- [31] 孟慧芳, 许有鹏, 徐光来, 等. 平原河网区河流连通性评价研究[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23 (5): 626-631. (Meng Huifang, Xu Youpeng, Xu Guanglai, et al. Study on rivers connectivity evaluation in plain river network area [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(5): 626-631. (in Chinese))
- [32] 周震. 巢湖流域水系连通性及其对水质的影响研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2017.

(收稿日期: 2025-03-07 编辑: 熊水斌)

# 明渠弯道几何形态对水动力特性的影响研究

李凯<sup>1</sup>, 曾诚<sup>2</sup>, 陈辰<sup>2</sup>, 王明辉<sup>1</sup>, 胡羽蝶<sup>3</sup>, 周婕<sup>4</sup>

(1. 宿迁市水务工程建设管理中心; 2. 河海大学水利水电学院; 3. 江苏省水文水资源勘测局无锡分局;  
4. 河海大学力学与工程科学学院)

**摘要:**为探究宽深比和径宽比对明渠弯道水动力特性的影响规律,建立了基于 RNG  $k-\varepsilon$  紊流模型和体积函数自由表面追踪技术的三维数值模型。通过对 4 种宽深比和 4 种径宽比工况下的弯道水流进行数值模拟,重点分析了水面形态、流速分布、断面环流及弯道分离流等水动力特征。结果表明:水流紊动特性随宽深比或径宽比的减小而增强;当上述比值降低时,流速重分布特性愈发显著,环流强度增强,弯道分离流发生的概率增大;针对本文模拟的小宽深比和小径宽比 U 形弯道,分离流临界条件是宽深比为 1.5、径宽比为 1.0。

**关键词:**明渠弯道水流;宽深比;径宽比;数值模拟

**Study on influence of geometric morphology of open-channel bends on hydrodynamic characteristics//Li Kai<sup>1</sup>, Zeng Cheng<sup>2</sup>, Chen Chen<sup>2</sup>, Wang Minghui<sup>1</sup>, Hu Yudie<sup>3</sup>, Zhou Jie<sup>4</sup> (1. Suqian Water Engineering Construction and Management Center; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University; 3. Wuxi Branch, Jiangsu Hydrology and Water Resources Survey Bureau; 4. College of Mechanics and Engineering Science, Hohai University)**

**Abstract:** To investigate the influence laws of the width-to-depth ratio and the radius-to-width ratio on the hydrodynamic characteristics of open-channel bends, this study established a three-dimensional numerical model based on the RNG  $k-\varepsilon$  turbulence model and the volume of fluid (VOF) free surface tracking method. Numerical simulations of bend flow under four width-to-depth ratios and four radius-to-width ratios were conducted, with a focus on analyzing hydrodynamic characteristics such as water surface profiles, velocity distribution, secondary flows, and bend separation flows. The results indicate that the flow turbulence characteristics intensify as the width-to-depth ratio or radius-to-width ratio decreases. With the reduction of these ratios, flow redistribution becomes increasingly significant, circulation strength strengthens, and the probability of flow separation in bends increases. For the U-shaped bends with small width-to-depth and radius-to-width ratios simulated in this study, the critical conditions for flow separation are identified as a width-to-depth ratio of 1.5 and a radius-to-width ratio of 1.0.

**Key words:** open-channel bend flow; width-depth ratio; radius-width ratio; numerical simulation

明渠水流进入弯道后,受弯道边壁约束及离心力作用,水流运动方向发生改变,导致水面形态和水流结构进行调整,形成了弯道水流特有的水动力特性。对明渠弯道水动力特性的研究,不仅有助于推动河道水动力学的发展,更能为河床演变研究和水利工程规划提供科学依据。前人对弯道水动力特性进行了大量研究<sup>[1-2]</sup>。在水面形态方面,罗索福斯基等<sup>[2]</sup>通过中心角为 180°的弯道水槽试验对自由水面形态进行了观测,并推导出了弯道横比降计算公式;卡拉乌舍夫<sup>[3]</sup>和张红武等<sup>[4]</sup>推导出了弯道沿程最大横比降公式;张红武等<sup>[4]</sup>基于浑水动床试验结果进一步发现,含沙量对水面横比降存在影响,横比

降随含沙量的增加而增大,但当含沙量增大至一定数值后,其影响程度逐渐减弱。Bridge 等<sup>[5]</sup>根据实际观测数据分析指出,水位升高或水流动量增大会导致横比降增大,且弯道处横比降呈现沿程变化的特征。在流速分布研究方面,张红武等<sup>[4]</sup>基于水槽试验结果发现,弯顶处的纵向流速垂线分布与指数型流速分布公式吻合较好,该公式在光滑和粗糙壁面条件下均与实测资料相符,且不受卡门常数影响。De Vriend<sup>[6]</sup>的研究表明,环流引起的横向动量变动会导致主流速分布变形,基于主流和次流相似性假定,其建立了概化弯道紊流数学模型,该模型对浅水和轻度弯曲河道的模拟效果较为理想。在断面环流

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3202605)

作者简介:李凯(1980—),男,高级工程师,主要从事水利工程建设和运行管理工作。E-mail:ripple9902@126.com

通信作者:曾诚(1981—),男,副教授,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:czeng@hhu.edu.cn

研究方面,波达波夫<sup>[7]</sup>和卡拉乌舍夫<sup>[3]</sup>分别依据纵向流速的抛物线型和椭圆型分布规律,推导出了不同的环流垂向分布公式;Kalkwijk 等<sup>[8]</sup>在推导弯道环流流速分布公式时考虑了离心力的影响,并基于对数型纵向流速分布公式推导出了垂向流速分布;孙东坡<sup>[9]</sup>采用指数型纵向流速分布,推导了环流流速分布公式;张耀先等<sup>[10]</sup>利用指数型分布公式,对弯道水流的横向流动和泥沙输运特性进行了研究。在弯道分离流研究方面,罗索福斯基等<sup>[2]</sup>认为径宽比为 1 时会出现分离流,但在水深较小和边壁变陡的情况下可能不出现分离流;Leeder 等<sup>[11]</sup>通过对比试验发现,分离流的发生与水流强度密切相关。在理论研究方面,刘焕芳<sup>[12]</sup>依据流速公式分析指出,径宽比越小,水流强度越大;河床糙率增加易导致水流发生分离;随着径宽比或宽深比的减小,水流出现分离的可能性增大。

国内外很多学者针对特定宽深比和径宽比条件下的弯道水流特性开展了大量研究。例如:Blanckaert<sup>[13-14]</sup>在径宽比为 1.31 和 1.46 的 193°弯道上进行了试验研究,选取了 5 组大宽深比(12.1、9.2、8.2、7.2、6.1)工况,分析了凹、凸岸边界层水流分离对主流区的影响,研究结果表明,当弯道弯曲程度达到某一临界数值时,环流强度不再增加,据此提出了“二次流饱和”的概念;Van Balen 等<sup>[15]</sup>对径宽比为 1.3,宽深比为 12、8.2 和 6.3 的弯道水流特性进行了分析,探讨了宽深比对弯道环流结构的影响;Wang 等<sup>[16]</sup>针对径宽比为 2.2 的 180°弯道水槽,研究了 9 种小宽深比(1.4~2.6)条件下的水流特性,发现床面变形对自由水面和次生环流具有显著影响;Moncho-Esteve 等<sup>[17]</sup>对宽深比在 8.5~17.0 之间的正弦派生连续弯道进行了数值模拟,分析了不同水力要素对天然连续弯道的影响;Yan 等<sup>[18]</sup>通过水槽试验和数值模拟相结合的方法,对径宽比为 1.5 的 135°弯道进行了研究,通过对比 5 种不同紊流模型的计算结果,发现 RNG  $k-\varepsilon$  模型对弯道水流模拟效果较好,并进一步对比分析了不同宽深比和断面形状对水流特性的影响。

目前针对特定宽深比或径宽比条件下的弯道水流已有很多研究,但尚缺乏针对不同宽深比或径宽比条件下弯道水动力特性的系统研究。本文采用数值模拟研究方法,对 4 种宽深比(1.0、1.5、2.0、2.5)和 4 种径宽比(0.75、1.0、1.5、2.0)条件下的弯道水流进行模拟研究,分析了弯道几何形态与水流结构之间的相关性,总结了弯道几何形态对水动力特性的影响规律。

## 1 数值模型

### 1.1 控制方程与数值方法

明渠弯道水流的模拟应满足的质量守恒与动量守恒方程分别为:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j} \right) + g_i \quad (2)$$

式中:  $x_i$ 、 $x_j$  为笛卡尔坐标系坐标( $i, j=1, 2, 3$ );  $u_i$ 、 $u_j$  分别为  $i, j$  方向的时均流速;  $t$  为时间;  $\rho$  为流体密度;  $p$  为压强;  $\nu$  为运动黏性系数;  $\overline{u'_i u'_j}$  为雷诺应力脉动项;  $g_i$  为重力加速度在  $x_i$  方向的分量。

本文采用 RNG  $k-\varepsilon$  模型封闭控制方程,并利用体积函数(VOF)法捕捉自由液面。RNG  $k-\varepsilon$  模型和 VOF 法的详细算法实现及理论基础可参考文献[19]。在数值求解过程中,采用 SIMPLE (semi-implicit method for pressure linked equations) 算法实现速度与压力的解耦,其他各项的离散选用 QUICK (quadratic upstream interpolation for convective kinematics) 格式。边界条件设置如下:入口边界分为水相和气相,其中水相设置为速度进口,气相设置为压力进口;出口边界采用压力出口条件,满足静压假定,出口水位与水槽试验实测值保持一致,且压力分布符合静水压强规律;进出口边界处的紊动能与耗散率均按照经验公式的计算结果初始化;壁面设定为固壁边界。

### 1.2 模型建立与验证

本文以 Shukry<sup>[20]</sup>的矩形水槽弯道试验为基础,开展数值模拟研究。该物理模型为 U 形弯道,上下游直段长度均为 1.07 m,弯段内径为 0.15 m,外径为 0.45 m,水槽宽  $B=0.3$  m,高为 0.5 m,底坡为平坡且高程为 0。为保证进口段水流充分发展,数值计算中将上游直段延长至水槽宽的 12 倍(3.6 m),计算模型高度为 0.45 m,其余参数设置与物理模型保持一致,计算模型平面示意图如图 1 所示。模型验证的工况设置参照水槽试验:进口流量为  $0.072 \text{ m}^3/\text{s}$ ,流速为  $0.8 \text{ m/s}$ ,进口水深  $H_0=0.3$  m,下游出口处水位  $H_1=0.28$  m。

采用六面体网格对计算区域进行剖分,并在近壁区域及自由水面附近进行了局部加密,计算网格如图 2 所示。基于网格无关性分析,最终确定的网格方案包含 296 348 个网格单元。

明渠弯道水流形态复杂,为确保数值模型能够

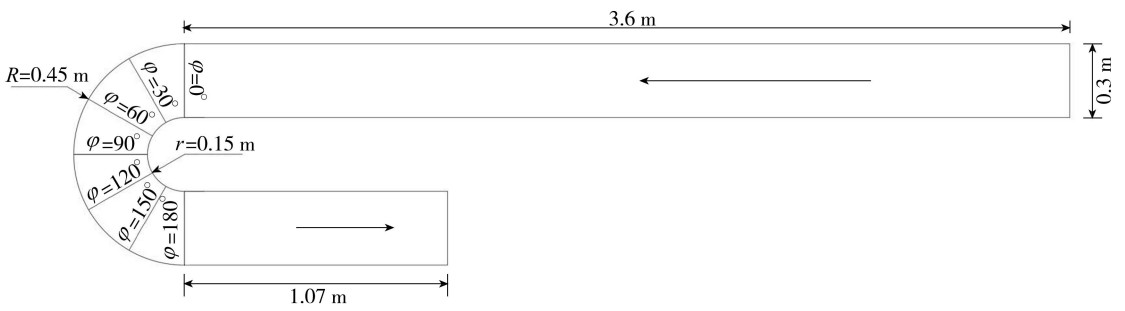


图1 计算模型平面示意图

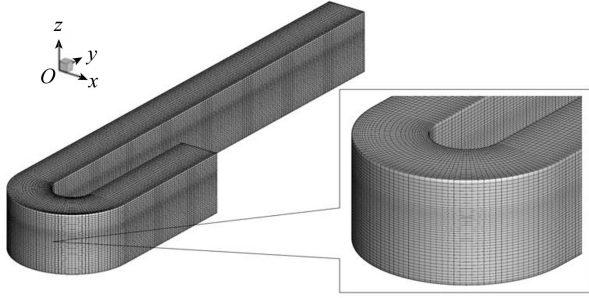


图2 三维网格示意图

准确模拟弯道水力特性,须对数学模型进行验证。本文将数值模拟计算结果与水槽试验实测数据<sup>[20]</sup>进行对比,分别从典型断面水位分布、沿水深方向的纵向流速分布以及弯道沿程流速分布3个方面,验证了数值模拟结果的可靠性。图3为入弯断面(中心角 $\varphi=0^\circ$ )、弯顶断面( $\varphi=90^\circ$ )和出弯断面( $\varphi=180^\circ$ )3个典型断面的水位 $H$ 验证结果。图4为弯顶及出弯断面上纵向流速分布的验证结果,验证位置选取了距凹岸边壁 $0.25B$ 、 $0.50B$ 和 $0.75B$ 处的

3条垂线,其中图4(a)~(c)为弯顶断面,图4(d)~(f)为出弯断面。图5为弯道沿程垂向平均流速等值线。由图3~5可见,数值模拟计算结果与试验测量值吻合较好,准确反映了弯道水流的水动力特征。

## 2 模拟结果与分析

### 2.1 数值模拟工况

在明渠弯道水流数值模型验证的基础上,本文选取4组宽深比( $H_r=B/H_0=1.0、1.5、2.0、2.5$ )和4组径宽比( $R_r=R_c/B=0.75、1.0、1.5、2.0$ , $R_c$ 为弯道曲率半径)工况,开展了三维数值模拟研究,各工况的计算参数详见表1。计算区域设置与验证模型保持一致:弯道进口直段长3.60 m,出口直段长1.07 m,水槽宽 $B=0.3$  m,进口流速 $u_0=0.8$  m/s。在针对不同宽深比的工况中,仅调整进口水深 $H_0$ 和出口水深 $H_1$ ;在针对不同径宽比的工况中,仅调整弯道曲率半径 $R_c$ 。计算网格划分均采用六面体网

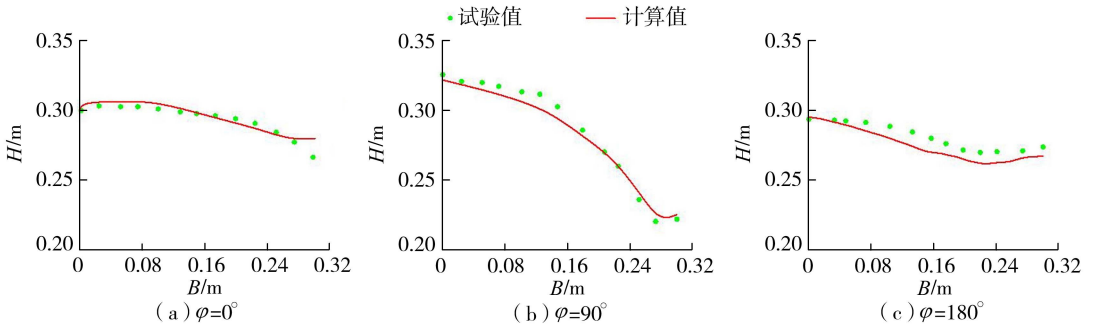


图3 典型断面水位分布

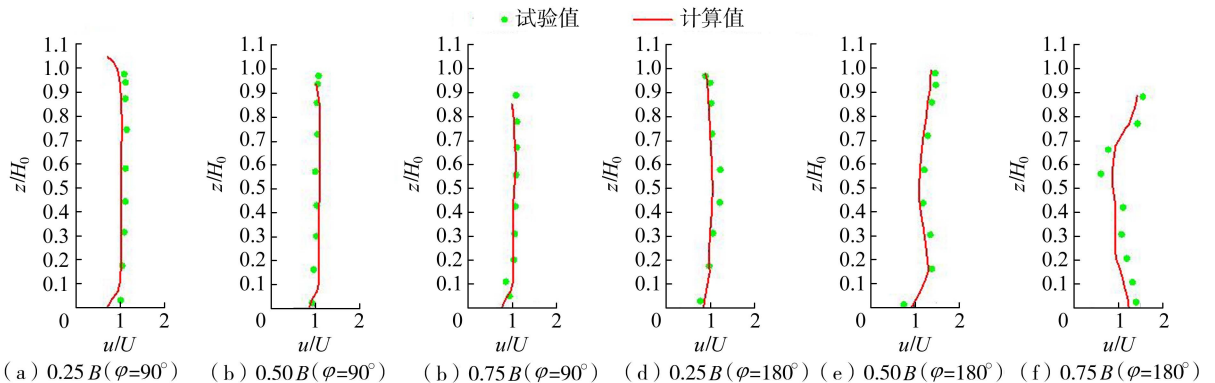
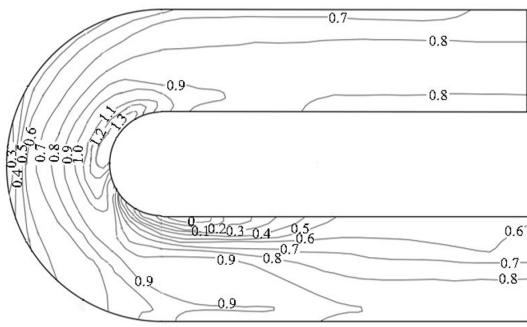
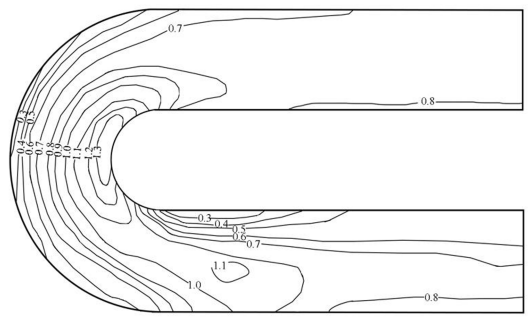


图4 断面纵向流速分布



(a) 试验测量结果



(b) 模型计算结果

图5 弯道沿程垂向平均流速分布(单位:m/s)

格,不同工况下的网格数量控制在 25 万~33 万之间。

表1 不同宽深比和径宽比工况计算参数

工况	$H_r$	$R_r$	$H_0/m$	$H_1/m$	$R_c/m$
1	1.0	1.0	0.30	0.28	0.30
2	1.5	1.0	0.20	0.187	0.30
3	2.0	1.0	0.15	0.14	0.30
4	2.5	1.0	0.12	0.112	0.30
5	1.0	0.75	0.30	0.28	0.225
6	1.0	1.5	0.30	0.28	0.45
7	1.0	2.0	0.30	0.28	0.60

## 2.2 水面形态

水流流经弯道做曲线运动,导致水面形态发生相应改变。不同宽深比工况下弯道水位沿程分布情况如图6所示,其中 $Z^* = H/H_0$ 。由图6可知,宽深比对中心线和凸岸侧水位分布影响显著,尤以凸岸侧最为突出,而对凹岸侧水位分布的影响则相对有限。在 $\varphi$ 由 $0^\circ$ 增至 $150^\circ$ 的范围内,随着宽深比的增大,水位下降程度加剧;而当 $\varphi$ 由 $150^\circ$ 增至 $180^\circ$ 时,不同宽深比工况下的水位下降速率差异较小。当宽

深比由1.0增大至2.5时,弯道水位纵向下降率从20%上升至40%,同时水面形态的变化也更为剧烈。

图7为不同径宽比工况下弯道水位的沿程分布情况。由图7可知,径宽比对凹岸侧和中心线水位分布的影响微弱,其主要影响集中在凸岸侧。在 $R_r = 1.5$ 和 $R_r = 2.0$ 工况下,水位沿程变化较小;然而当 $R_r$ 减小至0.75时,凸岸侧水位下降率达到30%。这表明,当 $R_r \geq 1.5$ 时,弯道水面纵比降较小,甚至可忽略不计;随着径宽比的不断减小,水面纵比降逐渐增大。

综合图3、图6及图7可知,弯道横断面存在明显的沿凹岸向凸岸的水位下降现象。为深入分析横断面水位分布特征,选取 $\varphi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ$ 共7个典型断面,结合水位的计算结果,探讨宽深比和径宽比对弯道横比降的影响。图8和图9分别展示了不同宽深比和径宽比工况下横断面水位分布计算结果。图中, $B^*$ 为相对于弯道宽度 $B$ 的无量纲径向距离, $B^* = 0$ 代表凹岸边壁, $B^* = 1$ 代表凸岸边壁。

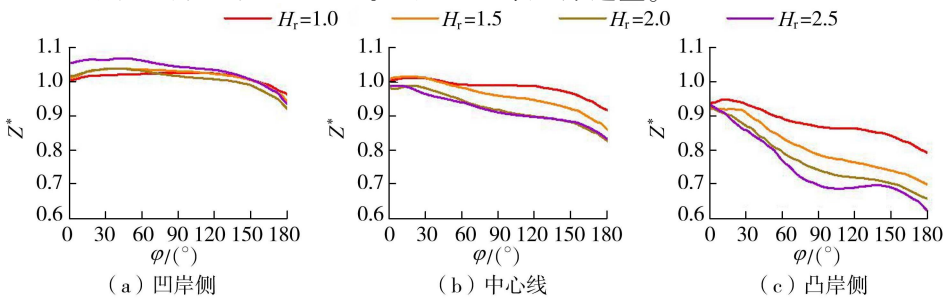


图6 不同宽深比工况下水位沿程分布

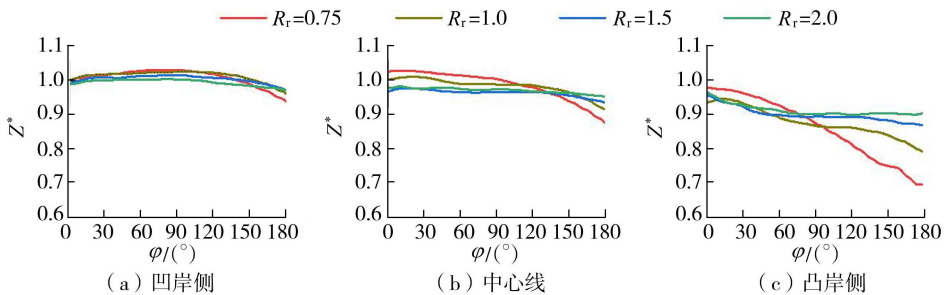


图7 不同径宽比工况下水位沿程分布

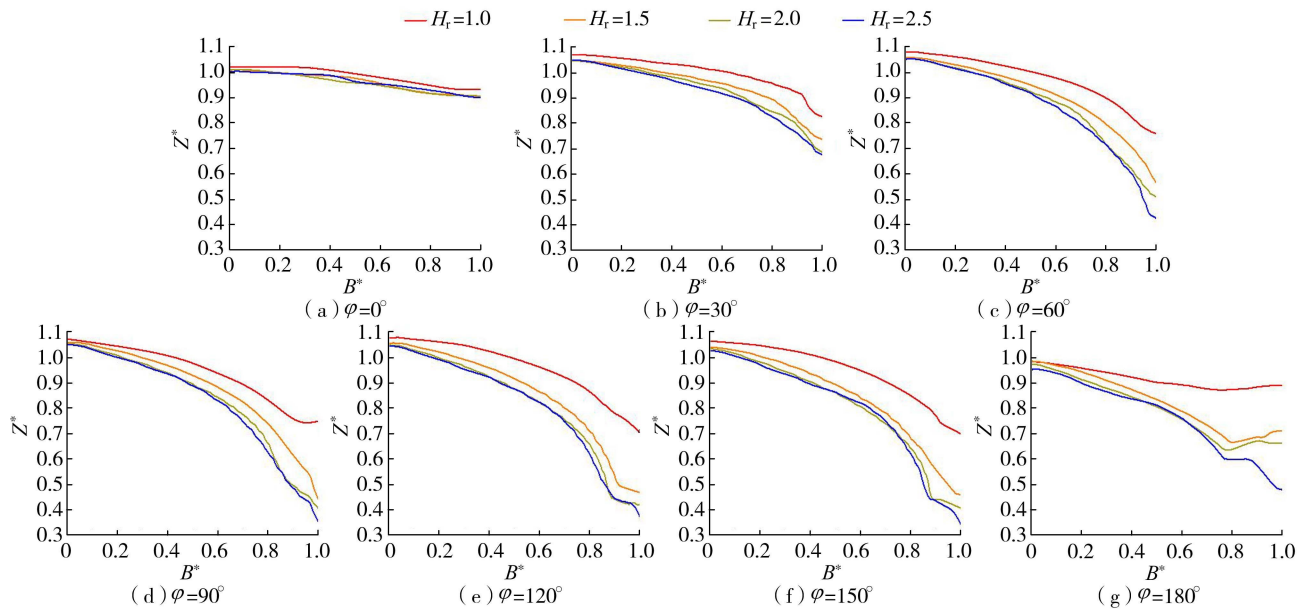


图8 不同宽深比工况下典型断面水位分布

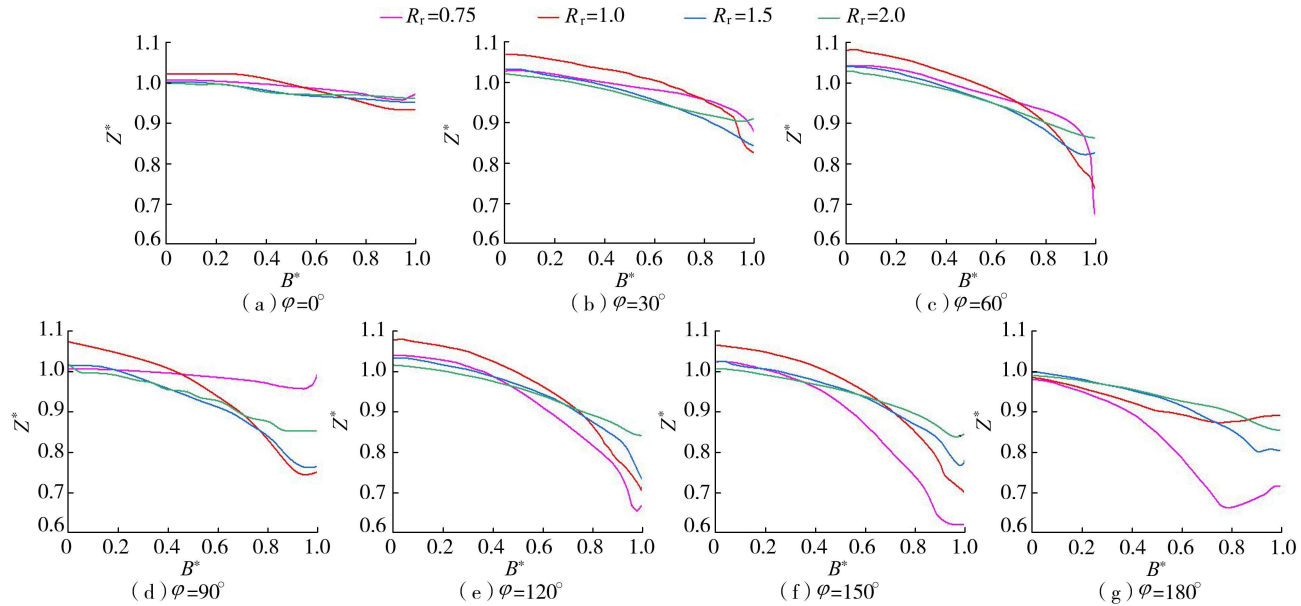


图9 不同径宽比工况下典型断面水位分布

由图8可知,在不同宽深比工况下,弯道凹岸侧的水位差较小,且越靠近凸岸,水位差越大。保持宽深比不变,当 $\varphi$ 从 $0^\circ$ 增至 $90^\circ$ 时,断面水位降幅增大;当 $\varphi$ 由 $90^\circ$ 增至 $150^\circ$ 时,水位降幅变化趋缓;当 $\varphi$ 由 $150^\circ$ 增至 $180^\circ$ 时,水位降幅有所减小。在同一横断面上,水位降幅随着宽深比的增大而增大。对比发现,宽深比由1.0增大至1.5对水位横向分布的影响,明显大于由2.0增大至2.5的影响。在4组宽深比工况中,断面横比降均在 $\varphi = 150^\circ$ 时达到峰值;当宽深比分别为1.0和2.5时,凸岸侧水位相较于凹岸侧分别降低了38.10%和68.28%。同一断面上,横比降随宽深比的增大而增大,且不同宽深比工况下断面横比降的沿程变化幅度差异较小。

由图9可知,断面横比降随径宽比的减小而增

大。具体而言,当径宽比为1.5和2.0时,最大横比降出现在 $\varphi = 120^\circ$ 断面;当径宽比为1.0时,最大横比降出现在 $\varphi = 150^\circ$ 断面;而当径宽比为0.75时,最大横比降出现在 $\varphi = 180^\circ$ 断面。这表明,随着径宽比的减小,最大横比降的出现位置逐渐向弯道出口滞后。此外,随着径宽比的增大,断面横比降的沿程分布趋于更加均匀。

综合分析不同宽深比和径宽比条件下弯道水位的纵向和横向分布可知,宽深比和径宽比对水面形态的影响在凸岸附近最为显著,水面纵比降和横比降均随宽深比的增大或径宽比的减小而增大。水流进入弯段后,水面横比降持续增大,在达到峰值后逐渐减小。本研究模拟的4组宽深比工况中,最大横比降均出现在 $\varphi = 150^\circ$ 断面,相较于宽深比,径宽比

对断面横比降沿程变化幅度的影响更为显著,且最大横比降的出现位置随径宽比的减小而向下游后移。

### 2.3 流速分布

流速重分布现象是弯道水流区别于顺直河道流速分布的特征表现。为深入分析弯段水流沿程纵向流速的分布规律,选取了底层( $Z^* = 0.3$ )、中间层( $Z^* = 0.5$ )和上层( $Z^* = 0.7$ )3个水平切面,对不同径宽比工况下的流速分布进行对比,各工况的纵向流速云图如图10所示。由图10可知,在 $Z^* = 0.3$ 处,最大纵向流速位于弯段进口附近的凸岸侧,随着 $Z^*$ 的增大,最大纵向流速的位置逐渐向凹岸侧及弯段出口方向偏移,且这种偏移现象随着径宽比的减小而愈发显著。当 $Z^*$ 一定时,断面纵向流速最大值随径宽比的减小而增大,同时纵向流速在纵向和横向上的分布也变得愈发不均匀。特别地,当径宽比为0.75和1.0时,出弯断面凸岸侧出现了纵向流速负值。综上所述,纵向流速重分布表现为:水流入弯后,纵向流速最大值起始于凸岸侧,随即逐渐向凹岸侧转移;最大流速出现位置沿垂向呈上移趋势;径宽比越大,流速分布越均匀。

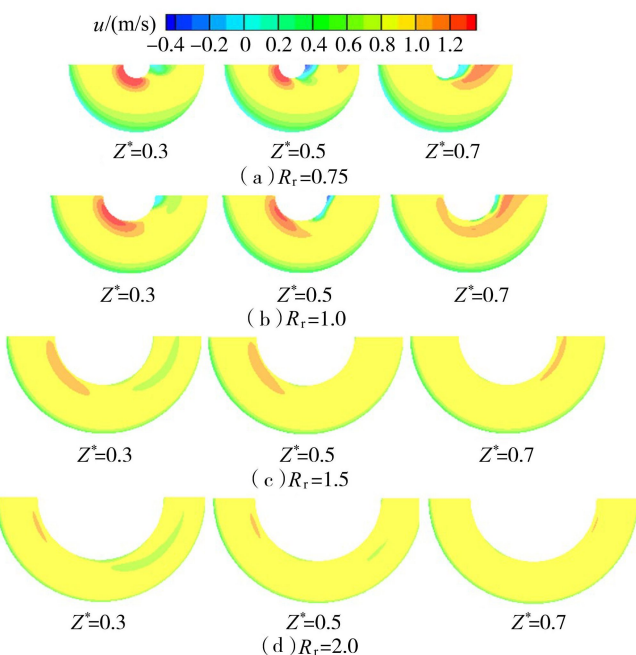


图10 不同径宽比工况下纵向流速分布

不同径宽比工况下的横向流速分布如图11所示,以凹岸指向凸岸方向为正。由图11可知,同一工况各水平面横向流速分布存在显著差异,且该差异随径宽比的减小而增大。具体而言,随着 $Z^*$ 增大,横向流速负值区逐渐由弯段下部的近凸岸侧向上游发展,其范围逐渐缩小,横向流速在纵向和横向上的分布趋于均匀。在同一水平面处,不同径宽比工况下的横向流速分布规律近似,但随着径宽比的

增大,流速分布逐渐均匀化,负值区范围减小。在横向上,弯道凹岸侧的横向流速沿程分布较为均匀,越靠近凸岸,横向流速分布的不均匀性越强。此外,随着 $Z^*$ 增大,横向流速极大值点的位置由弯道进口的凸岸侧向弯顶附近的凸岸侧偏移。相较于正值区,各水平面的流速负值区较大,表明横向流速主要指向弯道凹岸,凹岸受冲刷作用显著。综上所述,横向流速的重分布表现为:随着 $Z^*$ 增大,横向流速在纵向和横向上的分布更加均匀,负值区由弯段下部的近凸岸侧向上游迁移;随着径宽比减小,边壁对水流的作用增强,水流受挤压程度加剧,导致横向流速在纵向和横向上的分布差异增大,水流紊动特性增强。

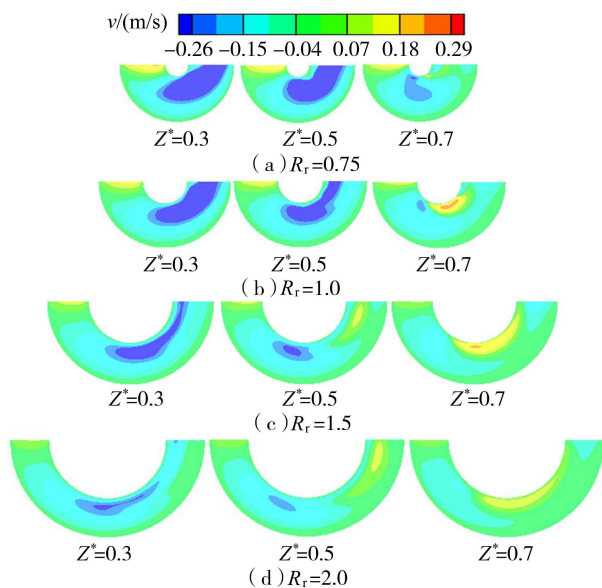


图11 不同径宽比工况下横向流速分布

### 2.4 断面环流

在弯道水流研究中,许多学者发现陡峭的边壁条件会促使弯道断面出现主体环流以及与其流向相反的次生环流<sup>[16,21-22]</sup>。图12展示了不同宽深比工况下的断面环流结构。由图12可见,环流在入弯断面( $\varphi = 0^\circ$ )尚未形成,随着水流在弯道内行进,各断面逐渐出现主体环流与次生环流共存的形态。其中,主体环流呈逆时针方向流动,且其中心位置随 $\varphi$ 的增大而逐渐向凸岸偏移,导致凸岸侧环流强度持续增加,断面整体环流强度也随之变化。次生环流主要位于上层水体,其强度随主体环流的增强而增大,且中心位置由凹岸不断向凸岸迁移。此外,在同一断面位置,宽深比的差异对断面环流强度具有显著影响。

图13为不同径宽比工况下的断面环流结构。与不同宽深比的计算结果类似,环流在入弯断面( $\varphi = 0^\circ$ )尚未形成,随着 $\varphi$ 值的增大,断面内逐渐出现主体环流和次生环流。在同一断面上,随着径宽

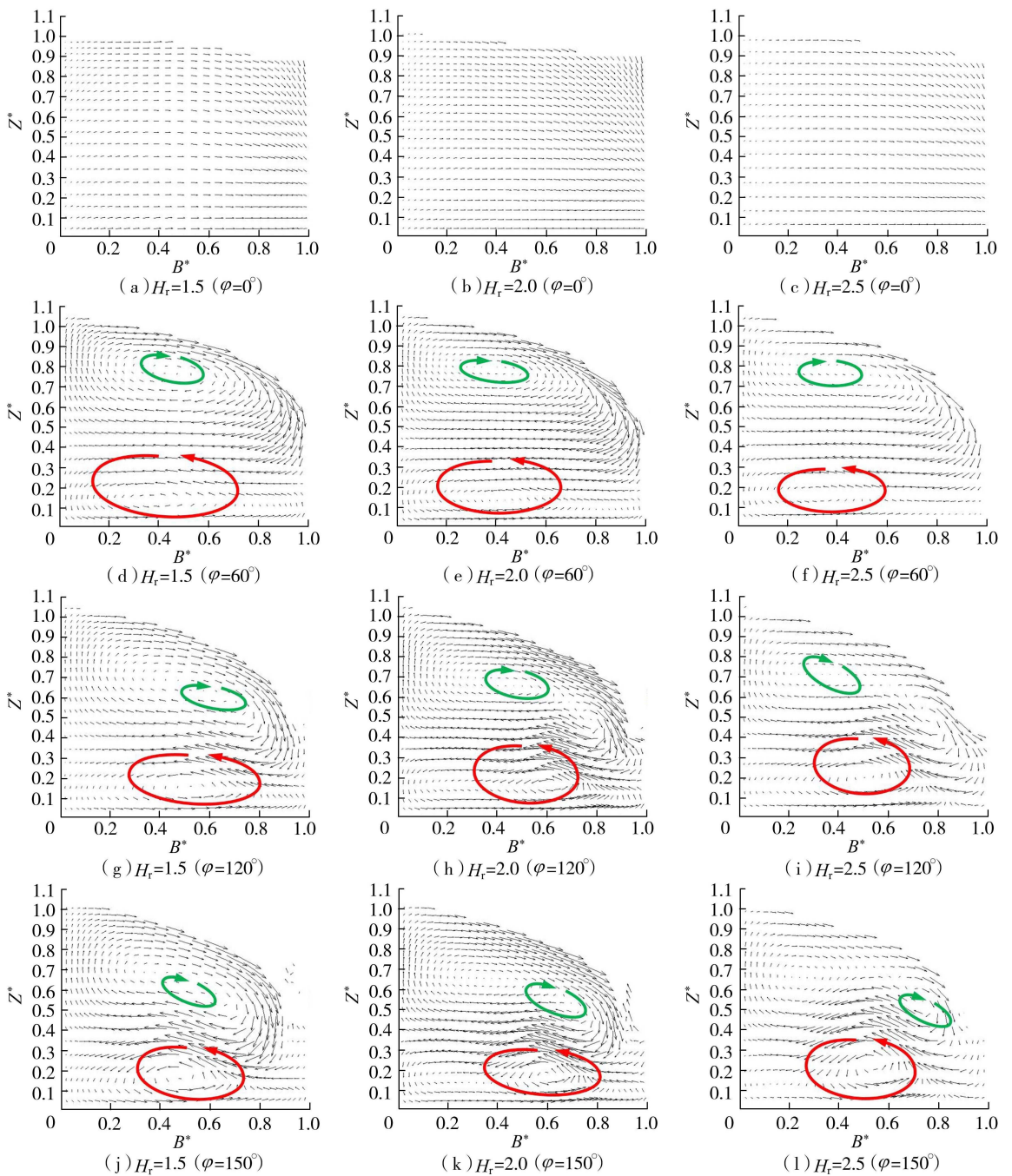


图 12 不同宽深比工况下断面环流结构(红色箭头为主体环流,绿色箭头为次生环流)

比的增大,主体环流和次生环流中心逐渐向凸岸偏移,环流强度也随之改变。总体来看,环流结构随水流发展沿程变化,中心位置持续向凸岸移动,次生环流随着主体环流的变化发生同向变化。对比分析表明,宽深比和径宽比对弯道环流结构的影响趋势一致,即弯道环流中心位置及环流强度均随宽深比和径宽比的变化而显著改变。

图 12 和图 13 不仅揭示了主体环流与次生环流的分布规律,还展示了二者的垂向分层现象:上部水体存在次生环流,下层水体存在主体环流。童思陈等<sup>[23]</sup>在弯道水流研究中也观察到了类似的环流分层现象。然而,目前关于弯道断面环流结构的这种

水深分层现象尚缺乏充分的机理解释,其成因可能与来流条件及边壁约束作用有关。

### 2.5 弯道分离流

弯道分离流是指弯道水流因能量不足以克服阻力,导致水流脱离边壁,形成与主流相反方向的回流,进而在主流和边壁间产生漩涡的现象。弯道分离流的出现受弯道水深、几何形态及壁面特性等因素的影响。对弯道分离流的研究,实质上是探讨确保弯道水流连续、不发生回流的临界条件,对于阐明弯道造床过程和揭示泥沙运动规律具有重要意义。

图 14 和图 15 分别为不同宽深比和径宽比工况下出弯断面( $\varphi = 180^\circ$ )的流速分布,其中  $U$  为断面

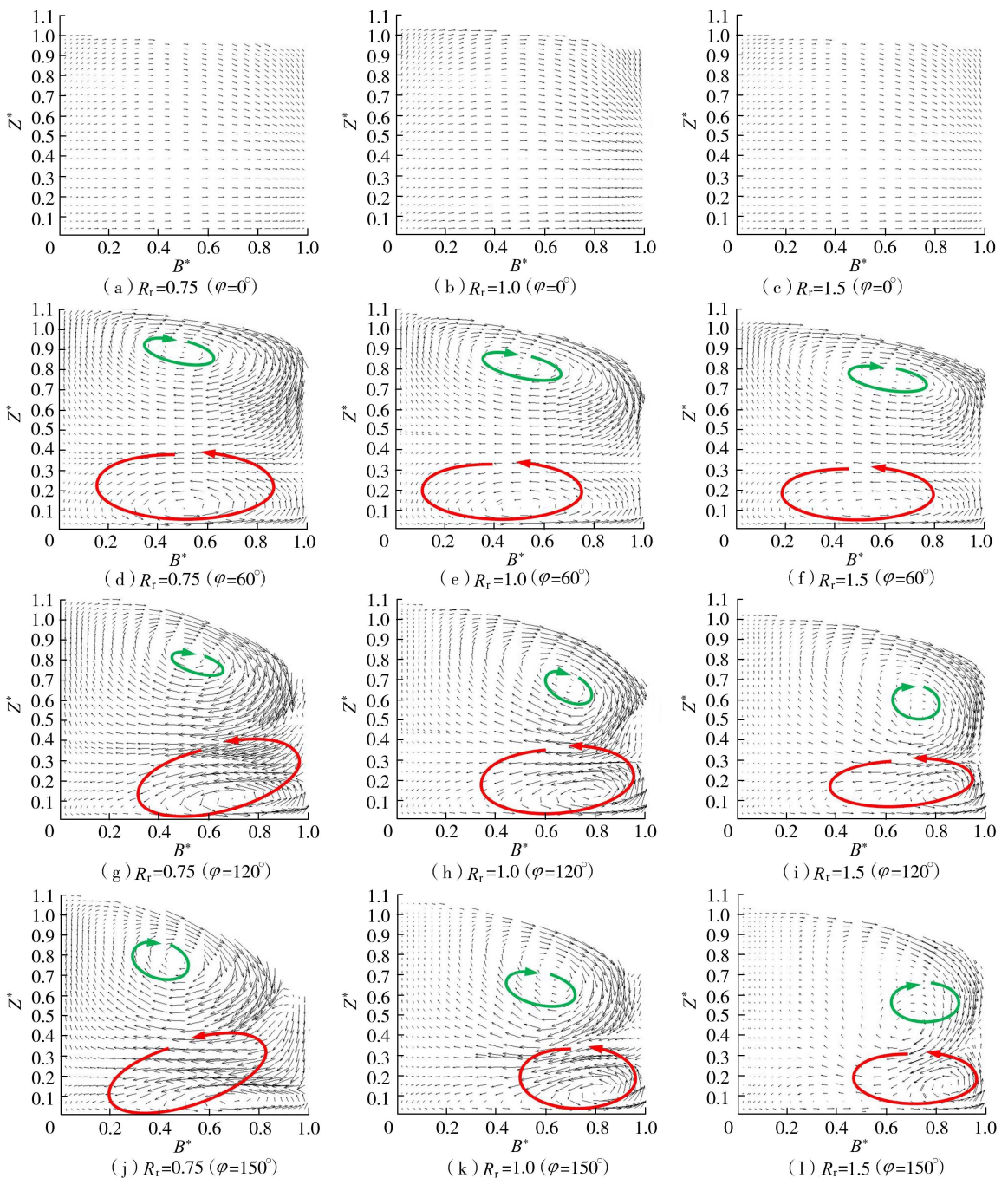


图 13 不同径宽比工况下断面环流结构(红色箭头为主体环流,绿色箭头为次生环流)

平均流速。图 14 表明,随着弯道水深增大(即宽深比减小),当宽深比降至 1.5 时,出弯断面凸岸开始出现分流现象;图 15 表明,随着弯道曲率半径减小(即径宽比减小),当径宽比降至 1.0 时,水流发生分离。当宽深比和径宽比进一步减小,面流与底流的运动差异显著增大,水流分离的可能性也随之增加。

本文数值模拟计算结果表明,弯道分离流易发生于出弯断面的凸岸附近。分离流的产生受宽深比和径宽比的影响显著,随着宽深比或径宽比的减小,分离流发生的可能性增大。针对本文涉及的 U 形 180°小宽深比和小径宽比明渠弯道,产生分离流的

临界条件为  $H_r=1.5$ 、 $R_r=1.0$ 。马森等<sup>[24]</sup>针对宽深比为 1.0 的 90°明渠弯道的研究发现,当径宽比为 1.0 时出现水流分离,这与本文计算结果一致。该对比表明,在小宽深比条件下,无论是 90°还是 180°弯道,径宽比等于 1.0 均为水流分离发生的临界值。

分离区的界定通常采用流线法或等值线法。流线法将回流结构的最外侧流线定义为分离区边界,取其在边壁的投影作为分离区长度,与边壁的最大距离作为分离区宽度。显然,流线法虽适用于二维平面,但在界定三维分离区时存在局限,需通过对垂直多层水平截面进行连续拟合才能较为准确地确定分离区边界。相比之下,等值线法将纵向流速为 0

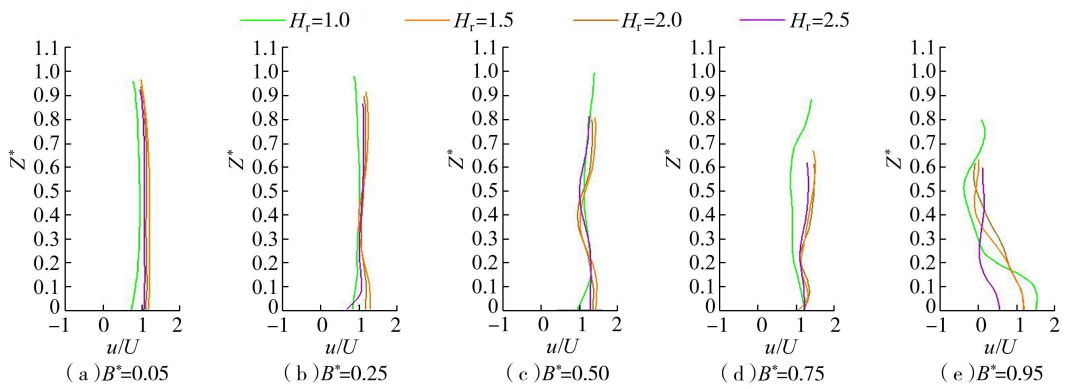


图 14 不同宽深比工况下出弯断面 ( $\varphi = 180^\circ$ ) 流速分布

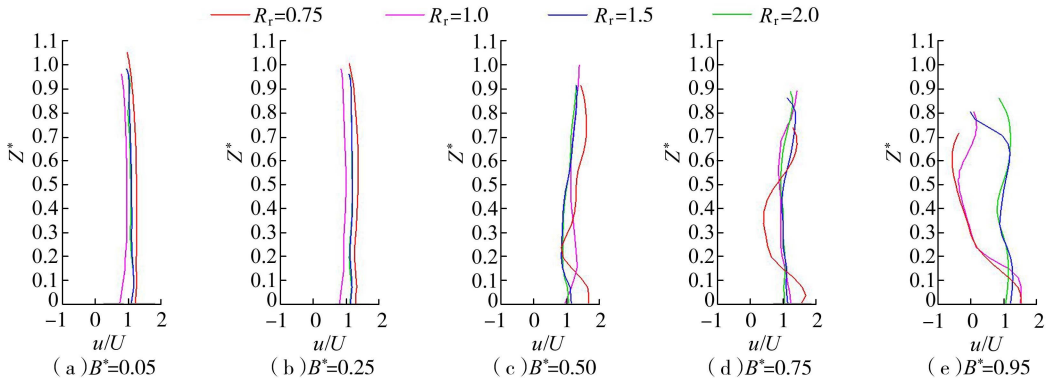


图 15 不同径宽比工况下出弯断面 ( $\varphi = 180^\circ$ ) 流速分布

的等值线定义为分离区边界。由于在实际应用中获取流速等值面图比多层截面拟合更易实现,该方法被广泛用于三维分离区的界定<sup>[25]</sup>。因此,本文采用等值线法定义分离区。图 16 为工况 1 ( $H_r = R_r = 1.0$ ) 下由纵向流速  $u = 0$  等值面确定的分离区边界三维示意图。结果显示,弯道分离区始于靠近出弯断面的弯段凸岸边壁,出弯后沿直段凸岸侧顺流方向发展,并在延伸一段距离后逐渐消失。在垂向上,分离区由中部水体分别向上下层扩展;从几何尺寸来看,分离区的水平范围由下层向上层逐渐增大。

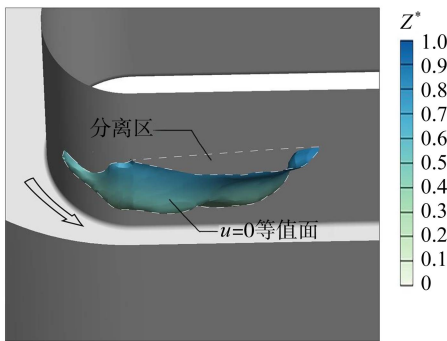


图 16 工况 1 条件下分离区三维示意图

### 3 结论

**a.** 受离心力作用,弯道水面产生纵比降,沿程呈下降趋势,尤其在凸岸侧更为显著。同时,水面由凹岸向凸岸倾斜形成横比降。在横断面上,凸岸侧

的水位下降速率较快,宽深比和径宽比对水面形态的影响也在此处最为显著。水面纵比降和水面横比降均随宽深比的增大或径宽比的减小而增大。水面横比降沿程呈现先增大后减小的变化趋势,且最大横比降出现位置随径宽比的减小而向下游后移。

**b.** 弯道水流流速呈现典型的重分布特征,最大流速位置由上部凸岸侧向下部凹岸侧偏移,且偏移速度随径宽比的减小而加快。径宽比的减小加剧了流速分布的不均匀性,增强了水流的紊动特性。

**c.** 弯道环流中心位置沿程逐渐向凸岸移动,次生环流随主体环流的变化呈现同向变化趋势。增大宽深比或径宽比对弯道环流结构的影响趋势一致。断面环流强度随宽深比或径宽比的增大而减小,且环流强度峰值的出现位置随宽深比的增大而滞后。

**d.** 弯道分离流易发生于出弯断面附近的凸岸侧。随着水深增加及水流挤压程度加剧,水流分离的概率随之增大。换言之,宽深比和径宽比的减小均会提高水流发生分离的可能性。基于数值模拟计算结果,针对小宽深比和小径宽比的 U 形弯道,确定分离流的临界条件是宽深比为 1.5、径宽比为 1.0。

### 参考文献:

[1] 李民康,冀鸿兰,罗红春,等. 流凌条件下弯道水力特性数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(3): 41-49. (Li Minkang, Ji Honglan, Luo Hongchun, et al. Numerical

- simulation of hydraulic characteristics of curved channels under ice flow conditions [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2021, 41 (3) : 41-49. (in Chinese)
- [ 2 ] 罗索福斯基 И Л,尹学良. 弯道水流的研究[J]. 泥沙研究, 1958(1) : 85-97.
- [ 3 ] 卡拉乌舍夫. 河流与水库水力学[M]. 程昌国, 译. 北京: 水利电力出版社, 1958.
- [ 4 ] 张红武, 吕昕. 弯道水力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1993.
- [ 5 ] Bridge J S, Jarvis J. Flow and sedimentary processes in the meandering river South Esk, Glen Clova, Scotland [J]. *Earth Surface Processes*, 1976, 1(4) : 303-336.
- [ 6 ] De Vriend H J. Steady flow in shallow channel bends [D]. Delft: Delft University of Technology, 1981.
- [ 7 ] 波达波夫. 波达波夫选集[M]. 北京: 水利电力出版社, 1958.
- [ 8 ] Kalkwijk J P T, Booij R. Adaptation of secondary flow in nearly-horizontal flow [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 1986, 24(1) : 19-37.
- [ 9 ] 孙东坡. 弯道横向流动与输沙的探讨[J]. 华北水利水电学院学报, 1992(3) : 60-68. (Sun Dongpo. Study of circulating velocity profile and lateral silt discharge in curved channels [J]. *Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power*, 1992(3) : 60-68. (in Chinese))
- [ 10 ] 张耀先, 丁新求, 孙东坡. 弯道水流横向流动与输沙研究[J]. 水利建设与管理, 2003(4) : 76-78. (Zhang Yaoxian, Ding Xinqiu, Sun Dongpo. Study on lateral flow and sediment transport in curved channels [J]. *Water Conservancy Construction and Management*, 2003(4) : 76-78. (in Chinese))
- [ 11 ] Leeder M R, Bridges P H. Flow separation in meander bends [J]. *Nature*, 1975, 253(5490) : 338-339.
- [ 12 ] 刘焕芳. 弯道水流的分离[J]. 武汉水利电力学院学报, 1989, 22(6) : 50-55. (Liu Huanfang. Flow separation in curved channels [J]. *Journal of Wuhan University of Hydraulic & Electric Engineering*, 1989, 22(6) : 50-55. (in Chinese))
- [ 13 ] Blanckaert K. Saturation of curvature-induced secondary flow, energy losses, and turbulence in sharp open-channel bends: laboratory experiments, analysis, and modeling [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2009, 114 (F3) : F03015.
- [ 14 ] Blanckaert K. Hydrodynamic processes in sharp meander bends and their morphological implications [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2011, 116 (F1) : F01003.
- [ 15 ] Van Balen W, Blanckaert K, Uijtewaal W S J. Analysis of the role of turbulence in curved open-channel flow at different water depths by means of experiments, LES and RANS [J]. *Journal of Turbulence*, 2010, 11 : N12.
- [ 16 ] Wang Xiekang, Liu Xingnian. Experimental investigation of flow structures and bed deformation with small width-to-depth ratio in a bend flume [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2016, 20(1) : 497-508.
- [ 17 ] Moncho-Esteve I J, García-Villalba M, Muto Y, et al. A numerical study of the complex flow structure in a compound meandering channel [J]. *Advances in Water Resources*, 2018, 116 : 95-116.
- [ 18 ] Yan Xiaohui, Rennie C D, Mohammadian A. A three-dimensional numerical study of flow characteristics in strongly curved channel bends with different side slopes [J]. *Environmental Fluid Mechanics*, 2020, 20(6) : 1491-1510.
- [ 19 ] 曾诚, 尹雨然, 陈辰, 等. 明渠弯道交汇口水动力特性数值模拟 [J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(2) : 9-15. (Zeng Cheng, Yin Yuran, Chen Chen, et al. Numerical simulation of hydrodynamics of open-channel confluences with bend flow [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2023, 43(2) : 9-15. (in Chinese))
- [ 20 ] Shukry A. Flow around bends in an open flume [J]. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 1950, 115(1) : 751-778.
- [ 21 ] Bathurst J C, Hey R D, Thorne C R. Secondary flow and shear stress at river bends [J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 1979, 105(10) : 1277-1295.
- [ 22 ] 王平义. 弯曲河道动力学[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1995.
- [ 23 ] 童思陈, 钟亮, 许光祥. 弯道水流环流结构的试验研究 [J]. 水运工程, 2009(10) : 32-35. (Tong Sichen, Zhong Liang, Xu Guangxiang. Experimental study on the circulation configuration in curved conduit [J]. *Port & Waterway Engineering*, 2009(10) : 32-35. (in Chinese))
- [ 24 ] 马淼, 李国栋, 张巧玲, 等. 弯道弯曲度对水流结构的影响 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2016, 24(6) : 1193-1202. (Ma Miao, Li Guodong, Zhang Qiaoling, et al. Effects of curve bending on the flow structure [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2016, 24(6) : 1193-1202. (in Chinese))
- [ 25 ] 曾诚, 陈辰, 周舟, 等. 明渠交汇流分离区形态及二次流强度分析 [J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(2) : 50-55. (Zeng Cheng, Chen Chen, Zhou Zhou, et al. Analysis on separation zone shape and secondary current intensity in open-channel combining flows [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2022, 42(2) : 50-55. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-03-07 编辑: 俞云利)

# 漩滚涌潮在变化地形上传播演变的数值模拟研究

喻仞石<sup>1</sup>, 屈科<sup>1,2,3</sup>, 郑伟<sup>1</sup>, 王超<sup>1</sup>, 王旭<sup>1,2</sup>

(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;  
3. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室)

**摘要:**针对涌潮强大的冲击力可引起显著的泥沙输运与河床淤积,进而改变区域水动力特性的问题,基于OpenFOAM两相流模型构建了小尺度精细化数值水槽,探究了变化地形下漩滚涌潮的传播演变与水动力特性,分析涌潮高度、潮前水深和地形高度对漩滚涌潮的影响。结果表明,地形抬升导致漩滚涌潮流速和涡量发生剧烈变化,涌潮能量通过涡旋破碎和黏性耗散显著衰减,弱漩滚涌潮在浅水区退化为波状涌潮,而强漩滚涌潮因能量集中仍维持高频振荡;涌潮高度的增大可降低浅水区传播速度衰减幅度,增大表层水体紊动能;潮前水深的增大会使得浅水区紊动能减弱,并降低涌潮传播速度;地形高度的增加会减缓漩滚涌潮的传播速度;在浅水区传播过程中,强漩滚涌潮的紊动能衰减速率明显高于弱漩滚涌潮。基于上述数值模拟结果,提出了考虑地形抬升影响的涌潮传播速度修正公式,其计算结果与数值模拟结果吻合较好,验证了该公式的准确性。

**关键词:**漩滚涌潮;变化地形;水动力特性;数值模拟;海岸工程

**Numerical simulation of propagation and evolution of vortical tidal bore on varying topography**//Yu Renshi<sup>1</sup>, Qu Ke<sup>1,2,3</sup>, Zheng Wei<sup>1</sup>, Wang Chao<sup>1</sup>, Wang Xu<sup>1,2</sup>(1. School of Hydraulic and Ocean Engineering, Changsha University of Science and Technology; 2. Key Laboratory of Dongting Lake Aquatic Eco-Environmental Control and Restoration of Hunan Province; 3. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province)

**Abstract:** Aiming at the issue that the strong impact force of tidal bores can cause significant sediment transport and bed deposition, thereby altering regional hydrodynamic characteristics, a small-scale refined numerical flume was constructed based on the OpenFOAM two-phase flow model. The propagation evolution and hydrodynamic characteristics of vortical tidal bores on varying topography were investigated, and the effects of bore height, pre-bore water depth, and topographic height on vortical tidal bores were analyzed. The results show that topographic uplift leads to drastic changes in the velocity and vorticity of the vortical tidal bore, and the bore energy significantly attenuates through vortex breaking and viscous dissipation. Weak vortical tidal bores degenerate into undular bores in shallow water, whereas strong vortical tidal bores maintain high-frequency oscillations due to concentrated energy. An increase in bore height reduces the attenuation of propagation velocity in shallow water and increases the turbulent kinetic energy of the surface water body. An increase in pre-bore water depth weakens the turbulent kinetic energy in shallow water and reduces the bore propagation velocity. An increase in topographic height slows down the propagation velocity of the vortical tidal bore. During propagation in shallow water, the turbulent kinetic energy decay rate of strong vortical tidal bores is significantly higher than that of weak vortical tidal bores. Based on the above numerical simulation results, a modified formula for bore propagation velocity that accounts for topographic uplift is proposed, and its calculated results are in good agreement with the numerical results, validating the accuracy of the formula.

**Key words:** vortical tidal bore; varying topography; hydrodynamic characteristics; numerical simulation; coastal engineering

涌潮是一种河口地区特有的自然现象,其形成需要特定的地理条件,如逐渐收窄的河口、巨大的潮差以及合适的河床坡度等<sup>[1]</sup>。据统计,全球约有450个河口存在涌潮现象<sup>[2]</sup>,其中以亚马孙河涌潮

和我国的钱塘江涌潮最为典型。钱塘江涌潮形成后,河道水动力特性发生显著变化,水流从落潮状态迅速转变为涨潮状态,其涌潮高度一般为2~3m,传播速度可达6~12m/s,此时涌潮内蕴含着巨大的

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3103601)

作者简介:喻仞石(1998—),男,硕士研究生,主要从事波浪水动力研究。E-mail:2741475975@qq.com

通信作者:屈科(1985—),男,副教授,博士,主要从事计算水动力学与海洋多尺度流动研究。E-mail:kqu@csust.edu.cn

能量。例如,涌潮曾将海宁十堡 41 号丁坝处重约 30 t 的混凝土砌石坝面掀起,抛离原地 7~8 m;冲上塘顶的潮水还将海宁盐官塘顶重 1.5 t 的“镇海铁牛”掀起并推移约 10 m<sup>[3]</sup>。

近年来,国内外学者对涌潮的形成机理和演变规律开展了大量研究。Reungoat 等<sup>[4]</sup>通过对英国迪河口进行现场观测,揭示了涌潮水位、流速、紊动能、雷诺剪切应力等要素的变化规律。潘存鸿等<sup>[5]</sup>基于长期实测水文和地形资料,分析了人为因素和自然因素对涌潮强度、潮差以及涨潮历时等参数的影响。Koch 等<sup>[6]</sup>通过水槽试验提出了 3 种涌潮形态的弗劳德数区间,指出当相对弗劳德数较小时,水体自由表面起伏光滑且无破裂;当相对弗劳德数中等时,涌潮破碎后仍然以光滑的自由表面进行传播;当相对弗劳德数较大时,涌潮传播速度较快,且潮头出现一个明显的漩滚。Chanson<sup>[7]</sup>利用波浪水槽试验生成波状涌潮,在分析其流场特征的基础上,进一步探讨了涌潮的混合与弥散作用。Li 等<sup>[8]</sup>通过落闸生潮试验分析了涌潮在缓坡变化地形上的传播过程,并提出了共轭水深比的解析解。黄婷等<sup>[9]</sup>建立了二维高阶 Boussinesq 方程数值模型,复现了“交叉潮”“一线潮”“回头潮”三大潮景,模拟结果与实测数据吻合良好。张舒羽等<sup>[10]</sup>采用二维大尺度数值模型计算了 8 种地形条件下钱塘江涌潮特征的变化,并通过涌潮高度和潮前水深计算了各测站的相对弗劳德数,指出地形变化对潮汐和涌潮的影响显著。

如上所述,国内外学者在涌潮研究中采用了原型观测、理论分析、模型试验和数值模拟等多种方法,并在大尺度数值模型方面取得了丰硕成果,大尺度模型为整体把握涌潮水动力特性提供了有力支撑。然而,涌潮现象复杂多变,仅依靠大尺度模型难以全面、深入地揭示其局部精细特征。因此,小尺度模型在研究涌潮局部水动力特性及其与海岸结构物相互作用方面具有重要作用。戚蓝等<sup>[11]</sup>建立了小尺度精细化数值模型,通过大涡模拟 (LES) 求解纳维-斯托克斯 (N-S) 方程,发现小尺度精细模型模拟的漩滚涌潮在传播过程中,不同横断面的水体相互干扰很小,并指出二维数值模型仅需少量计算资源即可满足精度要求。Li 等<sup>[12]</sup>采用光滑粒子流体动力学 (SPH) 法模拟了涌潮通过桥墩时的局部水流特性。肖厅厅<sup>[13]</sup>结合数值模拟和物理试验研究了漩滚涌潮的内部流速、压强分布以及漩滚涌潮作用下桥墩受力与局部冲淤特性。

钱塘江河口含沙量较大且变化幅度显著。实测资料显示,涌潮来临前,钱塘江河口的含沙量约为 1~3 kg/m<sup>3</sup>;涌潮来临时,尖山至盐官河段的含沙量

峰值可达 65.8 kg/m<sup>3</sup>,形成高含沙量区<sup>[14]</sup>。在桐庐至乍浦河段,由于泥沙输运,河床形成了近 10 m 高的庞大泥沙堆积体<sup>[15]</sup>,涌潮传播至此处时会受到地形抬升的影响而改变形态。目前,针对变化地形条件下漩滚涌潮的小尺度精细化研究仍较为有限,为此本文构建小尺度精细化数值模型,研究漩滚涌潮在变化地形条件下的传播与演变特性,并系统分析涌潮高度、潮前水深和地形高度对其水动力特性的影响。

## 1 数值模型

### 1.1 控制方程

本文采用 OpenFOAM 不可压缩两相流数值模型,通过求解雷诺平均 N-S 方程 (RANS) 模拟漩滚涌潮在复杂地形上的传播过程。其控制方程包括质量守恒方程和动量守恒方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_{\text{eff}} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + (\rho - \rho_{\text{ref}}) g_i \quad (2)$$

式中: $t$  为时间; $x_i$  为笛卡尔坐标系下的坐标分量 ( $i=1, 2, 3$ ); $u_i$  为笛卡尔坐标系下  $i$  方向的流速分量; $p$  为静水压强; $\rho$  为流体密度; $\rho_{\text{ref}}$  为参考密度; $\mu_{\text{eff}}$  为有效动力黏度,其值为层流动力黏度与湍流动力黏度之和; $g_i$  为重力加速度在  $i$  方向的分量。

### 1.2 湍流模型与自由液面捕捉法

为精确表征漩滚涌潮的非线性流动特征,本文选用  $k-\omega$  SST 湍流模型实现湍流黏度的闭合求解,并采用 VOF (volume of fluid) 方法<sup>[16]</sup>追踪气液两相流界面,以揭示涌潮内部流场结构与自由液面演变特征。

### 1.3 计算区域与边界条件

本文构建的二维数值水槽如图 1 所示,其几何尺寸为长 40 m、高 1.2 m。在距入口 19.4 m 处设置高 0.08~0.2 m 的变化地形,将地形坡脚前定义为深水区,坡脚后为浅水区。其中, $z$  为水深方向, $x$  为涌潮传播方向,沿水槽  $x$  轴方向以 0.2 m 间距等距布置 181 个水位测点 (WG1~WG181),用于采集涌潮水体的自由液面高程以及传播速度。前后面采用空边界条件 (empty) 实现三维至二维模型的等效转换,底面采用壁面边界,顶面采用压力出口边界,出口为自由出流边界,入口采用潘存鸿等<sup>[5]</sup>基于一维连续-动量方程推导的理论流速边界:

$$v_1 = v_0 + \sqrt{gh_1(h_1 + h_0)/2h_0} - \sqrt{gh_0(h_1 + h_0)/2h_1} \quad (3)$$

其中  $h_1 = h_0 + H$

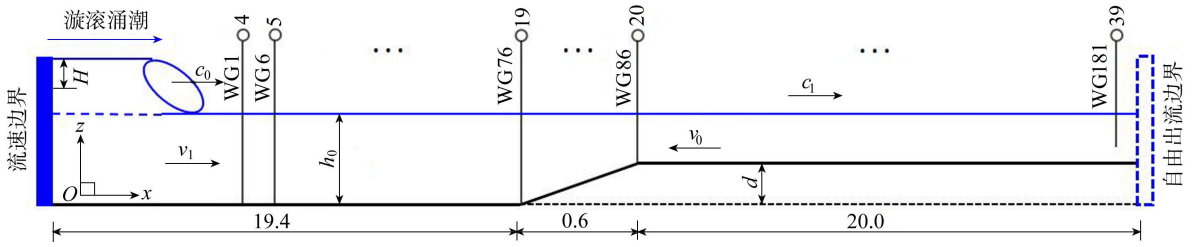


图1 数值水槽布置(单位:m)

式中: $v_1$ 为水流入口边界的水平流速; $v_0$ 为落潮流速; $g$ 为重力加速度; $h_0$ 为潮前水深; $H$ 为涌潮高度; $h_1$ 为潮后水深。

### 1.4 工况设置

根据涌潮强度的不同,涌潮形态可分为3种<sup>[11]</sup>:当涌潮强度较小时,涌潮表现为前导波之后伴随一系列振幅减小的子波所构成的波列<sup>[17]</sup>,称为波状涌潮;随着涌潮强度的增大,自由表面发生轻微破碎,水体仍然以波动的形式向前推进,称为弱漩滚涌潮;当涌潮强度较大时,涌潮前锋形成陡立推进的水滚,潮头完全破碎,自由表面发生剧烈的掺气现象,称为强漩滚涌潮<sup>[18]</sup>。基于上述判据,并采用本文建立的数学模型对103组涌潮工况进行计算,得出涌潮形态与相对弗劳德数 $Fr_1$ 之间的关系(图2),并定义当 $Fr_1 < 1.28$ 时,涌潮为波状涌潮;当 $1.28 \leq Fr_1 < 1.44$ 时,涌潮为弱漩滚涌潮;当 $Fr_1 \geq 1.44$ 时,涌潮为强漩滚涌潮。相较于波状涌潮,漩滚涌潮的传播速度更快、流动更为复杂,本文将主要对其进行讨论。

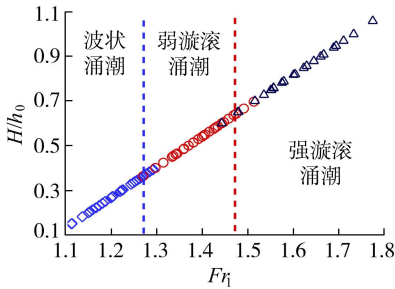


图2 涌潮形态与相对弗劳德数的关系

为研究漩滚涌潮在变化地形下的水动力特性,选取涌潮高度 $H$ 、潮前水深 $h_0$ 和地形高度 $d$ 作为主要控制参数进行分析,参数取值范围依据钱塘江天然涌潮水流条件确定: $h_0 = 3.4 \sim 4.3$  m、 $H = 1.6 \sim 3.0$  m、 $d = 0.8 \sim 2.0$  m<sup>[19-21]</sup>。根据相对弗劳德数大小,将涌潮划分为弱漩滚涌潮和强漩滚涌潮,模拟中涌潮水流参数按1:10的几何比尺进行缩尺,具体工况设置见表1。

## 2 结果与分析

### 2.1 模型验证

为验证所建模型模拟漩滚涌潮在变化地形上传

表1 工况设置

工况	$H/m$	$h_0/m$	$d/m$	$Fr_1$	涌潮形态
1	0.16	0.40	0.20	1.296	弱漩滚涌潮
2	0.18	0.40	0.20	1.333	弱漩滚涌潮
3	0.20	0.40	0.20	1.369	弱漩滚涌潮
4	0.22	0.40	0.20	1.406	弱漩滚涌潮
5	0.24	0.40	0.20	1.442	强漩滚涌潮
6	0.26	0.40	0.20	1.479	强漩滚涌潮
7	0.28	0.40	0.20	1.515	强漩滚涌潮
8	0.30	0.40	0.20	1.551	强漩滚涌潮
9	0.20	0.34	0.20	1.434	弱漩滚涌潮
10	0.20	0.37	0.20	1.399	弱漩滚涌潮
11	0.20	0.43	0.20	1.344	弱漩滚涌潮
12	0.28	0.34	0.20	1.604	强漩滚涌潮
13	0.28	0.37	0.20	1.556	强漩滚涌潮
14	0.28	0.43	0.20	1.479	强漩滚涌潮
15	0.20	0.40	0.08	1.369	弱漩滚涌潮
16	0.20	0.40	0.12	1.369	弱漩滚涌潮
17	0.20	0.40	0.16	1.369	弱漩滚涌潮
18	0.28	0.40	0.08	1.515	强漩滚涌潮
19	0.28	0.40	0.12	1.515	强漩滚涌潮
20	0.28	0.40	0.16	1.515	强漩滚涌潮

播的水动力过程的可靠性,将数值计算结果与杨火其等<sup>[22]</sup>的物理模型试验数据进行了对比,数值水槽的设置与物理模型试验保持一致,选取 $h_0 = 0.07$  m、 $H = 0.066$  m的工况进行验证。验证结果如图3所示(图中 $\eta$ 为涌潮水位, $F_x$ 为涌潮作用力),涌潮水位与涌潮作用力的计算结果与试验数据吻合较好,表明本文建立的两相流数值模型能够较好地模拟漩滚涌潮的传播过程及其与结构物的相互作用。

### 2.2 水动力特性

为深入研究漩滚涌潮传播演变过程中发生的复杂水动力现象,分别选取工况3和工况7来研究弱漩滚涌潮和强漩滚涌潮,两种漩滚涌潮在不同时刻的水体速度云图如图4所示。由图4(a)(b)可知,由于漩滚涌潮的相对弗劳德数较大,水体内部蕴含了巨大的能量,涌潮波能量无法像波状涌潮通过对后续波列的反向能量辐射和底部摩擦来耗散,能量的非线性耗散增强,因此两种漩滚涌潮的自由表面均发生了不同程度的破碎,潮头产生了强烈的水滚和水气混掺现象,通过大尺度的涡旋和黏性耗散将水体中的能量转换为热量。当漩滚涌潮传播至斜坡上时(图4(c)(d)(e)(f)),涌潮波一部分能量被斜坡

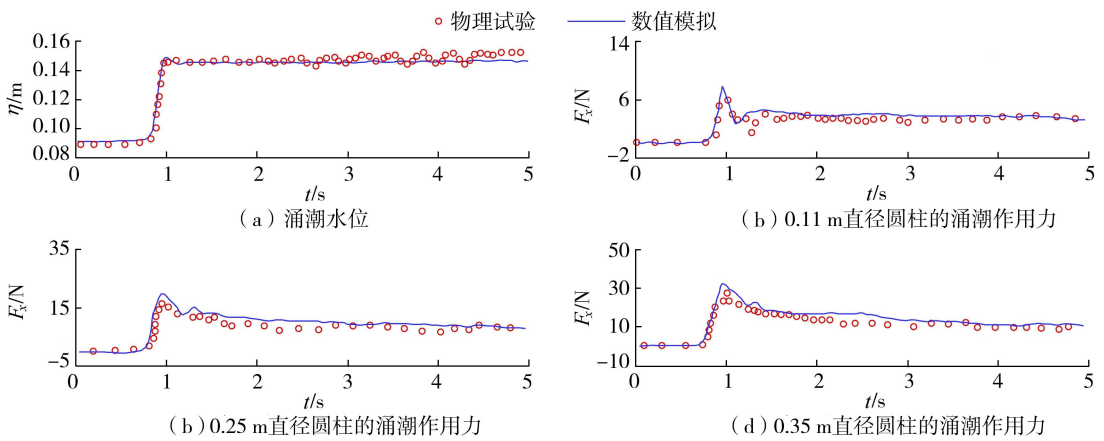


图3 验证结果

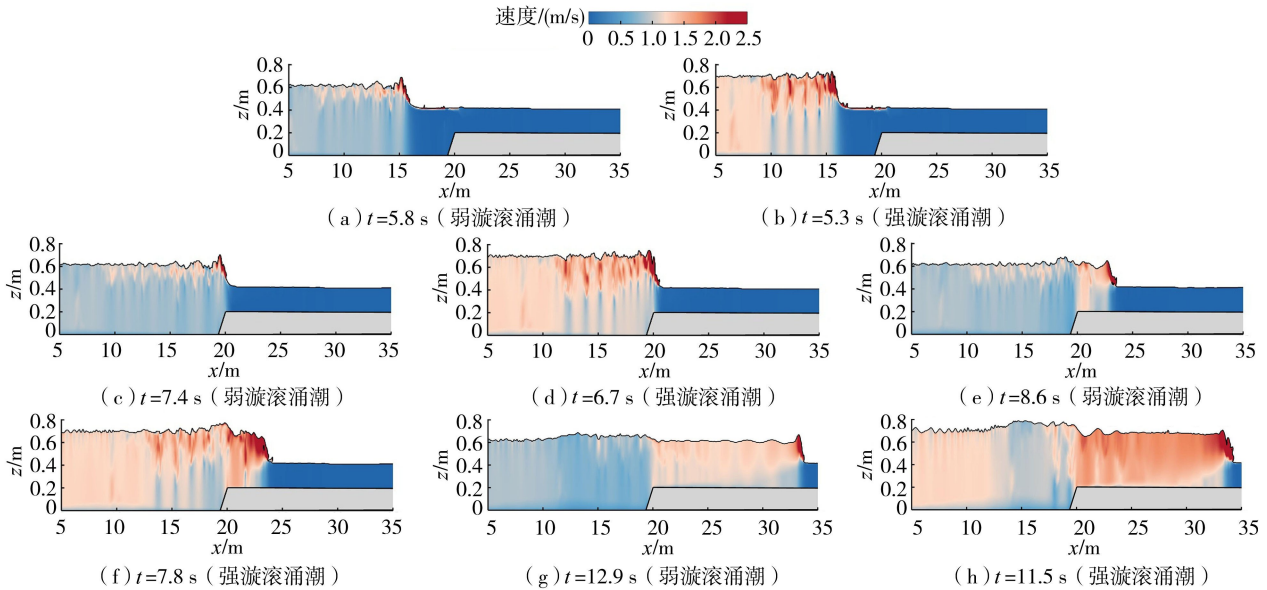


图4 不同时刻的水体速度云图

地形反射,另一部分透射至浅水区。反射波与后续波列不断叠加,产生一个向下游不断扩张的增水区。而透射波在通过变化地形后,由于水深变浅且斜坡地形的约束和导向作用突然消失,流速在进入浅水区后迅速增大(图4(g)(h))。弱漩滚涌潮进入浅水区后,水面再次形成光滑起伏的波列(图4(g)),这是由于斜坡地形反射分离了一部分潮波能量,且色散效应导致高频波与低频波分离,使得次生波再次形成波列,涌潮形态从弱漩滚涌潮转变为波状涌潮。而强漩滚涌潮进入浅水区后,潮头后方水面线趋于平稳,水体表面的高频振荡减弱。

图5给出了弱漩滚涌潮和强漩滚涌潮在不同测点处的自由液面时程曲线,强漩滚涌潮的传播速度稍快于弱漩滚涌潮。在 $x=16\text{ m}$ 处,受斜坡反射影响,约在 $10\text{ s}$ 时产生增水,弱漩滚涌潮产生的反射波与后续波列叠加,形成一系列振幅减小的光滑波列,而强漩滚涌潮在增水后呈现不规则波动。在 $x=20\text{ m}$ 处,受地形抬升的影响,自由水面略微升高,其

中弱漩滚涌潮水面升高约为 $2\%$ ,强漩滚涌潮水面升高约为 $7.7\%$ ,这可能是由于漩滚涌潮在斜坡处形成局部高压,高压促使更多水体向低压区域流动,使得强漩滚涌潮在斜坡处的增水效应更为强烈。在 $x=24,28\text{ m}$ 处,弱漩滚涌潮水面呈现短暂波动后趋于平稳,这可能是由于斜坡将潮波的部分能量反射后,水体动能减弱,使涌潮形态从弱漩滚涌潮短暂转变为波状涌潮。

涡旋是导致涌潮中物理量产生脉动的主要因素之一。漩滚涌潮在传播过程中,潮头发生强烈的水滚,产生大量涡旋,致使大量能量通过涡旋运动的形式耗散。为进一步分析漩滚涌潮在变化地形上传播演变的水动力特性,图6给出了两种漩滚涌潮(工况3和工况7)的水体涡量云图。由图6(a)(b)可知,漩滚涌潮在深水区传播时,潮头前趾前方出现较大的正涡,这是由于漩滚涌潮在水滚前趾线处会产生快速波动的横向流动<sup>[23]</sup>。由于潮头以较高的速度向上游推进,不断与前方的低速水体发生剧烈的

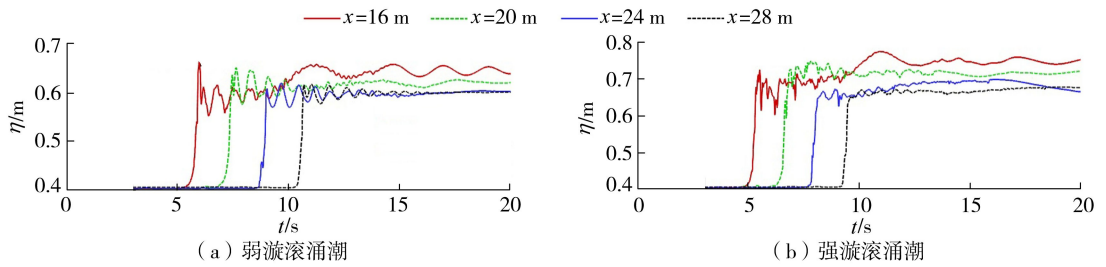


图5 不同测点处自由液面时程曲线

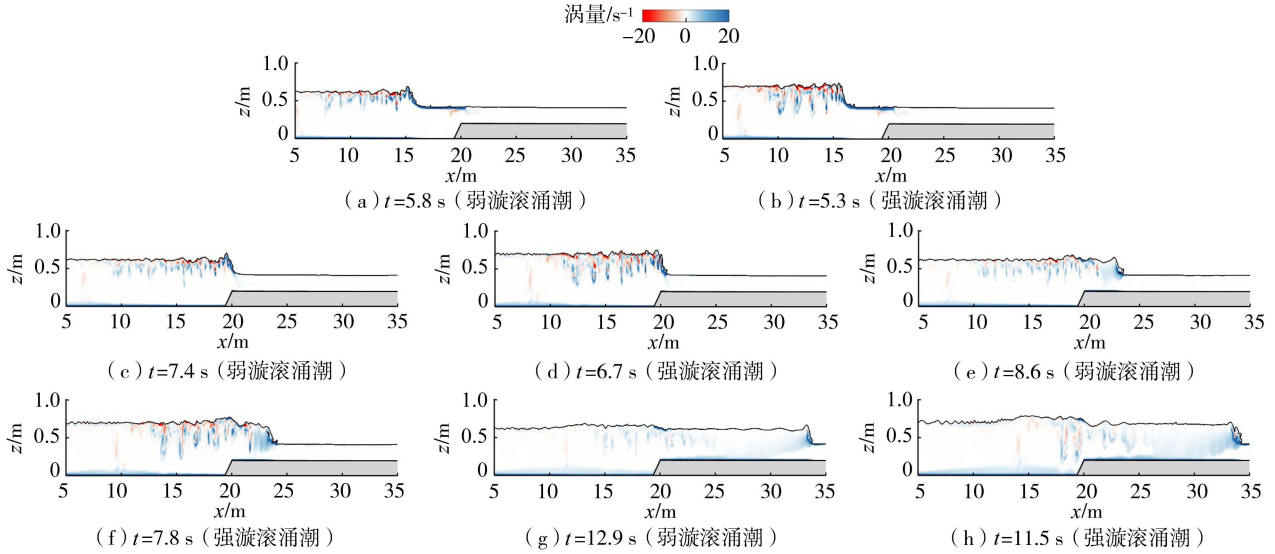


图6 不同时刻的水体涡量云图

相互作用,潮头处不断产生正涡,且这些正涡随着滚涌潮的高速传播逐渐移动至后方水体,而后方水体在流速减慢以及剪切应力的作用下,在表层水体产生大量负涡。正涡与负涡之间的持续相互作用导致水流方向不断变化,局部流速分布呈现高度非均匀性(图4),这也解释了在 $x=16\text{m}$ 处自由液面时程曲线较为紊乱的原因(图5)。当涌潮传播至斜坡上时,受地形压缩与阻滞作用,涌潮的传播速度减小,大量正涡与负涡发生聚集,水面紊动与振荡加剧,在正、负涡的相互作用下,大量能量通过黏性耗散被消耗(图6(e)(d))。滚涌潮通过斜坡后,反射波与次生波叠加产生了复杂的水动力效应(图6(e)(f)),大量能量在斜坡处耗散。而透射波在浅水区传播的过程中由于流速分布较为均匀,基本不再产生负涡,水体中全部为正涡,使得水面的高频振荡减弱(图6(g)(h))。

上述研究表明,滚涌潮在传播过程中会在其后方引起水体流速的显著波动,为探究不同条件下涌潮引起的水体紊动能变化规律,定义相对水深为 $z/h_1$ 。潮头经过后3s内水体内部流速波动较大,3s后水体流速逐渐趋于均匀,紊动也随之减弱。为表征不同工况下涌潮引起的紊动能,选择潮头经过后3s的时间段作为时均化脉动流速的计算时段<sup>[24]</sup>。

图7为深水区( $x=15\text{m}$ )和浅水区( $x=24、30\text{m}$ )的3个位置处紊动能沿相对水深的分布特征。由图7可见,在深水区,两种工况下紊动能的较高值均出现在底部和水体表面,该结果与肖厅厅<sup>[13]</sup>的研究结果一致,其中强滚涌潮在表层水体中的紊动能变化更为显著。当潮头进入浅水区后,紊动能沿相对水深的分布变得更加均匀,呈S形分布,且表层水体的紊动能显著降低。在 $x=15\sim 24\text{m}$ 区域,弱滚涌潮和强滚涌潮的紊动能分别减少约66.7%和67.8%;而在 $x=24\sim 30\text{m}$ 区间,其降幅分别为13.3%和63.2%。这表明涌潮进入浅水区后,大部分能量受黏性耗散和地形反射的影响而耗散。随着涌潮在浅水区的进一步传播,其紊动能呈沿程递减趋势,其中强滚涌潮的衰减更为显著。

### 2.3 涌潮高度的影响

不考虑其他参数的影响,潮前水深取 $0.4\text{m}$ ,地形高度取 $0.2\text{m}$ ,通过改变涌潮高度研究其对滚涌潮传播演变及水动力特性的影响。为定量分析滚涌潮通过地形前后的传播速度变化,定义相对传播速度 $\bar{c}/c_0$ ,其中 $\bar{c}$ 为某区域的平均传播速度, $c_0$ 为潘存鸿等<sup>[25]</sup>基于一维连续性方程推导出的涌潮理论传播速度:

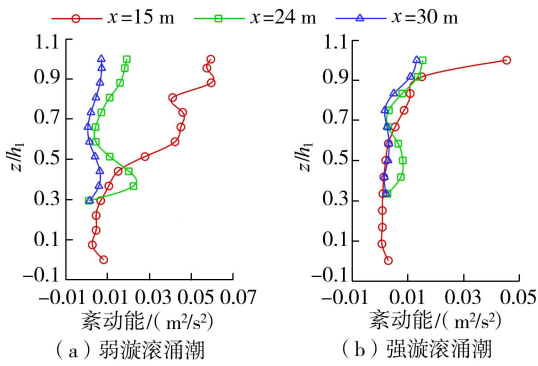


图7 紊动能沿相对水深的分布

$$c_0 = v_1 + \sqrt{\frac{gh_0(h_1 + h_0)}{2h_1}} \quad (4)$$

图8为不同涌潮高度下相对传播速度的变化,各工况在深水区的相对传播速度均趋近于1,理论传播速度与实际传播速度之间的 skill 数<sup>[26]</sup>约为0.997,表明涌潮在深水区的传播受地形影响较小。对比深水区与浅水区的相对传播速度可以发现,漩滚涌潮在地形抬升后,其传播速度显著衰减,且衰减幅度随着涌潮高度的增加而减小。当涌潮高度取最小设计值  $H = 0.16\text{ m}$  时,浅水区的相对传播速度降至最低,约为0.89,这可能是由于地形对涌潮能量的削减作用存在一定限度。

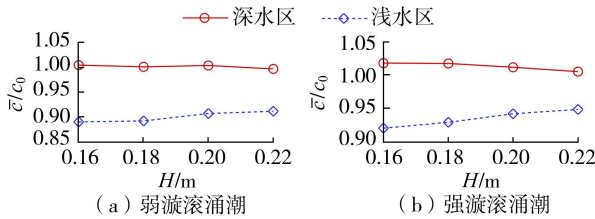


图8 不同涌潮高度下的相对传播速度

图9为不同涌潮高度下紊动能沿相对水深的分布特征,在深水区( $x = 15\text{ m}$ ),两种漩滚涌潮的紊动能最大值均集中于水体上部。弱漩滚涌潮的紊动能沿水深分布较为规律,且垂向平均紊动能随涌潮高度的增大而增大;而强漩滚涌潮因剧烈掺混作用,紊动能沿水深分布较为紊乱。图9(b)(e)进一步表明,当漩滚涌潮进入浅水区( $x = 24\text{ m}$ )后,紊动能与涌潮高度之间的相关性明显减弱。相较于深水区,紊动能显著降低,其沿水深方向呈S形分布,且强漩滚涌潮的紊动能普遍高于弱漩滚涌潮。当涌潮继续推进至  $x = 30\text{ m}$  时,紊动能进一步显著下降,弱漩滚涌潮和强漩滚涌潮的平均紊动能分别减少约36.36%和42.27%。

## 2.4 潮前水深的影响

不考虑其他参数的影响,强漩滚涌潮和弱漩滚涌潮的涌潮高度分别取0.24、0.28 m,地形高度取0.2 m,通过改变潮前水深研究其对漩滚涌潮传播演

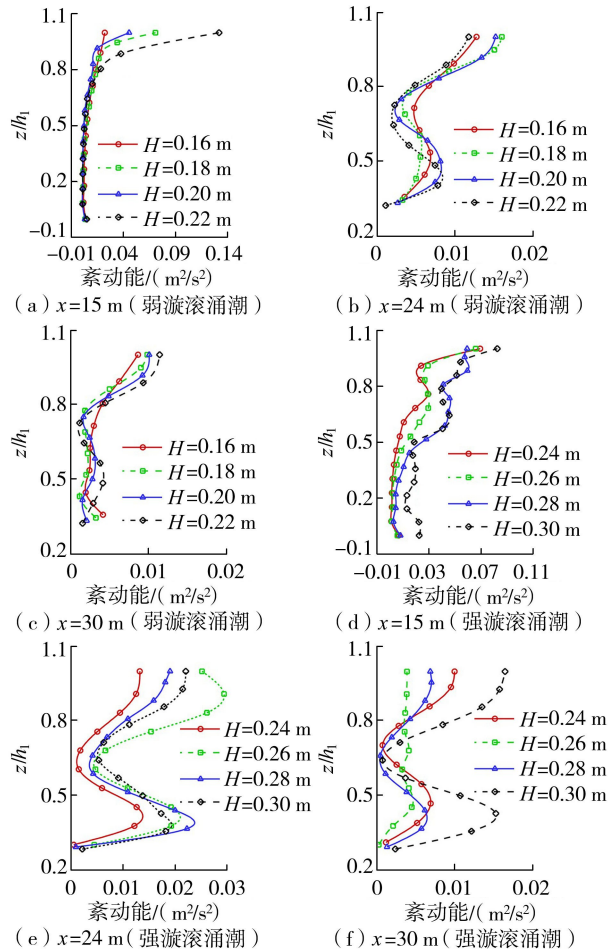


图9 不同涌潮高度下紊动能沿相对水深的分布

变及水力特性的影响。由图10可知,8个工况在深水区的平均传播速度与理论传播速度基本一致,两者之间的 skill 数约为0.9961,表明在不同潮前水深条件下,漩滚涌潮在深水区传播时受地形影响较小。对比深水区与浅水区的相对传播速度可知,变化地形可以有效削弱涌潮的传播速度,且削弱幅度随潮前水深的增大而增大。当潮前水深取最大设计值0.43 m时,浅水区的相对传播速度最小,约为0.93,这可能是由于较大的水深能够更好地缓冲波浪破碎时产生的紊动能。

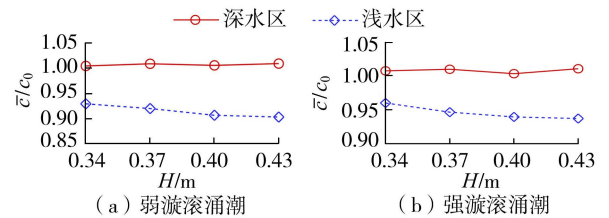


图10 不同潮前水深下的相对传播速度

图11为不同潮前水深下紊动能沿相对水深的分布特征。在深水区( $x = 15\text{ m}$ ),当  $h_0 = 0.34 \sim 0.40\text{ m}$  时,弱漩滚涌潮的紊动能分布形态较为相似;当  $h_0 = 0.43\text{ m}$  时,上部水体区域的紊动能明显增大,而强漩滚涌潮的紊动能沿水深分布较为离散,

随  $h_0$  的变化无明显规律。当涌潮传播至浅水区 ( $x = 24$  m) 时,紊动能整体显著减小,且随着潮前水深的增大,紊动能沿水深分布趋于均匀,这可能是由于较大的潮前水深可以有效缓和和减弱涌潮所带来的紊动。当涌潮从  $x = 24$  m 传播至  $x = 30$  m 处时,漩滚涌潮的紊动能进一步减小,弱漩滚涌潮和强漩滚涌潮紊动能的平均降幅分别约为 38.06% 和 48.62%。

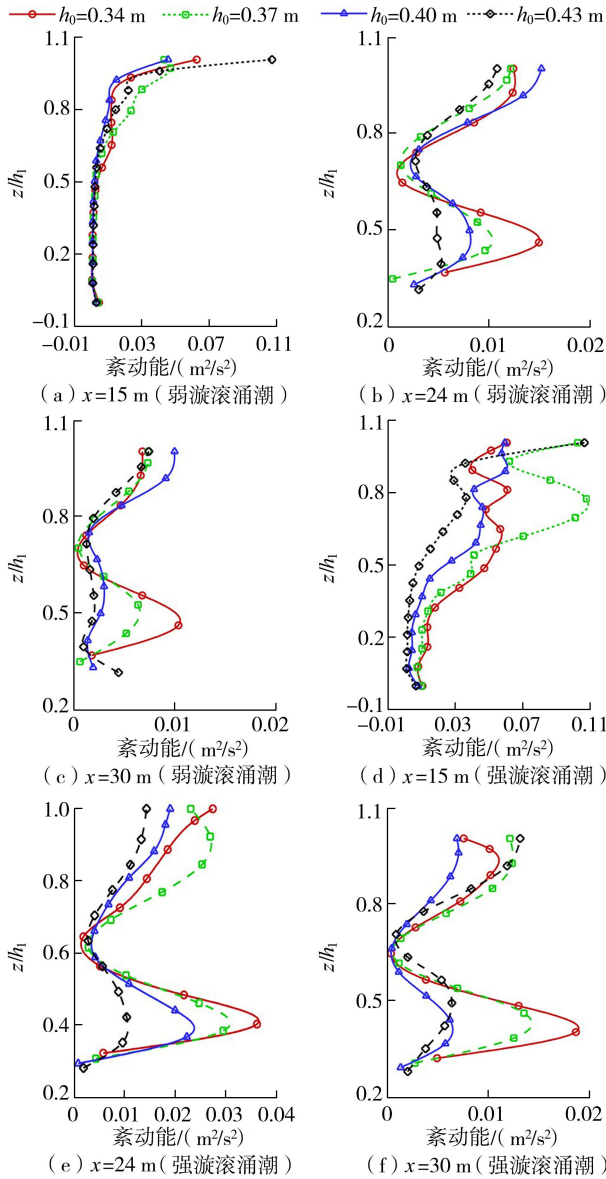


图 11 不同潮前水深下紊动能沿相对水深的分布

## 2.5 地形高度的影响

不考虑其他参数的影响,强漩滚涌潮和弱漩滚涌潮的涌潮高度分别取 0.24、0.28 m,潮前水深取 0.4 m,通过改变地形高度研究其对漩滚涌潮传播演变及水动力特性的影响。由图 12 可知,各工况下深水区的平均传播速度与理论传播速度吻合较好,其 skill 数约为 0.988。观察浅水区的相对传播速度发现,随地形高度的增大,两种漩滚涌潮的相对传播速度均呈线性减小趋势。当  $d = 0.08$  m 时,强漩滚涌

潮在浅水区的相对传播速度约为 0.996,表明强漩滚涌潮在通过较低地形时受到的影响较小。当地形高度达到最大值时,强漩滚涌潮和弱漩滚涌潮的传播速度降低幅度最为显著,降低幅度分别约为 10.89% 和 6.76%。

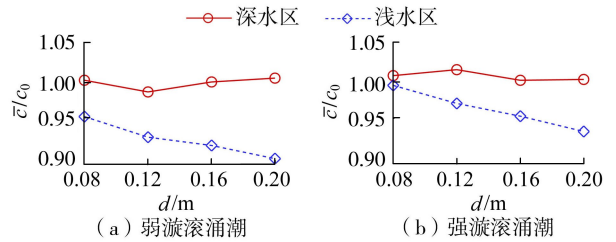


图 12 不同地形高度下的相对传播速度

图 13 为不同地形高度下两种漩滚涌潮紊动能沿水深方向的分布,在深水区  $x = 15$  m 处,4 种地形高度下的紊动能沿水深方向的变化幅度均较小。当

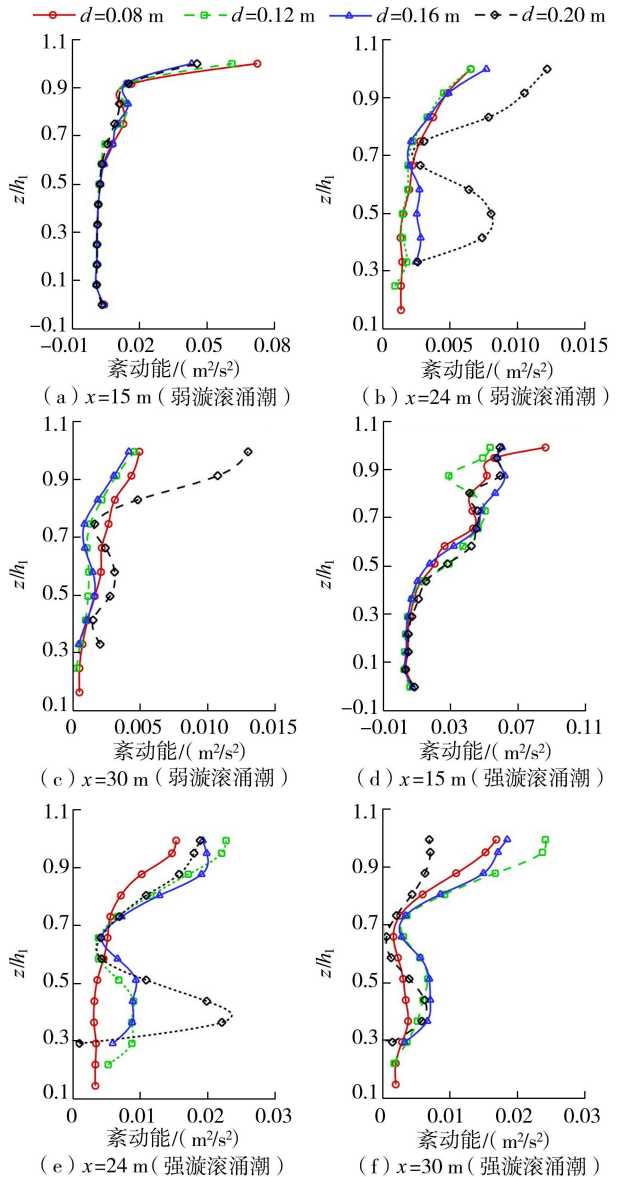


图 13 不同地形高度下紊动能沿相对水深的分布

漩滚涌潮通过地形后 ( $x = 24 \text{ m}$  处), 随地形高度的降低, 水深增加, 为水体提供了更大的能量交换空间, 使得紊动能沿水深分布更为均匀。当涌潮传播至  $x = 30 \text{ m}$  处时, 弱漩滚涌潮的紊动能在  $d = 0.2 \text{ m}$  时达到最大值, 而强漩滚涌潮则呈现出相反的趋势, 其紊动能在较小地形高度条件下反而较大。这可能是因为地形高度的降低使得强漩滚涌潮在通过地形时有更多的水体发生透射, 同时由于强漩滚涌潮具有更大的能量, 水深的增加并未能有效消减其能量, 因此在  $d = 0.08 \text{ m}$  时, 紊动能呈现沿程增大的趋势。

### 3 理论分析

涌潮是一种强间断非线性流动, 尤其是漩滚涌潮, 具有传播速度极快、破坏力极大等特性。潘存鸿等<sup>[25]</sup>基于一维连续性方程推导了涌潮在平地的理论传播速度, 该公式已得到广泛应用。本文通过数值模拟对该公式进行了进一步验证, 发现此公式能够很好地预测漩滚涌潮在深水区的传播速度, 决定系数  $R^2 = 0.993$  (图 14(a))。然而, 实际河床并非平坦, 受涌潮冲击的影响, 河床常存在沙坎等地形<sup>[27]</sup>, 使得涌潮在传播过程中受到地形抬升的影响, 因此研究受地形抬升后的涌潮传播速度  $c_1$  同样重要。本文研究发现漩滚涌潮在平地的传播速度  $c_0$  和受到地形抬升后的传播速度  $c_1$  均与涌潮高度  $H$ 、潮前水深  $h_0$ 、地形高度  $d$  之间具有良好的线性关系, 因此基于前人研究和这 3 个变量构建如下拟合公式:

$$c_1 = c_0 A \left( \frac{h_1 - h_0}{h_0} \right)^B \left( \frac{d}{0.2} \right)^C \quad (5)$$

式中:  $A$ 、 $B$ 、 $C$  为待定系数。基于数值计算结果, 利用多元线性回归分析对系数进行率定, 从而得到受地形抬升影响后的漩滚涌潮传播速度计算公式:

$$c_1 = 0.685 \sqrt{\frac{gh_1(h_1 + h_0)(h_1 - h_0)^{0.21}}{h_0^{1.21}}} \left( \frac{d}{0.2} \right)^{0.064} \quad (6)$$

图 14(b) 为漩滚涌潮在通过地形后的传播速度  $c_1$  的模拟值与公式计算值的对比结果, 决定系数

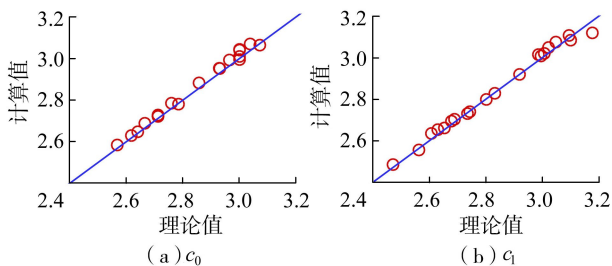


图 14 传播速度理论值与计算值的对比

$R^2 = 0.959$ , 表明公式计算值与模拟值吻合较好, 验证了该公式的准确性。

### 4 结论

a. 漩滚涌潮在深水区传播时, 潮头前趾处产生正涡, 后方水体因剪切作用形成负涡, 引发流速分布的高度非均匀性。地形抬升导致涌潮能量显著耗散, 弱漩滚涌潮在浅水区逐渐退化为波状涌潮, 而强漩滚涌潮因能量集中仍维持高频振荡。

b. 随涌潮高度  $H$  增大, 涌潮传播速度的衰减幅度减小(浅水区相对传播速度从 0.89 增至 0.95), 并使得紊动能分布趋于均匀, 但浅水区紊动能沿程仍呈显著衰减, 降幅达 36%~63%。潮前水深  $h_0$  增大可缓冲涌潮能量, 显著削弱浅水区传播速度(相对速度最低降至 0.93), 并促进紊动能沿水深均匀分布。地形高度降低对漩滚涌潮传播速度的抑制作用减弱, 同时为水体能量交换提供了更多空间, 但在较低地形 ( $d = 0.08 \text{ m}$ ) 条件下, 强漩滚涌潮因透射增强, 紊动能沿程增大。

c. 基于数值模拟结果, 针对涌潮高度、潮前水深及地形高度 3 种因素, 利用多元线性回归分析拟合出地形抬升后漩滚涌潮传播速度  $c_1$  的计算公式, 其预测结果与模拟值吻合较好 ( $R^2 = 0.959$ ), 为复杂地形条件下涌潮动力学研究提供了定量工具。

### 参考文献:

- [1] 林炳尧. 钱塘江涌潮的特性 [M]. 北京: 海洋出版社, 2008.
- [2] Chanson H. Current knowledge in tidal bores and their environmental, ecological and cultural impacts [J]. *Environmental Fluid Mechanics*, 2011, 11(1): 77-98.
- [3] 陶存焕, 戴泽衡. 明清时期钱塘江海塘 [J]. *水利规划*, 1997(3): 73-78. (Tao Cunhuan, Dai Zeheng. Qiantang River seawall in the Ming and Qing Dynasties [J]. *Water Resources Planning and Design*, 1997(3): 73-78. (in Chinese))
- [4] Reungoat D, Chanson H, Keevil C E. Field measurements of unsteady turbulence in a tidal bore: the Garonne River in October 2013 [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2015, 53(3): 291-301.
- [5] 潘存鸿, 郑君, 胡成飞, 等. 钱塘江涌潮影响因素研究 [J]. *泥沙研究*, 2023, 48(1): 13-20. (Pan Cunhong, Zheng Jun, Hu Chengfei, et al. Study on the impact factors of tidal bore on the Qiantang River [J]. *Journal of Sediment Research*, 2023, 48(1): 13-20. (in Chinese))
- [6] Koch C, Chanson H. Turbulence measurements in positive surges and bores [J]. *Journal of Hydraulic Research*,

- 2009,47(1):29-40.
- [ 7 ] Chanson H. Physical modelling of the flow field in an undular tidal bore [J]. Journal of Hydraulic Research, 2005,43(3):234-244.
- [ 8 ] Li Ying, Pan Dongzi, Chanson H, et al. Tidal bore progressing on a small slope [J]. Experimental Thermal and Fluid Science,2017,88:513-518.
- [ 9 ] 黄婷,张怀,石耀霖. 基于 Boussinesq 型方程的钱塘江涌潮数值模拟[J]. 地球物理学报,2022,65(1):79-95. (Huang Ting, Zhang Huai, Shi Yaolin. Numerical simulation of the tidal bore in the Qiantang River based on Boussinesq-type equations [J]. Chinese Journal of Geophysics,2022,65(1):79-95. (in Chinese))
- [ 10 ] 张舒羽,潘存鸿,程文龙. 钱塘江涌潮对地形变化的响应研究[J]. 海洋工程,2020,38(1):130-139. (Zhang Shuyu, Pan Cunhong, Cheng Wenlong. Response of tidal bore in Qiantang River to topographical changes [J]. The Ocean Engineering, 2020, 38 ( 1 ) : 130-139. ( in Chinese))
- [ 11 ] 戚蓝,肖厅厅,张芝永,等. 涌潮水流 CFD 数值模拟 [J]. 水利水运工程学报,2019(3):32-40. (Qi Lan, Xiao Tingting, Zhang Zhiyong, et al. Numerical simulation of tidal bore based on CFD method [J]. Hydro-Science and Engineering,2019(3):32-40. (in Chinese))
- [ 12 ] Li Jing, Liu Huaxing, Tan S K. Lagrangian modeling of tidal bores passing through bridge piers [J]. Journal of Hydrodynamics,2010,22(1):496-502.
- [ 13 ] 肖厅厅. 涌潮作用下桥墩局部水动力及冲刷特性研究 [D]. 天津:天津大学,2019.
- [ 14 ] 潘存鸿,曾剑,唐子文,等. 钱塘江河口泥沙特性及河床冲淤研究[J]. 水利水运工程学报,2013(1):1-7. (Pan Cunhong, Zeng Jian, Tang Ziwen, et al. A study of sediment characteristics and riverbed erosion/deposition in Qiantang estuary [J]. Hydro-Science and Engineering, 2013(1):1-7. (in Chinese))
- [ 15 ] 钱宁,谢汉祥,周志德,等. 钱塘江河口沙坎的近代过程 [J]. 地理学报,1964,30(2):124-142. (Qian Ning, Xie Hanxiang, Zhou Zhide, et al. The fluvial processes of the big sand bar inside the Chien Tang Chiang estuary [J]. Acta Geographica Sinica, 1964, 30 ( 2 ) : 124-142. ( in Chinese))
- [ 16 ] Zhang Zhiyong, Shi Bing, Guo Yakun, et al. Numerical investigation on critical length of impermeable plate below underwater pipeline under steady current [J]. Science China Technological Sciences,2013,56(5):1232-1240.
- [ 17 ] 林炳尧,黄世昌,毛献忠. 波状水跃和波状涌潮的分析 [J]. 水动力学研究与进展 (A 辑),1998,13(1):106-115. (Lin Bingyao, Huang Shichang, Mao Xianzhong. Analyses of undular hydraulic jump and undular bore [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics,1998,13(1):106-115. (in Chinese))
- [ 18 ] Leng Xinqian. A study of turbulence: the unsteady propagation of bores and surges [D]. St Lucia: The University of Queensland,2018.
- [ 19 ] 张芝永,肖厅厅,戚蓝,等. 涌潮水流作用下桩柱表面压强及受力分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2020,53(6):573-581. (Zhang Zhiyong, Xiao Tingting, Qi Lan, et al. Analysis of the surface pressure and force of piles under tidal bore [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology),2020,53(6):573-581. (in Chinese))
- [ 20 ] 陈刚,何昆,杨元平,等. 强涌潮对桥墩墩身作用力试验研究 [J]. 浙江水利科技,2020,48(4):20-23. (Chen Gang, He Kun, Yang Yuanping, et al. Experimental research on force of strong tidal bore on a bridge pier body [J]. Zhejiang Hydraulics,2020,48(4):20-23. (in Chinese))
- [ 21 ] 曾剑. 基于数据挖掘的钱塘江河口水沙运动规律研究 [D]. 杭州:浙江大学,2010.
- [ 22 ] 杨火其,王瑞锋,李志永,等. 强涌潮水流条件下直立圆柱体的涌潮作用力试验研究 [J]. 水电能源科学,2024,42(9):63-65. (Yang Huoqi, Wang Ruifeng, Li Zhiyong, et al. Experimental study on tidal bore force of vertical cylinder under strong tidal bore [J]. Water Resources and Power,2024,42(9):63-65. (in Chinese))
- [ 23 ] Leng Xinqian, Chanson H. Breaking bore: physical observations of roller characteristics [J]. Mechanics Research Communications,2015,65:24-29.
- [ 24 ] Chanson H. Unsteady turbulence in tidal bores: effects of bed roughness [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering,2010,136(5):247-256.
- [ 25 ] 潘存鸿,鲁海燕,曾剑. 钱塘江涌潮特性及其数值模拟 [J]. 水利水运工程学报,2008(2):1-9. (Pan Cunhong, Lu Haiyan, Zeng Jian. Characteristic and numerical simulation of tidal bore in Qiantang River [J]. Hydro-Science and Engineering,2008(2):1-9. (in Chinese))
- [ 26 ] Willmott C J. On the validation of models [J]. Physical Geography,1981,2(2):184-194.
- [ 27 ] 潘冬子,李颖,潘存鸿. 涌潮水沙动力过程现场观测研究进展 [J]. 海洋工程,2023,41(2):169-181. (Pan Dongzi, Li Ying, Pan Cunhong. A review on field observations of tidal bore-induced flow and sediment dynamic processes [J]. The Ocean Engineering,2023,41(2):169-181. (in Chinese))

(收稿日期:2025-03-25 编辑:雷燕)

# 基于浑水渗流理论的堤坝管涌分析及验证

刘世隆<sup>1</sup>, 宋靖宇<sup>2</sup>, 党发宁<sup>2</sup>, 薛海斌<sup>2</sup>, 张雅敏<sup>1</sup>, 薛宁<sup>1</sup>

(1. 青海黄河上游水电开发有限责任公司; 2. 西安理工大学西北旱区生态水利国家重点实验室)

**摘要:**根据浑水带出或带入地层的固体颗粒体积等于地层孔隙的变化量这一原理,推导了浑水渗流过程中孔隙率(孔隙比)随时间的变化公式;基于达西渗透系数公式,建立了浑水渗流过程的渗透系数与初始孔隙率(初始孔隙比)、初始渗透系数的关系及浑水渗流过程中渗透系数随时间的变化公式;根据自由土颗粒所受渗流拖曳力与有效重量相平衡的管涌临界起动力条件,推导了发生管涌的临界渗流速度和临界水力坡降计算公式,并给出了利用有限元软件迭代求解非稳定渗流管涌发生与发展过程的计算方法。山东某中型水库大坝反滤层发生的管涌破坏实例验证结果表明,本文方法能够准确再现反滤层管涌破坏的发展过程,反滤层渗透系数在颗粒流失完后短时间内急剧增大,导致水力坡降迅速升高并引发连锁破坏,最终造成黏土斜墙被击穿而形成集中渗漏通道,计算得到的管涌破坏模式与现场实测塌坑位置及发展规律吻合良好。

**关键词:**浑水渗流;管涌;孔隙比;渗透系数;堤坝

**Analysis method and validation of dam piping based on muddy water seepage theory**//Liu Shilong<sup>1</sup>, Song Jingyu<sup>2</sup>, Dang Faning<sup>2</sup>, Xue Haibin<sup>2</sup>, Zhang Yamin<sup>1</sup>, Xue Ning<sup>1</sup>(1. Qinghai Huanghe Hydropower Development Co., Ltd.; 2. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology)

**Abstract:** Based on the principle that the volume of solid particles carried out of or into the stratum by muddy water equals the change in pore volume, a formula for the variation of porosity (void ratio) with time during the seepage process of muddy water is derived. Based on Darcy's permeability coefficient formula, the relationship between the permeability coefficient and the initial porosity (initial void ratio) as well as the initial permeability coefficient is established, and a formula for the temporal variation of permeability coefficient during the muddy water seepage process is developed. According to the critical initiation condition for piping, where the seepage drag force acting on free soil particles is balanced by their effective weight, formulas for calculating the critical seepage velocity and critical hydraulic gradient for piping initiation are derived, and a numerical method based on finite element software is proposed to iteratively solve the initiation and evolution process of unsteady seepage piping. The proposed method is validated using a piping failure case in the filter layer of a medium-sized reservoir dam in Shandong Province. The results show that the method can accurately reproduce the evolution of piping failure in the filter layer. The permeability coefficient of the filter layer increases sharply within a short period after particle loss is completed, leading to a rapid increase in hydraulic gradient and triggering a chain failure, eventually resulting in the breakthrough of the clay inclined wall and the formation of a concentrated seepage channel. The calculated piping failure mode agrees well with the measured locations and development patterns of collapse pits in the field.

**Key words:** muddy water seepage; piping; pore ratio; permeability coefficient; dam

浑水向地层内部渗透时往往会发生淤堵,地层的孔隙比逐渐减小,导致渗透系数降低,如坝前覆盖层上的淤积、山前地下水回灌时的场地淤堵及淤地坝和水力充填尾矿坝堆积过程造成的淤堵。当有浑水向地层外部渗透时,往往是地层内部发生了管涌,地层的孔隙比逐渐增大,导致地层渗透系数逐渐增大。这类渗流过程中,渗透介质及其渗透系数是在不断变

化的,传统的达西渗流理论不适合求解此类问题。

管涌临界水力坡降是判定土体渗透破坏的核心指标,其计算方法围绕土体水力条件、几何特性及应力状态展开。随着研究的深入,经典计算方法形成了适配不同土体类型的体系,围绕土体细观孔隙结构、应力状态及地基赋存条件等关键影响因素进行了深入研究,通过细化颗粒起动力判据、量化关键参数

**基金项目:**陕西省重点研发计划重点产业创新链(群)项目(2022ZDLSF07-02)

**作者简介:**刘世隆(1984—),男,高级工程师,硕士,主要从事水电和新能源工程建设管理工作。E-mail:13709741848@163.com

**通信作者:**宋靖宇(1997—),男,博士研究生,主要从事大坝防渗研究。E-mail:Songjy\_Xaut@163.com

与临界水力坡降的耦合关系<sup>[1-2]</sup>,建立了多因素耦合的临界水力坡降改进计算模型<sup>[3-4]</sup>,并通过室内试验或数值模拟验证模型参数的合理性,提高了无黏性土、砂性土、砂砾石土等不同土体及双层地基等特殊结构的临界水力坡降计算精度与适配性<sup>[5-7]</sup>。试验技术方面,二元堤基模型试验、潜蚀可视化试验及细观渗流侵蚀试验等实现了颗粒运移与临界水力坡降的直接观测<sup>[8-10]</sup>;数值方法如多场耦合<sup>[11]</sup>、渗流场模拟<sup>[12-13]</sup>等,有效支撑了复杂地层条件下计算模型的验证与优化<sup>[6,14-15]</sup>。总体而言,管涌临界水力坡降计算是多因素耦合的结果,但部分模型适用场景有限,复杂应力与极端水力荷载下的计算方法尚未成熟,模型通用性与交叉验证需进一步加强,为完善统一计算框架提供关键支撑。

本文基于浑水渗流理论,利用达西渗透系数公式建立了浑水渗流过程中渗透系数与初始孔隙率(初始孔隙比)、初始渗透系数的关系及浑水渗流过程中渗透系数随时间的变化公式,根据自由土颗粒所受渗流拖曳力与有效重量相平衡的管涌临界启动条件,推导了发生管涌的临界渗流速度和临界水力坡降计算公式,给出了利用有限元软件迭代求解非稳定渗流管涌发生与发展过程的计算方法,最后通过工程实例验证了本文方法的有效性。

## 1 浑水渗流理论与堤坝管涌分析方法

### 1.1 土体渗透系数与孔隙率的关系

达西定律给出了清水在层流状态下的渗透速度、渗透流量与水力坡降之间的比例关系,其中渗透系数是一个不随时间变化的介质常数。但对于有浑水入渗地层发生淤堵或浑水出渗地层发生管涌的渗流来说,渗流过程中地层的孔隙比、渗透系数甚至渗透介质是随时间而变化的,为此需先确定地层中孔隙比随浑水渗流过程的变化规律,在此基础上再研究渗透系数随时间的变化规律。

土体渗透系数的大小与土体的级配和孔隙比直接相关,随着管涌的发展,土体的级配、密度与孔隙比会同时发生变化,但影响渗透系数的主要因素是孔隙比,管涌过程中土体的密度在减小,孔隙比在变大,土体的渗透系数也随之增大。粗粒土的渗透系数与孔隙比或孔隙率的关系式已有很多种,本文以达西渗透系数公式为例来研究浑水渗流(含浑水入渗淤堵和浑水出渗管涌)过程中土体渗透系数的计算方法。

达西渗透系数公式为:

$$k = \frac{\beta\gamma_w}{\lambda\eta} \frac{n^2}{1-n} d^2 = \frac{\beta\gamma_w}{\lambda\eta} \frac{e^2}{1+e} d^2 \quad (1)$$

式中: $k$ 为土体渗透系数; $n$ 、 $e$ 分别为土体的孔隙率与孔隙比; $d$ 为颗粒粒径,mm; $\beta$ 为颗粒的球体系数,圆球时取 $\pi/6$ ; $\lambda$ 为邻近颗粒的影响系数,对于无限水体中的圆球取 $3\pi$ ; $\eta$ 为水的动力黏滞系数; $\gamma_w$ 为水的容重, $\text{kN}/\text{m}^3$ 。

根据党发宁等<sup>[14]</sup>的研究,对于黏性土来说,将薄膜水所占据的孔隙体积与土颗粒体积之比定义为黏性土的无效孔隙比( $e_0$ )。土体孔隙比 $e$ 与无效孔隙比 $e_0$ 的差值即为有效孔隙比 $e_u$ ,用有效孔隙比替换式(1)中的孔隙比,式(1)仍然成立。党发宁等<sup>[14]</sup>给出了稠度指标法、起始坡降法、双电层参数法和击实饱和法等4种计算无效孔隙比的方法,其中稠度指标法最有效实用,该方法在计算孔隙比时,将液限含水量所占据的空间体积换算为无效孔隙比。下文孔隙比均指有效孔隙比,所有计算公式同时适合粗粒土与细粒土。

由于水的动力黏滞系数、土的颗粒比表面积以及颗粒形状系数均不便量测,因此本文假定这些参数在浑水渗流过程中不变,可以用初始时刻其他便于测定的力学参数等效替代<sup>[16]</sup>,亦即管涌过程中土体渗透系数的变化主要是由细颗粒流失造成孔隙率增大而引起的。由于初始渗透系数 $k_0$ 、初始孔隙率 $n_0$ 、初始孔隙比 $e_0$ 可由式(1)计算得到,故:

$$\frac{\beta\gamma_w}{\lambda\eta} d^2 = k_0 \frac{1-n_0}{n_0^2} = k_0 \frac{1+e_0}{e_0^2} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)可得浑水渗流 $t$ 时刻用初始孔隙率 $n_0$ (初始孔隙比 $e_0$ )表示的浑水入渗淤堵或浑水出渗管涌影响范围内的土体渗透系数:

$$k_t = \frac{\beta\gamma_w}{\lambda\eta} \frac{n_t^2}{1-n_t} d^2 = k_0 \frac{1-n_0}{n_0^2} \frac{n_t^2}{1-n_t} = \frac{\beta\gamma_w}{\lambda\eta} \frac{e_t^2}{1+e_t} d^2 = k_0 \frac{1+e_0}{e_0^2} \frac{e_t^2}{1+e_t} \quad (3)$$

式中: $k_t$ 、 $n_t$ 、 $e_t$ 分别为浑水渗流 $t$ 时刻的渗透系数、孔隙率和孔隙比。式(3)的优点在于利用初始渗透系数和初始孔隙率(初始孔隙比)就可计算管涌时渗透系数的变化过程,回避了测算水的动力黏滞系数、土颗粒比表面积以及颗粒形状系数的不便,从而简化求解。

### 1.2 土体孔隙率(孔隙比)随时间变化的计算公式

取渗流影响范围内的土体为单元体,假定浑水渗流过程中单元体总体积保持不变,由于浑水渗流引起土体中细颗粒的含量变化(浑水入渗淤堵时为细颗粒增加,浑水出渗管涌时为细颗粒流失),导致土体的整体密度发生变化,进而影响孔隙率。根据浑水带出或带入地层的固体颗粒体积等于地层孔隙

的体积变化量,可得浑水渗流时刻  $t$  渗流影响范围内土体的孔隙率和孔隙比为:

$$n_t = \frac{V_{st} + V_0}{V} = \frac{V_{st}}{V} + n_0 \quad (4)$$

$$e_t = \frac{n_t}{1 - n_t} \quad (5)$$

式中: $V$ 为浑水渗流影响范围内土体的总体积; $V_0$ 为浑水渗流初始时刻渗流影响范围内孔隙的体积; $V_{st}$ 为浑水渗流  $t$  时刻浑水入渗淤堵带入地层的泥沙或管涌出渗带出地层的泥沙总体积,浑水入渗淤堵时取负值,管涌出渗时取正值。

### 1.3 土体管涌过程中临界渗流速度与临界水力坡降的确定方法

土体之所以发生管涌,是因为土体中的细粒含量较少,粗颗粒没有对细颗粒形成压实约束。因此,可以认为管涌过程中能够移动的土颗粒处于无约束状态,这样当渗透水流的拖曳力等于其有效重量时,管涌开始发生,依此可以得到土体管涌过程中临界渗流速度的确定方法。

依据 Stokes 给出的针对一个土颗粒的层流阻力公式,可知一个不受约束的土颗粒所受的渗透水流拖曳力为<sup>[17]</sup>:

$$F = \lambda \eta d v' \quad (6)$$

式中: $F$ 为拖曳力; $d$ 为可在管涌过程中移动的颗粒直径,根据经验一般取  $d_5 \sim d_3$ ,即颗分曲线上累计质量分数在 5%~3%时对应的颗粒直径,本文取  $d_5$ ,管涌过程中这一参数也是一个变量,可以由土体的级配曲线扣除已经流失的颗粒计算得到,因此以下将其记为  $d_{5t}$ ;  $v'$ 为颗粒周围孔隙水沿渗流方向的局部平均流速,与土体渗透速度  $v$  的关系为  $v = n v'$ 。对于水体中的圆球有  $\lambda = 3\pi$ ,将  $d_5$  记为  $d_{5t}$ ,式(6)可以改写为:

$$F = 3\pi \eta d_{5t} v / n \quad (7)$$

将管涌过程中可移动的土颗粒当成球体,根据土粒比重  $G$  的计算公式  $G = W_s / V_p \gamma_w$  ( $V_p$ 为单个土颗粒球体的体积),可得单个球形土颗粒的有效重量  $W_s$  为:

$$W_s = G V_p \gamma_w - V_p \gamma_w = \frac{1}{6} \pi d_{5t}^3 (G - 1) \gamma_w \quad (8)$$

令渗透水流的拖曳力  $F$  等于其有效重量  $W_s$ ,可得管涌发生的临界渗流速度  $v_{cr}$  为:

$$v_{cr} = \frac{1}{18\eta} n d_{5t}^2 (G - 1) \gamma_w \quad (9)$$

根据达西定律可得发生管涌的临界水力坡降为:

$$i_{cr} = \frac{1}{18k_t \eta} n d_{5t}^2 (G - 1) \gamma_w \quad (10)$$

当然,发生管涌的临界水力坡降也可根据土颗粒自重、静水浮力及渗透力相平衡原理得到的以下经验公式进行计算<sup>[18]</sup>:

$$i_{cr} = 2.2(1 - n)^2 (G - 1) \frac{d_5}{d_{20}} \quad (11)$$

假设有限元计算到某时步时,一个单元的土颗粒总体积(由干密度直接算出)为  $V_s$ ,管涌流失的颗粒总体积为  $V_{st}$ ,则随时间变化的  $d_{5t}$  为粒径级配曲线上以 5%  $(V_s - V_{st}) \times 100\%$  计算结果作为纵坐标所对应的横坐标值。

### 1.4 浑水出渗方程及其有限元求解方法

过流面积区域内管涌的浑水出渗总渗流量  $V_t$  为:

$$V_t = \int_0^T k_t i A dt \quad (12)$$

式中: $T$ 为出渗时间; $A$ 为过流面积; $i$ 为水力坡降。

假定管涌渗出水中的固体颗粒的体积分数为  $\alpha$ ,且不随管涌过程变化(可根据试验或现场测定值取某段时间的平均值,无试验资料时依据经验确定),则管涌流失的颗粒总体积可根据  $V_{st} = \alpha V_t$ <sup>[14]</sup> 计算得到。

注意,本文是以管涌出渗带出固体土颗粒为例进行分析的,当  $V_{st}$  取负值时,利用本文方法就可计算浑水入渗导致细颗粒在砂砾石地基中的淤堵问题。将式(4)代入式(3),得到渗透系数随管涌过程的变化关系式如下:

$$k_t = k_0 \frac{1 - n_0 [(\alpha V_t + V_0)/V]^2}{n_0^2 [1 - (\alpha V_t + V_0)/V]} \quad (13)$$

进一步可得单位过流面积的渗流量随时间变化的关系式如下:

$$V_t = \int_0^T k_0 \frac{1 - n_0}{n_0^2} \frac{i A [(\alpha V_t + V_0)/V]^2}{1 - (\alpha V_t + V_0)/V} dt \quad (14)$$

利用式(10)~(14)即可以借助有限元程序模拟管涌的发生和发展过程。计算步骤为:①采用非稳定渗流分析有限元软件计算得到研究区的初始渗流场,根据临界水力坡降计算公式(式(10)或(11))逐个单元判断是否发生了管涌;②对已经发生管涌破坏的单元,依据式(13)和式(14)计算该单元渗透系数的变化,再根据式(10)或(11)计算临界水力坡降的变化;③调整地层对应单元的渗透系数及临界水力坡降,重新进行本时步的渗流场计算;④进入下一时间步,重复前3步计算过程。

## 2 实例验证

### 2.1 工程概况

山东某中型水库的流域面积为 80 km<sup>2</sup>,水库的

总库容为 2 696 万  $m^3$ 。水库始建于 1975 年 12 月, 1980 年 12 月开始蓄水, 是一座以防洪、灌溉为主的综合性中型水库。水库主坝轴线全长 335.00 m, 由土坝、黏土斜墙坝、堆石重力坝等组成。黏土斜墙坝全长 540.00 m, 高程 302.00~336.00 m 为黏土斜墙, 墙顶高程 341.80 m, 黏土斜墙顶宽 6.40 m, 迎水面坡比 1:2.50, 底面坡比 1:2.00。黏土斜墙坝上游坝坡为干砌块石护坡, 下游侧坝体为阶地体, 在古河道段高程 302.00 m 以下为卵砾石层, 卵砾石层至基岩采用厚 0.70 m、长 102.00 m、最大深度 18.00 m 的混凝土防渗墙。黏土斜墙上游没有设置保护层, 斜墙厚度与所承受的水头相比偏薄。黏土斜墙坝与卵砾石层之间只设置一层反滤层。水库的正常蓄水位为 336.00 m, 设计洪水位为 338.53 m, 校核洪水位为 339.34 m。

因多种原因, 防渗墙施工质量较差, 水库蓄水之初即出现渗漏现象。1980 年水库蓄水后, 坝后约 200 m 处出现渗漏点及渗漏带, 采用了帷幕灌浆截渗措施处理, 渗漏量有所下降。1992 年 5 月黏土斜墙上又出现 4 处塌坑, 塌坑开挖现场清晰地观察到护坡石和垫层发生严重破坏, 黏土斜墙坝体已有部分塌陷, 水流冲蚀现象严重, 渗流导致坝内出现低密度区, 黏土斜墙上已形成明显的渗流通道, 通道口径 68 cm, 也就是发生了严重的管涌。

## 2.2 黏土斜墙坝渗流计算模型

黏土斜墙坝有限元计算模型如图 1 所示, 模型以 302.00 m 高程线与混凝土防渗墙对称轴线交点为原点、指向下游方向(图中向右)为  $x$  轴正方向、向上为  $y$  轴正方向建立坐标系, 网格划分如图 2 所示, 划分单元 12 133 个, 节点数为 12 392。

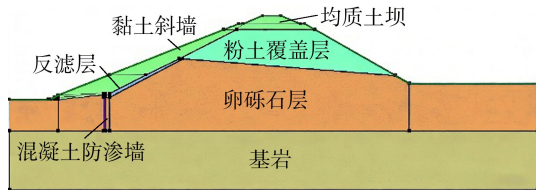


图 1 黏土斜墙坝材料分区

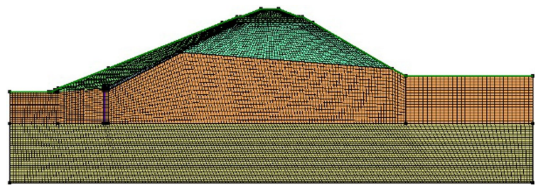


图 2 黏土斜墙坝网格划分

坝体及坝基各部位渗透系数按勘探和设计情况取值, 坝前黏土斜墙渗透系数为  $4.10 \times 10^{-6}$  m/s, 坝基卵砾石层渗透系数为  $8.70 \times 10^{-3}$  m/s, 混凝土防渗墙渗透系数为  $1.70 \times 10^{-9}$  m/s, 反滤层渗透系数为

$4.05 \times 10^{-5}$  m/s。坝后高程 302.00 m 处自由出渗。

## 2.3 黏土斜墙与反滤料的渗透特性

### 2.3.1 黏土斜墙的渗透特性

黏土斜墙坝由重粉质黏土填筑而成, 填筑质量不均匀。重粉质黏土为红褐色, 可塑状态, 干密度  $1.41 \sim 1.73$  g/ $cm^3$ , 平均值为  $1.62$  g/ $cm^3$ , 没有达到设计干密度不小于  $1.65$  g/ $cm^3$  的要求; 标准贯入击数为  $3.7 \sim 5.7$ , 属中等压缩性; 渗透系数平均为  $4.10 \times 10^{-6}$  m/s, 属弱透水性。渗透变形类型为流土, 根据规范可知坝体黏土的允许水力坡降为 4~5, 不超过 10。黏土斜墙料中粒径  $< 0.002$ 、 $0.002 \sim < 0.005$ 、 $0.005 \sim < 0.01$ 、 $0.01 \sim < 0.05$ 、 $0.05 \sim < 0.075$  mm 的颗粒质量分数分别为 11.1%、3.7%、6.2%、73.6%、5.4%。

### 2.3.2 反滤料的渗透特性

建坝时取土区内反滤材料缺乏, 只在黏土斜墙下部设置了一层反滤层, 反滤料采用无黏性粗砂, 土粒比重为 2.68, 孔隙比为 0.48, 渗透系数为  $4.05 \times 10^{-5}$  m/s, 反滤料中粒径  $< 0.075$ 、 $0.075 \sim < 0.25$ 、 $0.25 \sim < 0.5$ 、 $0.5 \sim < 2.0$ 、 $2.0 \sim 5.0$  mm 的颗粒质量分数分别为 0.5%、4.3%、26.7%、68.2%、0.3%。

本文选用刘杰等<sup>[18]</sup>提出的细粒含量判别法判别反滤料的渗透变形形式。由反滤料颗粒级配可知, 其不均匀系数为 5.12, 颗粒是不均匀的, 曲率系数为 1.91, 可知其颗粒连续, 所以反滤料是颗粒级配连续的不均匀砂土。级配连续型土采用几何平均粒径作为区分粒径, 在反滤料颗粒级配曲线上查得反滤料的渗透变形形式为管涌。

### 2.3.3 反滤层管涌的临界水力坡降

由颗粒级配曲线得反滤料  $d_5 = 0.21$  mm,  $d_{20} = 0.42$  mm, 由式(11)计算得到  $i_{cr} = 0.483$ ;  $\eta$  取 20℃ 时的  $1.010 \times 10^{-6}$  kPa·s, 由式(10)计算得到  $i_{cr} = 0.500$ 。两种方法计算得到的反滤料临界水力坡降非常接近, 间接说明式(10)是合理的, 按偏于保守考虑, 以下计算中反滤料的临界水力坡降取 0.483。

## 2.4 反滤层管涌破坏过程计算

由于反滤层设计不规范, 水库正常蓄水时, 反滤料可被渗透水流冲蚀形成管涌, 黏土斜墙失去反滤料的保护后将发生渗透破坏, 坝体产生上、下游贯通的渗漏通道。下文以浑水渗流理论为基础, 首先采用式(10)或式(11)判定管涌发生条件, 采用有限元软件计算渗流场时运用式(13)和式(14)计算管涌发生后渗透系数的演化, 以此来分析该大坝正常蓄水位时的渗透破坏过程。

### 2.4.1 第一次计算

首先利用有限元软件进行初始渗流场计算, 得到黏土斜墙与反滤层附近的水头等值线、水力坡降

与流速分布如图 3~5 所示,反滤层与卵砾石层接触位置处的流速、水力坡降随  $x$  坐标的变化如图 6 所示。

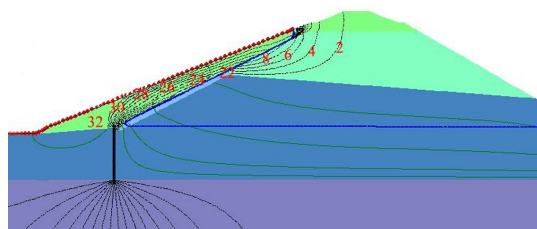


图 3 第一次计算时黏土斜墙与反滤层附近水头等值线(单位:m)

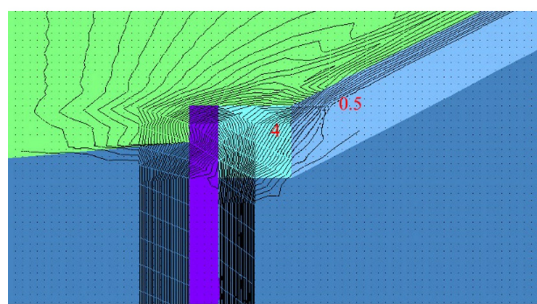


图 4 第一次计算时黏土斜墙与反滤层附近水力坡降等值线

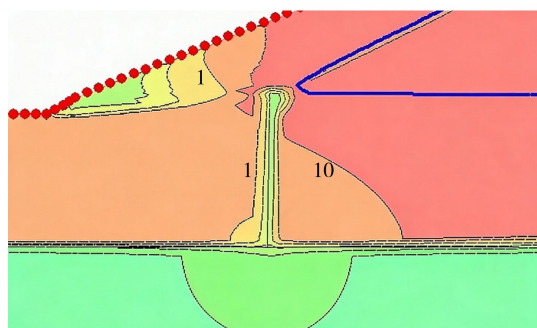


图 5 第一次计算时黏土斜墙与反滤层附近流速等值线(单位: $10^{-6}$  m/s)

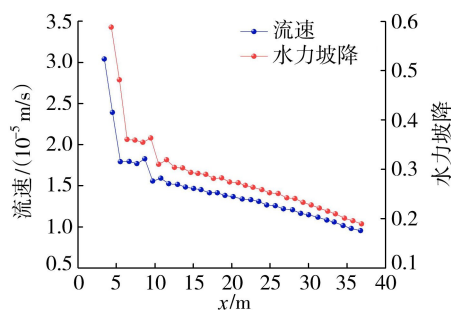


图 6 第一次计算时反滤层与卵砾石层接触位置处流速和水力坡降随  $x$  坐标的变化曲线

可见正常蓄水位 336.00 m 时,水头等值线集中分布于黏土斜墙和反滤层中,其中黏土斜墙承受着大部分的水头,反滤层中的水头等值线分布于底部和顶部,以底部较密集。由图 6 结合图 4、图 5 可知,在较大范围内流速的最大值达到  $1 \times 10^{-5}$  m/s,渗

流速度较大,留下了很大的安全隐患。反滤层底部的水力坡降较大,最大值已达到 4,为临界水力坡降 0.483 的 8.28 倍。反滤层与卵砾石层接触位置处的最大水力坡降为 0.6,也大于临界水力坡降,该位置存在渗透破坏危险。

由于设计和施工的原因,卵砾石层的渗透系数较大,级配不良,不能有效防止反滤层颗粒的流失,同时由于反滤料自身级配不能保证稳定,在水力坡降大于临界水力坡降时会发生管涌破坏,基于此,选择反滤层中水力坡降大于临界水力坡降的区域,由浑水渗流程序进行计算。

由图 7 可见,整个管涌时间内孔隙率、渗透系数都呈现出明显的增大趋势,且孔隙率、渗透系数的增大速率随着时间的增长而增大,这与现场观测到的土体管涌破坏发展过程能较好地吻合。在初始时刻,由于被渗透水流带出管涌口的颗粒粒径较小,在渗流量和渗流速度都较小的情况下,细颗粒的流失速度也相应较缓慢,所以孔隙率、渗透系数也在缓慢增长,但土体中细颗粒的流失导致了局部渗透系数的增大,使管涌水向该区域集中,加速了管涌的发展。随着细颗粒的不断流失,土体的孔隙通道越来越大,可以允许一些较大粒径的颗粒通过,此时管涌就会呈现加速发展的趋势。土体渗透系数从  $5 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-4}$  m/s 历时 1700 s,而从  $5 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-3}$  m/s 的则只用了 200 s,速率变化非常明显,说明反滤层中的黏性颗粒一旦流失完成,反滤层将在很短时间内破坏。

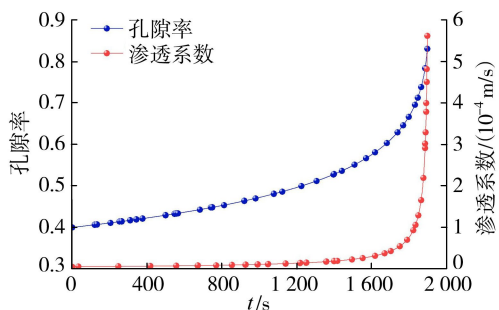


图 7 管涌区孔隙率和渗透系数随时间变化曲线

#### 2.4.2 第二次计算

在第一次计算的基础上,按照 1.4 节给出的有限元求解方法进行第二次计算,得到黏土斜墙与反滤层附近的水头等值线如图 8 所示。

正常蓄水位 336.00 m 时,第一次计算的反滤层已经发生管涌破坏,由图 8 可知,第二次计算的水头等值线仍分布于黏土斜墙和反滤层中,与第一次计算结果比较,黏土斜墙承受的水头增大,反滤层中的水头等值线分布更加密集。由图 9 可见,反滤层底部局部位置流速最大值已达  $4.81 \times 10^{-5}$  m/s,而且分

布范围集中,使此处更容易发生渗流破坏。反滤层底部的水力坡降仍然很大,反滤层上方水力坡降已达 5.8 左右,约为临界水力坡降的 12 倍,管涌范围将进一步扩大。

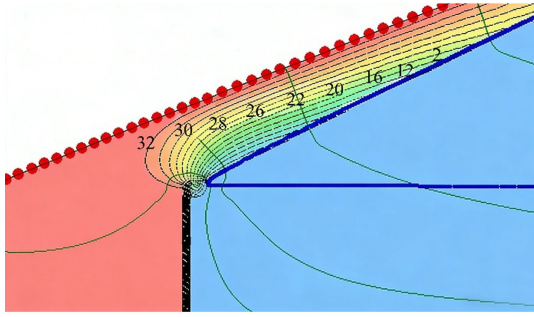


图 8 第二次计算时黏土斜墙与反滤层附近水头等值线(单位:m)

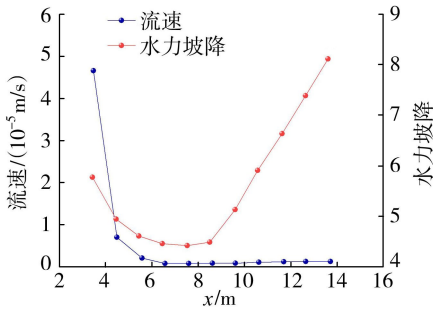


图 9 第二次计算时反滤层与卵石石层接触位置处流速和水力坡降随  $x$  坐标的变化曲线

### 2.4.3 第三次计算

在第一、二次计算的基础上进行第三次计算,得到黏土斜墙与反滤层附近的水头等值线、水力坡降与流速分布如图 10~12 所示,反滤层与卵石石接触位置处的流速、水力坡降随  $x$  坐标变化如图 13。

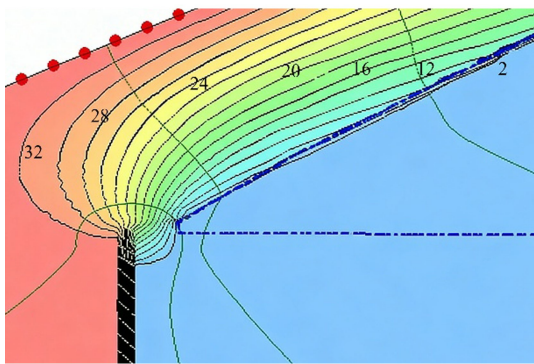


图 10 第三次计算时黏土斜墙与反滤层附近水头等值线(单位:m)

由图 10 可知,所有的水头都由黏土斜墙承担,在黏土斜墙底部水头等值线分布密集,造成在此位置水力坡降很大,由图 13 可知,此处最大流速为  $7.34 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ ,较第一次计算的初始值有大幅度的提升。对照图 12 可见流速达到  $3.16 \times 10^{-6} \text{ m/s}$  的区域明显扩大,此时在防渗墙与黏土斜墙接触位置最

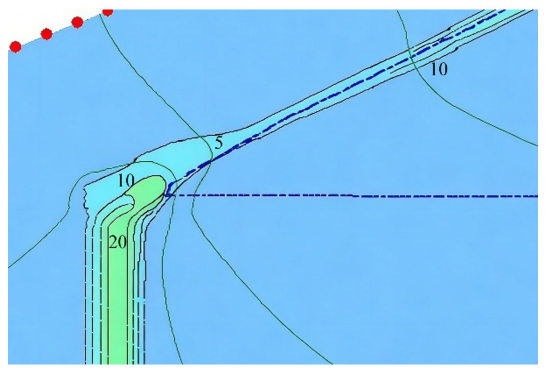


图 11 第三次计算时黏土斜墙与反滤层附近水力坡降等值线

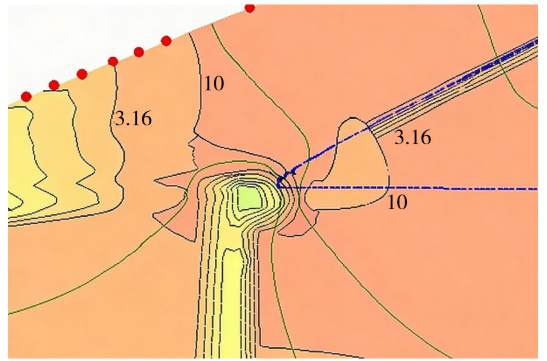


图 12 第三次计算时黏土斜墙与反滤层附近流速等值线(单位: $10^{-5} \text{ m/s}$ )

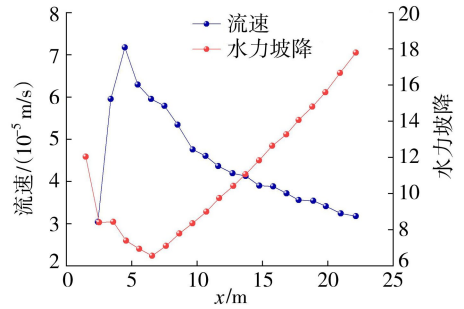


图 13 第三次计算时反滤层与卵石石层接触位置处流速和水力坡降随  $x$  坐标的变化曲线

大水力坡降已达到 20。

由于反滤层的管涌破坏,致使防渗墙顶部的黏土斜墙失去反滤层的保护,使得该处黏土斜墙中的水力坡降达到 20,已超过了黏土斜墙的允许水力坡降(4~5),在库区高水位作用下,此处的黏土斜墙发生流土破坏,使黏土斜墙被击穿,成为贯通上下游的集中渗漏通道。这是大坝在蓄水后黏土斜墙上出现多处塌坑的直接原因。

上述计算结果与 1992 年现场实测的黏土斜墙塌坑位置及破坏形态高度吻合,成功再现了从反滤层局部管涌发展到黏土斜墙被击穿形成贯通上下游集中渗漏通道的完整演化过程。3 次迭代计算清晰地展示了管涌破坏的渐进性特征,第一次计算显示反滤层底部水力坡降远超临界值,局部区域首先发

生管涌,随着反滤料细颗粒流失,渗透系数在短时间内急剧增大,第二次计算显示管涌范围显著扩大,至第三次计算时防渗墙顶部黏土斜墙处水力坡降已超过允许值,最终导致黏土斜墙流土破坏。这一计算过程完整揭示了管涌破坏由点到面、由局部到整体的发展机理,与实际观察到的形成塌坑、通道扩展、坝面塌陷的破坏顺序一致,验证了本文方法在预测管涌发生位置、判断破坏发展趋势及评估工程安全风险方面具有良好的可靠性和工程适用性,为类似堤坝工程的渗流安全评价提供了有效的分析手段。

### 3 结 语

本文以浑水渗流理论为基础,采用达西渗透系数公式建立了浑水渗流过程中渗透系数与初始孔隙率(初始孔隙比)、初始渗透系数的关系;根据浑水带出或带入地层的固体颗粒体积等于地层孔隙的变化量这一原理,推导了浑水渗流过程中孔隙率(孔隙比)随时间的变化公式及浑水渗流过程中渗透系数随时间的变化公式。以地层管涌过程为例,根据自由土颗粒所受渗流拖曳力与有效重量相平衡的管涌临界启动条件,推导了发生管涌的临界渗流速度和临界水力坡降计算公式,给出了利用有限元软件迭代求解非稳定渗流管涌发生与发展过程的计算方法。利用本文提出的计算方法重现了山东发生管涌破坏的某中型水库大坝反滤层的管涌过程及黏土斜墙被渗流击穿、坝面出现塌坑的过程,验证了本文方法的有效性。

### 参考文献:

[ 1 ] Deng Zezhi, Wang Gang, Jin Wei, et al. Characteristics and quantification of fine particle loss in internally unstable sandy gravels induced by seepage flow [ J ]. *Engineering Geology*, 2023, 321: 107150.

[ 2 ] Pol J C, Kanning W, van Beek V M, et al. Temporal evolution of backward erosion piping in small-scale experiments [ J ]. *Acta Geotechnica*, 2022, 17 ( 10 ): 4555-4576.

[ 3 ] Ming P, Lu J, Cai X, et al. Multi-particle model of the critical hydraulic gradient for dike piping [ J ]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2020, 57 ( 3 ): 200-210.

[ 4 ] Zhang S, Ye F, Liu Y, et al. Critical hydraulic gradient of piping erosion under free flow and seepage flow coupling model [ J ]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2023, 60 ( 5 ): 419-427.

[ 5 ] 梁越, 龚胜勇, 杨咏梅, 等. 间断级配散粒土侵蚀过程及强度演变机理研究 [ J ]. *岩土工程学报*, 2024, 46 ( 3 ): 632-639. ( Liang Yue, Gong Shengyong, Yang Yongmei, et

al. Erosion process and strength evolution mechanism of gap-graded cohesionless soil [ J ]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2024, 46 ( 3 ): 632-639. ( in Chinese )

[ 6 ] 王明年, 江勇涛, 于丽, 等. 砂性土细颗粒启动临界水力坡降计算方法 [ J ]. *岩土力学*, 2020, 41 ( 8 ): 2515-2524. ( Wang Mingnian, Jiang Yongtao, Yu Li, et al. Analytical solution of startup critical hydraulic gradient of fine particles migration in sandy soil [ J ]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41 ( 8 ): 2515-2524. ( in Chinese )

[ 7 ] 吴梦喜, 高桂云, 杨家修, 等. 砂砾石土的管涌临界渗透坡降预测方法 [ J ]. *岩土力学*, 2019, 40 ( 3 ): 861-870. ( Wu Mengxi, Gao Guiyun, Yang Jiaxiu, et al. A method of predicting critical gradient for piping of sand and gravel soils [ J ]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40 ( 3 ): 861-870. ( in Chinese )

[ 8 ] 李火坤, 王文韬, 王姣, 等. 二元堤基结构堤防管涌机理模型试验 [ J ]. *水利水电科技进展*, 2024, 44 ( 1 ): 79-88. ( Li Huokun, Wang Wentao, Wang Jiao, et al. Model test study on piping mechanism of binary dike foundation structure [ J ]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2024, 44 ( 1 ): 79-88. ( in Chinese )

[ 9 ] 梁越, 代磊, 魏琦. 基于透明土和粒子示踪技术的渗流侵蚀试验研究 [ J ]. *岩土工程学报*, 2022, 44 ( 6 ): 1133-1140. ( Liang Yue, Dai Lei, Wei Qi. Experimental study on seepage erosion based on transparent soil and particle tracing technology [ J ]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44 ( 6 ): 1133-1140. ( in Chinese )

[ 10 ] 罗玉龙, 李澳, 张海彬, 等. 不同层间系数条件下双层地基潜蚀可视化试验研究 [ J ]. *岩石力学与工程学报*, 2024, 43 ( 1 ): 226-235. ( Luo Yulong, Li Ao, Zhang Haibin, et al. Visual experimental study on suffusion in double-layered soil under different retention ratios [ J ]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2024, 43 ( 1 ): 226-235. ( in Chinese )

[ 11 ] Zou Yuhua, Chen Chen, Zhang Limin. Simulating progression of internal erosion in gap-graded sandy gravels using coupled CFD-DEM [ J ]. *International Journal of Geomechanics*, 2020, 20 ( 1 ): 0001520.

[ 12 ] Al-Janabi A, Dibs H, Sammen S, et al. Comparison analysis of seepage through homogenous embankment dams using physical, mathematical and numerical models [ J ]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2025, 50 ( 11 ): 8143-8152.

[ 13 ] 刘胜, 王媛, 冯迪. 堤防管涌渗流场响应特征的数值模拟 [ J ]. *水利水电科技进展*, 2023, 43 ( 6 ): 10-16. ( Liu Sheng, Wang Yuan, Feng Di. Numerical simulation of response characteristics of seepage field during embankment piping [ J ]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2023, 43 ( 6 ): 10-16. ( in Chinese )

( 下转第 45 页 )

# 基于改进人工鱼群-粒子群算法的梯级水库群多目标优化调度算法

张侃侃<sup>1,2</sup>, 赵海峰<sup>3</sup>, 王兆才<sup>1,3</sup>

(1. 水能资源利用关键技术湖南省重点实验室; 2. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司; 3. 上海海洋大学信息学院)

**摘要:**为解决梯级水库群优化调度中高维度、非线性的复杂优化问题,提出了一种两阶段多目标改进人工鱼群-粒子群(TMIAFS-PSO)算法。该算法采用分段映射扩展初始种群的搜索空间,通过调整自适应步长和引入多样化移动策略来增强局部和全局搜索能力;采用两阶段过滤策略,保留符合约束条件的粒子,并加入改进人工鱼群优化策略,进一步扩大粒子搜索范围。金沙江下游的乌东德、白鹤滩、溪洛渡和向家坝梯级水库群实例验证结果表明,相较于其他算法, TMIAFS-PSO 算法的帕累托解集表现出更好的收敛性和均匀性,体现了该算法的优越性,并通过分析 TMIAFS-PSO 算法所生成调度方案的水位变化,总结出该梯级水库群相对稳定的优化调度方案。

**关键词:**梯级水库群优化调度;改进人工鱼群-粒子群算法;帕累托解集;多目标优化算法

**A multi-objective optimal operation algorithm of cascade reservoirs based on improved artificial fish swarm-particle swarm optimization algorithm**//Zhang Kankan<sup>1,2</sup>, Zhao Haifeng<sup>3</sup>, Wang Zhaocai<sup>1,3</sup> (1. Hunan Provincial Key Laboratory of Hydropower Development Key Technology; 2. POWERCHINA Zhongnan Engineering Corporation Limited; 3. College of Information, Shanghai Ocean University)

**Abstract:** To address the high-dimensional and nonlinear complex optimization problems in the optimal operation of cascade reservoirs, a two-stage multi-objective improved artificial fish swarm-particle swarm optimization (TMIAFS-PSO) algorithm was proposed. This algorithm employs segmented mapping to expand the search space of the initial population, and enhances local and global search capabilities by adjusting the adaptive step size and introducing a diversified movement strategy. Additionally, the algorithm adopts a two-stage filtering strategy to retain particles that meet the constraint conditions and incorporates an improved artificial fish swarm optimization strategy to further expand the particle search range. A case study was conducted on the cascade reservoir group consisting of Wudongde, Baihetan, Xiluodu, and Xiangjiaba in the lower reaches of the Jinsha River. The results indicate that, compared to other algorithms, the Pareto solution set of the TMIAFS-PSO algorithm exhibits better convergence and uniformity, demonstrating the superiority of this algorithm. By analyzing the water level variations of the operation schemes generated by the TMIAFS-PSO algorithm, a relatively stable optimal operation scheme for this cascade reservoir group is summarized.

**Key words:** optimal operation of cascade reservoirs; improved artificial fish swarm-particle swarm optimization algorithm; Pareto solution set; multi-objective optimization algorithm

梯级水库群优化调度是指在多个相邻且相互影响的水库之间,通过优化决策达到整体水利效益最大化<sup>[1]</sup>。梯级水库群的合理调度可提高水资源的利用效率<sup>[2]</sup>,有效预防和减轻洪涝干旱等灾情造成的不利影响<sup>[3]</sup>,有助于实现水电资源利用的最大化,满足社会对清洁能源的需求<sup>[4]</sup>。同时,梯级水库群优化调度可以维持水生态系统的需水流量,对保护水生

态环境、促进生态文明建设有着重要意义<sup>[5]</sup>。

梯级水库群优化调度需要综合考虑各种约束条件和优化目标,是一项复杂的、多目标的经济和技术问题<sup>[6]</sup>。随着梯级水库数量增加,决策变量呈指数级增长,引发“维数灾”困境,因此必须采用合适的优化算法和调度策略。水库调度问题作为一类优化问题,受到学者的广泛关注,其求解方法已从最初的

**基金项目:**水能资源利用关键技术湖南省重点实验室开放研究基金面上项目(PKLHD202304);教育部人文社科规划基金项目(24YJAZH167);国家自然科学基金项目(11701363)

**作者简介:**张侃侃(1985—),男,高级工程师,博士,主要从事智能水利研究。E-mail:kkzhang68@163.com

**通信作者:**王兆才(1979—),男,副教授,博士,主要从事水文预报和梯级水库优化调度研究。E-mail:zewang@shou.edu.cn

线性规划发展到非线性规划、动态规划等<sup>[7]</sup>。近年来,随着智能优化算法的不断发展和完善,其在水库调度问题中的应用日益广泛。相比传统的优化算法,智能优化算法具有更强的适应性和鲁棒性,能够更好地处理多目标、多约束和高维度问题,也能够更有效地应对水库调度问题中的复杂性挑战<sup>[8-10]</sup>。例如:王奇等<sup>[11]</sup>关注多水库水电系统的最优策略选择问题,采用改进的智能水滴(IWD)算法研究梯级水库群调峰调度,验证了算法的高效性;许婷婷<sup>[12]</sup>改进了遗传算法(GA),并将其应用于洪水季节的水库调度,以加强洪水控制能力并确保地区安全;汪涛等<sup>[13]</sup>利用粒子群(PSO)算法确定了水库系统对洪水排放的初始解决方案,有效满足了水库的防洪泄洪和安全管控需求。串并联水库群调度是一种具有高维度、非线性、多目标等特性的复杂优化问题,无法简单地采用常规的优化算法求解,不少学者提出了多目标智能优化算法<sup>[14-15]</sup>,如刘百灵等<sup>[16]</sup>的第二代非支配排序遗传算法(NSGA-II)、金文婷等<sup>[17]</sup>的多目标粒子群(MPSO)算法、王福岭<sup>[18]</sup>的差分演化算法(DEMO)、吴芸<sup>[19]</sup>的帕累托储存式动态维度搜寻(PA-DDS)等。

大规模的梯级水库群调度问题的复杂性远超传统的单一水库调度,它涉及多个目标、约束和维度,且决策变量数量随水库规模扩大呈指数级增长。在面对如此复杂的问题时,简单地引入一种智能优化算法往往难以满足多目标优化的需求。为有效应对该问题,本文提出了两阶段多目标改进人工鱼群-粒子群(TMIAFS-PSO)算法,并以金沙江下游梯级水库群为研究对象,将该算法与传统的单一优化算法进行比较,以期更好地兼顾多个目标之间的平衡,提高梯级水库调度问题的解决效率和准确度。

## 1 模型和方法

### 1.1 梯级水库群优化调度模型

梯级水库群优化调度模型的目标函数包括梯级水库总发电量最大、梯级电站最小出力最大、最小下泄流量最大,其函数形式分别为:

$$F_1 = \max \sum_{i=1}^T \sum_{i=1}^I K_i Q_u H_u \Delta t \quad (1)$$

$$F_2 = \max \left( \min_i \sum_{i=1}^I K_i Q_u H_u \right) \quad (2)$$

$$F_3 = \max(\min_i q_u) = \max[\min_i (Q_u + Q_{Ait})] \quad (3)$$

式中: $T$ 为调度时段的总数量; $I$ 为电站的总数量; $K_i$ 为电站 $i$ 的输出系数; $Q_u$ 为电站 $i$ 在时段 $t$ 的发电流量; $H_u$ 为电站 $i$ 在时段 $t$ 的发电水头(水位); $\Delta t$ 为计算时间步长; $q_u$ 为电站 $i$ 在时段 $t$ 的排水流量;

$Q_{Ait}$ 为电站 $i$ 在时段 $t$ 的弃水流量。

采用综合方法,以水量平衡、水位、下泄流量、电站输出、上下游梯级水库流量关系和非负约束等6个条件作为限制因素。

#### a. 水量平衡约束:

$$V_{i,t+1} = V_{it} + (Q_{lit} - Q_{it} - Q_{Ait}) \Delta t \quad (4)$$

式中: $V_{it}$ 为电站 $i$ 在时段 $t$ 的水库储量; $Q_{lit}$ 为时段 $t$ 内流入电站 $i$ 的流量。

#### b. 水位约束:

$$Z'_{it} \leq Z_{it} \leq Z''_{it} \quad (5)$$

式中: $Z_{it}$ 为电站 $i$ 在时段 $t$ 的水库水位; $Z'_{it}$ 、 $Z''_{it}$ 分别为电站 $i$ 在时段 $t$ 的水库水位的下限和上限,其中下限通常对应死水位,上限通常对应正常蓄水位或洪水限制水位。

#### c. 下泄流量约束:

$$Q'_u \leq Q_u + Q_{Ait} \leq Q''_u \quad (6)$$

式中: $Q'_u$ 、 $Q''_u$ 为电站 $i$ 在时段 $t$ 的最小和最大下泄流量。

#### d. 电站输出约束:

$$N_{\min} \leq K_i Q_u H_u \leq N_{\max} \quad (7)$$

式中: $N_{\min}$ 、 $N_{\max}$ 分别为电站 $i$ 的保证输出和装机容量。

#### e. 上下游梯级水电站流量约束:

$$q_u = Q_{i-1,t-1} + Q_{A_{i-1,t-1}} + Q_{lit} \quad (8)$$

#### f. 非负约束:

式(1)~(8)中的所有变量均为非负数。

## 1.2 改进人工鱼群-粒子群(IAFS-PSO)算法

人工鱼群(AFS)算法基于鱼群行为模型,通过鱼群的觅食行为来求解优化问题。本文将人工鱼的位置向量(对应梯级水库调度的决策变量,如水位、下泄流量)代入梯级水库多目标函数计算得到适应度值,其值越高表示对应调度方案的综合效益越优。由于AFS算法局部搜索能力较强,但全局探索能力不足,为此本文通过与具有全局搜索能力的PSO算法进行融合,并对AFS算法引入自适应步长、多样化移动策略,形成“AFS局部精细搜索与PSO全局快速探索”的协同框架,提升算法的寻优效果。

### 1.2.1 自适应步长策略

引入自适应步长策略,使步长能够根据迭代次数动态调整。算法在初期使用较大的步长以加快全局搜索速度,而在后期使用较小的步长以精细调节搜索过程,从而提高搜索的有效性和收敛性,步长计算公式为:

$$\gamma_h = \gamma_{\min} + (\gamma_{\max} - \gamma_{\min})(h_{\max} - h)/h_{\max} \quad (9)$$

式中: $\gamma_h$ 为当前迭代的步长; $\gamma_{\min}$ 为最小步长; $\gamma_{\max}$

为最大步长;  $h_{\max}$  为最大迭代次数;  $h$  为当前迭代次数。

### 1.2.2 多样化移动策略

引入多样化移动策略,使鱼群在搜索过程中具有更多的移动选择,而不局限于朝向邻居鱼移动或随机移动,从而增加搜索的多样性,有助于避免陷入局部最优解,提高算法的全局搜索能力,鱼群的位置更新公式为:

$$X_i = X_i + \gamma\delta \quad (i = 1, 2, \dots, p) \quad (10)$$

式中:  $X_i$  为第  $i$  条鱼的位置;  $\gamma$  为步长;  $\delta$  为移动方向;  $p$  为种群数量。在移动时,根据邻居鱼的适应度决定移动方向,如果邻居鱼的适应度更高,则朝向邻居鱼移动一定的步长;否则,随机选择一个方向移动一定的步长,以增加搜索的多样性。

### 1.2.3 考虑邻居鱼的适应度

在更新个体行为时,根据邻居鱼的适应度决定是否朝向邻居鱼移动。这样可以使得鱼群更加倾向于向适应度更高的方向移动,从而增强搜索的导向性,有助于更快地发现更优的解决方案,鱼群的位置更新公式为:

$$X_i = X_i + \gamma\delta\theta_i \quad (i = 1, 2, \dots, p) \quad (11)$$

式中:  $\theta_i$  为第  $i$  条鱼的舒适度因子。在这种情况下,舒适度因子可以根据鱼的个体特征和周围环境进行计算,以影响其移动方向和步长,可以使得鱼在移动时更加智能化和适应环境。

### 1.2.4 与 PSO 算法融合

PSO 算法是一种常用的智能优化算法<sup>[19]</sup>,具有较好的全局搜索能力,能够在解空间中高效搜索,快速定位潜在最优解。而 IAFS 算法则擅长局部搜索,能够在已知解附近进行精细调节。由于两种算法在搜索过程中采用了不同的搜索策略和更新规则,结合起来可以在解空间中形成更丰富的搜索路径,有助于克服局部最优解陷阱,增加算法的全局搜索能力,并且提高算法的鲁棒性,其流程见图 1。

## 1.3 TMIAFS-PSO 算法

尽管 IAFS-PSO 算法在解决某些问题方面表现出了非常好的优化效果,但是梯级水库问题通常涉及多个目标的优化。如果将原始算法直接应用于多目标优化问题,结果可能会偏向于单一目标的最优值,导致其他目标值处于不稳定状态。为了解决这个问题,本文提出了 TMIAFS-PSO 算法。TMIAFS-PSO 算法是在 IAFS-PSO 算法基础上,针对梯级水库多目标优化(发电、防洪、生态等)与强约束条件(水量平衡、水位、流量限制等)的特殊性,通过两阶段过滤策略(第一阶段处理约束违规解,第二阶段扩展可行解搜索范围)和帕累托解集构建,将单目标优化算法扩展至多目标场景。

第一阶段的重点是寻找不符合约束条件的解决方案。这些解决方案可能会违反水位、流量或功率输出等约束条件。为了解决这个问题,时间段被分为两部分:前一个月的水位和后一个月的水位。根据式(12)~(14)的描述,有一定概率会增加前一个月的水位或减少后一个月的水位。

若  $r_1 \leq 0.4$ :

$$X_u^{(k)} = X_u^{(k)} + r_2(X_{\max} - X_u^{(k)}) \quad (12)$$

若  $0.4 < r_1 \leq 0.6$ :

$$\begin{aligned} X_u^{(k)} &= X_u^{(k)} + r_2(X_{\max} - X_u^{(k)}) \\ X_{i+1,t}^{(k)} &= X_{i+1,t}^{(k)} - r_3(X_u^{(k)} - X_{\min}) \end{aligned} \quad (13)$$

若  $r_1 > 0.6$ :

$$X_{i+1,t}^{(k)} = X_{i+1,t}^{(k)} - r_3(X_u^{(k)} - X_{\min}) \quad (14)$$

式中:  $r_1, r_2, r_3$  为  $[0, 1]$  范围内的随机数;  $X_u^{(k)}$  为第  $i$  个粒子在第  $k$  次迭代期间的位置,此时为第  $t$  个月;  $X_{\max}, X_{\min}$  分别为当前粒子位置的最大值和最小值。

在第二阶段,为了扩大可行解的探索范围,首先选择一个随机分割点将解向量分成前部和后部两部分;然后按一定随机概率,以相同的值增加或减少前部或后部的水位;接着计算目标函数,如果得到了更好的解决方案,则用新的解决方案替换原始解决方

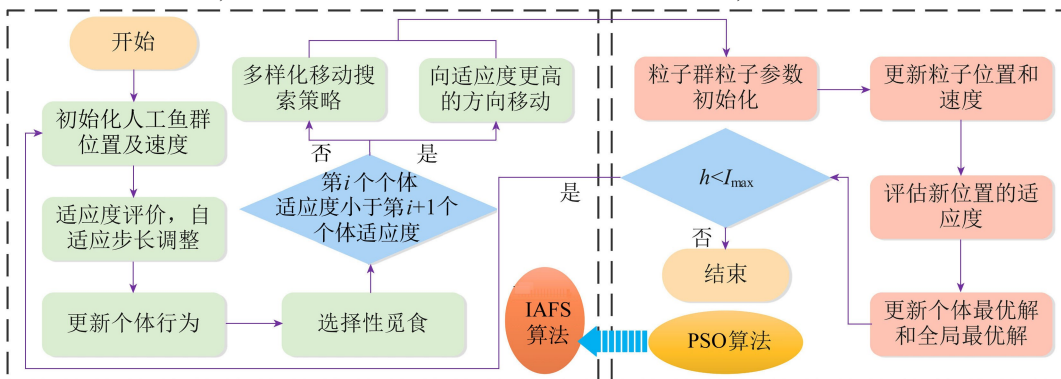


图 1 IAFS 算法与 PSO 算法融合的流程

案,否则保持不变。计算过程为:

$$C = \begin{cases} (C_1^1, C_2^1, \dots, C_{n-1}^1, C_n^1, C_{n+1}^0, \dots, C_N^0) & r_4 < 0.5 \\ (C_1^0, C_2^0, \dots, C_{n-1}^0, C_n^1, C_{n+1}^1, \dots, C_N^1) & r_4 \geq 0.5 \end{cases} \quad (15)$$

$$Y_i = \begin{cases} Y_i - r_5 C(X_{\max} - X_{\min}) & r_6 < 0.5 \\ Y_i + r_5 C(X_{\max} - X_{\min}) & r_6 \geq 0.5 \end{cases} \quad (16)$$

式中: $r_4, r_5, r_6$  为 $[0, 1]$ 范围内的随机数; $C_k^1, C_k^0$  分别表示数字 1 和 0; $Y_i$  为第  $i$  个粒子的解向量。

## 1.4 多目标优化算法性能比较

帕累托解集是多目标优化问题中独有的概念,它是指在多个决策目标的情况下,不能再通过优化任何一个目标来进一步改进解的同时,没有进一步降低其他目标。因此,帕累托解集质量是评价多目标优化算法性能的重要指标。本文通过以下 3 个指标对算法的帕累托解集质量作出评价:

a. 超体积指标(HV),用于衡量个体所占据的空间范围,以全面评估解集的收敛性和多样性<sup>[20]</sup>。

b. 多次运行所得的目标函数最优值的平均值,以有效消除由于随机性引起的波动影响,从而提供对算法稳定性和一致性的评估。

c. 解集覆盖指标,用于识别解集之间的差异性和相似性,通过比较不同算法生成的解集之间的重叠程度,评估这些算法在探索解空间时的多样性和全面性<sup>[21]</sup>。

## 2 实例验证

### 2.1 研究区概况

金沙江位于长江上游,长约 3 500 km,沿途落差高达 5 100 m,占据了长江主流落差的 95% 以上,因而金沙江流域拥有极为丰富的水力资源。目前金沙江下游依次建设了乌东德、白鹤滩、溪洛渡和向家坝

4 个大型水电站,总装机容量接近 5 000 万 kW,形成了一个庞大且复杂的梯级水电系统。对该梯级水库群的优化调度,既可以提高水电能源的利用效益,也可以降低水涝干旱灾害带来的不利影响,同时也能保障通航能力以及生态环境的安全。

### 2.2 优化结果

#### 2.2.1 帕累托解集对比评价

基于 GB/T 22482—2008《水文情报预报规范》,计算 1979—2022 年金沙江下游屏山站年径流距平百分率( $P$ ),选取 1990 年( $P = 22.7\%$ ,丰水年)、1996 年( $P = -2.8\%$ ,平水年)、2011 年( $P = -22.3\%$ ,枯水年)作为典型年份。所选年份涵盖高、中、低来水条件,且年内径流分配符合金沙江“汛期集中、枯季平稳”的特性(汛期径流量占比 72%~78%),以全面验证算法在不同水文场景下的调度性能。表 1 为本文建立的 TMIAFS-PSO 算法与常见的多目标算法(遗传算法(GA)、非支配排序遗传算法(NSGA-II)、IAFS-PSO 算法)在丰水年、平水年和枯水年寻优的帕累托解集结果。

较大的 HV 值对应更完整的帕累托前沿,表明解集的收敛性和分布更好。由表 1 的 HV 值可知,在丰水年,TMIAFS-PSO 算法实现了  $8.28 \times 10^{10}$  的 HV 值,总体表现良好,而 NSGA-II 的 HV 值为  $6.53 \times 10^{10}$ ,表现较差;在平水年,TMIAFS-PSO 算法实现了  $7.02 \times 10^{10}$  的 HV 值,同样表明总体表现良好,而 GA 的 HV 值为  $4.25 \times 10^{10}$ ,表现较差。在这两年中,TMIAFS-PSO 算法都优于其他算法。在枯水年,IAFS-PSO 算法实现了  $3.64 \times 10^{10}$  的 HV 值,总体表现良好,并且与 TMIAFS-PSO 算法的值非常接近。这是因为在枯水年,可调节流量大大减少,导致调节空间有限,并且水位相对接近,从而导致数值差异较小。

#### 2.2.2 梯级水库调度模型目标值分析

由表 1 中不同算法下的目标函数值可知,

表 1 不同算法下的 HV 和目标函数最优值

水平年	算法	HV/ $10^{10}$	平均最优值		
			总发电量/(亿 kW·h)	最小出力/MW	最小下泄流量/( $m^3/s$ )
丰水年	GA	8.04	2 076.31	14 597.90	2 655.62
	NSGA-II	6.53	2 080.58	13 474.91	2 315.42
	IAFS-PSO	7.35	2 073.23	15 011.81	2 692.39
	TMIAFS-PSO	8.28	2 085.45	15 692.81	2 863.17
平水年	GA	4.25	1 882.09	12 441.69	1 815.78
	NSGA-II	5.64	1 884.38	13 985.26	2 143.01
	IAFS-PSO	6.74	1 883.24	14 731.41	2 461.64
	TMIAFS-PSO	7.02	1 890.15	15 775.28	2 628.03
枯水年	GA	2.73	1 631.24	11 314.11	1 481.03
	NSGA-II	2.85	1 628.71	11 573.43	1 513.91
	IAFS-PSO	3.64	1 631.35	12 384.61	1 792.94
	TMIAFS-PSO	3.57	1 636.07	13 224.97	1 896.11

注:各目标最优值为帕累托解集中单一目标的最大值;所有数值均为 20 次独立运行的平均值,标准差小于 5%。

TMIAFS-PSO 算法一直优于其他 3 个算法。同时,随着径流量的减少,梯级水库总发电量也相应减少,减少幅度均在 200 亿 kW·h 左右。梯级水库最小出力在丰水年和平水年保持相对稳定,但在枯水年下降显著。这是因为减少的径流导致各机组无法以全负荷运行。最小下泄流量目标函数总体上也在逐渐减小。然而,由于算法性能和变化幅度不同, TMIAFS-PSO 与 IAFS-PSO 算法接近,明显高于 GA 和 NSGA-II 算法。总之, TMIAFS-PSO 算法获得的解集比其他算法获得的解集更接近真实的帕累托前沿,并且表现出良好的收敛性和均匀分布性。

表 2 展示了不同算法之间的解集覆盖情况。在丰水年、平水年和枯水年中, TMIAFS-PSO 算法获得的非支配解集与 GA、NSGA-II 和 IAFS-PSO 算法获得的非支配解集之间的覆盖率值均在 0.738 和 1 之间。这意味着尽管其他 3 种算法中的某些解可能对 TMIAFS-PSO 算法中的某些解来说是非支配的,但大多数情况下, TMIAFS-PSO 算法中的解都能够支配其他 3 种算法中的解。这表明,相较于 GA 和 NSGA-II 算法, IAFS-PSO 算法获得的非支配解集的质量更高。

表 2 不同算法的解集覆盖率

水平年	算法	GA	NSGA-II	IAFS-PSO	TMIAFS-PSO
丰水年	GA		0.881	0.260	0
	NSGA-II	0.081		0.291	0
	IAFS-PSO	0.482	0.143		0
	TMIAFS-PSO	0.840	0.738	0.812	
平水年	GA		0	0	0
	NSGA-II	1		0.253	0.009
	IAFS-PSO	0.851	0.286		0.009
	TMIAFS-PSO	1	0.738	1	
枯水年	GA		0.014	0	0
	NSGA-II	0.429		0	0
	IAFS-PSO	1	1		0
	TMIAFS-PSO	1	1	0.745	

从上述评价指标结果可以看出, TMIAFS-PSO 算法相较于原始的 IAFS-PSO 算法有所改进,提升了非支配解集的质量,并且能够提供更准确的结果。这种改进主要体现在约束处理和精度方面,使得 TMIAFS-PSO 算法在解决多目标优化问题时更加可

靠。因此,综合考虑各算法的性能和适用性, TMIAFS-PSO 算法在处理复杂的多目标优化问题时表现更好,它能够更快地收敛到全局最优解,产生的解集更均匀,覆盖的解空间更广泛,是解决梯级水库群调度等实际问题的有效工具。

### 2.3 优化调度结果

为进一步分析水库调度过程的特点,进行了各种方案的比较,包括总发电量最大、最小出力最大、最小下泄流量最大以及三目标平衡方案。具体的方案分配细节见表 3。图 2~4 分别展示了不同方案下丰水年、平水年、枯水年各个水库对应的水位变化过程。

由图 2~4 可知,平水年和枯水年的水位变化模式与丰水年类似。相比丰水年,溪洛渡和向家坝水库的水位变化幅度减小。进一步观察到,在丰水年,总发电量最大值为 2085.45 亿 kW·h,最小出力最大值为 15692.81 MW,最小下泄流量最大值为 2863.17 m<sup>3</sup>/s。在平水年,总发电量最大值为 1890.15 亿 kW·h,最小出力最大值为 16038.18 MW,最小下泄流量最大值为 2511.50 m<sup>3</sup>/s。而在枯水年,总发电量最大值为 1636.07 亿 kW·h,最小出力最大值为 13224.97 MW,最小下泄流量最大值为 1896.11 m<sup>3</sup>/s。此外,不同方案下每个水库的水位变化存在差异。总体而言,平衡方案下的水位变化相对缓慢,趋势明显。

在水位变化方面,虽然每个水库和不同方案的水位整体上呈现同步的增长和下降趋势,但是它们的水位变化幅度存在一定的差异。以乌东德水库为例,从 1 月初到 4 月初,各方案水位变化基本相似,但到了 4 月,不同方案之间出现差异,随后在 7 月初到 12 月初又重新同步。类似地,向家坝水库在各方案下的趋势基本相似,但在 1 月初到 5 月初的水位变化幅度明显不同。另外,就水位变化的频率而言,最小下泄流量最大方案的水位变化更为频繁,与其他方案有明显区别。

综合分析显示,平衡方案在考虑了所有 3 个目标的情况下,可能无法达到每个单独目标的最大值,

表 3 不同方案下的目标函数值

方案	丰水年			平水年			枯水年		
	总发电量/ (亿 kW·h)	最小出力/ MW	最小下泄流 量/(m <sup>3</sup> /s)	总发电量/ (亿 kW·h)	最小出力/ MW	最小下泄流 量/(m <sup>3</sup> /s)	总发电量/ (亿 kW·h)	最小出力/ MW	最小下泄流 量/(m <sup>3</sup> /s)
总发电量最大	2085.45	10215.37	2745.94	1890.15	12135.55	1792.30	1636.07	9823.40	1246.10
最小出力最大	2064.43	15692.81	1250.26	1875.84	15182.11	1965.36	1620.40	13224.97	1462.69
最小下泄流量最大	2069.34	14613.23	2863.17	1883.10	14954.79	2511.50	1627.05	11373.01	1896.11
平衡方案	2081.22	15265.92	2803.67	1884.59	16038.18	2457.85	1629.75	12632.00	1783.50

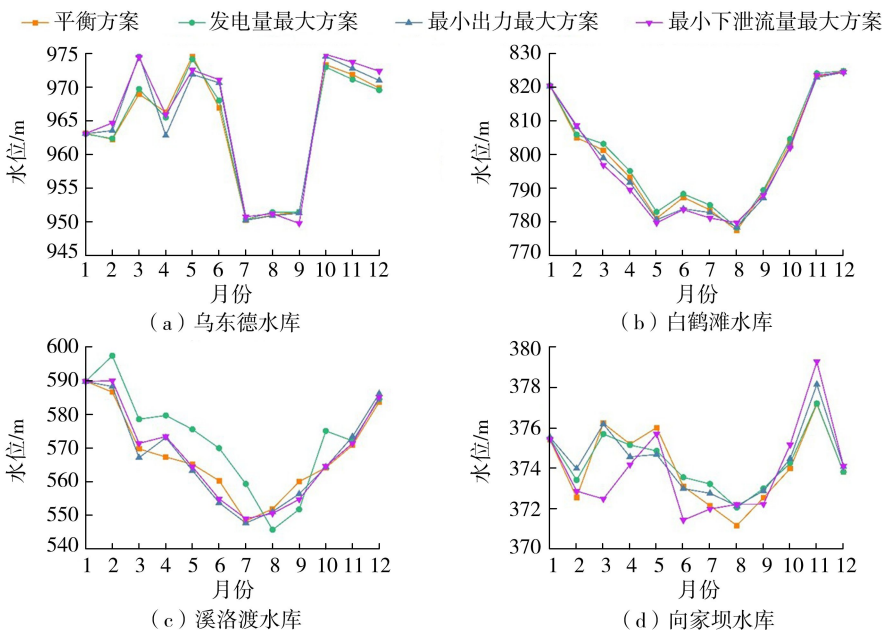


图2 丰水年不同方案下各水库的水位变化

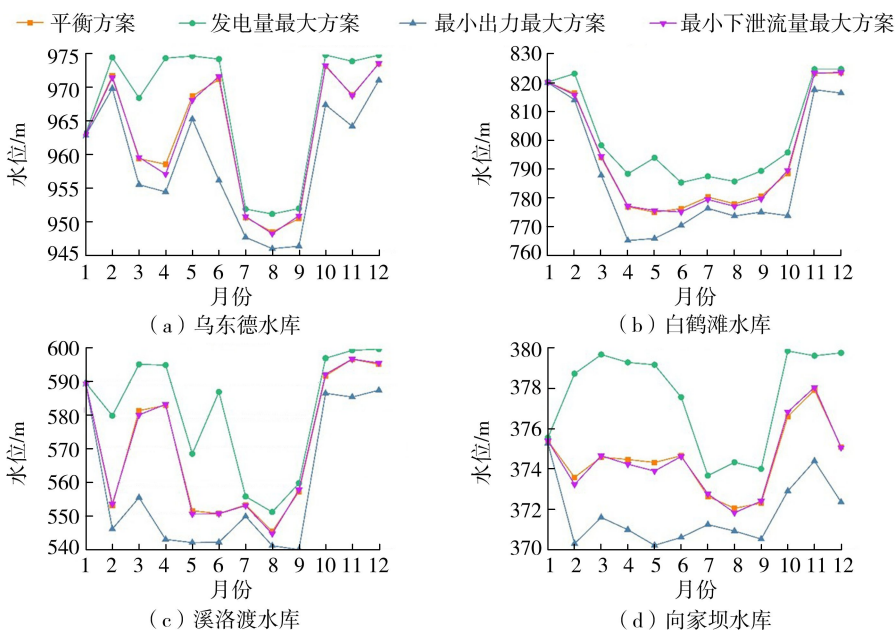


图3 平水年不同方案下各水库的水位变化

但会相对平衡地考虑所有目标,从而产生相对较好的结果。在丰水年、平水年和枯水年,总发电量、最小出力和最小下泄流量呈现递减趋势。丰水年的目标值普遍高于平水年,而平水年的目标值则高于枯水年。这表明水位变化与水资源的利用密切相关,对水库的调度和管理具有重要意义。

总体而言, TMIAFS-PSO 算法在应对复杂的多目标水库调度问题时表现出了较高的适应能力,超过了 NSGA-II 和 IAFA-PSO 等其他算法。这一结果反映了 TMIAFS-PSO 算法在优化过程中具有更有效地探索解空间、更好地平衡多个竞争性目标的能力。与传统的单目标最大化方法相比, TMIAFS-PSO 算

法能够在考虑多个目标时提供更全面的解决方案,克服了单目标最大化方法在满足其他目标时可能出现的不足。

值得注意的是,在多目标优化中,常常存在着目标之间的权衡和折中。尽管单目标最大化方法可以在特定目标上取得最佳结果,但往往会忽视其他目标的影响,导致在整体效益上可能并不理想。相反,采用平衡方案时,虽然不能将每个目标最大化,但能够更好地综合考虑多个目标,以达到整体效益的最优化。这种平衡和折中的思想是多目标优化中的关键,也是 TMIAFS-PSO 等算法成功应对复杂问题的重要原因之一。

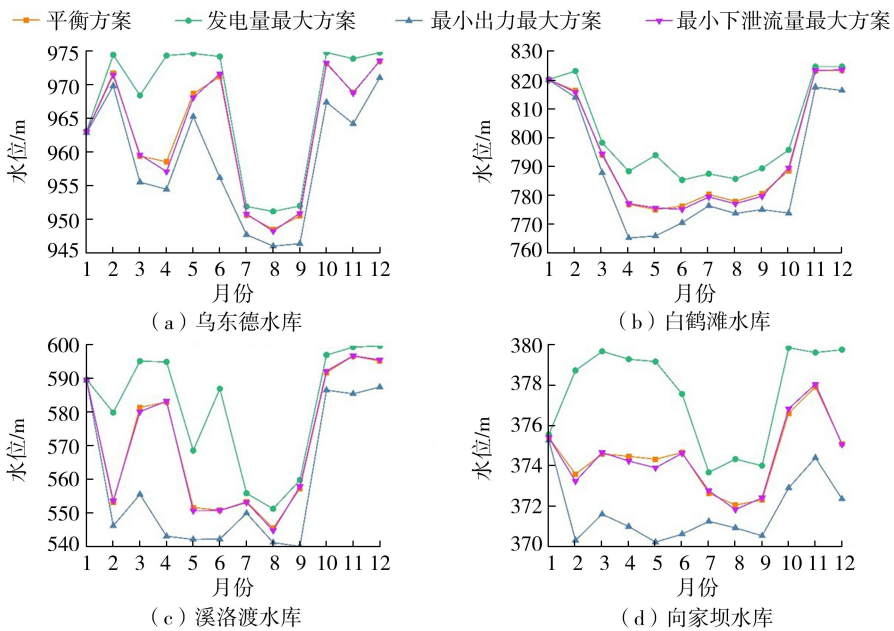


图4 枯水年不同方案下各水库的水位变化

### 3 结语

本文针对梯级水库群建立了多目标联合调度模型,并提出了两阶段多目标改进人工鱼群-粒子群(TMIAFS-PSO)算法,该算法结合了AFS算法和PSO算法的优势,以应对梯级水库系统的复杂性和多目标性。金沙江下游的乌东德、白鹤滩、溪洛渡和向家坝梯级水库群实例验证结果表明,TMIAFS-PSO算法在解集分布、收敛性和解集质量等方面,相较于其他算法均取得了显著的改进,可为梯级水库系统的优化调度提供更可靠、更有效的解决方案。

### 参考文献:

[1] 李国英. 为以中国式现代化全面推进强国建设、民族复兴伟业提供有力的水安全保障[J]. 水利发展研究, 2024, 24(3): 1-3. (Li Guoying. Improved water security for China's efforts to build itself into a stronger country and rejuvenate the Chinese nation on all fronts by pursuing Chinese modernization[J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(3): 1-3. (in Chinese))

[2] 黄何蛟龙, 刘兵, 杨广, 等. 基于二层规划的玛纳斯灌区山区-平原水库群联合调度[J]. 排灌机械工程专业学报, 2024, 42(2): 209-216. (Huang Hejiaolong, Liu Bing, Yang Guang, et al. Joint operation of mountainous-plain reservoirs group based on bilayer programming in Manas River Irrigation District [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2024, 42(2): 209-216. (in Chinese))

[3] 艾学山, 郭佳俊, 穆振宇, 等. 梯级水库群多目标优化调度模型及 CPF-DPSA 算法研究[J]. 水利学报, 2023, 54(1): 68-78. (Ai Xueshan, Guo Jiajun, Mu Zhenyu, et al.

Research on multi-objective optimal operation model of cascaded hydropower system and CPF-DPSA algorithm[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(1): 68-78. (in Chinese))

[4] Ni Xiaokuan, Dong Zengchuan, Jia Wenhao, et al. A novel method for measuring interaction among multiple objectives in reservoir operation using niche theory [J]. Water Science and Engineering, 2025, 18(1): 78-89.

[5] Sharifazari S, Sadat-Noori M, Rahimi H, et al. Optimal reservoir operation using Nash bargaining solution and evolutionary algorithms [J]. Water Science and Engineering, 2021, 14(4): 260-268.

[6] 黄显峰, 吴志远, 李昌平, 等. 基于改进粒子群-逐次逼近法的水库调度图多目标优化[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(2): 1-7. (Huang Xianfeng, Wu Zhiyuan, Li Changping, et al. Multi-objective optimization of reservoir operation chart based on IPSO-DPSA [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(2): 1-7. (in Chinese))

[7] 孙平, 王丽萍, 蒋志强, 等. 两种多维动态规划算法在梯级水库优化调度中的应用[J]. 水利学报, 2014, 45(11): 1327-1335. (Sun Ping, Wang Liping, Jiang Zhiqiang, et al. Application of two multi-dimensional dynamic programming algorithms in optimization of cascade reservoirs operation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(11): 1327-1335. (in Chinese))

[8] 唐红兵, 李崇浩, 黄巍, 等. 基于鸟群算法的梯级水库群长期优化调度研究[J]. 水资源研究, 2023, 12(1): 47-57. (Tang Hongbing, Li Chonghao, Huang Wei, et al. Research on long-term optimal operation of cascade reservoir group based on bird swarm algorithm [J]. Journal of Water Resources Research, 2023, 12(1): 47-57. (in Chinese))

- [9] 黄显峰,王宁,刘志佳,等. 基于改进 NSGA-II 算法的梯级水库多目标优化调度[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(4): 51-58. (Huang Xianfeng, Wang Ning, Liu Zhijia, et al. Multi-objective optimal operation of cascade reservoirs based on improved NSGA-II algorithm [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(4): 51-58. (in Chinese))
- [10] 赵紫薇,杨哲,张全旺,等. 考虑预报不确定性的梯级水库群联合优化调度[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(4): 67-75. (Zhao Ziwei, Yang Zhe, Zhang Quanwang, et al. Joint optimal operation of cascade reservoirs considering forecast uncertainty [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(4): 67-75. (in Chinese))
- [11] 王奇,邢龙,简铁柱,等. 基于改进智能水滴算法的梯级水库群调峰调度研究[J]. 水电能源科学, 2023, 41(4): 97-101. (Wang Qi, Xing Long, Jian Tiezhu, et al. Research on peak shaving scheduling of cascade reservoir groups based on improved intelligent water drop algorithm [J]. Water Resources and Power, 2023, 41(4): 97-101. (in Chinese))
- [12] 许婷婷. 梯度交叉实数编码遗传算法及其在梯级水库优化调度中的应用[D]. 武汉:华中科技大学, 2021.
- [13] 汪涛,徐杨,刘亚新,等. 基于多种群引力粒子群算法的金沙江下游:三峡梯级水库群优化调度[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(12): 30-36. (Wang Tao, Xu Yang, Liu Yaxin, et al. Optimal operation of cascade reservoirs in the lower reaches of Jinsha River to the Three Gorges based on multi-group gravitational particle swarm algorithm [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40(12): 30-36. (in Chinese))
- [14] 夏燕. 梯级水库群发电-生态协同调度混合量子粒子群算法研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2019.
- [15] 乔英. 梯级水库群多目标优化调度研究[D]. 北京:华北电力大学(北京), 2020.
- [16] 刘百灵,李仓水,刘芳业. 基于 NSGA-III 的黄河上游梯级水库多目标调度研究[J]. 人民黄河, 2022, 44(4): 140-144. (Liu Bailing, Li Cangshui, Liu Fangye. Study on multi-objective operation of cascade reservoirs in the upper reaches of the Yellow River based on NSGA-III [J]. Yellow River, 2022, 44(4): 140-144. (in Chinese))
- [17] 金文婷,王义民,畅建霞,等. 黄河中下游水资源多目标利益对古贤水库运行的响应[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(1): 52-59. (Jin Wenting, Wang Yimin, Chang Jianxia, et al. Response of water resources multi-objective interests in middle-lower Yellow River to Guxian Reservoir operation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(1): 52-59. (in Chinese))
- [18] 王福岭. 基于协同差分演化算法的梯级水库短期发电优化调度研究[J]. 中国农村水利水电, 2013(6): 145-148. (Wang Fuling. Research on the application of co-differential evolution algorithm to the optimal operation of cascade reservoirs in a short time [J]. China Rural Water and Hydropower, 2013(6): 145-148. (in Chinese))
- [19] 吴芸. 实值优化问题的元启发式优化算法研究与应用[D]. 武汉:武汉大学, 2021.
- [20] Zitzler E, Thiele L, Laumanns M, et al. Performance assessment of multiobjective optimizers: an analysis and review [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2003, 7(2): 117-132.
- [21] 周颖,周研来,鲁圆圆. 基于碳减排的梯级水库消落期多目标水碳调度研究[J]. 水生态学杂志, 2024, 45(1): 18-25. (Zhou Ying, Zhou Yanlai, Lu Yuanyuan. Multi-objective water-carbon operation of cascaded reservoirs in the drawdown period based on carbon emission reduction [J]. Journal of Hydroecology, 2024, 45(1): 18-25. (in Chinese))

(收稿日期:2025-03-13 编辑:俞云利)

(上接第 37 页)

- [14] 党发宁,刘云贺,陈军强,等. 浑水渗流理论及其工程应用[J]. 中国科学: E 辑 技术科学, 2006(9): 1029-1036. (Dang Faning, Liu Yunhe, Chen Junqiang, et al. Muddy water seepage theory and its application [J]. Science in China: Series E Technological Sciences, 2006(9): 1029-1036. (in Chinese))
- [15] 王霜,陈建生,钟启明. 多层堤基结构管涌动态发展的数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(6): 39-45. (Wang Shuang, Chen Jiansheng, Zhong Qiming. Numerical study on dynamic development process of piping in multi-stratum dike foundations [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(6): 39-45. (in Chinese))
- [16] 高俊,党发宁,丁九龙,等. 考虑初始固结状态影响的软基固结计算方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(增刊 1): 3189-3196. (Gao Jun, Dang Faning, Ding Jiulong, et al. Research on soft soil consolidation calculation method considering the impacts of initial consolidation state [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(S1): 3189-3196. (in Chinese))
- [17] Xue Haibin, Dang Faning, Li Yanlong, et al. Development of piping analysis method for embankment including time-dependent change in permeability coefficient [J]. International Journal of Geomechanics, 2021, 21(6): 40210901-40210906.
- [18] 刘杰,温彦锋,谢定松,等. 土石坝渗流控制基本原理与反滤层设计[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2022: 17. (收稿日期:2025-03-04 编辑:熊水斌)

# 基于多目标优化的敖江流域梯级水库水资源调度研究

翁 硕<sup>1</sup>, 林明财<sup>2</sup>, 林建锋<sup>2</sup>, 王 浩<sup>1</sup>, 谢皓南<sup>1</sup>

(1. 福州大学土木工程学院; 2. 福建省水利规划院)

**摘要:**针对敖江流域霍口—山仔梯级水库群供水、发电和生态目标水资源多目标协同问题,提出一种基于改进NSGA-III算法的多目标非劣解集优选方法,通过引入两层参考点法与边界权重法构造决策策略,实现对非劣解集的科学优选,并基于该方法构建了敖江流域梯级水库群多目标调度模型。与单目标调度模型对比分析结果表明:多目标调度模型有效解决了高维目标下参考点指数级增长的难题;相较于单目标(发电、供水或生态)调度模型,多目标调度模型在保持发电量一定的同时,显著降低了发生供水短缺的概率,消除了生态用水不足的情况,且弃水量大幅减少;多目标调度显著平衡了发电、供水与生态风险,验证了其在复杂约束条件下的综合优化优势。

**关键词:**梯级水库;多目标协同;非劣解集;NSGA-III算法;敖江流域

**Research on water resources operation of cascade reservoirs in the Aojiang River Basin based on multi-objective optimization**//Weng Shuo<sup>1</sup>, Lin Mingcai<sup>2</sup>, Lin Jianfeng<sup>2</sup>, Wang Hao<sup>1</sup>, Xie Haonan<sup>1</sup> (1. College of Civil Engineering, Fuzhou University; 2. Fujian Provincial Water Conservancy Planning Institute)

**Abstract:** To address the multi-objective coordination problem of water supply, power generation, and ecological targets in the Huokou-Shanzai cascade reservoir system of the Aojiang River Basin, this study proposed a multi-objective non-inferior solution set optimization method based on the improved NSGA-III algorithm. By constructing a decision-making strategy that integrates the two-layer reference point method and the boundary weighting approach, this method achieves the scientific selection of the non-inferior solution set. Based on this method, a multi-objective operation model for the cascade reservoir system in the Aojiang River Basin was established and compared with single-objective operation models. The results indicate that the multi-objective operation model effectively addresses the challenge of exponential growth in reference points under high-dimensional objectives. Compared to single-objective (power generation, water supply, or ecology) operation models, the multi-objective operation model maintains a certain level of power generation while significantly reducing the probability of water supply shortages, eliminating ecological water deficits, and substantially decreasing spillage. The multi-objective operation model effectively balances the risks among power generation, water supply, and ecological goals, demonstrating its comprehensive optimization advantages under complex constraints.

**Key words:** cascade reservoirs; multi-objective collaboration; non-inferior solution set; NSGA-III algorithm; the Aojiang River Basin

随着我国水利水电建设的快速发展,全国已建成数量庞大的水库工程体系,水利水电工程重点已从规划建设进入运行管理关键时期<sup>[1]</sup>。在气候变化与人类活动双重影响下,水资源供需矛盾加剧,流域生态保护与高质量发展对梯级水库群的多目标协同调控提出了更高要求。梯级水库群优化调度虽能提升水资源利用率,但面临多目标、高维、强约束、非线性耦合问题。进行多目标协同优化调度不仅能提升水资源综合利用效率,而且是保障流域生态安全、支撑区域可持续发展的重要手段<sup>[2-3]</sup>。目前,使用高效计算方法已成为解决上述问题的重要途径,遗传

算法因其搜索全局最优解的能力突出,已成为水库优化调度中的研究热点<sup>[4-5]</sup>。因此,开展梯级水库优化调度研究,充分发挥水库间的相互补偿作用,提高水能资源利用效率,具有重要的科学价值和现实意义。

众多学者通过构建协同模型与使用遗传算法探索多目标协调问题。在多目标协调方面,Feng等<sup>[6]</sup>构建了近似动态规划(ADP)框架,嵌入长短期记忆神经网络(LSTM)动态建模水电站非线性关系,结合模糊聚类支持向量机提取智能调度规则,显著降低了计算复杂度,同时通过多目标合作搜索算法

(MOCSA),解决了发电-生态多目标协同问题;Jin等<sup>[7]</sup>提出了基于协同理论的多目标协同调控框架(MOSRR),通过划分初级与次级需求优先级,结合层次分析法和粒子群优化算法,解决了黄河上游水库群在发电、供水、水沙调控及生态维护之间的协同问题,显著提升了初级需求保障率;李洁玉等<sup>[8]</sup>提出了黄河水沙调控多目标协同模型,结合系统耦合协调度理论,揭示了排沙与发电的强竞争关系以及生态与发电的弱竞争关系,采用NSGA-II算法实现了目标函数的动态权重调整;曾坤<sup>[9]</sup>针对水风光互补系统,构建了中长期多目标优化模型,发现枯水年风光高占比场景下目标冲突最复杂,需通过耦合协调调度模型平衡效益。在遗传算法应用和改进方面,王小安等<sup>[10]</sup>以遗传算法为求解手段,构建了梯级水电系统短期发电优化调度模型,实现了对复杂约束条件下非线性优化问题的高效求解,为梯级水电站短期发电提供了有效解决方案;王学斌等<sup>[11]</sup>构建了针对黄河下游梯级水库的多目标调度模型,并利用改进快速非劣解集排序遗传算法(ICGC-NSGA-II)进行求解,探究了水库在供水、发电以及生态效益之间的平衡关系;吴云等<sup>[12]</sup>对NSGA-II算法在约束条件处理和遗传操作越界处理方面进行了改进,并给出了3种不同的优化配置方案供决策者使用;陈立华等<sup>[13]</sup>针对标准遗传算法(SGA)局部寻优能力较差、易早熟等不足,提出了超立方体浮点数编码自适应遗传算法(AGA)和超立方体浮点数编码遗传模拟退火算法(SA-GA)。尽管现有研究取得了显著进展,但现有模型大多基于固定权重或约束转换,缺乏动态调整机制,方法多侧重单目标效益提升,缺乏多目标协同效益的量化评估框架。目前流域水资源调度都是以水库群为基础,需依靠梯级水库之间的关系进行优化调度,仅依靠单目标水库进行优化调度的方式已难以满足调度需求。

本文基于敖江流域霍口—山仔梯级水库,分别构建了考虑供水、发电、生态的单目标和多目标优化调度模型,采用动态规划逐次逼近法(DDDP)和基于边界交叉构造权重法的非支配排序遗传算法-III(NSGA-III算法)对模型分别进行求解,同时构建了梯级水库多目标调度方案评价体系,并采用层次分析法和熵权法相结合的主客观权重法计算权重,最后构建模糊优选评价模型确定最优调度方案,并引入供水风险分析,以期对梯级水库的调度管理提供科学依据和决策支持。

## 1 研究区概况

敖江发源于福建省宁德市,全长137 km,河道平

均坡降2.6‰。敖江流域(26°15'N~26°38'N, 119°06'E~119°39'E),流域总面积2665 km<sup>2</sup>,海拔5~1479 m,整体地势西高东低,上游峡谷众多,陡坡急流纵横交错,中间夹杂有山谷盆地;下游河道相对较宽,坡度较缓。敖江流域位于亚热带季风性气候区,受季风影响,有时会出现极端降雨或台风,多年平均气温为19.1℃,最高气温可达38.7℃,最低气温为-3.8℃;历年最大日降水量为212 mm(1973年),多年平均水面蒸发量为1019 mm。流域属于山区河流范畴,水资源丰富,水流变化剧烈,汛期来水颇丰,水量激增,易引发洪涝灾害;非汛期则可能面临干旱挑战。敖江流域供水规划主要涵盖福州第二水源供水工程、塘坂引水二期工程以及罗源敖江供水工程三大工程。

## 2 研究方法

### 2.1 多目标优化调度模型

#### 2.1.1 目标函数

考虑水库工程不同运行目标,分别以河道外供水缺水量最小( $F_1$ )、系统多年平均发电量最大( $F_2$ )、河道内生态缺水量最小( $F_3$ )这3个目标建立梯级水库单目标优化调度模型,如式(1)~(3)所示。单目标调度模型采用DDDP优化算法进行求解。而梯级水库多目标优化调度模型综合考虑供水目标、生态目标和发电目标,通过NSGA-III算法计算梯级水库调度的帕累托最优解集,以确保梯级水库系统的供水效益、生态效益、发电效益达到最佳<sup>[14]</sup>。同时,为提高水资源利用率,在3个目标函数的基础上还需设置发电弃水量最小( $F_4$ )为目标函数(式(4))。

$$F_1 = \min W_d = \begin{cases} 0 & R_d \geq Q_d \\ \min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (Q_{dj} - R_{dj}) \Delta t & R_d < Q_d \end{cases} \quad (1)$$

$$F_2 = \max E = \max \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n N_{ij} \Delta t / T = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (K_i R_{geij} H_{ij} \Delta t) / T \quad (2)$$

$$F_3 = \min W_e = \begin{cases} 0 & R_e \geq Q_e \\ \min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (Q_{ej} - R_{ej}) \Delta t & R_e < Q_e \end{cases} \quad (3)$$

$$F_4 = \min W_{rs} = \begin{cases} 0 & R_{ge} \geq Q_{ge} \\ \min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (R_{geij} - Q_{gei}) \Delta t & R_{ge} < Q_{ge} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $W_d$  为调度期内河道外供水缺水总量;  $i, m$  分别为水库序号及水库总数;  $j, n$  分别为调度时段序号和调度时段总数;  $Q_{dij}$  为河道外供水需水流量, 包括生活需水流量、工业需水流量、河道外生态需水流量;  $R_{dij}$  为河道外供水流量;  $\Delta t$  为单个时段长度;  $E$  为梯级水库系统平均年发电量;  $N_{ij}$  为发电出力;  $T$  为调度年数;  $K_i$  为水电站的出力系数;  $R_{geij}$  为发电流量;  $H_{ij}$  为发电水头;  $t$  为发电时长;  $W_e$  为调度期内生态缺水总量;  $Q_{eij}$  为河道生态需水流量;  $W_{rs}$  为调度期内发电弃水总量;  $R_{eij}$  为河道生态供水流量;  $Q_{gei}$  为水轮机最大过机流量。

### 2.1.2 约束条件

本文将需水分为生活需水、工业需水、生态需水和河道外生态需水 4 个类别, 并按照供水优先级以最小生态需水、生活需水、工业需水、适宜生态需水、河道外生态需水的顺序进行水库供水。多目标调度模型与各单目标调度模型的约束条件包括水库水量平衡约束、库容约束、水库水位约束、泄流能力非负约束、水库间水力联系约束、电站出力约束、水轮机最大过机流量约束和最小生态下泄流量约束:

$$V_{i,j+1} = V_{ij} + (Q_{lij} - R_{ij} - Q_{sij})\Delta t \quad (5)$$

$$V_{ijmin} \leq V_{ij} \leq V_{ijmax} \quad (6)$$

$$Z_{ijmin} \leq Z_{ij} \leq Z_{ijmax} \quad (7)$$

$$R_{ij} \geq 0 \quad (8)$$

$$Q_{li+1,j} = R'_{ij} + q_{ij} \quad (9)$$

$$N_{ij} \geq N_{ijmin} \quad (10)$$

$$R_{geij} < Q_{gei} \quad (11)$$

$$R_{ij} \geq Q_{eijmin} \quad (12)$$

式中:  $V_{ij}$ 、 $V_{i,j+1}$  分别为水库  $i$  的初、末库容;  $Q_{lij}$ 、 $R_{ij}$  分别为水库  $i$  第  $j$  时段的平均入库流量和出库流量;  $Q_{sij}$  为水库  $i$  第  $j$  时段的损失流量;  $V_{ijmin}$ 、 $V_{ijmax}$  分别为水库  $i$  第  $j$  时段的最小和最大库容;  $Z_{ij}$  为水库  $i$  第  $j$  时段的水位;  $Z_{ijmin}$ 、 $Z_{ijmax}$  分别为水库  $i$  第  $j$  时段的最小和最大允许水位;  $R'_{ij}$  为水库  $i$  第  $j$  时段可汇入下游水库的下泄流量;  $q_{ij}$  为水库  $i$  第  $j$  时段下游河段的区间入流量;  $N_{ijmin}$  为水库  $i$  第  $j$  时段的最小出力;  $Q_{eijmin}$  为水库  $i$  第  $j$  时段河道内最小生态需水流量。

### 2.1.3 决策变量

各单目标优化调度模型以调度期内各水库不同时段的下泄流量作为决策变量, 调度期为 1957—2018 年, 以月为计算时段。多目标优化调度模型以调度期内不同时段末各水库库容作为决策变量, 调度期为 1957—2018 年, 以月为计算时段, 由汛期初 (4 月初) 开始, 共 744 个时段。以上模型均由霍口、山仔两座水库参与调度。

## 2.1.4 优化算法

### 2.1.4.1 DDDP 优化算法

DDDP 优化算法的求解步骤主要包括常规动态规划算法求解和改进算法求解两部分<sup>[15]</sup>。常规动态规划算法求解步骤主要为: ①确定阶段变量, 把水库的调度期按月为时段划分为  $K$  个阶段, 以  $k$  代表阶段变量 ( $k=1, 2, \dots, K$ ); ②选取水库库容为状态变量; ③对状态变量进行离散, 离散点数为  $N$ ; ④选取时段  $t$  的水库下泄流量  $Q_t$  作为决策变量; ⑤建立状态转移方程; ⑥确定阶段目标, 通常取各时段发电量最大或供水量缺额最小; ⑦建立动态规划逆时序递推方程, 动态规划逆时序递推过程可参考文献<sup>[16]</sup>。

改进算法求解步骤如下: ①在可行域内选定每个水库的初始调度线; ②为每个水库定义一个优化通道, 半径向量为  $\omega_i = (\omega_{i1}, \omega_{i2})$ , 以初始解为基准生成 3 个候选解, 即初始解 -  $\omega_i$ 、初始解、初始解 +  $\omega_i$ ; ③利用常规动态规划算法中的递推方程推求优化调度线; ④用前面步骤中得到的优化调度线替代初始调度线; ⑤重复前面离散、推求优化调度线和替代初始调度线的操作直至满足收敛条件  $|(F_d - F_{d-1})/F_{d-1}| \leq \varepsilon_1$ , 其中  $F_d$  为第  $d$  次迭代时的目标函数值,  $\varepsilon_1$  为收敛条件值, 迭代结束。

### 2.1.4.2 NSGA-III 算法

NSGA-III 算法是遗传算法的一类改进, 不同于 NSGA-II 算法的选择机制, NSGA-III 算法引入参考点机制以有效求解 3 个及以上高维目标的多目标优化问题。

NSGA-III 算法中常见的权重构造方法有均匀权重法、自适应权重法、随机权重法、边界交叉法等<sup>[17]</sup>。故本文使用边界交叉法构造权重, 将参考点置于标准化超平面上, 形成  $M-1$  维标准单纯形, 并沿各目标轴分为  $p$  份。常规 NSGA-III 算法中, 随着目标维度  $M$  的增加, 若仅提高分区数量  $p$  来增强参考点的细致度, 会导致参考点总数呈指数级增长, 增加计算复杂性和存储需求。为避免上述问题, 本文采用两层参考点产生策略, 增加内层, 该策略在保留原有参考点框架的基础上, 通过引入两层参考点结构, 优化了传统方法中分割份数  $p$  对中间点产生和参考点数量的影响, 在保持中间点生成能力的同时, 有效控制了参考点的总数, 从而提高了方法的适用性和效率, 具体方法可参考文献<sup>[14]</sup>。

## 2.2 多目标非劣解集方案优选

### 2.2.1 方案评价指标体系构建

综合考虑霍口-山仔梯级水库调度目标及决策者主观倾向, 选取梯级水库供水缺水量、发电量、生

态缺水量、发电弃水量、供水可靠性、发电可靠性、生态可靠性及供水易损性、发电易损性、生态易损性指标构建评价指标体系。其中可靠性度量整个调度期内供水量(发电量、生态供水量)满足需求的时段数,易损性度量供水(发电、生态供水)不足时段的平均缺少程度,可靠性与易损性的计算公式为:

$$I_1 = \frac{T}{n} (G_i = D_i) / T \quad (13)$$

$$I_2 = \frac{\sum_{G_i < D_i} (D_i - G_i)}{\sum_{G_i < D_i} D_i} \quad (14)$$

式中: $I_1$ 、 $I_2$ 分别为可靠性和易损性; $\frac{T}{n} (G_i = D_i)$ 为指示函数,当 $G_i = D_i$ 时取值为1,否则为0; $G_i$ 为时段内实际供水量、发电量和生态缺水量; $D_i$ 为时段内供水、发电和生态供水需求; $\sum_{G_i < D_i} (D_i - G_i)$ 为所有发电、供水、生态供水不足时段内的缺水量总和; $\sum_{G_i < D_i} D_i$ 为所有发电、供水、生态供水不足时段内的需水总量。

各指标按照式(15)进行归一化处理,其中梯级发电量、可靠性指标为正向指标,采用正向归一化公式计算,其余指标为逆向指标,采用逆向归一化公式计算。

$$y_{ij} = \begin{cases} (x_{ij} - x_{ij\min}) / (x_{ij\max} - x_{ij\min}) & x_{ij} \text{ 为正向指标} \\ (x_{ij\max} - x_{ij}) / (x_{ij\max} - x_{ij\min}) & x_{ij} \text{ 为逆向指标} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $x_{ij}$ 为第 $j$ 个方案中第 $i$ 项指标的原始值; $y_{ij}$ 为第 $j$ 个方案中第 $i$ 项指标的归一化值; $x_{ij\min}$ 为第 $i$ 项指标在所有方案中的最小值; $x_{ij\max}$ 为第 $i$ 项指标在所有方案中的最大值。

指标权重的确定方法分为主观法和客观法。其中主观法易偏离实际,客观法忽视决策者偏好,水库多目标评价体系复杂,需结合两者优点。因此,本文采用层次分析法和熵权法相结合的主客观权重法计算权重,主客观综合指标权重求解公式为

$$w_{\text{int}} = \alpha w_{\text{sub}} + (1 - \alpha) w_{\text{obs}} \quad (16)$$

$$\alpha = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n w_{\text{sub}i} y_{ij}}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n w_{\text{sub}i} y_{ij} + \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n w_{\text{obs}i} y_{ij}}$$

式中: $w_{\text{int}}$ 为主客观综合指标权重; $\alpha$ 为主观权重分配系数; $w_{\text{sub}}$ 为层次分析法指标主观权重; $w_{\text{obs}}$ 为熵权法指标客观权重; $w_{\text{sub}i}$ 为第 $i$ 项评价指标的主观权重; $w_{\text{obs}i}$ 为第 $i$ 项指标的客观权重。

### 2.2.2 模糊优选评价模型构建

本文采用模糊数学理论量化模糊因素,综合评价后优选多目标非劣解集调度方案。方案 $j$ 与最优

方案和最劣方案间差异的综合权函数如式(17)所示,该函数通常用于量化方案 $j$ 与这两个极端解集之间的相对接近程度。

$$f_i(u_j, w_i) = u_j^2 \sum_{i=1}^m [w_i (g_i - r_{ij})]^2 + (1 - u_j)^2 \sum_{i=1}^m [w_i (r_{ij} - b_i)]^2 \quad (17)$$

式中: $u_j$ 为隶属度; $w_i$ 为求得的第 $i$ 项指标的主客观综合权重; $m$ 为指标数; $n$ 为非劣解集调度方案数; $i, j$ 分别表示指标序号和调度方案序号; $r_{ij}$ 为第 $j$ 个方案第 $i$ 项指标的归一化值; $g_i$ 为非劣解集方案集中归一化指标 $i$ 的最大值,即最优方案; $b_i$ 为非劣解集方案集中归一化指标 $i$ 的最小值,即最劣方案。

建立多目标决策模型:

$$\min \{f(\mathbf{u}, \mathbf{w}_i) = [f_1(u_1, w_1), f_2(u_2, w_2), \dots, f_n(u_n, w_n)]\} \quad (18)$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} \sum_{i=1}^m w_i = 1 & w_i > 0, i = 1, 2, \dots, m \\ 0 < u_j < 1 & j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (19)$$

通过构造拉格朗日函数,求解上述决策模型,获得隶属度计算公式:

$$u_j = \left\{ 1 + \frac{\sum_{i=1}^m [w_i (g_i - r_{ij})]^2}{\sum_{i=1}^m [w_i (r_{ij} - b_i)]^2} \right\}^{-1} \quad (20)$$

将主客观综合权重代入式(20)计算隶属度,依据方案隶属度对各非劣解集方案进行排名,并结合实际情况从非劣解集中选取最优方案。

## 3 结果与分析

### 3.1 方案优选结果

通过改进NSGA-III算法求解梯级水库多目标优化调度模型,并根据多目标优化所得的非劣解集设置多目标优化调度模型的调度方案集。多目标调度模型通过优化求解后可得到969个非劣解集,将得到的非劣解集绘制于同一坐标系下,得到梯级系统长系列发电量、供水缺水量、生态缺水量、弃水量4个目标值的帕累托图,如图1所示。

基于前述主客观综合赋权法和模糊优选模型,确定了梯级水库多目标优化调度的最优方案。多目标调度模型和单目标调度模型的调度结果对比如表1所示。分析调度结果可知,与发电单目标调度结果相比,多目标调度减少了少量发电量,显著降低了供水缺水量,完全消除了生态缺水,并减少了弃水量。与供水单目标调度相比,多目标调度在增加发电量的同时,仍能有效减少供水缺水,完全消除生态

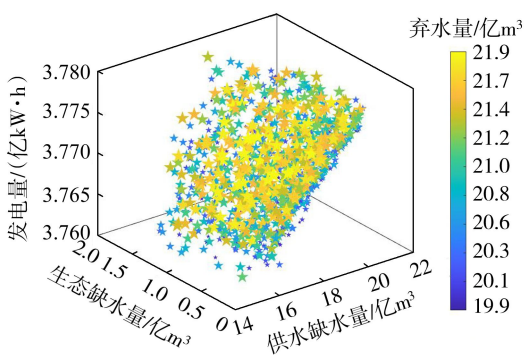


图1 多目标帕累托图

表1 单目标和多目标调度结果对比

模型	水库	多年平均发电量/ (亿 kW · h)	多年供水 缺水总量/ 亿 m <sup>3</sup>	多年生态 缺水总量/ 亿 m <sup>3</sup>	多年弃水 总量/亿 m <sup>3</sup>
发电单 目标	霍口	2.144	23.583	0.603	5.910
	山仔	1.931	85.045	1.226	37.522
	梯级	4.075	108.628	1.829	43.433
供水单 目标	霍口	1.386	1.233	0.782	14.211
	山仔	1.177	7.240	2.617	53.990
	梯级	2.563	8.473	3.399	68.201
生态单 目标	霍口	1.784	7.545	0.000	7.700
	山仔	1.618	30.656	0.000	28.153
	梯级	3.402	38.201	0.000	35.853
多目标	霍口	1.980	4.621	0.000	4.351
	山仔	1.788	11.188	0.000	15.817
	梯级	3.767	15.809	0.000	20.168

缺水,并大幅减少弃水。与生态单目标相比,多目标调度同样提升了发电量,大幅减少了供水缺水和弃水,且维持了生态需水的完全满足。

梯级水库多年月均发电量和系统历年发电量见图2。由图2可知,系统多年平均年发电量中,发电单目标调度最高,供水单目标调度最低。年发电量最大值分别出现在1997年和2016年,此外,各目标下发电量最大值均集中于6月。多目标调度6月发电量低于发电单目标调度,同时高于供水和生态单目标调度。除发电单目标梯级系统发电量最小值出现在12月,供水、生态单目标及多目标调度梯级系统发电量最小值均出现在1月。多目标调度最小月发电量为0.152亿kW·h,与发电单目标调度(0.117亿kW·h)相比增加了29.822%,与供水单

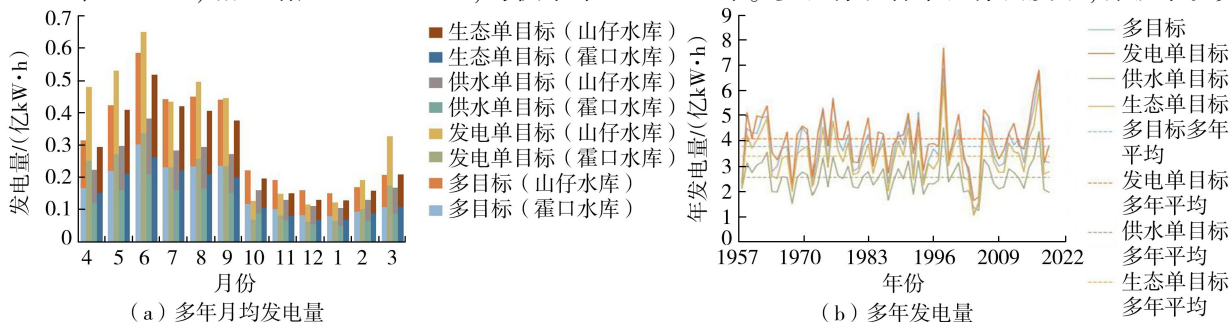


图2 梯级水库系统多年月均发电量和多年发电量

目标调度(0.105亿kW·h)相比增加了44.51%,与生态单目标调度(0.13亿kW·h)相比增加了17.016%。

多目标调度结果中,霍口水库、山仔水库及梯级系统在枯水期平均发电量均高于发电、供水和生态单目标调度,增幅显著;霍口水库、山仔水库、梯级系统多年平均丰水期发电量分别为1.392亿、1.269亿、2.662亿kW·h,三者的平均发电量较发电单目标调度有所下降,相比供水和生态单目标调度则有显著增加,总体而言,多目标调度在枯水期发电量优化明显,丰水期则在保证供水与生态基础上有所调整。

梯级水库系统多目标和各单目标下的河道外供水情况见图3。由图3可知,多目标调度显著减少了供水年缺水量,与发电单目标相比降幅大,但略高于供水单目标和生态单目标。多目标和各单目标下,最大供水缺水量发生在2003年。梯级系统供水缺水情况主要出现在10月至次年3月,属于枯水期。多目标调度结果中,霍口水库、山仔水库及梯级系统枯水期缺水量均低于发电单目标情况,略高于供水单目标和生态单目标。此外,缺水情况主要发生在山仔水库,霍口水库缺水较少。

梯级水库系统河道内生态缺水情况见图4,多目标和生态单目标情况均能满足生态需水,无缺水情况发生。而发电单目标和供水单目标在枯水期存在生态缺水,2003年最为严重。发电单目标调度结果中,霍口水库、山仔水库、梯级系统多年平均枯水期生态缺水量分别为0亿、0.019亿、0.019亿m<sup>3</sup>,供水单目标调度结果中,霍口水库、山仔水库、梯级系统多年平均枯水期生态缺水量分别为0.012亿、0.042亿、0.054亿m<sup>3</sup>。由上述分析可知山仔水库下游河道为主要缺水区域,霍口水库至山仔水库区间河道缺水状况则较轻微。

图5为梯级水库系统的历年弃水量。由图5可知,多目标调度显著减少了年弃水量,相比发电、供水和生态单目标均有明显下降,最大弃水量出现在1990年。多目标和各单目标调度下,梯级系统弃水

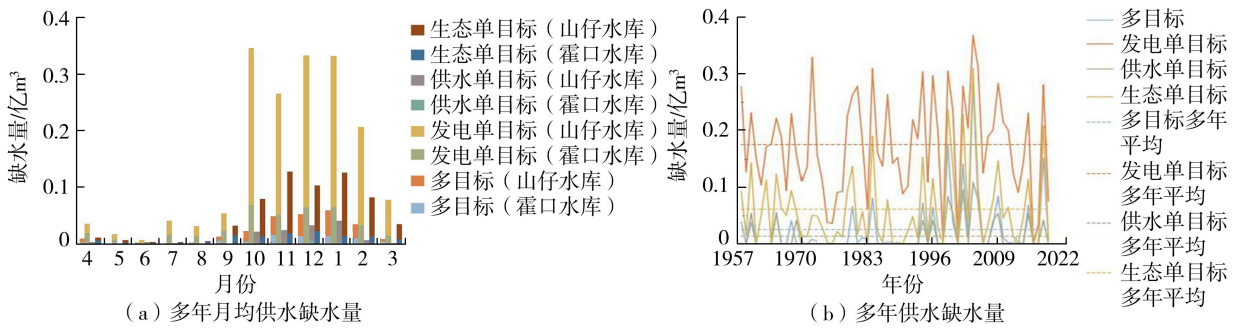


图3 梯级水库系统河道外多年月均供水缺水量和多年供水缺水量

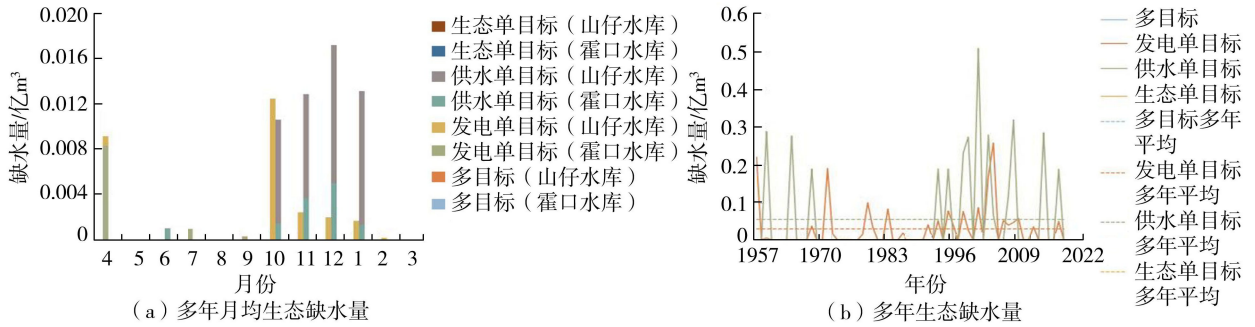


图4 梯级水库系统河道内多年月均生态缺水量和多年生态缺水量

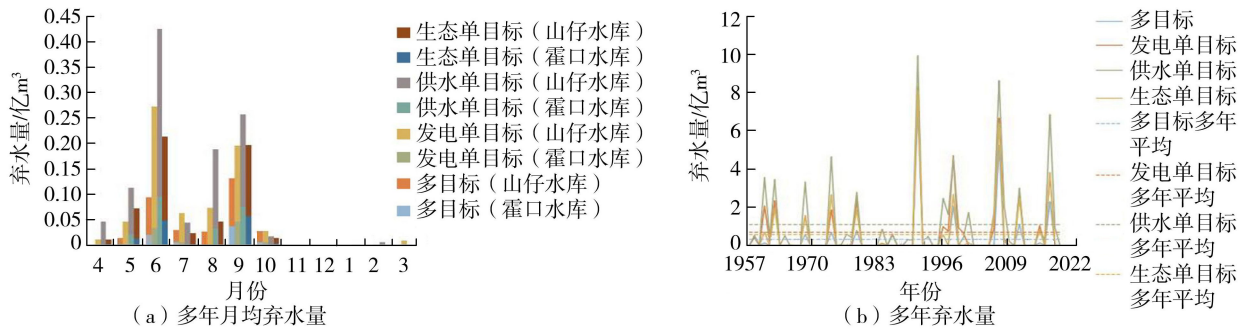


图5 梯级水库系统多年月均弃水量和多年弃水量

情况主要出现在丰水期,多目标调度下霍口水库弃水较少,而山仔水库弃水较多,这主要是因为霍口水库的水库库容和调节性能优于山仔水库。

### 3.2 入库出库流量变化

#### 3.2.1 霍口水库

霍口水库作为敖江流域中上游龙头水库,具有年调节特性,在梯级水库调度中起主导作用,霍口水库的多年入库流量和多目标优化调度后的出库流量变化过程如图6所示。从图6可以看出,多目标优化调度起到了蓄丰补枯的作用。为分析霍口水库入库流量及各模型优化后出库流量的状况,计算霍口水库多年(1957—2018年)月均入库流量及出库流量序列水文要素的统计特征值,结果如表2所示。由表2可知,霍口水库月均入库流量平均值为 $41.674 \text{ m}^3/\text{s}$ ,标准差为 $37.204 \text{ m}^3/\text{s}$ ,变差系数为0.893。各模型优化后出库流量平均值与入库流量相差不多,各模型的出库流量变差系数均小于入库流量变差系数,其中多目标出库流量的变差系数最

小,发电单目标的变差系数最大。结果表明,梯级水库优化调度对径流有调节作用,坦化了出库流量过程,具有蓄丰补枯的作用。

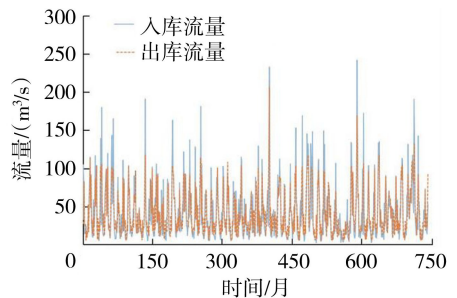


图6 霍口水库多年入库出库流量

表2 霍口水库月均入库流量和出库流量统计

特征值	平均值/ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	标准差/ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	变差系数
历史入库流量	41.674	37.204	0.893
多目标出库流量	41.348	29.582	0.715
发电单目标出库流量	41.305	34.653	0.839
供水单目标出库流量	41.465	31.898	0.769
生态单目标出库流量	41.387	31.176	0.753

表3 山仔水库月均入库流量和出库流量统计

特征值	平均值/ (m <sup>3</sup> /s)	标准差/ (m <sup>3</sup> /s)	变差系数
历史入库流量	57.381	51.066	0.890
多目标入库流量	53.035	42.207	0.796
多目标出库流量	52.697	39.443	0.748
发电单目标入库流量	53.975	46.511	0.862
发电单目标出库流量	53.606	46.739	0.872
供水单目标入库流量	52.976	45.240	0.854
供水单目标出库流量	52.766	43.410	0.823
生态单目标入库流量	53.225	43.523	0.818
生态单目标出库流量	52.938	41.022	0.775

多年平均月入库流量及各模型优化后出库流量变化过程如图7所示。从图7可以看出,相比入库流量,丰水期出库流量大多有所降低,枯水期出库流量大多有所增加,其中多目标优化调度对径流的调节作用最明显,蓄丰补枯效果尤为显著。

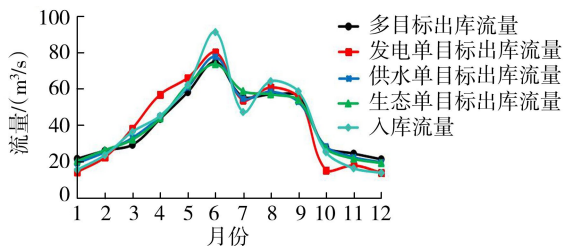


图7 霍口水库多年平均出库流量

### 3.2.2 山仔水库

与上游霍口水库优化调度后,山仔水库的入库流量和出库流量均发生了变化,山仔水库多年历史入库流量及多目标调度后山仔水库入库、出库流量变化过程如图8所示。由图8可知,多目标优化后山仔水库入库、出库流量均呈现削丰补枯的变化趋势。

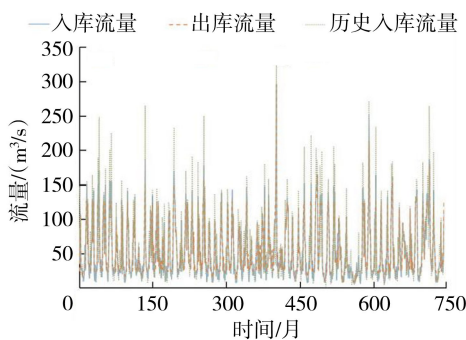


图8 山仔水库历年入库出库流量

为分析山仔水库历史入库流量及各模型优化后入库、出库流量的变化状况,计算山仔水库多年(1957—2018年)月均入库流量及出库流量序列水文要素的统计特征值,结果如表3所示。由表3可知,山仔水库历史入库流量平均值为57.381 m<sup>3</sup>/s,标准差为51.066 m<sup>3</sup>/s,变差系数为0.890,均略大于优化后的入库、出库流量情况。多目标优化后历年月均入库、出库流量平均值分别为53.035、52.697 m<sup>3</sup>/s,标准差分别为42.207、39.443 m<sup>3</sup>/s,变差系数分别为0.796、0.748,与单目标调度模型相差不大。从各模型出库流量的变差系数来看,除发电单目标调度外,其余模型的外出流量变差系数均小于相应入库流量的变差系数,其中多目标出库流量的变差系数最小,发电单目标的变差系数最大。结果表明,梯级水库优化调度对径流有调节作用,有效调节了山仔水库的入库流量和出库流量,稳定了径流过程。

多目标调度模型和单目标调度模型模拟的山仔水库多年平均月入库流量及出库流量变化过程如图9所示,并与山仔水库多年平均历史入库流量进行对比。由图9可知,相比历史入库流量,丰水期优化后入库流量大多有所降低,枯水期优化后入库流量大多有所增加;丰水期优化后入库流量降低幅度大于枯水期入库流量增加幅度;优化后出库流量变化过程与优化后入库流量相似,其中枯水期出库流量的增大幅度大于入库流量。由此可见,梯级水库优化调度具有蓄丰补枯的作用,其中多目标优化模型的优化效果相对较为明显。

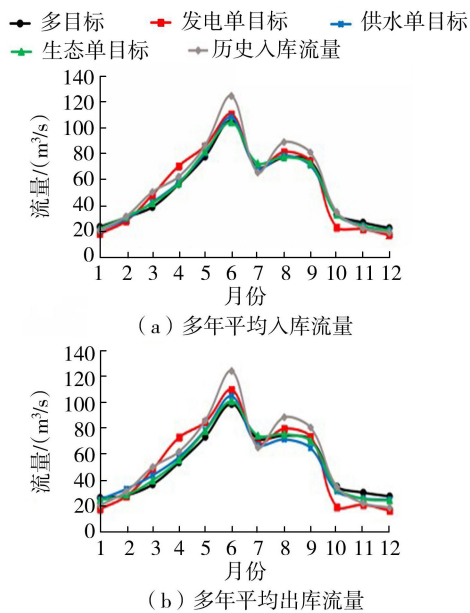


图9 山仔水库多年平均入库和出库流量

### 3.3 风险分析

本文所建立的多目标非劣解集方案评价体系共选取了10个评价指标,即梯级水库发电量、发电可靠性、发电易损性、供水缺水量、供水可靠性、供水易损性、生态缺水量、生态可靠性、生态易损性、发电弃水量,并将所构建的多目标非劣解集方案评价体系中的各评价指标按式(15)进行归一化处理。

采用前文所述主客观综合赋权法确定多目标非劣解集方案评价体系中各指标的综合权重,具体计

算结果如表 4 所示。最后,将确定的各评价指标主客观综合权重代入模糊优选公式(式(20)),计算各非劣解集方案隶属度,依据方案隶属度值对各方案进行排序。根据排序大小,最终选取隶属度最大(0.901)的方案为多目标调度模型的最优方案。

表 4 各评价指标权重

指标	层次分析法	熵权法	主客观综合 赋权法权重
	主观权重	客观权重	
发电量	0.02719	0.10003	0.06315
发电可靠性	0.04453	0.10002	0.07193
发电易损性	0.04194	0.09991	0.07056
供水缺水量	0.07866	0.10007	0.08924
供水可靠性	0.09867	0.10016	0.09941
供水易损性	0.09867	0.09994	0.09930
生态缺水量	0.16119	0.09997	0.13096
生态可靠性	0.20970	0.10004	0.15556
生态易损性	0.20970	0.09993	0.15550
发电弃水量	0.02974	0.09993	0.06440

根据研究区流域梯级水库系统 1957—2018 年多目标调度结果,针对发电、供水、生态目标进行风险分析,结合研究区域的特点,选取发电风险因子、供水风险因子、生态风险因子进行计算与分析,风险指标为:

$$I_3 = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T Y_t \quad (21)$$

其中  $Y_t = \begin{cases} 1 & \text{时段内实际情况不满足设计需求} \\ 0 & \text{时段内实际情况满足设计需求} \end{cases}$

式中:  $I_3$  为风险指标;  $Y_t$  为第  $t$  时段需求满足状态指示变量。

通过计算多目标非劣解集中的风险因子,确定发电、供水和生态风险的阈值范围分别为 15.46%~19.35%、17.74%~25%、0%~2.82%。根据各风险因子的计算结果进行频率分析,绘制各风险因子的频率分布直方图及分布曲线(图 10)。由图 10 可知,数据接近正态分布趋势,因此本文依据正态分布的  $3\sigma$  原则,将风险划分为可接受、可容忍和不可接受 3 个等级,以便于量化评估风险等级。具体阈值如下:发电风险 [15.46%, 18.08%) 可接受、[18.08%, 18.78%) 可容忍、[18.78%, 19.60%] 不可接受;供水风险 [17.74%, 23.3%) 可接受、[23.3%, 24.56%) 可容忍、[24.56%, 25.75%] 不可接受;生态风险 [0%, 1.63%) 可接受、[1.63%, 2.5%) 可容忍、[2.5%, 3.05%] 不可接受。

对比多目标最优方案与各单目标优化结果中的风险指标可知,在多目标最优方案中,发电风险、供水风险指标分别控制在 16.4% 和 20.16%,而生态风险指标为 0%,展现了较优异的综合平衡能力。发电单目标发电风险、供水风险、生态风险指标分别为 31.32%、41.26%、10.35%;供水单目标发电风

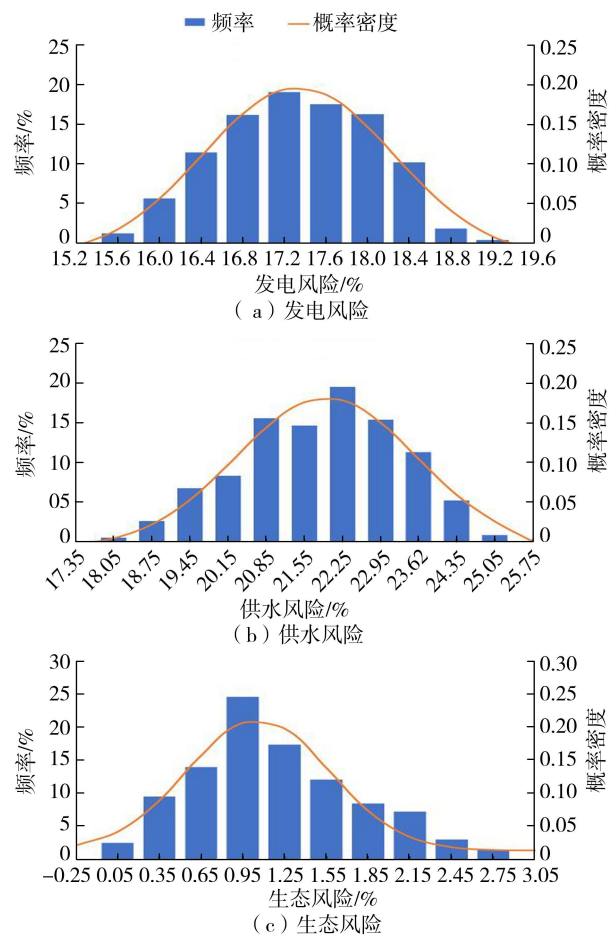


图 10 发电、供水和生态风险因子频率直方图

险、供水风险、生态风险指标分别为 31.99%、4.44%、2.15%;生态单目标发电风险、供水风险、生态风险指标分别为 26.61%、28.09%、0%。相比之下,发电单目标优化提升了发电量,其发电风险、供水风险及生态风险均显著高于其他方案,显示出明显的风险不平衡性。

分析原因可知,发电单目标调度模型通过最大化系统发电量的方式,可能在丰水期过度放水发电,导致枯水期水库蓄水量不足,无法持续满足发电需求。图 11 为不同模型下梯级水库多年月均发电量。由图 11 可知,发电单目标调度模型在丰水期累计发电量达 3.04 亿  $\text{kW} \cdot \text{h}$ ,高于多目标调度模型丰水期累计发电量、供水单目标调度模型丰水期累计发电量和生态单目标调度模型丰水期累计发电量,但是发电单目标调度模型枯水期累计发电量为 1.03 亿  $\text{kW} \cdot \text{h}$ ,低于多目标调度模型枯水期累计发电量 1.11 亿  $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。这种“涸泽而渔”的策略虽然提高了总发电量,却加剧了时段性发电短缺的风险(如枯水期发电量骤降)。丰水期发电单目标调度模型的发电风险、供水风险、生态风险指标分别为 16.13%、36.02%、22.31%,而枯水期分别为 45.43%、60.35%、43.82%,虽然丰水期大大降低了

发电风险,但是枯水期的发电、供水和生态风险指标都大大提高。而多目标调度模型通过平衡发电、供水和生态需求,合理分配水资源,确保了发电量的稳定性(如枯水期发电量显著提升),减少了极端短缺的可能性。因此,尽管单目标调度模型总发电量更高,但因波动性大、保障性差,其发电风险(31.32%)显著高于多目标调度模型(16.4%)。供水单目标优化则在保障供水方面表现最佳,供水风险低至4.44%,其发电风险和生态风险处于较高水平。生态单目标优化使生态风险降至0%,在发电和供水方面风险则较高。

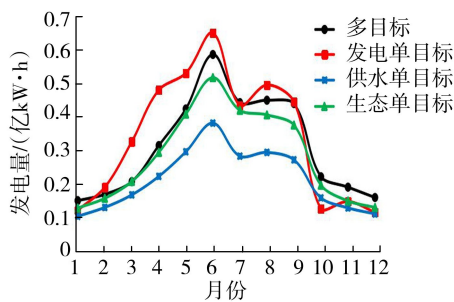


图 11 不同模型模拟的梯级水库多年月均发电量

综上所述,单目标优化在提高效益的同时,其他领域风险将显著增加。而多目标优化调度模型则能够在发电、供水和生态保护之间找到更加均衡的解,各目标风险指标均控制在较低且可接受的范围内,体现了良好的整体性。

## 4 结 语

本文采用 NSGA-III 算法及两层参考点法构建了敖江流域梯级水库多目标调度模型,有效解决了高维空间点数激增问题,并构建了多目标非劣解集优选模型,同时引入供水风险分析对多目标和单目标调度结果进行了分析。研究得出,与发电单目标调度模型相比,多目标调度模型能够在保持发电量稳定的同时显著降低发生供水短缺的概率,消除生态用水不足的情况,且弃水量大幅减少,优化效果显著;梯级水库多目标优化调度对径流的调节优势优于传统单目标调度,具有良好的蓄丰补枯作用;与单目标调度模型相比,多目标调度模型在发电、供水和生态保护之间找到了更加均衡的解,各目标风险指标均控制在较低且可接受的水平内,证实了多目标调度模型优于单目标调度模型。

## 参考文献:

[1] 张利平,夏军,胡志芳. 中国水资源状况与水资源安全问题分析[J]. 长江流域资源与环境,2009,18(2):116-120. (Zhang Liping, Xia Jun, Hu Zhifang. Situation and

problem analysis of water resource security in China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2009,18(2):116-120. (in Chinese))

[2] 赵紫薇,杨哲,张全旺,等. 考虑预报不确定性的梯级水库群联合优化调度[J]. 水利水电科技进展,2025,45(4):67-75. (Zhao Ziwei, Yang Zhe, Zhang Quanwang, et al. Joint optimal operation of cascade reservoirs considering forecast uncertainty [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2025,45(4):67-75. (in Chinese))

[3] Hong Kunhui, Zhang Wei, Ma Aixing, et al. Multi-objective synergetic operation for cascade reservoirs in the Upper Yellow River[J]. Water,2024,16(10):1416.

[4] 温进化,张松达,王士武. 遗传算法在多目标水库群调度中的应用研究[C]//水系统与水资源可持续管理——第七届中国水论坛论文集. 北京:中国自然资源学会水资源专业委员会,中国地理学会水文地理专业委员会,中国水利学会水文专业委员会,等,2009:391-394.

[5] 黄显峰,王宁,刘志佳,等. 基于改进 NSGA-II 算法的梯级水库多目标优化调度[J]. 水利水电科技进展,2024,44(4):51-58. (Huang Xianfeng, Wang Ning, Liu Zhijia, et al. Multi-objective optimal operation of cascade reservoirs based on improved NSGA-II algorithm [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(4):51-58. (in Chinese))

[6] Feng Zhongkai, Zhang Li, Mo Li, et al. A multi-objective cooperation search algorithm for cascade reservoirs operation optimization considering power generation and ecological flows[J]. Applied Soft Computing,2024,150:111085.

[7] Jin Wenting, Wang Yimin, Chang Jianxia, et al. Multi-objective synergetic reservoir operation in a sediment-laden river[J]. Journal of Hydrology,2021,599:126295.

[8] 李洁玉,李航,王远见,等. 黄河水沙调控多目标协同模型构建及应用[J]. 水科学进展,2023,34(5):708-718. (Li Jieyu, Li Hang, Wang Yuanjian, et al. Construction and application of a multi-objective collaborative model of water and sediment regulation in the Yellow River[J]. Advances in Water Science,2023,34(5):708-718. (in Chinese))

[9] 曾坤. 水资源短缺地区水风光中长期多目标协同运行研究[D]. 荆州:长江大学,2023.

[10] 王小安,李承军. 遗传算法在短期发电优化调度中的研究与应用[J]. 长江科学院院报,2003,20(2):13-15. (Wang Xiaohan, Li Chengjun. Research and application of genetic algorithm to cascade hyroelectric stations' short-term optimization scheduling[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2003,20(2):13-15. (in Chinese))

(下转第 62 页)

# 方形竖井空间主动土压力演化规律研究

徐伟<sup>1</sup>, 李楠楠<sup>2</sup>, 张亚鹏<sup>1,3</sup>, 朱谭谭<sup>2</sup>, 邬志<sup>1</sup>, 盛可鑫<sup>2</sup>

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司; 2. 长安大学公路学院; 3. 绿色矿山技术与智能装备浙江省工程研究中心)

**摘要:**为研究方形竖井井壁空间主动土压力的分布规律,建立了不同宽高比影响下方形竖井周围土体的滑动体破坏模型,推导得到了空间主动土压力计算公式,分析了挡土墙和周围土体物理力学参数对空间主动土压力的影响。研究表明:方形竖井挡土墙宽高比较小时,滑动体上部为三棱柱、下部为楔形体;宽高比较大时,滑动体为楔形体,楔形体横截面为梯形;随着宽高比的增大,相同埋深处的空间主动土压力逐渐增大,并随着埋深的增大逐渐由非线性变化趋向于稳定,其大小趋向于库仑土压力;挡土墙临界宽高比随挡土墙宽高比的增大逐渐增大,随土体内摩擦角的增大逐渐减小;宽高比小于10时,空间主动土压力与库仑土压力差异较大,宽高比大于10时,空间主动土压力与库仑土压力差异小于10%。

**关键词:**方形竖井;主动土压力;滑动体;宽高比;空间效应

**Study on evolution law of spatial active earth pressure for square shaft//**Xu Wei<sup>1</sup>, Li Nannan<sup>2</sup>, Zhang Yapeng<sup>1,3</sup>, Zhu Tantan<sup>2</sup>, Wu Zhi<sup>1</sup>, Sheng Kexin<sup>2</sup> (1. POWERCHINA Huadong Engineering Corporation Limited; 2. School of Highway, Chang'an University; 3. Zhejiang Engineering Research Center of Green Mine Technology and Intelligent Equipment)

**Abstract:** To investigate the distribution of spatial active earth pressure on the walls of square shafts, a failure model of the sliding body in surrounding soil under different aspect ratios was established. A formula for calculating the spatial active earth pressure was derived, and the influence of physical and mechanical parameters of the retaining wall and surrounding soil on the spatial active earth pressure was analyzed. The results show that when the aspect ratio of the square shaft wall is small, the sliding body consists of an upper triangular prism and a lower wedge. When the aspect ratio is large, the sliding body is a single wedge with a trapezoidal cross-section. As the aspect ratio increases, the spatial active earth pressure at the same burial depth gradually increases. With the increase of burial depth, the earth pressure gradually transitions from a nonlinear variation to a stable state, approaching the Coulomb's earth pressure. The critical aspect ratio of the retaining wall increases with the increase of the wall's aspect ratio and decreases with the increase of the soil's internal friction angle. When the aspect ratio of the retaining wall is less than 10, the difference between the spatial active earth pressure and Coulomb's earth pressure is significant. When the aspect ratio exceeds 10, the difference is less than 10%.

**Key words:** square shaft; active earth pressure; sliding body; aspect ratio; spatial effect

随着城市建设的快速推进和城市基础设施的全面改造,城市地下空间的开发利用已成为推动城市可持续发展的重要路径。地下工程施工中,竖井(深基坑)作为地下空间与外界联系的关键通道,其安全性和稳定性至关重要。竖井施工过程中,井壁的设计合理性直接关系到竖井的整体安全,而井壁结构设计中的核心内容与其所承受的土压力大小及分布有关,因此研究竖井井壁的土压力分布具有重要意义。

目前,土压力分布的计算方法已积累了大量研

究成果,主要包括模型试验、理论解析与数值模拟等方向<sup>[1-5]</sup>。刘忠玉<sup>[6]</sup>基于墙体在极限平衡状态下滑动面通过墙角的假定,提出了非线性主动土压力分布的理论公式。Niedostatkiewicz等<sup>[7-8]</sup>应用粒子图像测速技术,对无黏性土挡土墙剪切区及主动土压力分布进行了试验研究。应宏伟等<sup>[9]</sup>通过有限元分析,分别推导了砂土与黏性土主动土压力分布及合力作用点相对高度的计算公式。Jaradat等<sup>[10-11]</sup>则采用离散元方法对土压力开展了多尺度数值分析。上述研究均将土压力问题简化为平面问题,得

**基金项目:**国家自然科学基金项目(42307222);黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室开放基金项目(KLTLR-Y23-3)

**作者简介:**徐伟(1975—),男,高级工程师,硕士,主要从事水利水电工程研究。E-mail:1016515446@qq.com

**通信作者:**朱谭谭(1989—),男,副教授,博士,主要从事隧道及地下工程研究。E-mail:tantan.zhu@foxmail.com

到的结果较保守。经典的朗肯土压力理论和库仑土压力理论均将挡土墙视为平面问题进行研究,即将挡土墙视为无限长墙中的一个单位长度墙体,土压力随深度呈线性分布。然而实际工程中,挡土墙的长度是有限的,作用在挡土墙上的土压力与墙长和墙高均有关。将土压力问题简化为平面问题不能真正反映墙后填土的破坏特征,甚至与工程实际差异较大。为此,部分学者转向空间土压力研究,但仍存在明显局限。关晓迪等<sup>[12]</sup>建立了考虑中主应力系数的圆形竖井主动土压力计算模型,Cheng等<sup>[13-14]</sup>的研究表明圆形竖井土压力随深度呈非线性增长,但圆形竖井的主动土压力模型及土压力分布规律难以推广至方形截面。朱正国等<sup>[15-18]</sup>采用有限差分法分析了方形竖井土压力与周围土体的变形规律,发现土体破坏模式随长宽比而变化。Yang等<sup>[19-21]</sup>基于极限平衡法揭示了宽高比的影响机制,但没有提出实用算法。因此,现有主动土压力研究在从平面问题转向空间问题时,所提出的理论模型多局限于圆形竖井,而针对方形竖井还没有公认的实用计算方法。因此,对方形竖井空间主动土压力分布与计算方法的研究仍显不足。

本文基于三维极限平衡理论,以方形竖井挡土墙为研究对象,通过构建由宽高比控制的滑动体破坏模型,提出了空间主动土压力计算方法并分析了其分布规律,可为软土地层中方型竖井工程的支护设计提供参考。

## 1 土体破坏模式

针对方形竖井挡土墙,Yang等<sup>[19-20]</sup>指出,挡土墙后填土的滑动体形状并非简单的平面三角形分布,而是与墙的宽度和高度均有关。而Soubra等<sup>[22]</sup>研究表明,挡土墙后滑动体的形状根据挡土墙宽高比 $n$ 可分为三棱柱+楔形体、楔形体两种,两种破坏形状间存在一种临界状态,即当滑动体的破坏形状恰好是高度为 $H_{cr}$ 的单一楔形体时,所对应的挡土

墙宽高比即为临界宽高比 $n_{cr}$ 。

传统平面土压力理论难以反映其真实的空间受力状态。研究表明,墙后滑动体的三维形态及土压力分布受控于挡土墙的宽高比。如图1所示(图中 $H$ 为挡土墙高度; $B$ 为挡土墙宽度; $T_1$ 为三棱柱高度; $T_2$ 为土体切除部分的高度; $\theta$ 为破坏角,即滑动体中轴线处滑动面与挡土墙间的夹角),当 $n < n_{cr}$ 、 $n = n_{cr}$ 、 $n > n_{cr}$ 时,滑动体分别呈现为“上部三棱柱+下部楔形体”的组合物、完整的三角形顶面楔形体、梯形顶面楔形体3种形状。该空间形态的差异,是影响方形竖井土压力分布区别于经典平面解的关键因素,也构成了本文研究的理论基础。

为了计算方形竖井挡土墙上的土压力,需要确定滑动体的范围。在外力作用下,竖井周围土体内会形成一系列拱形结构,这些拱形结构能抵抗外力的作用,从而保持土体的稳定性。随着变形的增大,土体中的拱作用逐渐明显,当达到极限平衡状态时形成极限平衡拱。顾慰慈<sup>[23]</sup>取墙宽的一半作为研究对象,建立了任意深度处的平衡拱进行分析,得到了极限平衡拱计算公式:

$$x^2 - B \tan \varphi = 0 \quad (1)$$

式中: $x$ 、 $y$ 分别为平衡拱在水平与垂直方向的坐标(以拱顶或墙中心为原点); $\varphi$ 为墙后土体内摩擦角。

为了简化计算,对挡土墙及墙后土体作如下假设:①挡土墙为竖直、刚性体,墙后填土面水平,墙后填土可看作半无限空间,土体为均匀、各向同性材料;②达到主动极限平衡状态时,破裂面通过墙脚;③墙体与填土间的摩擦角为恒定值;④忽略挡土墙的转动。

当支护结构与土体的弹性模量比大于1000且井壁挡土墙在短期开挖荷载下的变形量低于变形阈值0.05% $H$ 时,视其为刚性体。

如图1(b)所示,当 $n = n_{cr}$ 时,竖直三棱柱高度为0,设此时挡土墙高度为 $H_{cr}$ ,则临界宽高比为:

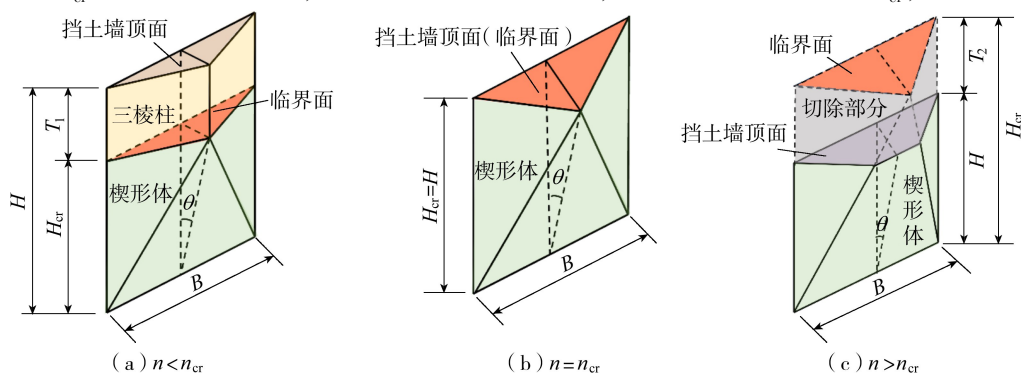


图1 滑动体破坏形状

$$n_{cr} = B/H_{cr} \quad (2)$$

因此求得  $H_{cr}$  即可确定临界宽高比  $n_{cr}$ 。为求得临界宽高比,需先求得滑动体体积。

当  $n \leq n_{cr}$  时,滑动体由高度为  $T_1$  的三棱柱和高度为  $H-T_1$  的楔形体两部分组成,滑动体总体积为:

$$V_1 = BhH/2 - Bh(H - T_1)/4 \quad (3)$$

为简化计算,可将滑动体横截面进行简化,即平衡拱用面积相等的等效三角形来代替,该三角形即为图 1(a) 所示三棱柱横截面三角形。根据平衡拱面积和等效三角形面积公式,可得三角形的高  $h$  为:

$$h = \frac{1}{3} B \cot \varphi \quad (4)$$

当  $n > n_{cr}$  时,滑动体为顶面是梯形的楔形体,楔形体顶面梯形高度为  $h_0$ ,则楔形滑动体总体积为:

$$V_2 = Bh_0^2 H/2h + B(h - h_0)h_0 H/4h \quad (5)$$

其中  $h_0 = Hh/(H + T_2)$

因墙后滑动体关于挡土墙中轴线对称,所以墙后主动土压力的合力、滑动体的重力、滑动体作用在滑动面上的反力等力的作用点均在挡土墙中线上。 $n \leq n_{cr}$  和  $n > n_{cr}$  两种情况下滑动体受力状态分别如图 2(a)(b) 所示。滑动体重力  $G = \gamma V$  ( $\gamma$  为土体容重,  $V$  为滑动体体积)。土体作用在挡土墙上的土压力的合力为  $E$ ,其与墙面法线方向的夹角为  $\delta$ 。滑动体作用在底滑动面  $ab$  上的反力为  $R$ ,其与底滑动面法线方向的夹角为  $\varphi$ 。由滑动土体极限平衡状态下的静力平衡条件可得各作用力之间关系如图 2(c) 所示。根据三角形正弦定理可得主动土压力合力:

$$E = G \frac{\cos(\theta + \varphi)}{\sin(\delta + \theta + \varphi)} = \gamma V \frac{(\cot \varphi - \tan \theta) \sin \varphi}{[\tan \theta + \tan(\varphi + \delta)] \cos(\varphi + \delta)} \quad (6)$$

由式(6)可以看出,主动土压力合力  $E$  是  $\theta$  的单值函数,当  $\theta=0$  时,  $G=0$ ,当  $\theta=\pi/2 - \varphi$  时,  $E=0$ 。因此当  $\theta$  在  $0 \sim \pi/2 - \varphi$  范围内变化时,  $E$  存在一个极大值,即所求的主动土压力。挡土墙宽度  $B$  为定

值时,等效三角形高度  $h$  为定值,所以  $\theta$  是关于  $H_{cr}$  的函数,且由几何关系得:

$$\tan \theta = h/H_{cr} = h/(H - T_1) \quad (7)$$

当  $n \leq n_{cr}$  时,将式(4)代入式(3),之后将式(3)和式(7)代入式(6),得主动土压力合力:

$$E = \frac{\gamma \left[ \frac{BhH}{2} - \frac{BhH_{cr}}{4} \right] \left( \cot \varphi - \frac{h}{H_{cr}} \right) \sin \varphi}{\left[ \frac{h}{H_{cr}} + \tan(\varphi + \delta) \right] \cos(\varphi + \delta)} \quad (8)$$

为了求解破坏角  $\theta$ ,令  $dE/dH_{cr} = 0$ ,可得:

$$H_{cr} = B_2 + \frac{1}{2} \sqrt{B_2^2 + 4B_1} \quad (9)$$

其中  $B_1 = \frac{h + 2hH[\cot \varphi + \tan(\varphi + \delta)]}{\cot \varphi \tan(\varphi + \delta)}$

$$B_2 = 2h/\tan(\varphi + \delta)$$

当  $n > n_{cr}$  时,将式(5)代入式(6),可得主动土压力合力:

$$E = \gamma \frac{(\cot \varphi - \tan \theta) \sin \varphi}{[\tan \theta + \tan(\varphi + \delta)] \cos(\varphi + \delta)} \cdot \left[ \frac{Bh_0^2 H}{2h} + \frac{B(h - h_0)h_0 H}{4h} \right] \quad (10)$$

其中  $H = H_{cr} - T_2$

将式(9)代入式(2)可得临界宽高比:

$$n_{cr} = 2B/(2B_2 + \sqrt{B_2^2 + 4B_1}) \quad (11)$$

将式(4)和式(9)代入式(7)可得:

$$\tan \theta = (2B \cot \varphi)/3(2B_2 + \sqrt{B_2^2 + 4B_1}) \quad (12)$$

## 2 主动土压力分布

### 2.1 主动土压力沿墙深分布特征

在外荷载作用下,墙后填土绕墙脚滑动时,墙后填土内部存在多条相互平行的滑动面,其与水平方向夹角等于滑动面倾角<sup>[24]</sup>。故假定任意高度处所对应的滑动面均平行于边缘滑动面,采用基于滑裂面分层得到的斜微分单元法分析土压力沿墙深的分布。假定某一底滑动面与挡土墙的交点埋深为  $z$ ,该底滑动面、两侧滑动面、挡土墙围成的滑动体顶面

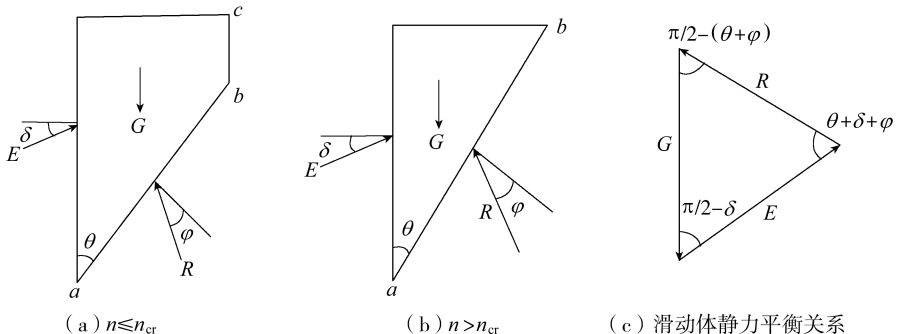


图 2 滑动体受力分析

面积为  $A_z$ 。

如图 3 所示,取某一埋深为  $z$  的底滑动面,该底滑动面与两侧滑动面及挡土墙围成一个空间滑动楔形体。根据受力平衡,作用于该微分单元上的总主动土压力微分  $dE$  可由滑动面上的极限抗力积分求得。

设  $k$  为土压力系数:

$$k = \frac{(\cot \varphi - \tan \theta) \sin \varphi}{[\tan \theta + \tan(\varphi + \delta)] \cos(\varphi + \delta)} \quad (13)$$

则任意埋深  $z$  处主动土压力  $p$  为:

$$p = dE/Bdz = k\gamma dV/Bdz = k\gamma A_z/B \quad (14)$$

当  $n \leq n_{cr}$  时,如果  $z \leq H_{cr}$ ,则任意埋深  $z$  处对应的滑动体顶面面积  $A_z$  为:

$$A_z = Bh/2 - B(h - z\tan\theta)^2/2h \quad (15)$$

将式(15)代入式(14),可得:

$$p = \gamma kh/2 - \gamma k(h - z\tan\theta)^2/2h \quad (16)$$

式(16)表明,此时主动土压力随埋深增大呈抛物线型增大。

当  $n \leq n_{cr}$ 、 $z > H_{cr}$  时,滑动体顶面将完全形成,其面积  $A_z$  达到最大值并保持不变,此时  $A_z = Bh/2$ ,将此面积代入式(14),得到此埋深区间的主动土压力为一常数:

$$p = \gamma kh/2 \quad (17)$$

当  $n > n_{cr}$  时,任意埋深处对应的滑动体顶面面积  $A_z$  计算如图 3(b) 所示,任意埋深处挡土墙主动土压力同式(16)。

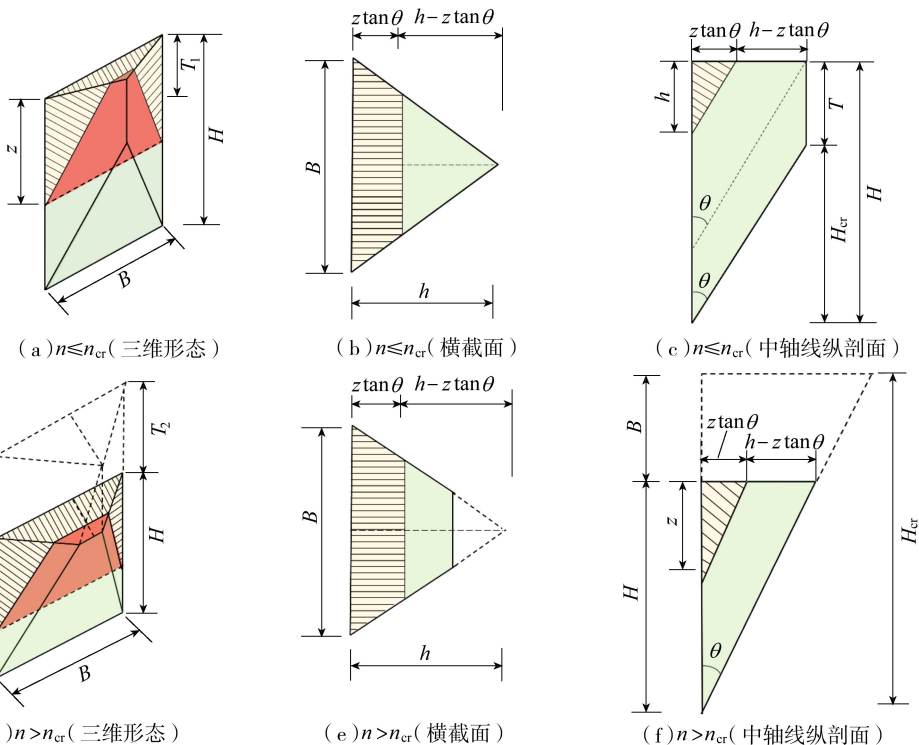


图 3 滑动体顶面面积计算示意图

## 2.2 主动土压力沿墙长分布特征

主动土压力沿墙长(墙宽)的分布规律,可由滑动体的三维几何形态推导得出。在任意埋深  $z$  处,作用于挡土墙上的主动土压力沿墙长的分布形式,与该埋深处滑动体水平横截面的几何形状直接相似。以挡土墙中轴线与地表的交点为坐标原点,计算模型的横截面和中轴线纵剖面如图 4 所示,任意埋深  $z$  处的主动土压力沿墙长的分布可用下式计算:

$$p = \gamma k y_0 \quad (18)$$

式中:  $y_0$  为通过点  $(0,0,z)$  的滑动面与地面交线的  $y$  坐标。

当  $n \leq n_{cr}$  时,如果  $z \leq H_{cr}$ ,滑动体水平截面呈梯形,故主动土压力沿墙长呈梯形分布,如图 4(a) 所示,主动土压力可以分  $|x| \leq x_0$  和  $|x| > x_0$  两部分计算,其中  $x_0$  为通过点  $(0,0,z)$  的滑动面与地面交线长度的一半。由相似三角形可以求得:

$$x_0 = B(h - 2y_0)/2h \quad (19)$$

当  $|x| \leq x_0$  时,主动土压力可用下式计算:

$$p = \gamma k y_0 = \gamma k z \tan \theta \quad (20)$$

当  $|x| > x_0$  时,任意埋深处滑动体横截面高度为

$$y = \frac{B - 2x}{B - 2x_0} z \tan \theta, \text{ 代入式(18)可得:}$$

$$p = \frac{B - 2x}{B - 2x_0} \gamma k z \tan \theta \quad (21)$$

当  $n \leq n_{cr}$ 、 $z > H_{cr}$  时,滑动体横截面随埋深发生变化,主动土压力沿墙长的分布为可按式(20)

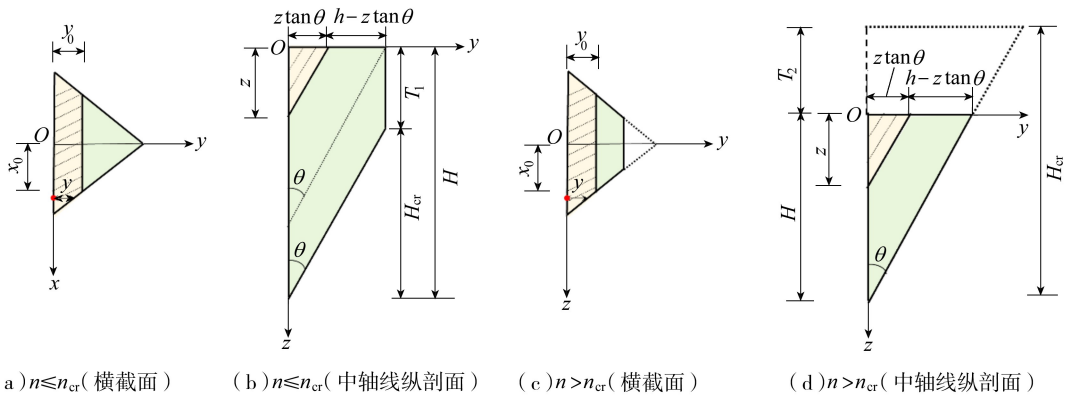


图4 土压力沿墙长分布计算示意图

计算。

当  $n > n_{cr}$  时,任意埋深处主动土压力沿墙长的分布与  $n \leq n_{cr}$ 、 $z \leq H_{cr}$  时相同,土压力分布分为两种情况,可分别按式(20)和式(21)进行计算。

### 2.3 主动土压力合力作用点位置

主动土压力合力作用点与墙顶的距离  $H_E$  可用下式计算:

$$H_E = \int p z dz / \int p dz = \int p z dz / E \quad (22)$$

当  $n \leq n_{cr}$  时,将式(8)和(16)代入式(22),可得:

$$H_E = (6H^2 - h^2 \cot \theta) / (12H - 6h \cot \theta) \quad (23)$$

当  $n > n_{cr}$  时,将式(10)和式(17)代入式(22),可得:

$$H_E = (32H^2 h - 3H^3 \tan \theta) / (48h^2 \cot \theta - 24Hh) \quad (24)$$

## 3 土压力影响因素分析与验证

合阳县城南排水建设工程3号竖井开挖深度为50 m。竖井所在地层主要为黄土,通过室内试验,得到竖井周围土体容重为  $20.1 \text{ kN/m}^3$ ,内摩擦角为  $32.8^\circ$ ,黏聚力为  $34.0 \text{ kPa}$ 。竖井的土体弹性模量为  $32.4 \text{ MPa}$ ,而C25混凝土井壁配格栅钢架后的等效模量为  $38 \text{ GPa}$ ,模量比超过阈值(1000);同时现场监测显示井壁最大水平位移仅  $3.53 \text{ mm}$ (对应50 m井深的变形阈值为  $25 \text{ mm}$ ),完全满足刚性假设要求。因此,以该方形竖井为工程背景,分析挡土墙和周围土体相关物理力学参数对主动土压力的影响。

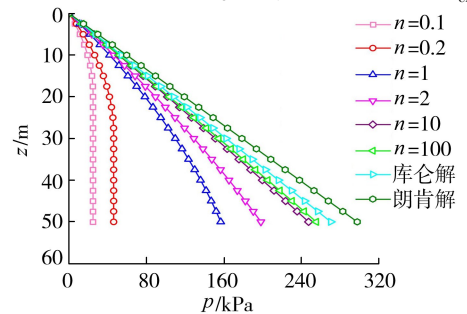
### 3.1 挡土墙宽高比

不同宽高比下,竖井单位井壁宽度上主动土压力  $p$  随埋深  $z$  的变化如图5(a)所示,可见井壁宽度会对井壁主动土压力产生较大影响。此外,墙-土摩擦角  $\delta$  对竖井井壁主动土压力具有显著影响。在缺乏  $\delta$  的确切值时,可以取  $\delta = \varphi/3^{[11]}$ 。因此,图5中  $\delta$  取值为  $10.9^\circ$ 。主动土压力随埋深的增大逐渐增

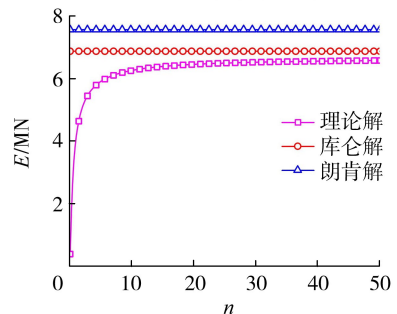
大,但增大速率逐渐减小。当宽高比较小时,埋深大于30 m后,主动土压力随埋深的增大基本保持不变。相同埋深下,主动土压力及其变化速率随宽高比的增大均逐渐增大。

竖井单位井壁宽度上主动土压力合力  $E$  随宽高比  $n$  的变化如图5(b)所示,  $E$  随  $n$  增大而增大,增大速率逐渐减小,  $E$  逐渐趋向于库仑主动土压力合力。由图5可知,  $E$  始终小于主动土压力库仑解,随着  $n$  的增大,  $E$  逐渐增大,趋向于平面应变条件下的库仑主动土压力。当  $n = 10, 100$  时,  $E$  理论解分别等于库仑主动土压力的93.1%和98.2%,即  $n > 10$  时,随着  $n$  的增大,增加量逐渐减小,相对  $n$  的变化可以忽略不计。因此,当  $n < 10$  时,  $E$  与库仑主动土压力差异较大,此时采用库仑土压力理论求解偏于保守;当  $n > 10$  时,  $E$  与库仑主动土压力的差异小于10%,此时可采用库仑主动土压力理论近似求解。

不同土体内摩擦角  $\varphi$  下,临界宽高比  $n_{cr}$  随宽



(a) 土压力变化规律



(b) 单位井壁宽度上主动土压力合力

图5 宽高比对竖井井壁土压力的影响

高比  $n$  的变化如图 6 所示。 $n_{cr}$  随  $n$  的增大逐渐增大并趋向于一个阈值。以  $\varphi = 30^\circ$  为例,当  $n = 0.2$  时, $n_{cr} = 0.31$ ;当  $n = 5$  时, $n_{cr} = 2.11$ ;随着  $n$  的继续增大, $n_{cr}$  逐渐趋向于 3.7。

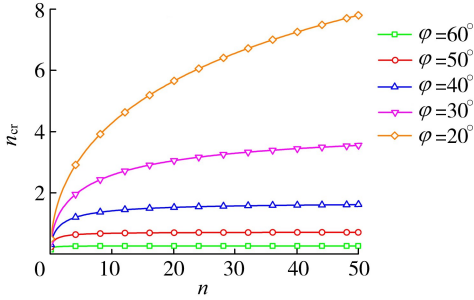


图 6 临界宽高比变化规律

### 3.2 土体内摩擦角和墙-土摩擦角

取井壁宽高比为 0.2,土体内摩擦角  $\varphi$  和墙-土摩擦角  $\delta$  对单位井壁宽度上主动土压力合力  $E$  的影响如图 7 所示。相同  $\delta$  下, $E$  随  $\varphi$  的增大逐渐减小。相同  $\varphi$  下, $E$  随  $\delta$  的增大逐渐减小。 $E$  随  $\delta$  的增大而逐渐减小可能是以下两方面原因导致的:①随着  $\delta$  的增大,滑动体在井壁上的摩擦力增大,该摩擦力可以减小土体沉降和变形,减弱土体的破坏程度,进而减小作用在挡土墙上的主动土压力;② $\delta$  增大时,土体与井壁间的摩擦力增大,土体内土拱效应增强,竖井周边土体承载能力增强,井壁上主动土压力减小。

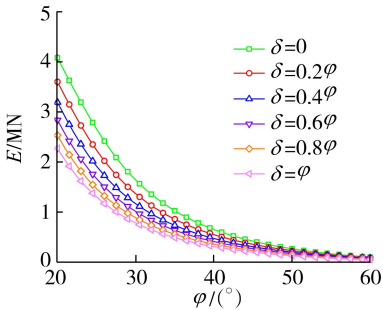


图 7 土体内摩擦角和墙-土摩擦角对土压力的影响

### 3.3 验证

为了验证上述理论解的有效性,本文采用颗粒流与有限差分(PFC-FLAC)耦合的方法来构建方形深竖井数值模型(图 8),即在模型中,根据土体距离井壁的远近,采取不同的模拟方法建模,对于距离井壁较远的土体,由于其变形和相对位移较小,采用有限差分法模拟;而对于距离井壁较近的土体,由于其变形和相对位移较大,则采用颗粒流法模拟。因本文研究基于极限状态进行分析,故颗粒流与有限元模型均采用摩尔库仑本构模型,井壁由刚性墙体模拟。通过控制墙体以恒定速度缓慢背向土体移动,使墙后土体应力状态逐步调整。随着墙体位移增

加,作用于挡土墙的土压力逐渐减小,最终趋于稳定,表明土体已达到主动极限平衡状态。此时,通过计算墙体所承受的水平方向作用力,即可获得竖井井壁的主动土压力值。

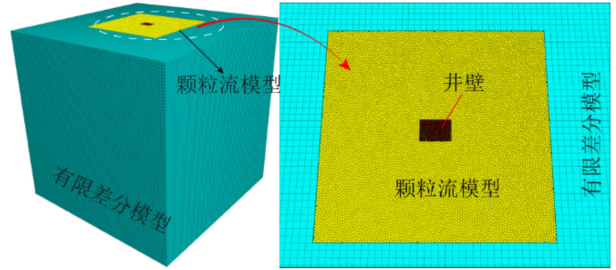


图 8 方形深竖井颗粒流与有限差分耦合模型

提取井壁长边中轴线的土压力,将空间状态下本文理论解、现场实测数据与数值模拟结果进行对比,结果如图 9 所示。由图 9 可知,数值模拟与现场实测数据分布趋势相同,主要分为近似于线性增加、保持平稳和快速减小 3 个阶段,整体表现出非线性分布规律。3 号竖井井壁长边的宽高比为 0.194,小于其临界宽高比(0.347),依据前文分析结果,当  $n < n_{cr}$  时,单位井壁宽度上的主动土压力随深度的变化可分为曲线增长与基本不变两个阶段。理论解与数值模拟、现场实测数据前两阶段的结果吻合较好,峰值偏差小于 2%,趋势一致;但在第三阶段,因本文理论解未考虑井底基础约束导致的土体位移差,未能再现数值解中出现的土压力骤降现象。方形竖井数值模拟的滑动体如图 10 所示,在主动土压力状态下,竖井上部破坏体为三棱柱,下部为顶面为三角形的楔形体,与理论推导的  $n < n_{cr}$  分布较为吻合。因此,理论解能够有效预测方形竖井的主动土压力分布特征,使用该空间主动土压力理论解分析方形竖井空间主动土压力分布特征具有适用性,空间主动土压力随埋深呈非线性增长。

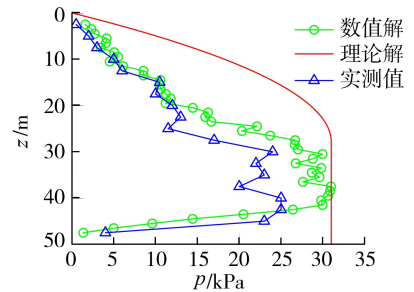


图 9 理论解与数值解、现场实测结果对比

为进一步验证本文模型与理论解的适用性,选取文献[16]的竖井案例进行对比分析。竖井平面尺寸为  $18\text{m} \times 0\text{m}$ ,埋深 56 m,土体参数如下:容重  $\gamma = 20\text{ kN/m}^3$ ,黏聚力  $c = 0\text{ kPa}$ ,内摩擦角  $\varphi = 30^\circ$ ,墙-土摩擦角  $\delta = 20^\circ$ 。在宽高比  $n = 0.32$  的条件下,

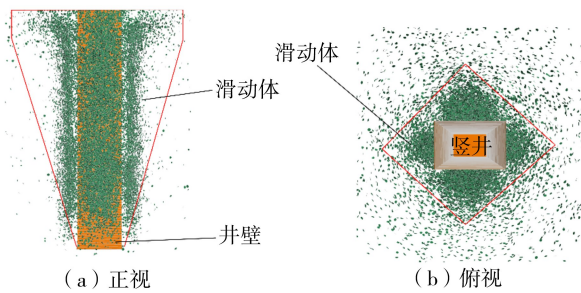


图 10 数值模拟滑动体形状

本文理论解与文献[16]结果的对比如图 11 所示,文献[16]理论解主动土压力系数为常数,土压力呈线性分布;而本文模型考虑到主动土压力系数并非一直不变,而是与埋深等参数相关的函数(式(13)),与文献[16]数值解分布规律一致,复现了由于土拱效应使土压力随埋深非线性增长的特征。因此,本文建立的非线性解析模型更符合方形竖井真实受力情况。

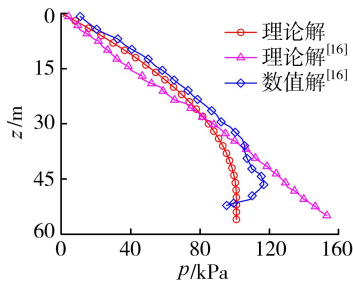


图 11 挡土墙中轴线土压力理论解与文献[16]结果对比

## 4 结论

**a.** 方形竖井挡土墙后填土的滑动体形态受宽高比控制,可分为两类:当宽高比较小时,滑动体由上部的三棱柱与下部的顶面为三角形的楔形体组合而成;当宽高比较大时,滑动体为单一的、顶面呈梯形的楔形体。

**b.** 随着埋深的增大,主动土压力逐渐增大,增大速率逐渐减小;相同埋深下,随着挡土墙宽高比的增大,主动土压力逐渐增大。

**c.** 选取宽高比阈值为 10,挡土墙宽高比小于 10 时,土压力设计应选取空间状态下的土压力;挡土墙宽高比大于 10 时,土压力库仑解与真实土压力差异小于 10%,可近似选取平面状态下的土压力设计方形竖井支护结构,简化土压力的计算过程。

**d.** 由于一般方形竖井工程井壁的宽高比通常不超过 1,因此类似方形竖井的土压力分布呈现出显著的空间效应,沿埋深表现为先非线性增长、后趋于稳定的特征,因此在进行方形竖井支护结构设计时,应考虑分段进行支护结构设计,降低工程成本。

## 参考文献:

- [ 1 ] Tom Wörden F, Achmus M. Numerical modeling of three-dimensional active earth pressure acting on rigid walls [J]. Computers and Geotechnics, 2013, 51: 83-90.
- [ 2 ] Lin Yuliang, Leng Wuming, Yang Guolin, et al. Seismic active earth pressure of cohesive-frictional soil on retaining wall based on a slice analysis method [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 70: 133-147.
- [ 3 ] 罗章波, 亢佳伟, 李仑, 等. 黄土-古土壤地层深竖井受力变形特征研究 [J]. 铁道工程学报, 2024, 41(3): 1-6. (Luo Zhangbo, Kang Jiawei, Li Lun, et al. Research on the stress and deformation characteristics of vertical shafts in loess paleosol stratum [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2024, 41(3): 1-6. (in Chinese))
- [ 4 ] Lei Mingfeng, Li Jin, Zhao Chenyang, et al. Pseudodynamic analysis of three-dimensional active earth pressures in cohesive backfills with cracks [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 150: 106917.
- [ 5 ] Xu Jingshu, Wang Pengfu, Huang Fu, et al. Active earth pressure of 3D earth retaining structure subjected to rainfall infiltration [J]. Engineering Geology, 2021, 293: 106294.
- [ 6 ] 刘忠玉. 有限无黏性填土刚性挡土墙主动土压力计算 [J]. 中国公路学报, 2018, 31(2): 154-164. (Liu Zhongyu. Active earth pressure calculation of rigid retaining walls with limited granular backfill space [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(2): 154-164. (in Chinese))
- [ 7 ] Niedostatkiewicz M, Lesniewska D, Tejchman J. Experimental analysis of shear zone patterns in cohesionless for earth pressure problems using particle image velocimetry [J]. Strain, 2011, 47(S2): 218-231.
- [ 8 ] Patel S, Deb K. Study of active earth pressure behind a vertical retaining wall subjected to rotation about the base [J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(4): 04020028.
- [ 9 ] 应宏伟, 黄东, 谢新宇. 考虑邻近地下室外墙侧压力影响的平动模式挡土墙主动土压力研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊 1): 2970-2978. (Ying Hongwei, Huang Dong, Xie Xinyu. Study of active earth pressure on retaining wall subject to translation mode considering lateral pressure on adjacent existing basement exterior wall [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S1): 2970-2978. (in Chinese))
- [ 10 ] Jaradat K A, Abdelaziz S L. On the use of discrete element method for multi-scale assessment of clay behavior [J]. Computers and Geotechnics, 2019, 112: 329-341.
- [ 11 ] 孙佳政. 不同位移模式下挡土墙非极限主动土压力研

- 究[D]. 杭州:浙江大学,2023.
- [12] 关晓迪,何盛东,魏欢欢,等. 基于 Mogi-Coulomb 强度准则的竖井井壁压力计算[J]. 建井技术,2022,43(1):15-20. (Guan Xiaodi, He Shengdong, Wei Huanhuan, et al. Calculation on pressure in mine shaft lining based on Mogi-Coulomb strength criterion [J]. Mine Construction Technology,2022,43(1):15-20. (in Chinese))
- [13] Cheng Y M, Hu Y Y, Wei W B. General axisymmetric active earth pressure by method of characteristics-theory and numerical formulation [J]. International Journal of Geomechanics,2007,7(1):1-15.
- [14] Chehadah A, Turan A, Abed F, et al. Lateral earth pressures acting on circular shafts considering soil-structure interaction [J]. International Journal of Geotechnical Engineering,2019,13(2):139-151.
- [15] 朱正国,安辰亮,朱永全,等. 地铁深竖井土压力理论研究[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(增刊2):3776-3783. (Zhu Zhengguo, An Chenliang, Zhu Yongquan, et al. Research on soil pressure theory of deep subway shaft [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2013,32(S2):3776-3783. (in Chinese))
- [16] 应宏伟,梁文鹏. 方竖井基坑平动模式挡墙的主动土压力[J]. 上海交通大学学报,2018,52(11):1459-1466. (Ying Hongwei, Liang Wenpeng. Spatial active earth pressure against translating retaining walls in square shaft excavations[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2018,52(11):1459-1466. (in Chinese))
- [17] Benmebarek S, Khelifa T, Benmebarek N, et al. Numerical evaluation of 3D passive earth pressure coefficients for retaining wall subjected to translation [J]. Computers and Geotechnics,2008,35(1):47-60.
- [18] Schrüderich C, Tschuchnigg F, Wichtmann T. Rigorous lower and upper bounds for the 3D passive earth pressure problem [J]. Géotechnique Letters, 2020, 10 (2): 100-105.
- [19] Yang Xiaoli, Li Zhengwei. Upper bound analysis of 3D static and seismic active earth pressure [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2018,108:18-28.
- [20] Li Zhengwei, Yang Xiaoli. Three-dimensional active earth pressure for retaining structures in soils subjected to steady unsaturated seepage effects [J]. Acta Geotechnica, 2020,15(7):2017-2029.
- [21] Li Zhengwei Yang Xiaoli. Three-dimensional active earth pressure under transient unsaturated flow conditions [J]. Computers and Geotechnics,2020,123:103559.
- [22] Soubra A H, Galvani D, Regenass P. Three-dimensional active earth pressures [C]//Barcelona:European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering. Barcelona:ECCOMAS,2000.
- [23] 顾慰慈. 挡土墙土压力计算[M]. 北京:中国建材工业出版社,2001:240-242.
- [24] 张恒志,徐长节,何寨兵,等. 基于离散元方法的不同挡墙变位模式下有限土体主动土压力研究[J]. 岩土力学, 2022, 43 (1): 257-267. (Zhang Hengzhi, Xu Changjie, He Zhaibing, et al. Study of active earth pressure of finite soils under different retaining wall movement modes based on discrete element method [J]. Rock and Soil Mechanics,2022,43(1):257-267. (in Chinese))

(收稿日期:2025-03-18 编辑:熊水斌)

(上接第 54 页)

- [11] 王学斌,畅建霞,孟雪姣,等. 基于改进 NSGA-II 的黄河下游水库多目标调度研究 [J]. 水利学报,2017,48(2):135-145. (Wang Xuebin, Chang Jianxia, Meng Xuejiao, et al. Research on multi-objective operation based on improved NSGA-II for the lower Yellow River [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2017,48(2):135-145. (in Chinese))
- [12] 吴云,曾超,杨侃,等. 基于改进 NSGA-II 算法的水资源多目标优化配置 [J]. 人民黄河,2020,42(5):71-75. (Wu Yun, Zeng Chao, Yang Kan, et al. Multi-objective optimal allocation of water resources based on improved NSGA-II algorithm [J]. Yellow River,2020,42(5):71-75. (in Chinese))
- [13] 陈立华,梅亚东,董雅洁,等. 改进遗传算法及其在水库群优化调度中的应用 [J]. 水利学报,2008,39(5):550-556. (Chen Lihua, Mei Yadong, Dong Yajie, et al. Improved genetic algorithm and its application in optimal dispatch of cascade reservoirs [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2008,39(5):550-556. (in Chinese))
- [14] Deb K, Jain H. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, part I: solving problems with box constraints [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation,2014,18(4):577-601.
- [15] Heidari M, Chow V T, Kokotović P V, et al. Discrete differential dynamic programming approach to water resources systems optimization [J]. Water Resources Research,1971,7(2):273-282.
- [16] 蒋志强. 嵌套结构并行多维动态规划算法及其应用研究 [D]. 北京:华北电力大学,2015.
- [17] 丁洋洋. 分解策略型多目标进化算法中的自适应机制研究 [D]. 南京:南京信息工程大学,2018.

(收稿日期:2025-03-09 编辑:俞云利)

# 数字孪生三江平原涝区管理平台构建与应用

刘永强,张 钰,孙昊聪

(河海大学水利水电学院)

**摘要:**针对当前农田涝区管理水平落后、智慧化程度不高等问题,基于农田涝区主要业务需求分析,以物理涝区为单元、业务应用为牵引,提出了基于数字孪生的涝区管理平台框架。运用 BIM+GIS、物联网、无人机倾斜摄影等技术,研究了涝区数字化、可视化场景的构建方法,搭建了涝区三级地理空间数据底板,建立了包含感知设备层、平台支撑层、业务应用层及用户交互层的平台架构,并开发了涝区一张图、智慧防汛、维护保养等功能模块。三江平原 A 农田涝区应用验证结果表明,基于该框架搭建的数字孪生涝区管理平台实现了防洪“四预”、农田排涝与维护保养等功能,提升了涝区管理的科学性与信息化水平,验证了平台框架设计的合理性与关键技术应用的可行性,可为数字孪生技术在涝区管理领域的应用提供参考。

**关键词:**数字孪生;涝区管理;智慧水利;管理平台;三江平原

**Construction and application of a digital twin-based management platform for waterlogged area in the Sanjiang Plain//Liu Yongqiang, Zhang Yu, Sun Haocong (College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University)**

**Abstract:** To address the problems of outdated management levels and low degree of intelligence in current waterlogged farmland areas, a digital twin-based management platform framework for waterlogged areas is proposed based on an analysis of key business requirements, taking physical waterlogged areas as units and business applications as driving forces. Using BIM+GIS, the Internet of Things (IoT) and UAV oblique photogrammetry, methods for constructing digital and visualized scenarios of waterlogged areas are developed. A three-level geospatial data foundation is established, a platform architecture consisting of sensing device layer, platform support layer, business application layer and user interaction layer is designed, and functional modules including a unified map of the waterlogged area, intelligent flood control and maintenance management are developed. A case study conducted in a waterlogged farmland area of the Sanjiang Plain shows that the proposed digital twin-based management platform realizes functions such as four pre-measures (forecasting, early warning, rehearsing, pre-planning) for flood control, farmland drainage and maintenance management, and improves the scientific and informatization levels of waterlogged area management, validating the rationality of the platform framework design and the feasibility of key technologies. This study provides a reference for the application of digital twin technology in waterlogged area management.

**Key words:** digital twin; waterlogged area management; smart water conservancy; management platform; the Sanjiang Plain

数字孪生<sup>[1-3]</sup>指通过多学科交叉、多物理量、多维多尺度的仿真过程,借助数字化手段构建虚拟环境下与实体等价的数字模型,实现对物理世界的动态映射和智能模拟。近年来,水利部先后发布《关于“十四五”期间大力推进智慧水利建设的指导意见》《智慧水利建设顶层设计》《数字孪生流域建设技术大纲(试行)》《数字孪生水利工程建设技术导则(试行)》《水利业务“四预”功能基本技术要求(试行)》《数字孪生灌区建设技术指南(试行)》等

指导文件和技术要求,明确提出构建“智慧水利”体系,发挥数字孪生动态映射功能,推动新阶段水利高质量发展。已有学者对数字孪生技术在水利领域的研究与应用开展了大量探索,如王万祯等<sup>[4]</sup>从多角度探讨了石羊河数字孪生流域建设实施内容;谢崇宝等<sup>[5]</sup>提出了现代化数字灌区的主要业务应用结构体系及主体功能;肖宏宇等<sup>[6]</sup>集成物联网、数字孪生、水利模型与灌区水资源调度技术,探索了灌区动态感知体系与水资源调度仿真模拟,实现了水资

源可视化管理和智慧决策;边晓南等<sup>[7]</sup>基于德州市水资源现状,提出了水资源数字孪生五维模型框架,探讨了虚实体交互、数据服务平台及数字孪生互联互通等技术的可行性,促进水资源信息化管理水平的提升;贺挺等<sup>[8]</sup>提出了基于组件技术的模型管理方式及基于云工作流的模型搭建方法,推进数字孪生流域模型平台建设;韩鹏等<sup>[9]</sup>利用物联网、大数据、BIM+GIS等技术构建了全景式数字孪生调水管理系统,提升了调水工程建设、调度运行及智慧管理的信息化水平;赵菲等<sup>[10]</sup>利用卫星遥导融合技术构建了新型水利信息系统,实现了数字孪生水库“四预”(预报、预警、预演、预案)功能。此外,数字孪生黄河<sup>[11]</sup>、数字孪生长江<sup>[12]</sup>、数字孪生珠江<sup>[13]</sup>、数字孪生小流域<sup>[14]</sup>等的建设应运而生,掀起了数字孪生水利建设的热潮。然而,当前针对数字孪生涝区的框架结构及关键技术研究尚显不足,尤其是关于数字孪生农田涝区的业务需求与应用模式,亟须开展系统性研究。

数字孪生农田涝区以物理涝区为单元、数据资源为底座、模型库为核心、知识库为驱动,基于GIS、BIM、物联网等技术,结合作物特性实现农田排涝、防洪“四预”及维护保养功能的信息化管理。农田涝区的形成与水文、气象、地形、地貌及排水条件密切相关,通常山区谷底以渍害为主,平原坡地则易发生涝灾。松辽流域三江平原作为典型农田涝区,涵盖平原坡地、平原洼地及沼泽湿地等多种类型,并担负黑龙江省产粮重任,构建其数字孪生系统具有重要意义。因此,本文选取三江平原A农田涝区为研究对象,以“需求牵引”为出发点、以“提升能力”为落脚点,构建一套基于数字孪生的涝区管理平台架构体系,并开发数字孪生涝区管理平台,以期数字孪生技术在农田涝区管理中的应用提供参考。

## 1 典型涝区概况及管理业务分析

### 1.1 典型涝区概况

A涝区位于三江平原中东部,行政隶属于黑龙江省鸡西市,地理坐标为 $45^{\circ}43'32''N \sim 46^{\circ}11'03''N$ 、 $132^{\circ}45'43''E \sim 133^{\circ}40'28''E$ 。作为三江平原重要产粮基地,该区域地势自西北向东南倾斜,闭流洼地较多。受台风、热对流及地形影响,区域年平均降水量约为559.3 mm,7月下旬至8月中旬暴雨频发,洪水紧随暴雨,峰型急涨缓落,加重了平原低洼地的洪涝灾情。该地区自建国起共发生洪涝灾害近30次,排泄不及时致使大面积耕地受涝。目前,该涝区控制面积达358.14万 $hm^2$ ,其中耕地面积为244.52万 $hm^2$ ,易涝面积为241.52万 $hm^2$ ,严重影响粮食生产安全。

2011年中央一号文件《关于加快水利改革发展的决定》指出,要加快农田水利设施建设,重视农田易涝地区的治理,强调在发展农田灌溉的同时应解决现有农田的防洪治涝问题,构建防灾减灾建设与管理的保障体系,并以信息化管理为长远目标,这为本文应用数字孪生等信息化技术解决该区域涝灾管理问题提供了政策导向。

目前,A涝区现有的治涝骨干工程包括排水渠道19条、排水涵洞9座、分水闸32座、涵闸18座、渡槽4座、退水闸2座、排水泵站1座等。田间工程采用斗渠、斗沟东西向布置,间距500~800 m,沟渠之间设有道路和林带;农渠间距100 m,与农沟相间布置,农渠与相邻农沟间距50 m。

### 1.2 涝区管理业务分析

A涝区现有的管理模式为传统人工巡检,已无法满足现代化管理需求。因此,在加强涝区排干清淤、工程扩建的同时,应从涝区实际管理需求出发,基于涝区现状条件,围绕治涝与除涝主题,以监测数据为基础,将涝区管理聚焦于农田排涝、防洪“四预”及维护保养等业务,为数字孪生涝区管理平台的搭建提供思路。

a. 数据监测主要包括水位监测、流量监测、降雨监测和视频监控。结合三江平原A涝区地形特征,利用高精度地形图、历史洪水数据及水文测站信息,将易积水的低洼地段、水闸、泵站等排水设施进出水口、关键排干汇入口等影响洪水或积水分布的节点作为涝区关键监测点,通过布设传感设备获取水位、流量、流速、雨量等要素信息,实现对主要积水区域和排水节点的全面有效覆盖。例如,利用水位计对涵闸、开敞式闸的闸前水位、强排站进水池水位及穿堤涵闸的出口水位进行实时监测,以分析其排水能力;在排干汇入承泄区口处布置标准监测断面,利用流量计监测泵闸出口、渠道口、干支流沟渠的水流流速并评估流量负荷,防止水流积聚;借助雨量计分析降雨强度和密度。各节点共同组成涝区全方位监测感控体系,为后续农田排涝、防洪“四预”等业务提供数据支撑。

b. 农田排涝针对作物生长期的内涝积水进行清排,将实时监测的积水深度、作物受淹情况和设施运行状态作为变量,以积水深度最小化、作物损失最小化、设备利用最大化为目标函数,以监测区域内积水深度、排水设施流量、作物受涝面积、排水模数、排涝设施运行状态为约束条件,通过权重分配计算区域排水优先级得分,确定涝区优先排涝顺序,进而调控闸门开度和泵站运行参数以控制排水速率,实现

资源的优化配置。其中,排水模数是排水模型设计的基本参数,也是衡量排涝能力的主要技术指标之一<sup>[15]</sup>。区别于城市排涝的即时性,农作物耐涝时长一般为1~3 d,且A涝区以水田为主,故排水模数可根据下式计算:

$$q_w = [p_{3d} - (d + e)t - h] / 86.4t \quad (1)$$

式中: $q_w$  为水田设计排水模数,  $m^3 / (s \cdot km^2)$ ;  $p_{3d}$  为设计3 d暴雨量, mm;  $h$  为水田滞蓄水深, mm;  $d$  为田间渗漏损失, mm;  $e$  为田间蒸发损失, mm;  $t$  为排出历时,取4 d。

c. 防洪“四预”旨在根据气象部门共享的数据,运用通信、遥测、物联网和计算机技术,实现雨量、水位、流量、气温、湿度、风向、风速及土壤水分等水情、气象数据的实时收集和处理;在此基础上,对过境洪水的淹没范围及洪峰流量进行预报预警,动态模拟预演洪水形势、人员疏散、抢险救援等场景,并及时更新河道、沟渠、水库、蓄滞洪区等区域的应急预案<sup>[16]</sup>。

d. 维护保养包括对涝区内排水沟道、排水渠道、排水涵洞、渡槽、排水闸站等工程制定检查计划,记录并查看维修保养情况,上传和反馈问题,通过APP辅助管理人员及时发现并处理隐患,确保排涝体系正常运行,提高排涝效率和安全性。

## 2 平台总体设计

### 2.1 建设任务

数字孪生三江平原涝区建设通过感控体系搭建、数据底板构建、模型库与知识库建设,实现物理涝区的数字化改造。以涝区管理业务需求为导向,构建集涝区一张图、智慧防汛、维护保养等功能于一体的可视化、智能化管理应用体系,以此提出数字孪生涝区管理平台的总体架构。其中,数据底板建设通过整合涝区已有监测数据、业务管理数据及外部共享数据,重点开展BIM+GIS等地理空间数据的集成与融合,且BIM模型建模精度不低于LOD350,确保数据的精确性与全面性;模型库包含洪水预报模型、暴雨预报模型、农田排涝模型、闸泵联合调度模型、设备安全评价及预测模型等涝区专题模型,以及可视化与智能识别模型;知识库则包含预报调度方案库、业务规则库、工程安全知识库、历史场景知识库等。

### 2.2 平台总体架构

平台采用B/S架构进行设计,以网络传输为基础,自下而上构建感知设备层、平台支撑层、业务应用层,并贯穿网络安全体系和运行维护体系,紧密结合涝区管理需求,总体架构见图1。

a. 网络传输基底。借助物联网、通用分组无线

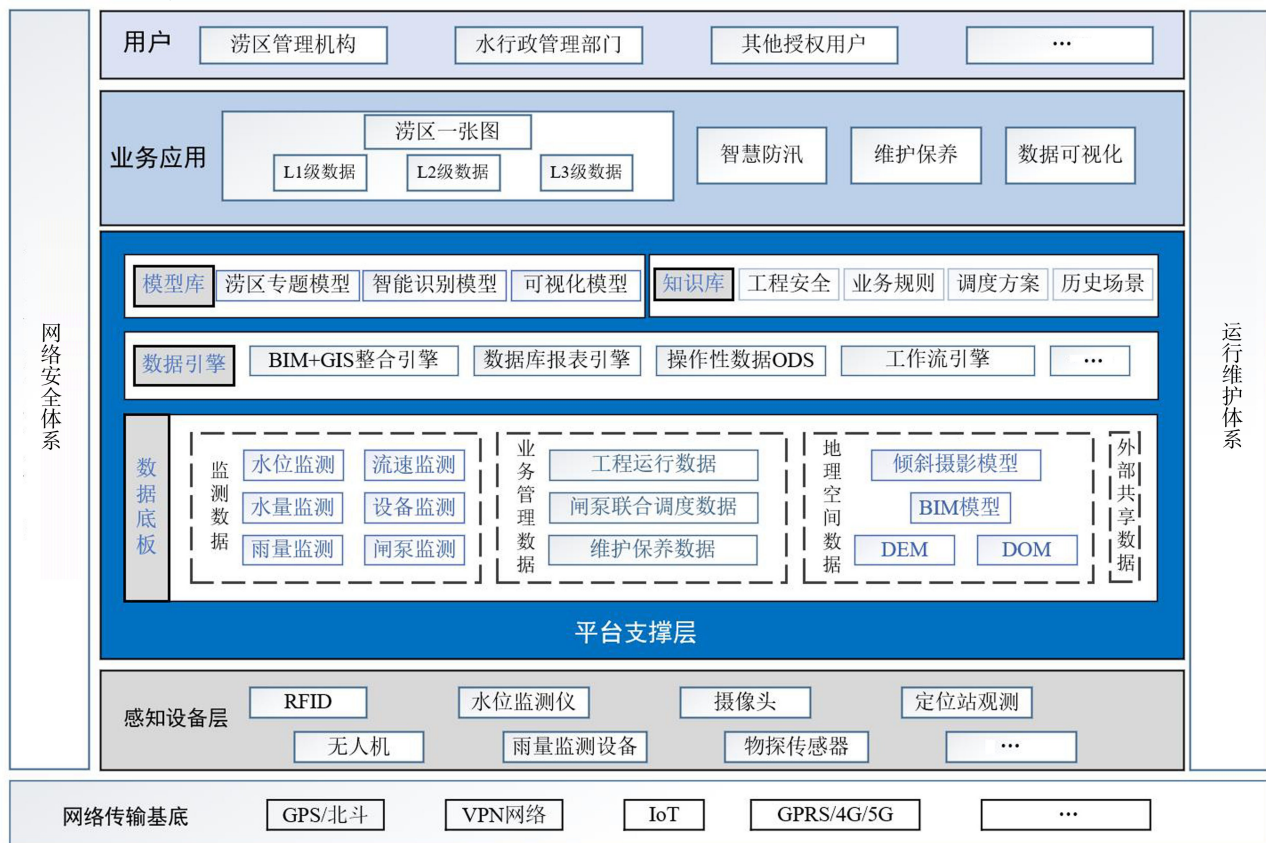


图1 数字孪生涝区管理平台总体架构

服务(GPRS)等传输技术,保障多源数据的实时采集与云端传输,提升平台的响应速度和处理能力,为实现涝区全域互联提供坚实的技术支撑。

**b. 感知设备层。**基于物联网技术,通过布设摄像头、无线射频识别技术(RFID)、水位计、雨量计等感知设备,全方位动态监测涝区关键节点,构建全域数据采集体系,筑牢数字化涝区基底。

**c. 平台支撑层。**作为涝区管理平台的“大脑”,该层涵盖模型库、知识库及数据引擎建设,承担数据加载、分析、处理、清洗、共享及知识库调用等任务,实现以数据底板为基础,模型库为核心,知识库为驱动的数字表达。

**d. 业务应用层。**以涝区管理业务为导向,通过对物理实体位置、运行规则等要素的数字赋能,整合涝区一张图、智慧防汛、维护保养等功能模块,以全面提升涝区综合管理效率和应急处置能力。

**e. 用户交互层。**基于 MVC 框架结构设计的 Web 服务器,及时处理 HTTP 请求,通过 URL 实现准确映射,保障数据的实时交互与安全管理;同时通过用户角色权限控制,实现分级高效管理。

感知设备层采集的监测数据通过网络传输基底上传至平台支撑层,完成数据存储、分析等操作,业务应用层基于数据分析结果响应管理需求,最终通过 Web 服务器在用户交互层实现双向交互与分级管理。

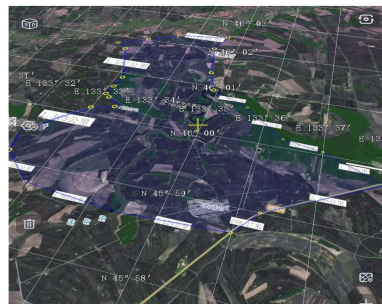
### 3 关键技术

#### 3.1 可视化场景构建技术

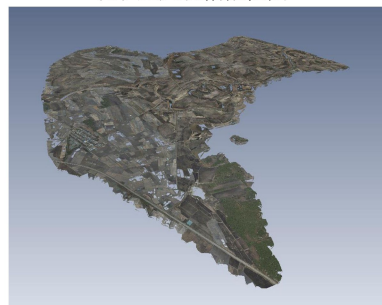
传统的场景构建多用于大范围区域地形模型展示,难以表现建筑物、道路及水流等细节。因此,本文引入三级地理空间数据底板构建概念,以满足涝区空间数据对可视化表达的精细化需求。其中,L1和L2级数据底板数据主要从水利部和省级水利管理平台共享获取;在数据无法共享时,采用卫星遥感地图、无人机倾斜摄影<sup>[17]</sup>等GIS技术进行数据补充<sup>[18]</sup>;L3级数据底板利用BIM建模<sup>[19]</sup>等技术实现建筑物的精细表达,GIS与BIM的集成与融合在建模质量、仿真精度、渲染表达等方面均具有显著优势,为A涝区可视化场景构建提供技术支撑。

**a. 无人机倾斜摄影技术。**该技术是实现三维场景建模的重要手段<sup>[20]</sup>,其数据格式易于网络分布与共享应用。本文采用大疆经纬M300RTK无人机搭载禅思P1相机进行数据采集,相机焦距为35mm,有效像素为4500万,像元尺寸为4.4 $\mu\text{m}$ ;航摄相对高度为200m,航向重叠率为80%,旁向重叠率为70%,可获取研究区多角度影像。借助

ContextCapture Center软件处理无人机拍摄的多角度图像,通过对相机参数、影像数据及POS数据进行多视角影像密集点特征匹配,进而完成区域网的自由网多视影像联合约束平差解算,确定图像的空间位置和角度,建立影像间的几何关系。基于匹配成功的特征点生成点云数据,经过数据编辑、切割等操作构建三维不规则三角网(TIN)模型。该软件支持图像纹理自动映射,增强了三维场景模型的仿真效果。三江平原A涝区三维场景建模结果如图2所示。



(a) 无人机拍摄范围



(b) 倾斜摄影模型

图2 三维场景建模结果

**b. BIM+GIS融合技术。**通过将包含几何信息和属性数据的BIM模型<sup>[21-22]</sup>与覆盖地理信息、地形数据及空间关系的GIS模型融合,构建涝区全要素地理空间数据底板,强化可视化场景表达。BIM+GIS融合技术可通过FBX、IFC、Shapefile等数据格式转换实现信息交互与工作协同<sup>[23-24]</sup>。利用FME软件实现BIM模型的局部坐标向区域坐标系的转换,并基于Helmert地理坐标转换算法实现BIM模型与GIS模型在空间位置上的对齐,确保数据格式的兼容性与信息的完整性。利用共享云平台集成GIS与Revit模型,实现涝区从宏观到微观的可视化场景构建及地理信息全覆盖,强化涝区数字化表达,同时为防洪“四预”、维护保养等功能的实现提供精准的数据支撑。

#### 3.2 物联网技术

物联网技术<sup>[25]</sup>采用感知层、网络层和应用层三层架构,实现排涝设施与智慧响应的互联互通。感知层由RFID、雷达水位计、超声波流量计、称重式雨量计等设备组成。结合A涝区区域特点,在低洼地

段、排水设施进出口、排干汇入口等易涝节点布设监测设备,动态监测水位、流量、流速及排涝设备状态,布设时充分考虑设备性能及测量精度,同时在泵站、水闸、排水渠出口处安装视频监控设备,辅助巡检及远程管理。网络层由各种局域网、互联网、有线和无线通信网等构成,设置1个中心站、36个遥测站,采用GPRS连接分布广泛的传感器节点,适应涝区远距离覆盖需求,保证数据高效安全地传送。应用层对集成数据进行清洗、分析和处理,提供跨领域的新型应用和服务。

物联网云平台<sup>[26]</sup>具备海量数据储存和扩展能力。基于MVC-EF-Bootstrap技术体系在云端建立Web服务器,与浏览器进行交互,能够实现涝区监测数据的实时上传与存储,满足高效处理海量数据的需求。

### 3.3 数据库设计

以水利部颁布的《数字孪生水利工程建设技术导则(试行)》为参照,在共享水利部、流域管理机构等部门相关知识库的基础上,结合涝区管理业务特点,构建基于MySQL的预报调度方案库、业务规则库、工程安全知识库、历史场景知识库等,为数字化涝区管理提供智能决策支撑。利用E-R图(实体关系图)表达实体、属性及实体间的关系与约束,梳理业务规则与逻辑结构(图3)。其中,矩形框表示实体,椭圆形框表示属性,菱形框表示实体间的关系,连接线表示关系的约束,多个实体通过不同关系紧密相连。例如,“水文监测站”实体通过“一对多”关系关联多条“传感信息”,每条传感信息包含“传感设备ID”“采集时间”等属性;“预警信息”与“传感信息”之间的“一对多”关系则用于关联同一预警下

的多源传感数据,以支撑分析决策。“用户”与“设备”为“多对多”关系,一个用户可管理多台设备,每台设备也可由多个用户管理。

数据库采用Entity Framework框架实现数据交互,前端使用Bootstrap构建整洁直观的操作界面,代码采用IOC(控制反转)+AOP(面向切面编程)+DDD(领域驱动设计)模式,系统支持轻量级缓存、缩略图上传及服务调用。运用Redis缓存技术<sup>[27]</sup>优化数据存储和访问效率,减轻后端数据库的压力,提高数据访问速度和系统响应能力。接口端设计遵循一致性与安全性原则,前后端基于HTTP协议的网络通信进行交互,保障涝区运行管理的稳定与安全。通过构建预报预警-防洪排涝-响应调用引擎,实现应急决策向实时化、精准化转变。其中,预报预警模块利用监控与传感器采集的实时信息,结合历史场景知识库,基于洪水预报模型预测涝区洪水淹没范围及积水趋势,并及时发布预警信息;防洪排涝模块依托农田排涝模型、闸泵联合调度模型,结合业务规则库、安全知识库,实现防洪排涝与资源的高效利用;响应调用模块接收并处理预警与排涝调度指令,快速生成应急预案并推送至相关用户。

## 4 平台功能应用

### 4.1 涝区一张图

涝区一张图是集区域水系、地形、地貌、水利设施等多维度信息为一体的数字化地图,支持图层管理、坐标定位、底图切换、二维与三维场景切换、缩放、旋转等操作,可实现大范围尺度上涝区自然环境的二三维地图展示。为满足不同尺度可视化需求,构建L1~L3级地理空间数据底板,其中,L1级覆盖

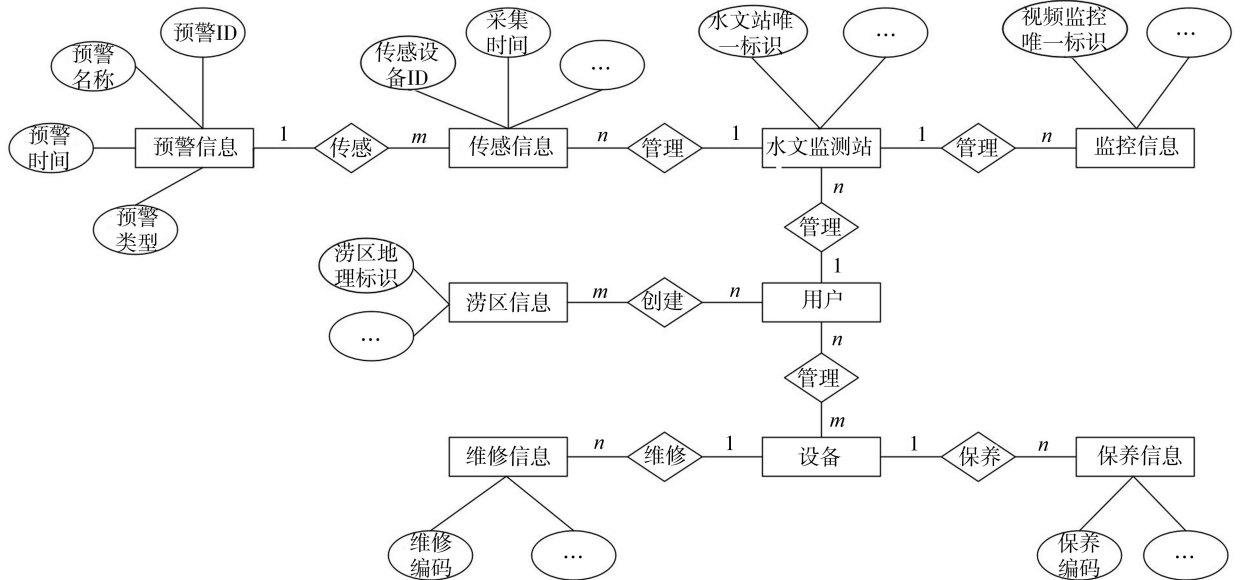


图3 数据库 E-R 图

涝区整体及周边流域水系, L2 级聚焦涝区区域划分与典型建筑物标注, L3 级为 BIM 模型的精细化表达, 通过与 GIS 模型融合完成可视化场景展示, 并以此作为三江平原 A 涝区管理底图, 强化了视觉效果, 使用户能够立体、直观、全面地查看 A 涝区实况, 实现对涝区的全局把控(图 4)。

## 4.2 智慧防汛

智慧防汛旨在整合多方位监测/监控数据及历史数据的基础上, 实现防洪“四预”及农田排涝功能。

**a. 数据监测。**基于实景现场布设的物理传感设备获取雨量、水位、流量、排涝工程运行状态等实时监测数据, 支持按关键字段查询, 并以图表形式为管理者提供可视化数据视图。借助视频监控系统的实时性, 通过光纤和无线网络将实时视频信息传输至监控中心, 实现关键节点全天候动态监测, 辅助管理人员开展安全巡检。

**b. 预报预警。**将气象部门提供的水雨情数据传输至云端服务器, 以知识库、模型库和算法为驱动, 对特征数据进行提取、分析与处理, 评估涝区自排能力。通过洪水预报模型和暴雨预报模型, 采用人机交互方式动态分析并预报洪水淹没范围、位置、面积及农田积水态势, 为涝区精准调度决策提供支撑。同时选取涝区内关键排干界面作为控制点, 根据排干设计流量, 对实时监测流量和预测流量超出设定阈值的情况进行预警, 提高涝区防御的及时性。

**c. 农田排涝。**依据 A 涝区实际监测范围, 布设土壤墒情监测 13 处、水位监测 85 处、表面流速监测 28 处, 实时监测农田积水深度与土壤湿度。通过分析 A 涝区作物在不同生长阶段的耐水性, 将作物耐涝时长纳入农田排涝模型, 确定排水优先级, 降低积

水对作物生长的负面影响。基于洪水预报模型和农田排涝模型, 引入系统算力<sup>[28-31]</sup>和大数据分析技术<sup>[32]</sup>对未来降雨情景进行预测, 进而优化闸泵联合调度方案, 实现实时数据驱动的动态优化。闸泵联合调度模型采用启发式优化的多目标算法, 以排水效率最优、能耗最小、设备状态最佳为目标函数, 以泵站、节制闸、排水涵闸的联合调配流量、闸孔过流能力和机电设备、排水建筑物安全为约束条件, 优化得到泵站和各闸门的分配流量。结合泵站特性曲线、闸门开度流量曲线, 确定泵站各机组开启数量、转角和转速及各闸门开启数量和高度, 实现闸泵联合排水最优, 及时清排农田积水。在设施资源有限的情况下, 优先清排积水较深、作物耐涝能力弱的区域。系统提供远程操作界面, 同时支持人工干预和手动调节, 确保调度灵活性。

**d. 预案预演。**基于知识库调用引擎, 挖掘历史场景<sup>[33]</sup>、业务规则等信息, 实现应急预案的智能生成、更新和优化。在 BIM+GIS 模型融合的基础上, 利用实时水雨情数据和空间分析能力, 动态模拟洪水演进情景, 完成预报预警-防洪排涝-信息发布-联合响应的全过程预演, 合理指导群众疏散与抢险救灾, 辅助运管人员快速决策<sup>[34-35]</sup>。利用移动 APP、现场 LED 屏等方式向管理部门及社会公众发布紧急通知, 及时组织人员疏散; 居民可通过平台获取预警信息或发送求助信号, 管理部门及时响应并开展联动救援, 筑牢人民生命安全红线。

## 4.3 维护保养

基于设备安全评价及预测模型要求, 合理设定变压器、水泵、电机、闸门、启闭机等设备的安全监测阈值。通过在泵站和水闸安装各类传感器, 实现设

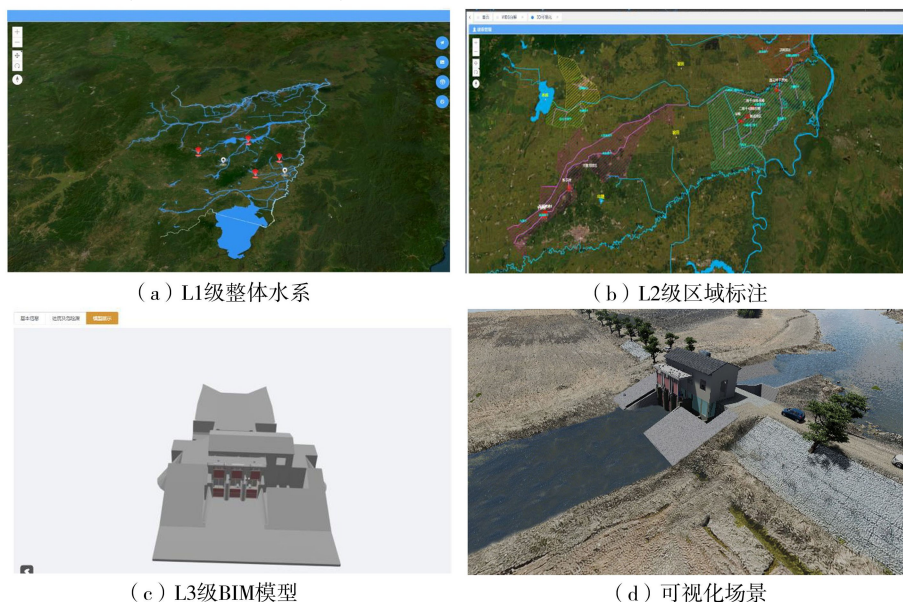


图 4 涝区一张图效果展示

备温度、压力、流量、水位、振动、摆度等运行状态参数的自动化采集。结合传感器采集的实时数据、历史运行数据、设备维修保养记录等多维度数据资源,进行交叉对比分析,支持设备信息的联动查询,提升设备运行状态的研判感知能力。当系统监测到设备参数异常时,及时推送预警信息至相关人员,督促其开展现场实地巡检。系统以时间为主线,展示巡检人员、巡检时间、巡检详情等信息,便于维修人员及时上报设备状态、反馈检查结果,处理异常状况并完成备案记录,进一步提高维护保养效率与质量。

## 5 结 语

数字孪生技术是推动水利智慧化转型的重要手段之一。本文以三江平原农田涝区为研究对象,在分析农田涝区管理核心业务需求的基础上,遵循“需求牵引,应用至上”的原则,提出了基于数字孪生的涝区管理平台架构体系。通过重点研究涝区可视化场景构建、多源数据融合的数据库设计等关键技术,搭建了 A 涝区智慧化管理平台,实现了涝区多尺度、全要素数据的监测、集成、分析与处理,完成了物理涝区在虚拟空间的数字化映射与赋能。平台集成了涝区一张图、防洪“四预”、维护保养等功能,推动了涝区管理向信息化、数字化迈进,为数字孪生在涝区治理领域的研究提供了思路,也为智慧水利的全面推进提供了实践参考。

## 参考文献:

[ 1 ] Grieves M, Vickers J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems [ M ]. Kahlen F J, Flumerfelt S, Alves A. Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. Cham: Springer, 2017: 85-113.

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

[ 3 ] 李国英. 深入贯彻落实党的二十大精神 扎实推动新阶段水利高质量发展;在 2023 年全国水利工作会议上的讲话[J]. 水利发展研究, 2023, 23(1): 1-11. (Li Guoying. Thoroughly implement the spirit of the 20th National Congress of the Communist Party of China and solidly promote the high-quality development of water conservancy in the new stage; speech at the National Water Conservancy Work Conference in 2023 [J]. Water Resources Development Research, 2023, 23(1): 1-11. (in

Chinese))

[ 4 ] 王万祯,康德奎,王晓军. 石羊河数字孪生流域建设探讨[J]. 中国农村水利水电, 2022(8): 117-120. (Wang Wanzhen, Kang Dekui, Wang Xiaojun. Exploration of digital twin watershed construction for Shiyang River[J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(8): 117-120. (in Chinese))

[ 5 ] 谢崇宝,白静,张武雄,等. 现代化数字灌区建设主体功能及主要应用结构体系探讨[J]. 中国农村水利水电, 2024(4): 141-145. (Xie Chongbao, Bai Jing, Zhang Wuxiong, et al. Discussion on major function and key application structure system of modernized digital irrigation district[J]. China Rural Water and Hydropower, 2024(4): 141-145. (in Chinese))

[ 6 ] 肖宏宇,陈石磊,王帅,等. 数字孪生灌区水资源调度管理平台设计与实现[J]. 长江科学院院报, 2025, 42(8): 170-178. (Xiao Hongyu, Chen Shilei, Wang Shuai, et al. Digital twin water resource scheduling and management platform for irrigation area [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2025, 42(8): 170-178. (in Chinese))

[ 7 ] 边晓南,张雨,张洪亮,等. 基于数字孪生技术的德州市水资源应用前景研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(6): 79-90. (Bian Xiaonan, Zhang Yu, Zhang Hongliang, et al. Research on application prospect of water resources in Dezhou based on digital twin technology[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(6): 79-90. (in Chinese))

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

[ 9 ] 韩鹏,李琨,庄志凤,等. 胶东调水工程信息化建设关键技术研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(增刊 2): 446-450. (Han Peng, Li Kun, Zhuang Zhifeng, et al. Research on key technologies of information construction of Jiaodong Water Diversion Project[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(S2): 446-450. (in Chinese))

[ 10 ] 赵菲,江威,丁小辉,等. 卫星遥导技术在数字孪生流域建设应用潜力与初探[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(增刊 2): 369-377. (Zhao Fei, Jiang Wei, Ding Xiaohui, et al. Application potential and initial exploration of communication, navigation and remote sensing satellite technology in digital twin watershed construction [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(S2): 369-377. (in Chinese))

[ 11 ] 栗铭. 《数字孪生黄河建设规划(2022—2025)》发布

- [J]. 人民黄河,2022,44(6):174. (Li Ming. Release of the Digital Twin Yellow River Construction Plan (2022-2025) [J]. Yellow River,2022,44(6):174. (in Chinese))
- [12] 程海云. 推进长江数字孪生流域建设的水文实践与思考[J]. 中国水利,2022(15):49-50. (Cheng Haiyun. Hydrological practice and thinking of promoting the construction of digital twin watershed of the Yangtze River [J]. China Water Resources, 2022(15):49-50. (in Chinese))
- [13] 甘郝新,吴皓楠. 数字孪生珠江流域建设初探[J]. 中国防汛抗旱,2022,32(2):36-39. (Gan Haoxin, Wu Haonan. Study on the construction of the digital twin Pearl River Basin [J]. China Flood & Drought Management, 2022,32(2):36-39. (in Chinese))
- [14] 庞家锋,林凯荣,郑炎辉,等. 小流域数字孪生建设关键技术及应用:以广东佛山市三水区大塘引涌为例[J]. 中国防汛抗旱,2022,32(7):19-23. (Pang Jiafeng, Lin Kairong, Zheng Yanhui, et al. Research and application of key technologies for digital twin construction in small watersheds; taking Datang diversion channel in SanShui District of Foshan City in Guangdong Province as an example [J]. China Flood & Drought Management, 2022,32(7):19-23. (in Chinese))
- [15] 崔宗培,徐乾清,吴以鳌,等. 中国水利百科全书(第三卷)[M]. 北京:水利电力出版社,1991.
- [16] 叶瑞禄,左翔,刘修恒. 数字孪生秦淮河流域防洪四预平台建设与应用[J]. 人民长江,2024,55(3):13-20. (Ye Ruilu, Zuo Xiang, Liu Xiuheng. Construction and application of four pre-platform for flood control of digital twin Qinhuai River Basin [J]. Yangtze River, 2024, 55(3):13-20. (in Chinese))
- [17] 贾智乐. 飞马 F200 无人机在大型水利工程及 BIM 建设中的应用[J]. 测绘通报,2019(9):159-162. (Jia Zhile. Application on large-scale water conservancy projects and BIM construction by FEIMA F200 UAV [J]. Bulletin of Surveying and Mapping,2019(9):159-162. (in Chinese))
- [18] 梁鑫,侯精明,王添,等. 基于多源数据融合的城市洪涝模拟高精度地形构建方法[J]. 水利水电科技进展,2024,44(6):56-63. (Liang Xin, Hou Jingming, Wang Tian, et al. A method for constructing high-precision terrain for urban flood simulation based on multi-source data fusion[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(6):56-63. (in Chinese))
- [19] 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))
- [20] 满旺,李宗梅,聂芹,等. 数字孪生技术在小型水库管理中的应用初探[J]. 测绘通报,2023(1):20-25. (Man Wang, Li Zongmei, Nie Qin, et al. A preliminary study on the application of digital twin technology in the management of small reservoirs [J]. Bulletin of Surveying and Mapping,2023(1):20-25. (in Chinese))
- [21] Liu Ting, Zhang Sherong, Wang Chao. A BIM-based safety management framework for operation and maintenance in water diversion projects [J]. Water Resources Management,2021,35(5):1619-1635.
- [22] Kaushik S, Dhote P R, Thakur P K, et al. An integrated approach for identification of waterlogged areas using RS and GIS technique and groundwater modelling [J]. Sustainable Water Resources Management, 2019, 5(4):1887-1901.
- [23] 李献忠,张社荣,王超,等. 基于 BIM+GIS 的长距离引调水工程运行管理集成平台设计与实现[J]. 水电能源科学,2020,38(9):91-95. (Li Xianzhong, Zhang Sherong, Wang Chao, et al. Design and implementation of long distance water diversion project operation management integration platform based on BIM + GIS [J]. Water Resources and Power,2020,38(9):91-95. (in Chinese))
- [24] Zhang Sherong, Hou Dejun, Wang Chao, et al. Integrating and managing BIM in 3D web-based GIS for hydraulic and hydropower engineering projects [J]. Automation in Construction,2020,112:103114.
- [25] Rao Xiaokang, Ma Rui, Zhang Li, et al. Research and design of a digital twin-driven smart river basin platform [J]. Metaverse,2022,3(2):11.
- [26] 杨婷婷,李志一,赵冬泉. 基于物联网大数据的城市降雨径流控制率分析[J]. 水电能源科学,2020,38(5):15-17. (Yang Tingting, Li Zhiyi, Zhao Dongquan. Analysis of urban rainfall runoff control rate based on internet of things big data [J]. Water Resources and Power,2020,38(5):15-17. (in Chinese))
- [27] 方豪文,周建中,贾本军,等. Redis 内存数据库在长江上游水资源管理决策支持系统中的应用研究[J]. 水力发电,2021,47(7):33-38. (Fang Haowen, Zhou Jianzhong, Jia Benjun, et al. Application of Redis memory database in the water resource management decision support system of the Upper Yangtze River [J]. Water Power,2021,47(7):33-38. (in Chinese))
- [28] 杨晶,路恒通,金鑫,等. 机器学习赋能智慧水利的现实基础、应用现状及发展前景[J]. 水利水电技术(中英文),2024,55(10):137-147. (Yang Jing, Lu Hengtong, Jin Xin, et al. The practical foundation, current application status, and future prospects for the integration of machine learning in empowering intelligent water conservancy [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(10):137-147. (in Chinese))

(下转第 75 页)

# 基于数字图像技术的水资源计量数据实时采集系统研发及应用

陈红<sup>1</sup>, 金鹏涛<sup>1,2</sup>, 马世斌<sup>3</sup>, 彭真<sup>3</sup>, 周子靖<sup>3</sup>, 周宇飞<sup>3</sup>, 钟爱成<sup>4</sup>

(1. 河海大学水利水电学院; 2. 河海大学苏州研究院; 3. 沂沭泗水利管理局沂沭河水利管理局; 4. 苏州市河道管理处)

**摘要:** 针对当前大量取用水数据未采用在线方式采集, 导致数据统计时间间隔大、数据偏差发现不及时的问题, 研发了水资源计量数据实时采集系统, 该系统采用摄像机实时采集取用水计量仪表显示数据, 经图像处理、识别, 提取相应水量数据, 实现水量数据的在线采集。基于数字图像技术, 构建了水表字符区定位方法, 创立了水表字符自适应模板匹配算法, 识别准确率提高至 97.5%。系统已应用于山东某规模以上取水户取水数据实时采集, 对比用户上报数据可知, 系统具有自动校核功能, 为水资源精细化管理提供了支持。

**关键词:** 取用水计量; 实时采集系统; 数字图像技术; 数据校核; 模板匹配

**Development and application of real-time water resources metering data acquisition system based on digital image technology**//Chen Hong<sup>1</sup>, Jin Pengtao<sup>1,2</sup>, Ma Shibin<sup>3</sup>, Peng Zhen<sup>3</sup>, Zhou Zijing<sup>3</sup>, Zhou Yufei<sup>3</sup>, Zhong Aicheng<sup>4</sup>  
(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University; 2. Suzhou Institute for Advanced Research of Hohai University; 3. Yishuhe Water Conservancy Bureau of Yishusi Conservancy Bureau; 4. Suzhou River Management Department)

**Abstract:** To address the current problem where a large volume of water withdrawal and usage data is not collected online, leading to large statistical time intervals and untimely detection of data deviations, a real-time water resources metering data acquisition system was developed. The system employs cameras to capture real-time images of the data displayed on water withdrawal and usage meters. Through image processing and recognition, the corresponding water volume data are extracted, enabling online collection of water volume data. Based on the digital image technology, a method for locating the character area of water meters was constructed, and an adaptive template matching algorithm for water meter characters was created, improving the recognition accuracy to 97.5%. The system has been applied to the real-time acquisition of water withdrawal data from a large-scale water user in Shandong Province. A comparison with the user-reported data shows that the system has an automatic verification function, providing support for the refined management of water resources.

**Key words:** water withdrawal and usage metering; real-time data acquisition system; digital image technology; data verification; template matching

我国水资源时空分布不均, 人均水资源占有量低, 水资源短缺现象时有发生<sup>[1]</sup>。为此, 国家要求建立严格的水资源刚性约束制度, 其中加强取用水管理是实施水资源消耗总量和消耗强度管控、强化水资源刚性约束的重要内容<sup>[2-3]</sup>。取用水计量是加强取用水管理工作的基础。目前, 部分重点取水户已实现在线计量, 水量数据可实时传输至相应主管部门, 但仍有大量取水户采取人工方式上报取用水数据<sup>[4]</sup>, 该方式存在上报时间间隔大、难以及时发现数据偏差等问题, 影响了水资源监管和配置。若对传统取用水计量仪表进行在线改造, 费时费力,

成本高, 且可能对水计量仪表的测量精度造成影响。因此, 如何构建一套传统水计量仪表数据实时采集系统对提升水资源管控能力至关重要。

近年来, 图像技术被广泛应用于流速、流量等流体测量领域<sup>[5-6]</sup>。例如: 唐洪武等<sup>[7]</sup>通过粒子图像处理技术, 实时测量了河工模型中自航船模的船尾流场及航道断面流场和表面流速, 该测量技术对水流运动干扰较小; Fujita 等<sup>[5]</sup>基于实验室流体力学研究中的粒子图像测速(PIV)技术提出了大尺度粒子图像测速法(LSPIV), 该方法可实现大面积流体表面流场的快速测量; 陈红等<sup>[8]</sup>采用图像技术研发

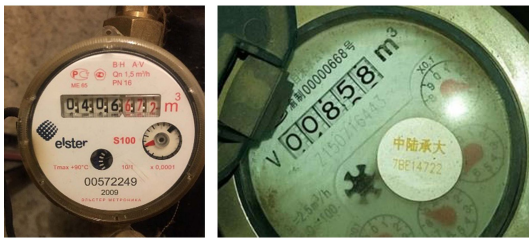
了表面流场测量系统,对比实验表明图像测速数据与传统流速仪测量结果一致。有研究者将图像技术引入仪表字符识别领域。例如:陈妃奋<sup>[9]</sup>运用机器学习方法对仪表字符进行图像识别,该方法需要大量样本图像,面对新型仪表字符时,识别准确率受到一定影响;陈文萍等<sup>[10]</sup>提出了一种基于YOLOv5的水计量仪表字符自动识别方法,该方法计算量大,对硬件设备性能要求较高,计算速率有待提高;高菊等<sup>[11]</sup>采用模板匹配算法,实现了仪表字符的轻量化识别,但对于不同类型、不同尺度水计量仪表字符,传统模板匹配算法会出现识别错误。

当前水计量仪表类型高达数百种,其字符的形式、大小、对比度各异,有必要研发一套兼具高精度和高效率的仪表字符识别算法,以满足水资源计量数据实时采集的要求。本文基于数字图像技术,研发了水资源计量数据实时采集系统,以期解决传统取水计量数据采集难题,提升水资源监管能力。

## 1 图像处理

### 1.1 图像采集

采用摄像机获取水计量仪表显示数据的图像,通过4G网络以TCP/IP协议传输至网络服务器,服务器接收、存储相应图像数据。基于C/S架构,采用Python语言开发,应用多线程技术,支持多台终端设备同时传输数据。将水计量仪表图像进行压缩,分辨率为640×480像素时图像大小为30 kB,提升数据传输效率。图1为两个典型水计量仪表的图像。



(a) 水表1 (b) 水表2

图1 水计量仪表图像

### 1.2 图像预处理及字符区定位

仪表图像包含字符、转盘等内容,为提高图像处理效率,首先分离字符区,采用Canny算子<sup>[12]</sup>提取字符区边缘,具体处理流程如图2所示,包括灰度变换、Canny边缘检测、二值化处理、字符区定位和倾

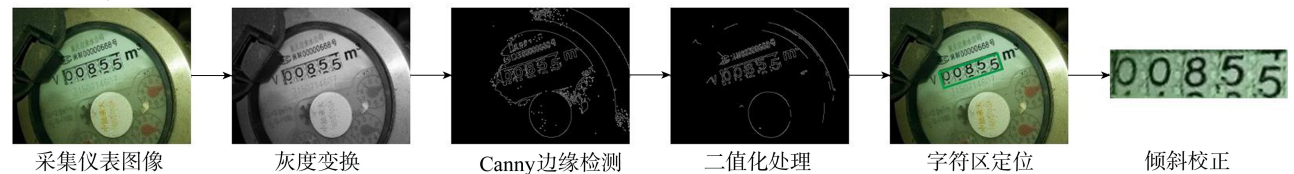


图2 字符区定位流程

斜校正。

a. 灰度变换:原始图像为RGB彩色图像,为提高边缘检测处理速度,降低数据量并提高边缘检测计算效率,将24位彩色图像转化为8位灰度图像。

b. Canny边缘检测:通过计算图像的灰度梯度值 $G$ 和方向 $\theta$ ,利用Canny算子对图像进行边缘检测。沿水平、垂直方向依次比较灰度梯度,对于梯度最大的坐标点,则保留其灰度值,否则将其灰度设置为0,不作为边缘点。灰度梯度值和方向的计算公式分别为:

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (1)$$

$$\theta = \arctan(G_y/G_x) \quad (2)$$

式中: $G_x$ 、 $G_y$ 分别为图像水平和垂直方向的灰度梯度。

c. 二值化处理:边缘检测处理后图像仍存在部分噪声,采用二值化处理减少噪声干扰,经过测试,二值化最佳阈值为直方图灰度峰值的1/2~2/3。当坐标点 $(x,y)$ 的灰度值大于最佳阈值时,相应灰度值设为255,反之,则设为0。

d. 字符区定位:利用字符边缘通常呈现直线的特征,通过计算相邻像素点的斜率并比较其一致性,实现字符区域的定位。当斜率一致时,可认为相关坐标点位于同一直线上,相应直线即为字符区域边界。

e. 倾斜校正:根据定位得到的字符区域顶点坐标,并根据边界绘制矩形边框,对边框内图像进行旋转变换,实现图像角度校正。

### 1.3 字符分割

分析水表灰度图像,相邻字符间存在显著的纵向分割线,根据该特征对每个字符进行分割。对字符区图像进行灰度变换和二值化处理。沿纵向依次统计灰度值为255的像素数,沿横坐标显示灰度值为255的像素数,相应谷值对应横坐标即为分割线坐标,从而实现字符间的分割,字符分割过程及效果如图3所示。将分割后的各字符图像存入原始字符图像数据库,作为初始图像模板备选图像。

## 2 自适应模板匹配算法

### 2.1 模板生成

从数据库选取对比度高、字符无遮挡的0~9数

直至完成仪表字符识别。

### 2.3 分析评估

影响字符匹配效果的处理流程主要有字符分割和模板匹配,为分析评估匹配效果,从测试集中选取 2 张典型水表图像,图像包含 5 位字符及 7 位字符,并与传统等距分割算法测试效果对比,结果如图 5 所示。

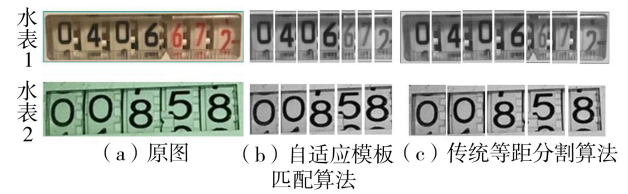


图 5 典型水表字符分割对比

传统等距分割算法根据仪表图像字符位数进行等距分割,受图像变形等影响,字符分割不完整。本文提出的自适应模板匹配算法基于相邻字符间的纵向分割线统计特征像素点数量,避免了字符图像变形及边缘噪声干扰,字符分割完整,有利于提高模板匹配的准确度。

为测试自适应模板匹配算法的准确率和运算速率,与相同硬件环境下传统模板匹配算法进行对比,结果如表 1 所示。自适应模板匹配算法的准确率大幅优于传统模板匹配算法,处理速度可达 60 帧/s,高于传统模板匹配算法。

表 1 不同识别算法评价指标对比

算法	准确率/%	速度/(帧/s)
自适应模板匹配算法	97.5	60
传统模板匹配算法	68.0	45

### 3 系统开发

取水计量实时监测系统包括现场监测子系统、云平台服务器、应用终端 3 个模块,如图 6 所示。云平台服务器作为综合数据库为各应用模块提供数据支持;现场监测子系统采用 C/S 架构与云平台服务器进行数据交互;应用终端采用 B/S 架构与云平台服务器进行数据交互。

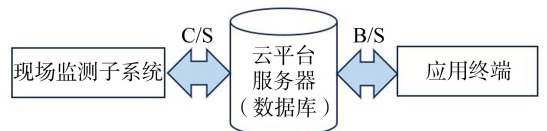


图 6 系统组成及交互关系

现场监测子系统采用 Python 语言,基于 QT(跨平台的 C++图形用户界面应用程序框架)开发。现场监测子系统的核心功能是数据采集与上传,数据实时采集过程中,可通过可视化界面进行串口参数设置,系统通过调用 Python 串口模块(pySerial)实

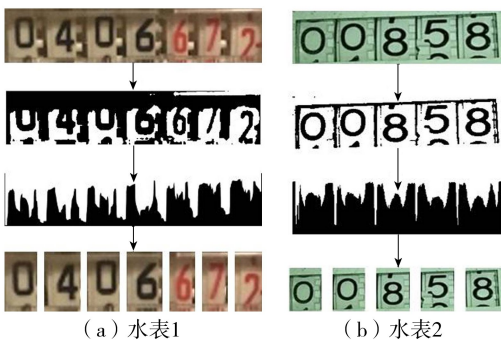


图 3 字符分割过程及效果

字图像,将目标数字单独截取并保存为图像文件,作为初始模板,如图 4(a)所示。对初始模板执行二值化处理,实现数字与背景的分,生成二值图像,如图 4(b)所示。二值化处理后,图像大小各异,需调整为统一大小尺寸。数据库字符图像的长、宽平均值分别为 28 像素和 34 像素,为减小图像调整量和变形,将初始模板图像尺寸统一调整为 28×34 像素。对于宽度较窄的字符,为防止变形,在字符右侧像素灰度值赋值为 255,形成优化模板,如图 4(c)所示。

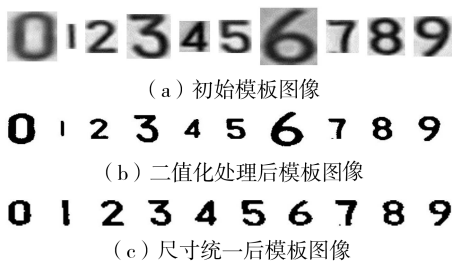


图 4 模板图像制作

### 2.2 模板匹配

依次统计分割字符图像宽度  $w$  和高度  $h$ ,生成大小为  $w \times h$  且灰度值为 255 的底板图像,在该图像中写入数字 0 并保存为模板;重复上述步骤依次生成模板图像 0~9,作为相应水计量仪表图像匹配模板。在识别仪表字符时,循环计算模板图像与相应字符图像相关度,计算公式为:

$$R(x, y) = \frac{\sum_{x', y'} [T(x', y') I(x + x', y + y')]}{\sqrt{\sum_{x', y'} T(x', y')^2 \sum_{x', y'} I(x + x', y + y')^2}} \quad (3)$$

式中:  $(x, y)$  为搜索位置坐标;  $(x', y')$  为模板内局部坐标;  $T(x', y')$  为模板像素值;  $I(x + x', y + y')$  为待匹配图像像素值;  $R(x, y)$  为模板匹配结果,即相关系数。

相关系数的范围为 0~1,其值越高表示匹配度越高,反之匹配度越低。选择相关系数最大的模板,其对应数字作为仪表字符匹配结果,重复以上步骤,

现图像数据的串口采集,并以 16 进制格式进行数据解析与显示,最终还原为图像。考虑现场可能有多个取水口,系统采用多线程开发,支持多台终端设备同时在线传输数据,避免了因多串口延迟导致系统卡顿或不同步等现象,系统主界面如图 7 所示。

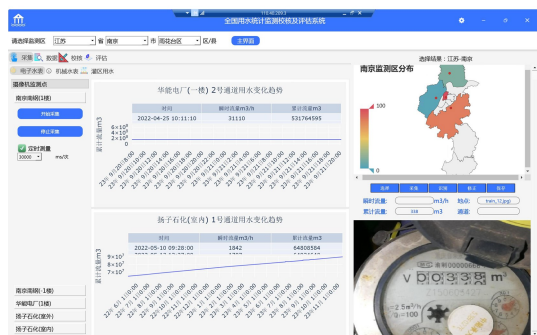


图 7 现场监测子系统界面

云平台由服务器和数据库组成,现场监测子系统将实时采集的取用水量数据传输至云平台,云平台 Web 程序获取数据,并开展分析,再通过远程应用终端提供服务。

应用终端基于 Django 框架开发,具有实时监控、用户申报、数据校核、数据统计评估和预警分析等功能。远程 Web 端通过 HTTP 协议与云平台进行通信,用户登录流程中,用户通过输入注册的用户名和密码登录系统,服务器验证用户信息并生成登录凭证存储在会话 (Session) 中,实现用户身份验证。实时信息展示取水量信息,包括实时取水过程、日取水量统计、月用水量及季度用水量统计等,如图 8 所示;用户申报模块让用户新增和管理申报记录,系统通过权限控制保证数据安全性;在数据校核阶段,系统将用户上报数据和监测数据进行核对,确保取水数据的准确性;数据统计评估模块提供取水量的实时监控、历史累计分析和数据查询,支持结果导出,为水资源管理提供可视化支持;预警分析功能根据设定阈值对取用水量进行预警,提醒取水单位合理配置水资源。水资源预警规则主要为超计划或超许可,系统根据规则进行预警处理并推送相关信息。

图 8 系统 Web 端界面



图 8 系统 Web 端界面

## 4 系统应用

选取山东某规模以上取水户作为实践试点,该取水户有 3 台计量仪表,年取水许可水量为 4500 万  $m^3$ 。图 9 为该监测点(计量设备为传统的机械水表)采用图像法监测的累计用水量变化,监测时间为 2023 年 10 月 16 日至 2023 年 12 月 5 日。从图 9 可以看出,系统监测数据的连续性较高,表明系统运行稳定。同时,对该时段内监测点的月用水量进行了统计,并与相关管理单位的人工抄表统计数据进行了比较,如表 2 所示,系统监测的月用水量和相关管理单位的统计数据一致,表明该系统能准确开展计量仪表图像的识别和用水数据的统计。

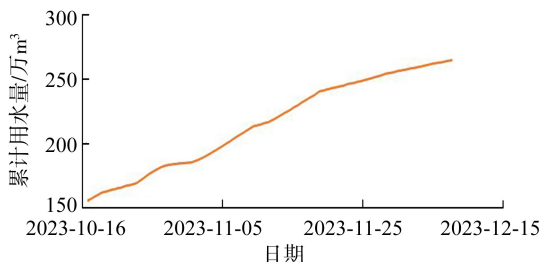


图 9 监测点累计用水量变化

表 2 月用水量统计

时间	系统监测月用水量/ $m^3$	管理部门统计月用水量/ $m^3$
2023 年 10 月	304 801	304 765
2023 年 11 月	707 055	707 100
2023 年 12 月	554 616	554 500

## 5 结语

为解决传统水计量仪表在不改造等情况下的数据实时采集难题,提出了水表字符区定位方法,并构建了水表字符自适应模板匹配算法,实现了水资源计量数据的自动提取,识别准确率达 97.5%。该方法能显著提升数据采集在线率,推进水资源监管。开发的水资源计量数据实时采集系统已经成功应用于某规模以上取水户的统计数据校核工作,对比人工抄表数据和图像法监测数据,水量数据一致,图像法监测数据时间分辨率更高,更有利于水资源管理。

## 参考文献:

- [ 1 ] 吴晓远,吴凤平. 流域国水资源短缺性组合评价模型及应用[J]. 经济与管理评论,2024,40(3):45-58. (Wu Xiaoyuan, Wu Fengping. Combined evaluation model and application of water resources shortage in basin countries [J]. Review of Economy and Management, 2024, 40(3): 45-58. (in Chinese))
- [ 2 ] 谢新民,蒋云钟,闫继军,等. 流域水资源实时监控管理系统研究[J]. 水科学进展,2003,14(3):255-259. (Xie Xinmin, Jiang Yunzhong, Yan Jijun, et al. Study on real-

- time monitoring and management system for water resources in river basin[J]. *Advances in Water Science*, 2003, 14(3): 255-259. (in Chinese))
- [ 3 ] 金菊良, 常哲, 周亮广, 等. 流域水资源安全风险评价问题的系统分析[J]. *水利水电科技进展*, 2025, 45(5): 112-118. ( Jin Juliang, Chang Zhe, Zhou Liangguang, et al. System analysis of water resources security risk assessment in river basins[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2025, 45(5): 112-118. (in Chinese))
- [ 4 ] 李云胜. 泰安市水资源综合管理信息系统设计与实现[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- [ 5 ] Fujita I, Muste M, Kruger A. Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 1998, 36(3): 397-414.
- [ 6 ] Astsatryan H, Hayrapetyan A, Narsisian W, et al. An interoperable cloud-based scientific GATEWAY for NDVI time series analysis[J]. *Computer Standards & Interfaces*, 2015, 41: 79-84.
- [ 7 ] 唐洪武, 陈诚, 陈红, 等. 实体模型表面流场、河势测量中图像技术应用研究进展[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(5): 567-572. ( Tang Hongwu, Chen Cheng, Chen Hong, et al. Review of image processing technique applied to measurement of surface flow field and river regime of physical model [ J ]. *Journal of Hohai University ( Natural Sciences )*, 2007, 35(5): 567-572. (in Chinese))
- [ 8 ] 陈红, 周国梁, 闫静, 等. 基于回归分析的表面流场粒子匹配算法[J]. *水利水电科技进展*, 2020, 40(1): 32-36. ( Chen Hong, Zhou Guoliang, Yan Jing, et al. Study on particle matching algorithm for surface flow field based on regression analysis [ J ]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2020, 40(1): 32-36. (in Chinese))
- [ 9 ] 陈妃奋. 基于深度学习的字轮式水表读数识别研究与应用[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2021.
- [ 10 ] 陈文萍, 娄嘉骏, 江少锋, 等. 基于 YOLOv5 的水表字轮读数自动识别方法[J]. *仪表技术*, 2023(3): 43-46. ( Chen Wenping, Lou Jiajun, Jiang Shaofeng, et al. Research on automatic recognition method of water meter wheel indications based on YOLOv5 [ J ]. *Instrumentation Technology*, 2023(3): 43-46. (in Chinese))
- [ 11 ] 高菊, 叶桦. 一种有效的水表数字图像二次识别算法[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2013, 43(增刊1): 153-157. ( Gao Ju, Ye Hua. An effective two-times recognition algorithm of meter digital image [ J ]. *Journal of Southeast University ( Natural Science Edition )*, 2013, 43(S1): 153-157. (in Chinese))
- [ 12 ] 任荣梓, 高航. 基于反馈合并的中英文混排版面 OCR 技术研究[J]. *计算机技术与发展*, 2017, 27(3): 39-43. ( Ren Rongzi, Gao Hang. Investigation on layout analysis technology of Chinese and English mixed OCR based on feedback merging [ J ]. *Computer Technology and Development*, 2017, 27(3): 39-43. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-03-06 编辑: 俞云利)

(上接第 70 页)

- [ 29 ] 高玉琴, 王慧, 刘钺, 等. 基于空间信息格网的南京市洪水风险评估[J]. *水利水电科技进展*, 2024, 44(6): 6-12. ( Gao Yuqin, Wang Hui, Liu Yue, et al. Flood disaster risk assessment in Nanjing City based on spatial information grids [ J ]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2024, 44(6): 6-12. (in Chinese))
- [ 30 ] 高玉琴, 徐诺, 汪键, 等. 基于复杂网络的洪涝灾害链风险评估[J]. *水资源保护*, 2025, 41(2): 115-122. ( Gao Yuqin, Xu Nuo, Wang Jian, et al. Risk assessment of flood disaster chain based on complex network [ J ]. *Water Resources Protection*, 2025, 41(2): 115-122. (in Chinese))
- [ 31 ] 郑德凤, 高敏, 李钰, 等. 基于 GIS 的大连市暴雨洪涝灾害综合风险评估[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(3): 1-8. ( Zheng Defeng, Gao Min, Li Yu, et al. Comprehensive risk assessment of rainstorm-flood disaster in Dalian City based on GIS [ J ]. *Journal of Hohai University ( Natural Sciences )*, 2022, 50(3): 1-8. (in Chinese))
- [ 32 ] 谢遵党. 水利水电工程数字设计工厂建设构想与实践[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(2): 60-72. ( Xie Zundang. Concept and practice of digitalized design factory for water conservancy and hydropower engineering [ J ]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(2): 60-72. (in Chinese))
- [ 33 ] Li Daqian. Research on data sharing of water conservancy informatization based on data mining and cloud computing [ C ] // *Journal of Physics: Conference Series*. Chongqing: IOP Publishing, 2021: 012130.
- [ 34 ] 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))
- [ 35 ] 杨芳, 李旭东, 宋利祥, 等. 城市暴雨洪涝灾害链风险评估方法[J]. *水资源保护*, 2025, 41(5): 52-60. ( Yang Fang, Li Xudong, Song Lixiang, et al. Risk assessment methodology for rainstorm-induced urban flood disaster chain [ J ]. *Water Resources Protection*, 2025, 41(5): 52-60. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-03-13 编辑: 雷燕)

# 蓄水条件下脉动注浆对黏土心墙坝应力与变形的影响

常留红<sup>1,2</sup>,周佳瑶<sup>1,2</sup>,廖奕<sup>1,2</sup>,胡鹏程<sup>3</sup>,张国安<sup>1,2</sup>,曾浩荣<sup>1,2</sup>,  
Sadik Mohammad Nafis<sup>1,2</sup>

(1. 长沙理工大学水利与海洋工程学院; 2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室;  
3. 中国电力建设集团有限公司中国水利水电第八工程局有限公司科研设计院)

**摘要:**依托车田江水库黏土心墙坝除险加固工程,采用流固耦合基本理论,建立了黏土心墙坝脉动注浆数值模型,模拟分析了蓄水条件下脉动注浆压力、注浆时间和注浆频率等脉动注浆参数对黏土心墙坝应力应变的影响,并与现场注浆试验结果进行了对比。结果表明:坝体应力和位移随脉动注浆压力、注浆时间、注浆持续段时间的增加而增大,随注浆间歇段时间的延长而减小;当脉动注浆压力为0.5~1.5 MPa时,坝体大部分区域处于受压状态且受力较为均匀;受上游水压力的影响,上游坝体水平位移小于下游坝体水平位移;当脉动注浆压力为0.5~1.5 MPa,注浆时间为1200~1800 s时,注浆持续段时间在7~9 s内,注浆间歇段时间在3~5 s内,有利于提高蓄水条件下脉动注浆对坝体的变形控制,从而有效提高脉动注浆过程中坝体的稳定性。

**关键词:**黏土心墙坝;脉动注浆;蓄水条件;应力;变形;车田江水库

**Influence of pulsating grouting on stress and deformation of clay core wall dam under impounding conditions//** Chang Liuhong<sup>1,2</sup>, Zhou Jiayao<sup>1,2</sup>, Liao Yi<sup>1,2</sup>, Hu Pengcheng<sup>3</sup>, Zhang Guoan<sup>1,2</sup>, Zeng Haorong<sup>1,2</sup>, Sadik Mohammad Nafis<sup>1,2</sup> (1. School of Hydraulic and Ocean Engineering, Changsha University of Science & Technology; 2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province; 3. Research and Design Institute of Sinohydro Engineering Bureau 8 Co., Ltd., Power Construction Corporation of China)

**Abstract:** Based on the risk removal and reinforcement project of the clay core wall dam of the Chetianjiang Reservoir, a numerical model of pulsating grouting for clay core wall dam was established using the basic theory of fluid-solid coupling. The influence of pulsating grouting parameters such as pulsating grouting pressure, grouting time and grouting frequency on the stress and strain of clay core wall dam under the impounding condition was simulated and analyzed, and compared with the results of field grouting test. The results show that the stress and displacement of the dam increase with the increase of pulsating grouting pressure, grouting time and grouting duration, and decrease with the extension of grouting interval. When the pulsating grouting pressure ranges from 0.5 to 1.5 MPa, most of the dam body is under pressure and the force is relatively uniform. Affected by the upstream water pressure, the horizontal displacement of the upstream dam is smaller than that of the downstream dam. When the pulsating grouting pressure ranges from 0.5 to 1.5 MPa, the grouting time ranges from 1200 to 1800 s, the grouting duration ranges from 7 to 9 s, and the grouting interval ranges from 3 to 5 s, it is beneficial to improve the deformation control of the dam body by the pulsating grouting under the impounding condition, so as to effectively improve the stability of the dam body during the pulsating grouting process.

**Key words:** clay core wall dam; pulsating grouting; impounding condition; stress; deformation; the Chetianjiang Reservoir

我国在役大中型水库中,黏土心墙坝是较为常见的坝型。由于大多建于20世纪60—70年代,受限于当时的经济技术条件,此类坝体普遍存在填筑密实度差、防渗性能差等问题,易引发心墙变形、开裂等<sup>[1-2]</sup>。注浆是提高除险加固工程中坝体的抗渗加固能力和耐久性、抑制坝体产生变形的的主要工程措施<sup>[3]</sup>。目前,黏土心墙坝除险加固施工大多在水

库放空条件下进行,严重影响库区生产、生活和生态用水,制约区域社会经济可持续发展。因此,如何在蓄水条件下进行黏土心墙坝除险加固施工,是工程界关注的焦点问题。

脉动注浆防渗处理技术已成功应用于云南八尺水库坝基防渗加固工程<sup>[4]</sup>、托口水电站防渗帷幕工程<sup>[5]</sup>,表现出较好的密实防渗效果。目前国内外对

除险加固工程中的脉动注浆工艺相关研究成果主要集中于采用不同注浆工艺,结合原型试验注浆方式,分析浆液的扩散规律和注浆工艺对土体应力场及位移场的影响。例如:张聪等<sup>[6]</sup>基于宾汉体流变方程、渗流方程和颗粒沉积理论,推导了脉动压力下宾汉流体的渗透扩散理论计算公式,分析了脉动注浆参数对浆液扩散距离的影响,并通过室内注浆模拟试验对其进行了验证;郑刚等<sup>[7-8]</sup>基于注浆原位试验,研究了双排注浆过程中注浆孔距离、注浆速率等注浆参数对土体水平位移的影响;程雪松等<sup>[9]</sup>基于应变法并结合现场试验模拟了土体性质和注浆参数对土体水平位移的影响;张聪等<sup>[10]</sup>通过原型试验探究了脉动压力下黏土固化浆液的扩散规律,建立COMSOL模型模拟了堤坝脉动注浆过程中脉动控制注浆浆液扩散机制;晏莉等<sup>[11]</sup>采用FLAC3D软件,对太原某地铁站试验段富水粉砂地层深基坑加固工程进行了数值模拟,分析了单液注浆联合双液注浆的止水效果及其对基坑变形的影响;卢晓鹏<sup>[12]</sup>以白鹤水库除险加固工程为例,研究了高压喷射注浆技术的关键参数及防渗效果;张贵金等<sup>[4]</sup>针对常规注浆在八尺水库趾板下基岩防渗注浆施工的局限性,通过现场试验优化注浆施工,解决了八尺水库坝基渗漏问题;窦金熙等<sup>[13]</sup>采用COMSOL模型,对全风化花岗岩砂质土介质的脉动注浆防渗控制参数及其机理进行了研究,并通过邦干水库注浆工程试验,验证得出脉动注浆控制参数。可见,现有研究主要针对新建大坝或放空条件下的大坝脉动注浆技术开展,蓄水条件下的大坝除险加固脉动注浆技术尚有待进一步研究。

## 1 研究区概况

车田江水库建成于1978年,是一座以灌溉为主,兼顾发电、防洪、养殖的大(2)型水利工程,主要建筑物为2级。大坝为弧形堆石黏土心墙坝,坝体各区域分别为心墙区、坝壳堆石区、过渡区、心墙段基础以及坝壳段基础(图1)。

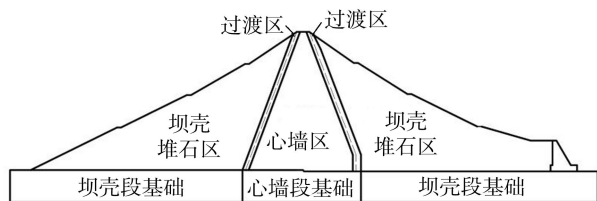


图1 黏土心墙坝剖面分区

心墙区以黄褐色黏土为主,夹含粉砾和细砾,土体多呈可塑状,具中等压缩性,土体孔隙较大,心墙干密度平均值小于 $1.46 \text{ g/cm}^3$ 。心墙土体现场渗透

系数为 $2.0 \times 10^{-5} \sim 9.7 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ ,平均值为 $3.1 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ ,不满足SL 274—2020《碾压式土石坝设计规范》中碾压后小于 $1.0 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 的要求,心墙区与坝基接触带存在接触渗流隐患。经现场大坝安全监测和钻孔注水试验,心墙区土体渗透系数不满足现行规范要求,存在渗透稳定问题,影响大坝安全稳定,水位高处心墙较薄,且库水位不能放空,而采用高喷注浆、劈裂注浆等常规注浆方式可能会造成心墙劈裂破坏等问题。因此,经多方案技术经济比较,采用可控复合膏浆高压脉动注浆对坝体进行除险加固。

## 2 研究方法

### 2.1 注浆过程流固耦合基本理论

黏土心墙不具有堆石体或砂卵石的大孔隙特性,符合多孔介质材料特征,浆液扩散方式为渗流,驱动力为注浆压力在土体中产生的压力差。现作出如下假设:①浆液在坝体中的流动符合改进的达西定律,且不考虑在流动过程中土体对浆液的渗滤作用;②黏土心墙土体本构模型为邓肯-张模型。

黏土心墙坝脉动注浆过程是浆液与土体相互耦合的过程,采用渗流控制方程与应力场控制方程进行描述,具体方程见文献[14]。

在注浆过程中,浆液密度由于注浆压力作用发生动态变化,考虑浆液黏度随时间的变化,浆液流动使多孔介质内有效应力发生变化,土体骨架产生形变,土体渗透率、孔隙率等为动态变量。浆液密度、浆液黏度、土体孔隙率、土体渗透率、渗透系数的具体方程见文献[14]。

### 2.2 黏土心墙坝脉动注浆数值模型

#### 2.2.1 计算模型及网格划分

针对车田江水库黏土心墙坝脉动注浆除险加固工程,建立黏土心墙坝几何模型,选取注浆试验断面,使用自由三角形网格模块对几何模型进行网格划分,对心墙区网格进行细化处理。最大单元尺寸为 $1.00 \text{ m}$ ,最小单元尺寸为 $0.01 \text{ m}$ ,最大单元增长率为 $1.12$ ,曲率因子为 $0.25$ 。

#### 2.2.2 计算参数设定

坝体邓肯-张模型参数指标和坝体各分区土体物理力学性能指标见表1。

脉动注浆压力、注浆时间及注浆频率是影响脉动注浆效果的关键参数。采用式(1)分段函数绘制出脉动注浆函数,进行周期性外推。采用设计脉动注浆压力范围为 $0.5 \sim 3.0 \text{ MPa}$ ,注浆总时长在 $300 \sim 1800 \text{ s}$ 内,脉动注浆持续段时间为 $3 \sim 12 \text{ s}$ ,脉动注浆间歇段时间为 $3 \sim 9 \text{ s}$ 。

表1 坝体邓肯-张模型及坝体区域土体物理力学性能参数

区域	$R_f$	$K$	$n$	$G$	$F$	$D$	$K_{ur}$	$\varphi/(^\circ)$	$\Delta\varphi/(^\circ)$	$c/\text{MPa}$	$n_0$	$k/(\text{m/s})$	$E/\text{MPa}$	$\nu$	$\rho/(\text{g/cm}^3)$	$\alpha$
心墙区	0.75	550	0.41	0.38	0.01	7.5	900	35	0	5	0.473	$3.5 \times 10^{-6}$	6.3	0.31	1.50	1
坝壳堆石区	0.65	1000	0.52	0.32	0.06	5.0	1800	53	10	0		$5.0 \times 10^{-4}$			2.30	1
过渡区	0.65	800	0.52	0.33	0.09	5.0	1500	50	6	0		$1.0 \times 10^{-4}$			2.15	1
心墙段基础	0.50	4500	0.76	0	0	0	9800	0	0	0	0.473	$3.5 \times 10^{-6}$	6.0	0.35	2.35	1
坝壳段基础	0	8000	0	0.28	0	0	2000	43	0	25	0.473	$3.5 \times 10^{-6}$	8.0	0.20	2.70	1

注: $R_f$ 为破坏比; $K$ 为模量系数; $n$ 为模量指数; $G, F, D$ 均为体变参数; $K_{ur}$ 为卸载再加载模量系数; $\varphi$ 为内摩擦角; $\Delta\varphi$ 为内摩擦角增量; $c$ 为黏聚力; $n_0$ 为初始孔隙率; $k$ 为渗透系数; $E$ 为弹性模量; $\nu$ 为泊松比; $\rho$ 为密度; $\alpha$ 为比奥系数。

$$P(t) = \begin{cases} P'/t_1 & 0 \leq t \leq t_1 \\ 0 & t_1 < t \leq t_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P'$ 为设计注浆压力; $t_1$ 为脉动注浆持续段时间; $t_2$ 为脉动注浆间隔段时间。

按照现场施工设计,可控复合膏浆液配合比为黏土 100 kg、水泥 100 kg、外加剂 15 kg、早凝剂 5 kg、水 160 L、改性剂 5 kg。

### 2.2.3 边界条件设置

a. 压力边界条件。黏土心墙坝渗流计算结果显示,浸润线在心墙区骤降。在大坝上游侧水下部分添加压力水头,在注浆孔处设置脉动注浆压力。

b. 位移边界条件。在大坝基础底部施加固定约束,基础两侧施加辊支撑;坝体剖面设置重力,确保数值模型模拟接近真实情况。将浆液渗流运动产生的动水力作为荷载输入应力场,实现模型中应力场控制方程的嵌入。

### 2.2.4 模型验证

注浆主要影响注浆孔附近心墙区域,采用自由三角形网格进行网格细化,将最大单元尺寸从 1 m 调整至 0.5 m,进一步增加注浆孔附近心墙区域网格数量,建立网格加密验证模型。以正常蓄水位条件下脉动注浆压力为 1.5 MPa、注浆总时长为 1800 s、脉动注浆频率为 4 次/min 的脉动注浆黏土心墙坝模型为研究对象,对比分析原型模型和网格加密模型的浆液分布和浆液扩散半径变化过程,进行网格无关性验证,结果见图 2。其中,相对固相质量分数是指不同位置处浆液中固相质量分数与注浆距离 0 m 处浆液中固相质量分数的比值。

由图 2 可知,相同计算参数下原型模型和网格加密模型的浆液分布和浆液扩散半径计算误差约 3%,在误差控制范围内,可以保证计算结果的准确性。

## 3 结果与分析

### 3.1 脉动注浆参数对坝体应力场的影响

#### 3.1.1 脉动注浆压力对坝体应力场的影响

研究工况为:上游蓄水位为正常蓄水位 491.2 m,脉动注浆时间为 1800 s,脉动注浆频率为 4 次/min(脉动注浆持续段时间为 12 s,注浆间歇段

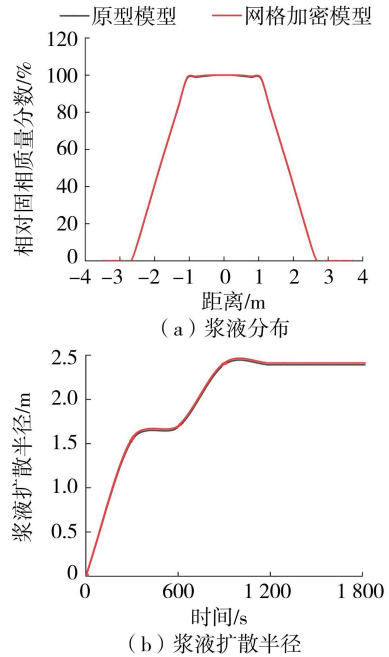


图2 原型模型和网格加密模型浆液分布和扩散半径

时间为 3 s),模拟蓄水条件下黏土心墙坝脉动注浆过程,分析脉动注浆压力为 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 MPa 时,坝体应力随脉动注浆压力变化的分布规律。结果见表 2。

表2 不同脉动注浆压力下坝体主应力分布情况

脉动注浆 压力/MPa	第一主应力/MPa		第三主应力/MPa	
	最大压应力	最大拉应力	最大压应力	最大拉应力
0.5	0.883	-12.10	0.493	-2.30
1.0	0.961	-2.69	0.380	-6.24
1.5	1.420	-3.32	0.547	-6.93
2.0	1.860	-4.05	0.701	-8.09
2.5	2.280	-4.79	0.841	-9.99
3.0	2.610	-5.45	0.875	-12.10

由表 2 可见,上游蓄水位、脉动注浆时间及脉动注浆频率不变时,坝体第一、第三主应力值随脉动注浆压力的增大而增大。脉动注浆压力由 0.5 MPa 增大至 3.0 MPa,坝体第一、第三主应力值的最大压应力分别增加了 195.0%、77.3%,此时坝体在注浆孔底部区域出现第一主应力最大拉应力达到 -5.45 MPa、第三主应力最大拉应力达到 -12.10 MPa,影响注浆过程中坝体的安全稳定性。

不同脉动注浆压力(0.5、1.5 MPa)下坝体的主

应力分布如图3所示。蓄水条件下进行脉动注浆除险加固施工时,不同脉动注浆压力下坝体主应力集中于注浆孔口区域,主应力分布范围和强度随脉动注浆压力的增加而增加,脉动注浆压力值在0.5~1.5 MPa时,坝体大部分区域处于受压状态且受力均匀,有利于保证脉动注浆施工过程中坝体的安全稳定性。

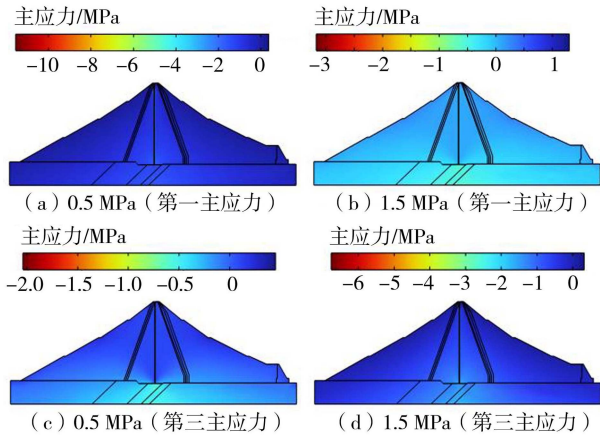


图3 不同脉动注浆压力下坝体主应力分布云图

### 3.1.2 脉动注浆时间对坝体应力场的影响

研究工况为:上游蓄水位为正常蓄水位491.2 m,脉动注浆压力为1.5 MPa,脉动频率为4次/min(脉动注浆持续段时间为12 s,注浆间歇段时间为3 s),模拟蓄水条件下黏土心墙坝脉动注浆过程,分析脉动注浆时间为300、600、900、1200、1500、1800 s时,坝体主应力随脉动注浆时间变化的分布规律。结果见表3。

表3 不同脉动注浆时间下坝体主应力分布情况

脉动注浆时间/s	第一主应力/MPa		第三主应力/MPa	
	最大压应力	最大拉应力	最大压应力	最大拉应力
300	1.770	-3.50	1.100	-7.46
600	1.680	-3.40	0.932	-7.32
900	1.600	-3.37	0.767	-7.18
1200	1.540	-3.35	0.626	-7.08
1500	1.470	-3.32	0.578	-6.99
1800	1.410	-3.32	0.547	-0.69

由表3可见,上游蓄水位、脉动注浆压力及脉动注浆频率不变时,坝体主应力值随脉动注浆时间增加而减小,脉动注浆压力为1.5 MPa时,脉动注浆时间从300 s增加至1800 s时,坝体第一、第三主应力值的最大压应力分别减小了20.3%、50.3%;此时坝体大部分区域呈受压状态,注浆过程中不易产生裂缝,有利于黏土心墙坝防渗加固。

不同脉动注浆时间(1200、1800 s)下坝体的主应力分布见图4。坝体主应力值随着脉动注浆时间的增加而减小,脉动注浆时间为1800 s时第一主应力值最小为1.42 MPa,第三主应力值最小为

0.55 MPa,注浆孔底部出现的应力也为最小值,脉动注浆时间对坝体的第三主应力分布影响不大。坝体大部分区域呈现受压状态,注浆过程中不易产生裂缝,有利于黏土心墙坝的防渗加固。

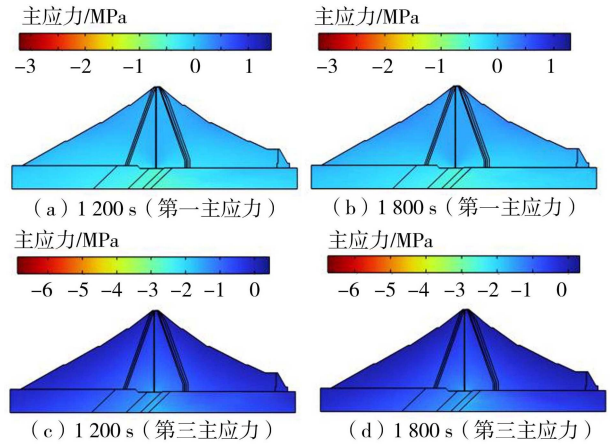


图4 不同脉动注浆时间下坝体主应力分布云图

### 3.1.3 脉动注浆频率对坝体应力场的影响

研究工况为:上游蓄水位为正常蓄水位491.2 m,脉动注浆压力为1.5 MPa,脉动注浆时间为1800 s,模拟蓄水条件下黏土心墙坝脉动注浆过程,分析脉动注浆间歇段时间 $t_2$ 为3 s,注浆持续段时间 $t_1$ 为3、5、7、9 s时及脉动注浆持续段时间 $t_1$ 为12 s,注浆间歇段时间 $t_2$ 为3、5、7、9 s时的应力分布变化。

表4为不同脉动注浆频率下坝体主应力分布情况。由表4可见,上游蓄水位、脉动注浆压力及脉动注浆时间不变时,坝体主应力随着注浆持续段时间的增加而增大,注浆持续段时间从3 s增加至9 s时第一、第三主应力值的最大压应力分别增大了4.0%、49.7%,表明较短的注浆间歇段时间有利于提高坝体的承载能力。

表4 不同脉动注浆频率下坝体主应力分布情况

注浆持续段时间/s	注浆间歇段时间/s	第一主应力/MPa		第三主应力/MPa	
		最大压应力	最大拉应力	最大压应力	最大拉应力
3	3	0.721	-2.49	0.195	-5.22
5	3	0.725	-2.49	0.289	-6.08
7	3	0.725	-2.49	0.292	-6.09
9	3	0.750	-2.61	0.292	-6.09
12	3	1.420	-3.32	0.547	-6.93

图5为不同脉动注浆频率下坝体主应力分布云图。由图5可知,注浆间歇段时间不变情况下,第一、第三主应力分布变化类似。坝体第一主应力随脉动注浆持续段时间的增加而增加,注浆持续段时间在7~9 s时,第一主应力增长速率缓慢;持续段时间不变时,第三主应力随注浆间歇段时间的增加而减小;间歇段时间增加会降低主应力值,表明脉动注

浆持续段时间在 7~9 s 内,且注浆间歇段时间在 3~5 s 内有利于提高坝体应力水平,增强坝体承载能力,保持坝体应力的均匀分布。

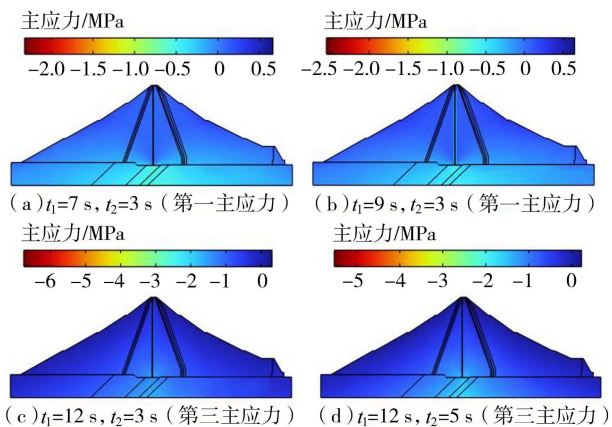


图 5 不同脉动注浆频率下坝体主应力分布云图

### 3.2 脉动注浆参数对坝体位移场的影响

基于蓄水条件下黏土心墙坝脉动注浆数值模型,模拟水库蓄水条件下黏土心墙坝脉动注浆过程,分析不同脉动注浆压力、注浆时间及注浆频率对黏土心墙坝的位移场的影响。研究工况与 3.1 节对应。

#### 3.2.1 脉动注浆压力对坝体位移场的影响

表 5 为不同脉动注浆压力下坝体位移分布情况。当上游蓄水位、脉动注浆时间及脉动注浆频率不变时,坝体水平移和垂直位移随脉动注浆压力增大而增大。上游侧坝体中,由于水位压力的作用抑制了注浆压力的影响,导致坝体上游侧最大水平位移均比下游侧小 0.1 m 左右。

表 5 不同脉动注浆压力下坝体位移分布

脉动注浆压力/MPa	最大水平位移/m		最大垂直位移/m
	上游	下游	
0.5	0.220	0.235	0.333
1.0	0.229	0.242	0.341
1.5	0.239	0.251	0.349
2.0	0.251	0.261	0.359
2.5	0.263	0.272	0.369
3.0	0.278	0.285	0.381

图 6 为不同脉动注浆压力下坝体位移分布云图。由图 6 可知,在上游蓄水位、脉动注浆时间、脉动注浆频率不变的情况下,坝体水平位移随脉动注浆压力的增大而增大。上游侧坝体受水压力作用可减小脉动注浆压力对坝体产生的水平位移,注浆孔上游侧坝体最大水平位移小于下游侧坝体最大水平位移。坝体垂直位移随脉动注浆压力的增大而增大,在实际施工中控制脉动注浆压力可有效避免注浆过程中产生坝体变形等问题。

#### 3.2.2 脉动注浆时间对坝体位移场的影响

表 6 为不同脉动注浆时间下坝体位移分布情

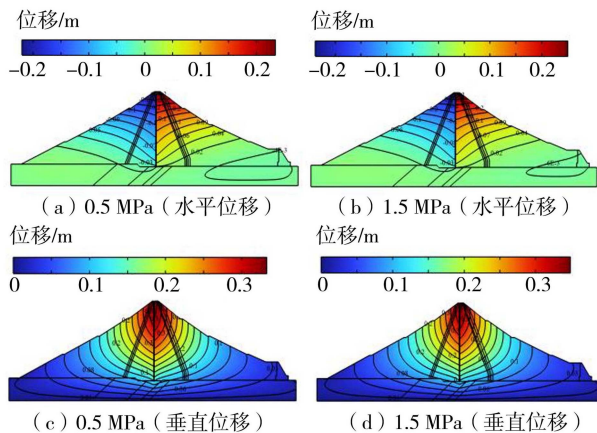


图 6 不同脉动注浆压力下坝体位移分布云图

况。当上游蓄水位、脉动注浆压力及脉动注浆频率不变时,随脉动注浆时间增加,坝体水平位移呈增加趋势。当脉动注浆压力为 1.5 MPa、脉动注浆时间从 300 s 增加至 1 800 s 时,坝体水平上游、下游最大位移分别增加了 6.1%、6.3%,垂直位移增加了 13.7%。

表 6 不同脉动注浆时间下坝体位移分布

脉动注浆时间/s	最大水平位移/cm		最大垂直位移/cm
	上游	下游	
300	0.224	0.236	0.335
600	0.225	0.238	0.345
900	0.228	0.240	0.354
1200	0.231	0.244	0.363
1500	0.235	0.247	0.372
1800	0.238	0.251	0.381

图 7 为不同脉动注浆时间下坝体位移分布云图。由图 7 可知,在上游蓄水位、脉动注浆压力、脉动注浆频率不变的情况下,坝体脉动注浆过程中坝体水平位移逐渐增大,与不同脉动注浆压力下坝体水平位移的分布规律相似;受坝体的竖向荷载作用,坝体水平位移随着注浆深度的增加而减小。而坝体垂直位移呈辐射状分布,垂直位移随着注浆深度的增加而逐渐减小,随着脉动注浆时间的推进,坝体垂

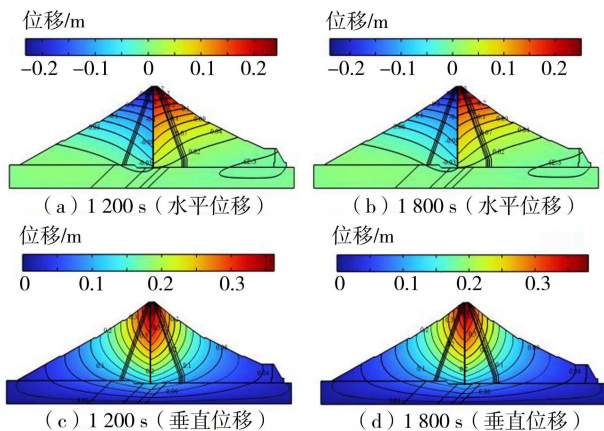


图 7 不同脉动注浆时间下坝体位移分布云图

直位移最大值缓慢增大,脉动注浆时间的增加对坝体隆起作用的影响较小。在同一水平线上,心墙区垂直位移值大于坝壳堆石区的垂直位移值,心墙区材料变形模量比坝壳堆石区材料变形模量低,出现了心墙区与坝壳堆石区变形不协调的情况。

### 3.2.3 脉动注浆频率对坝体位移场的影响

表 7 为不同脉动注浆频率下坝体位移分布情况。在上游蓄水位、脉动注浆压力、脉动注浆时间不变的情况下,坝体水平、垂直位移随脉动注浆持续段时间的增加而增加,随间歇段时间的增加而下降。较长脉动注浆持续段时间和较短间歇段时间的频率可有效避免坝体实际注浆过程产生坝体变形等问题。

表 7 不同脉动注浆频率下坝体位移分布

注浆持续段 时间/s	注浆间歇段 时间/s	最大水平位移/m		最大垂直 位移/m
		上游	下游	
3	3	23.33	23.86	35.71
5	3	22.58	23.98	35.83
7	3	25.03	26.05	35.86
9	3	24.98	26.01	35.93
12	3	28.85	29.32	46.17
12	5	24.86	25.91	35.73

图 8 为不同脉动注浆频率下坝体位移分布云图。由图 8 可知,在上游蓄水位、脉动注浆压力、脉动注浆时间不变的情况下,当脉动注浆间歇段时间保持不变时,随着脉动注浆持续段时间的增长,孔隙水压力逐渐增大,进而减缓了坝体水平位移和垂直位移的增加速度;当脉动注浆持续段时间保持不变时,坝体位移随着注浆间歇段时间的增加而减小。注浆间歇段时间的增加导致浆液在土体孔隙中凝絮停滞时间延长,浆液渗透扩散产生的孔隙压力减小使水平位移值减小;延长脉动注浆持续段时间可有效控制坝体垂直位移在较短时间内产生突变,有利于提高坝体在脉动注浆过程中的稳定性。黏土心墙坝脉动注浆施工过程中注浆持续段时间控制在 7~9 s,脉动间歇段时间控制在 3~5 s,有利于提高防渗

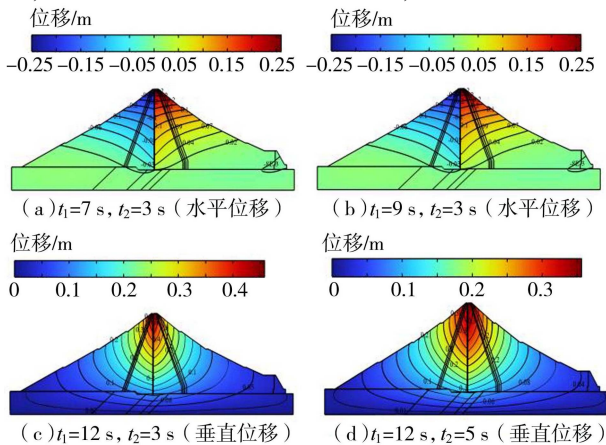


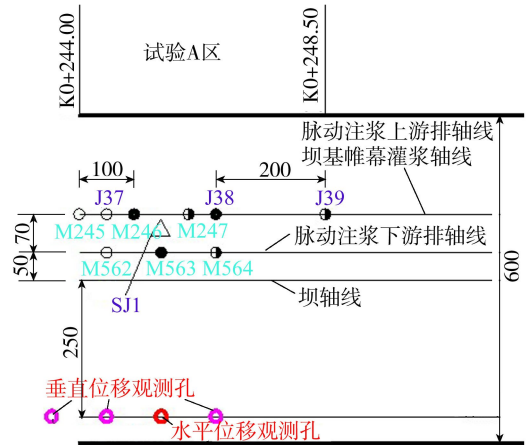
图 8 不同脉动注浆频率下坝体位移分布云图

加固效果。

## 3.3 现场注浆试验

### 3.3.1 可控复合膏浆高压脉动注浆施工

复合膏浆通常由水泥、黏土、外加剂(减阻剂、早强剂和速凝剂)及水以一定的比例配合组成,具有良好的流变性能。在坝体与坝基之间的岩土结合部位 1 m 范围内采用可控复合膏浆开展高压脉动注浆施工试验。选择右岸较高的坝段为试验区,验证高压脉动注浆工艺的可行性,将试验区与永久性施工相结合,布置在工程建设部位, A 区 K0+244.00~K0+248.50 为坝体厚度最大区域,且地质情况具有典型代表性,脉动注浆试验区位置如图 9 所示。



图例 ○ I 序孔 ● II 序孔 ● III 序孔 △ 检查孔  
M550 脉动注浆孔编号 J37 帷幕注浆孔编号

图 9 试验区 A 区钻孔及位移监测平面布置(单位:dm)

试验区 A 区布置脉动注浆孔 6 个,检查孔 1 个,位移观测孔 4 个;注浆试验孔分两排布置,每排钻孔按三个次序进行施工,排距 0.7 m,孔距 1.5 m,对 I 序孔、II 序孔、III 序孔进行施工,试验区注浆完成 14 d 后对检查孔进行施工。试验区钻孔注浆参数见表 8。

施工工艺流程为:钻孔、注浆准备→钻进成孔→注浆管安装→注浆段灌入封闭浆体→封闭浆体待凝→高压脉动注浆→自下而上小间隔提升灌注→本注浆段注浆结束→下一段注浆至顶部以下 5 m→自下而上小间隔提升灌注稳定浆液→结束封口。

实施钻孔内浆体阻塞、自下而上、分小段纯压式注浆,灌注可控复合膏浆,每个灌段长 0.5 m,当该灌段满足注浆结束标准时,实施下一灌段注浆,脉动注浆压力与注入量控制标准见表 9 和表 10,孔深最大为 80 m,提升间隔为 0.5 m。

试验区施工完毕 14 d 后,按规范要求进行注水试验,结合检查孔取芯、注浆资料分析等进行综合评价。验收标准要求注浆完成后坝体渗透系数小于  $1.0 \times 10^{-5}$  cm/s。试验区共完成压水试验 2 段,注水

表 8 试验区钻孔注浆参数

孔号	孔序	里程桩号	钻孔顶高程/m	注浆顶高程/m	钻孔底高程/m	钻孔总深度/m	注浆总深度/m
M245	I	K0+244.00	496.08	495.82	424.78	71.30	71.04
M246	Ⅲ	K0+245.00	496.08	495.82	424.84	71.24	70.98
M247	Ⅱ	K0+246.00	496.08	495.82	424.91	71.17	70.91
M562	I	K0+244.50	496.09	495.82	424.89	71.20	70.93
M563	Ⅲ	K0+245.50	496.09	495.82	424.96	71.13	70.86
M564	Ⅱ	K0+246.50	496.09	495.82	425.04	71.05	70.78

表 9 脉动注浆压力与注入量控制标准

孔序	脉动注浆压力/MPa		注入量/L	
	最小	最大	最小	最大
I	1.5	2.0	350	400
Ⅱ	2.0	2.5	250	300
Ⅲ	2.5	3.0	150	200

表 10 试验区注浆孔脉动注浆压力

孔号	孔序	各孔不同注浆段压力值/MPa			
		最大	最小	平均	对应隆起部位
M245	I	1.10	0.30	0.90	1.00
M246	Ⅲ	1.10	0.20	0.81	0.60
M247	Ⅱ	1.10	0.40	0.89	0.90
M562	I	1.10	0.10	0.95	1.10
M563	Ⅲ	1.10	0.30	0.88	0.70
M564	Ⅱ	1.10	0.20	0.88	1.00

试验 12 段,检查孔各孔段平均渗透系数为  $5.22 \times 10^{-6}$  cm/s,满足心墙加固设计防渗要求。

### 3.3.2 大坝变形施工监测及位移观测

为保证在蓄水水位下对坝体进行注浆时的施工安全和注浆质量,监测注浆时和注浆前后坝体内心墙状态及注浆过程中产生的水平和垂直裂缝及变形。脉动注浆前在试验区上游布设水平位移监测仪器,在 10、20、40 m 孔深位置处布设垂直位移监测仪器。

垂直位移测点布置在测孔管底部,置于坝体孔深 10、20、40 m 处,垂直位移监测孔施工完成后,采用自动采集设备进行测斜监测,以第一次抬动数据为基准,在注浆时和注浆后分别进行测量,与第一次的测量数据对比,计算注浆时和注浆后心墙垂直方向的变形。垂直位移观测装置安装在右侧坝段,图 10 为坝体内部垂直位移累积变形过程,其中 HG01、HG02、HG03 分别代表坝体孔深 10、20、40 m 位置的垂直位移计监测数据。由图 10 可知,坝体垂直位移随坝体孔深的增大呈现先减小后增大的趋势。

水平位移监测孔采用 YGL-C200 工程锚固钻机钻孔,开孔孔径 146 mm,终孔孔径 146 mm,钻孔方向与被监测的抬动面垂直,采用铅直孔。不同深度处坝体水平位移见图 11。

数值模型测线与现场监测仪器位置一致,现场脉动注浆压力平均值为 0.9 MPa,对比数值模型计算结果与现场监测结果,验证黏土心墙坝测线处的

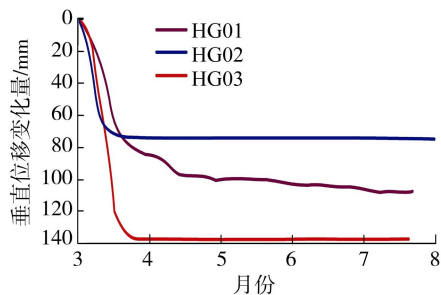


图 10 坝体内部垂直位移累积变形过程

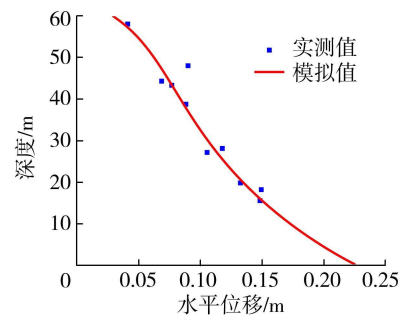


图 11 黏土心墙坝不同深度处水平位移对比

水平位移。由图 11 可知,坝体实测水平位移随注浆深度增加呈现锯齿状下降趋势,且水平位移主要受注浆量和坝体致密性影响。沿注浆深度方向水平位移计算值与实测值变化趋势基本一致,但注浆深度 45 m 以下时出现一处突变点。由于数值计算材料采用各向同性的多孔材料,而受施工技术限制,实际黏土心墙致密性并非始终一致,心墙致密性较差处水平位移较大,图 11 中出现突变点处部位与注浆工程中单元注浆量大、坝体心墙的致密性相关;数值模型计算水平位移与现场监测结果的计算误差约 5%,在误差控制范围内。可见,数值计算结果与现场监测结果较为吻合。

## 4 结论

a. 坝体应力随脉动注浆压力的增加、脉动注浆时间的推进和持续段时间的增加而增加,随注浆间歇段时间的延长而减小。脉动注浆除险加固施工过程中,延长脉动注浆持续段时间,缩短注浆间歇段时间,有利于保证浆液达到合理扩散半径,提高坝体变形控制效果。

b. 坝体水平位移、垂直位移随脉动注浆压力、

注浆时间、注浆持续段时间的增大而增大,随注浆间歇段时间的减小而减小。蓄水条件下受上游水压力作用,上游坝体水平位移小于下游坝体水平位移;在同一水平线上,心墙区的垂直位移大于坝壳堆石区的垂直位移。延长脉动注浆持续段时间可有效减少坝体垂直位移值产生突变的可能,有利于提高坝体在脉动注浆过程中的稳定性。

c. 综合各参数对坝体应力场和位移场的影响,在脉动注浆压力为 0.5~1.5 MPa、脉动注浆时间为 1200~1800 s 时,注浆持续段时间控制在 7~9 s,注浆间歇段时间控制在 3~5 s,能提高蓄水条件下黏土心墙坝脉动注浆除险加固工程施工质量,保证施工过程中坝体的安全性。

## 参考文献:

[1] 中华人民共和国水利部. 中国水利统计年鉴 2022[M]. 北京:中国水利水电出版社,2022:27.

[2] 朱瑞恒,岑威钧,薛阳,等. 坝基廊道开裂对心墙坝渗流特性的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(4):22-28. (Zhu Ruiheng, Cen Weijun, Xue Yang, et al. Influence analysis of dam foundation gallery cracks on seepage characteristics of core dam[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(4): 22-28. (in Chinese))

[3] 李吉林. 水布垭面板堆石坝基础注浆试验[J]. 水利水电科技进展,2012,32(5):67-70. (Li Jilin. Foundation grouting tests on Shuibuya face rockfill dam[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(5):67-70. (in Chinese))

[4] 张贵金,司马尹亮,陈安重,等. 强风化坝基渗水堵漏脉动注浆技术[J]. 水利水电技术(中英文),2022,53(3):78-83. (Zhang Guijin, Sima Yinliang, Chen Anzhong, et al. Seepage plugging technology for strongly weathered dam foundation [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(3): 78-83. (in Chinese))

[5] 张贵金,许毓才,陈安重,等. 一种适合松软地层高效控制注浆的新工艺:自下而上、浆体封闭、高压脉动注浆[J]. 水利水电技术,2012,43(3):38-41. (Zhang Guijin, Xu Yucai, Chen Anchong, et al. A new technical method for efficient and control grouting for loose ground: high pulsating pressure grouting from bottom to up stemming with slurry [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2012, 43(3): 38-41. (in Chinese))

[6] 张聪,梁经纬,张箭,等. 基于脉动注浆的宾汉流体渗透扩散机制研究[J]. 岩土力学,2018,39(8):2740-2746. (Zhang Cong, Liang Jingwei, Zhang Jian, et al. Mechanism of Bingham fluid permeation and diffusion based on pulse injection[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(8): 2740-2746. (in Chinese))

[7] 郑刚,王若展,程雪松,等. 注浆对邻近土体水平变形影响的原位试验研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2019,52(9):959-968. (Zheng Gang, Wang Ruozhan, Cheng Xuesong, et al. In situ test study of influence of grouting on horizontal deformation of adjacent soil [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2019, 52(9): 959-968. (in Chinese))

[8] Zheng Gang, Pan Jun, Cheng Xuesong, et al. Use of grouting to control horizontal tunnel deformation induced by adjacent excavation [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2020, 146(7): 05020004.

[9] 程雪松,高洁,潘军,等. 注浆水平纠偏的作用规律与影响因素[J]. 土木与环境工程学报(中英文),2022,44(5):136-147. (Cheng Xuesong, Gao Jie, Pan Jun, et al. Effect and influencing factors of the grouting on the horizontal deformation control [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(5): 136-147. (in Chinese))

[10] 张聪,梁经纬,阳军生,等. 堤坝脉动注浆浆液扩散机制及应用研究[J]. 岩土力学,2019,40(4):1507-1514. (Zhang Cong, Liang Jingwei, Yang Junsheng, et al. Research on the diffusion mechanism and application of pulsate grouting in embankment and dam [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(4): 1507-1514. (in Chinese))

[11] 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))

[12] 卢晓鹏. 高压喷射注浆技术在云南病险水库加固工程中的应用[J]. 水利水电科技进展,2012,32(5):82-85. (Lu Xiaopeng. Application of high-pressure sprinkling grouting technology to reinforcement of ill-conditioned reservoirs in Yunnan Province [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(5): 82-85. (in Chinese))

[13] 窦金熙,张贵金,陈安重,等. 全风化花岗岩地层脉动注浆控制防渗机理研究[J]. 岩土工程学报,2021,43(2):309-318. (Dou Jinxi, Zhang Guijin, Chen Anzhong, et al. Mechanism of seepage control of pulsating grouting in completely weathered granite stratum [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(2): 309-318. (in Chinese))

[14] 崔澈,李永杰,戚蓝,等. 高自生热材料注浆过程多场耦合数值分析[J]. 武汉大学学报(工学版),2018,51(11):941-949. (Cui Wei, Li Yongjie, Qi Lan, et al. Numerical analysis of multifield coupling in high self heating material grouting process [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2018, 51(11): 941-949. (in Chinese))

(收稿日期:2025-03-11 编辑:俞云利)

# 基于动态气囊边界改进的空气阀模型

赵莉<sup>1</sup>, 杨晓春<sup>2</sup>, 颜建国<sup>3</sup>, 申虎贲<sup>1</sup>

(1. 西安航空学院能源与建筑学院; 2. 安徽省水利水电勘测设计研究总院股份有限公司;  
3. 西安理工大学西北旱区生态水利国家重点实验室)

**摘要:**针对传统空气阀模型通常将气囊固定在空气阀节点处,忽略进排气过程中气囊体积变化引起的边界移动,进而导致邻近节点压力计算偏差的问题,提出了一种改进的空气阀模型——蔓延空气阀模型。该模型根据气囊体积变化实时更新气囊边界位置,使水气交界面的运动更符合真实物理过程,并通过耦合气体状态方程与流体控制方程,实现气囊压力、体积与质量的动态同步求解。某压力输水管道工程实例验证结果表明,蔓延空气阀模型能够有效模拟管道水力过渡过程,合理预测水柱分离及水锤压力变化,显著提升了管道系统水锤防护设计的准确性与可靠性。

**关键词:**空气阀模型;气囊边界;水柱分离;水力过渡过程

**An improved air valve model based on dynamic air-pocket boundaries**//Zhao Li<sup>1</sup>, Yang Xiaochun<sup>2</sup>, Yan Jianguo<sup>3</sup>, Shen Huben<sup>1</sup>(1. School of Energy and Architecture, Xi'an Aeronautical University; 2. Anhui Survey & Design Institute of Water Resources & Hydropower Co., Ltd.; 3. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology)

**Abstract:** Conventional air valve models usually fix the air pocket at the air valve node and neglect boundary movement caused by pocket volume variation during air intake and discharge, which may lead to pressure calculation errors at adjacent nodes. To overcome this limitation, an improved air valve model, namely the spreading air valve model, is proposed. This model updates the air-pocket boundary position in real time according to the variation in air-pocket volume, so that the motion of the water-air interface is more consistent with the actual physical process. By coupling the gas state equation with the fluid governing equations, the dynamic and simultaneous solution of air-pocket pressure, volume and mass is realized. Validation results from a pressurized water pipeline project show that the spreading air valve model can effectively simulate the hydraulic transient process, reasonably predict water column separation and water hammer pressure variation, and significantly improve the accuracy and reliability of water hammer protection design for pipeline systems.

**Key words:** air valve model; air pocket boundary; water column separation; hydraulic transient process

空气阀是长距离有压输水工程中不可或缺的水锤防护装置,主要用于管道排气和负压控制<sup>[1]</sup>。在管道系统运行过程中,管道充水、事故检修、阀门启闭(包括正常操作与异常突发情形)以及水泵启停等工况均可能引发管道内气体体积聚或瞬时负压<sup>[2-7]</sup>。合理布置并设置空气阀,可在系统运行过程中及时排出气体,并在发生负压时迅速向管道补气,有效抑制液柱分离现象,从而显著降低水锤效应带来的风险,保障管道系统的运行安全与稳定性<sup>[8]</sup>。相较于气压罐和调压塔,空气阀具有结构简单、成本低廉、安装方便等优点,因此在长距离输水工程中得到广泛应用<sup>[9]</sup>。实践表明,空气阀的进排气特性对于保

障长距离输水工程的安全运行至关重要<sup>[10]</sup>。

国内外学者针对空气阀数学模型开展了深入研究,并取得一系列研究成果。Streeter等<sup>[11]</sup>提出了基于理想气体的空气阀水力计算模型,其亚音速流入、亚音速流出、音速流入及音速流出4种基本假设被沿用至今。Lee等<sup>[12]</sup>认为进入管道的空气遵循多方过程,在此基础上引入与系统的热交换相关的多方指数,更准确地描述了气体压缩和膨胀的热传导特性。王玲等<sup>[13]</sup>建立了空管充水过程的空气阀数学模型,并提出了结合改进牛顿迭代法与直接求解法的高精度算法,提升了空气阀模型在空管充水瞬变计算中的适用性和精度。Coronado-Hernández

**基金项目:**国家自然科学基金面上项目(52579076);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2022JM-211);西安市科技局高校院所人才服务企业项目(23GXFW0039);陕西省创新能力支撑计划项目(2024RS-CXTD-31);陕西省技术创新引导计划项目(2024QCY-KXJ-050)

**作者简介:**赵莉(1982—),女,教授,博士,主要从事长距离输水安全防护研究。E-mail:22958531@qq.com

等<sup>[14]</sup>建立了一维通用数学模型,可用于分析安装有多个空气阀的不规则管道在排空过程中主要水力变量的变化规律。杨开林<sup>[15]</sup>基于等熵气动理论,构建了考虑气体绝热流动与空气阀高度影响的新型空气阀水力瞬变数学模型。

传统空气阀模型大多采用下列假设<sup>[16-18]</sup>:①经空气阀进入管道的气体始终积聚在空气阀附近,并在水压力升高时可充分排出;②当管道内气体体积分数较小时,气水两相呈无滑移流动。传统空气阀模型假定气体空腔始终固定在空气阀所在的网格节点,即使进气量超过管段容积,空腔也不会向相邻节点蔓延,导致管道中非空气阀节点的水位保持不变,压力无法真实反映进气量变化。当进气量较小时,该假设对计算结果影响有限,但在持续大量进气,甚至多段管道连续卸空的工况下,该模型会显著低估气水界面移动引起的压力变化,导致管线压力计算偏差较大,进而可能误导水锤防护方案的设计。为弥补传统一维空气阀模型的不足,王福军等<sup>[19-20]</sup>提出了基于二维和三维 CFD 的流动模型,用于精确模拟水与空气混合的动态相互作用及压力脉动。此类模型虽精度较高,但计算复杂,难以满足长距离管道工程的计算效率要求。为此,本文提出一种基于气囊体积变化实时更新边界位置的改进空气阀模型——蔓延空气阀模型,以期通过更合理的物理假设提升模型在工程应用中的适用性和计算效率。

## 1 模型改进方法

蔓延空气阀模型的建立需依据气囊体积变化驱动气囊边界运动,进而确定水气交界面的位置与形态,以提升模拟结果与实际工况的吻合度。在数值计算中,先根据不同压差条件下的进排气质量流速,计算得到气囊内气体质量,并通过边界流量差求得气囊体积变化;然后基于气体状态方程计算气囊内部压力,并将该压力赋值给气囊所在节点。满水管段采用传统特征线法(MOC)<sup>[21-23]</sup>进行计算;非满流管段则区分蒸汽型空腔与空气型空腔两种类型,分别采用相应计算模型。通过结合空气阀模型与液柱分离型水锤基本模型<sup>[24]</sup>,可实现对管线全流程流态的综合模拟与分析。

### 1.1 模型组成

蔓延空气阀模型由冲击水体、滞留气囊及水气交界面 3 部分组成。节点记录压力和流量,管段记录水量、水位、管段容积及管段编号。计算涉及的参数包括气囊压力、气囊体积、气囊质量、边界管段水柱高度和边界点压力。以空气阀所在节点为界,将气囊分为空气阀左侧和右侧两部分,其体积分别根

据左右两侧边界点流量计算得到。其中,边界点流量由边界点压力确定,而边界点压力为气囊压力与边界管段水柱高度之和,因此受气囊压力的影响。气囊质量由空气阀进排气质量方程确定,进排气质量流速受气囊压力的影响。由此可见,在进排气过程中,气囊压力时刻影响气囊体积、气囊质量及两侧边界点压力。为了精确求解这些相互耦合的参数,需要针对不同气囊压力建立空气阀计算模型,并满足质量守恒方程、连续性方程、动量方程及气体状态方程。满水管段采用传统 MOC 计算,通过联立空气阀模型及气囊动态边界方程进行求解。以下以图 1 为例对模型进行解释说明。

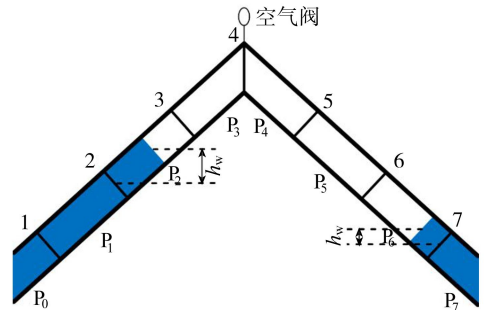


图 1 空气阀布置

图 1 中空气阀布置在节点 4,当节点 4 出现持续性负压后,空气阀进气形成的气囊向两侧下降管段蔓延,完全被气体占据的管段称为气囊内管段( $P_3$ 、 $P_4$ 、 $P_5$  管段),部分被气体占据的管段称为边界管段( $P_2$ 、 $P_6$  管段)。将边界管段中满水一侧的节点定义为气囊边界节点,即气囊左侧边界为节点 2,右侧边界为节点 7。边界节点  $m$  的测压管水头为气囊压力、管段内水柱与边界节点的垂直高差及边界节点的位置高程之和:

$$H_{l,m} = \frac{p_{a,t} - p_0}{\rho g} + h_{w,t,m} + Z_m \quad (1)$$

式中: $H$  为边界节点的测压管水头,  $m$ ;  $p_a$  为气囊绝对压力,  $\text{Pa}$ ;  $p_0$  为大气压,  $\text{Pa}$ ;  $\rho$  为水体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $g$  为重力加速度,取  $9.807 \text{ m}/\text{s}^2$ ;  $h_w$  为边界节点处的水柱垂直高度,  $m$ ;  $Z$  为边界节点的位置高程,  $m$ ; 下标  $m$  为气囊左、右边界节点编号,图 1 中  $m=2,7$ ;  $t$  为时间。

管内的空气满足如下气体定律:

$$p_{a,t+\Delta t} V_{a,t+\Delta t} = m_{t+\Delta t} R_s T \quad (2)$$

式中:  $p_{a,t+\Delta t}$  为  $t+\Delta t$  时刻管道中气囊的绝对压力,  $\text{Pa}$ ;  $V_{a,t+\Delta t}$  为  $t+\Delta t$  时刻管道中气囊的体积,  $\text{m}^3$ ;  $m_{t+\Delta t}$  为  $t+\Delta t$  时刻管道中气囊的质量,  $\text{kg}$ ;  $R_s$  为空气的比气体常数,取  $287 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $T$  为绝对温度,  $\text{K}$ ,本文取  $20^\circ\text{C}$ ,即  $293.15 \text{ K}$ 。

本文以气体状态方程(2)为基础,将气囊体积

方程、气囊质量方程和动态边界方程进行耦合求解。其中水气交界面位置及边界水柱高度由气囊动态边界方程确定,气囊体积  $V_{a,t+\Delta t}$  由气囊体积方程给出,气囊质量  $m_{t+\Delta t}$  由空气阀进、排气方程及质量方程确定。最后将  $V_{a,t+\Delta t}$  和  $m_{t+\Delta t}$  代入式(2),可得到仅含气囊压力  $p_{a,t+\Delta t}$  一个未知量的封闭方程组。

## 1.2 气囊体积方程

空气阀进气后,分别记录左右两侧管段的进气量。考虑水气耦合作用,联立气囊两侧气水边界点的流量方程与气体状态方程,求解得到两侧气囊的体积。 $t+\Delta t$  时刻的气囊体积计算方程为:

$$V_{a,t+\Delta t} = V_{a1,t+\Delta t} + V_{a2,t+\Delta t} = V_{a1,t} - \frac{1}{2} \int_t^{t+\Delta t} (Q_{t+\Delta t,L} + Q_{t,L}) dt + V_{a2,t} + \frac{1}{2} \int_t^{t+\Delta t} (Q_{t+\Delta t,R} + Q_{t,R}) dt \quad (3)$$

式中:  $V_{a1,t}$ 、 $V_{a2,t}$  分别为  $t$  时刻空气阀左侧、右侧气囊体积,  $m^3$ ;  $V_{a1,t+\Delta t}$ 、 $V_{a2,t+\Delta t}$  分别为  $t+\Delta t$  时刻空气阀左侧、右侧气囊体积,  $m^3$ ;  $Q_{t,L}$ 、 $Q_{t,R}$  分别为  $t$  时刻气囊左侧、右侧边界节点处的边界流量,  $m^3/s$ ;  $Q_{t+\Delta t,L}$ 、 $Q_{t+\Delta t,R}$  分别为  $t+\Delta t$  时刻气囊左侧、右侧边界节点处的边界流量,  $m^3/s$ ; 下标  $L$ 、 $R$  分别为气囊左、右边界节点编号。

对于气囊两侧边界节点,根据特征线法的相容性方程:

$$C^+ : H_{t+\Delta t,L} = C_P - BQ_{t+\Delta t,L} \quad (4)$$

$$C^- : H_{t+\Delta t,R} = C_M + BQ_{t+\Delta t,R} \quad (5)$$

可以得到两侧边界节点的流量方程分别为:

$$Q_{t+\Delta t,L} = \frac{C_P - H_{t+\Delta t,L}}{B} \quad (6)$$

$$Q_{t+\Delta t,R} = \frac{H_{t+\Delta t,R} - C_M}{B} \quad (7)$$

$$\text{其中 } H_{t+\Delta t,L} = \frac{p_{a,t+\Delta t} - p_0}{\rho g} + h_{w,t+\Delta t,L} + Z_L$$

$$H_{t+\Delta t,R} = \frac{p_{a,t+\Delta t} - p_0}{\rho g} + h_{w,t+\Delta t,R} + Z_R$$

$$C_P = H_{t,L-1} + BQ_{t,L-1} - RQ_{t,L-1} | Q_{t,L-1} |$$

$$C_M = H_{t,R+1} - BQ_{t,R+1} + RQ_{t,R+1} | Q_{t,R+1} |$$

$$B = \frac{a}{gA} \quad R = \frac{f\Delta x}{2gDA^2}$$

式中:  $a$  为水锤波速,  $m/s$ ;  $A$  为管道过水断面面积,  $m^2$ ;  $f$  为摩阻系数,  $N \cdot s/m^2$ ;  $\Delta x$  为空间步长,即计算管段的长度,  $m$ ;  $D$  为管道内径,  $m$ 。联立式(3)~(7)得到气囊体积方程:

$$V_{a,t+\Delta t} = V_{t,L} - \frac{1}{2} \int_t^{t+\Delta t} \left[ (H_{t,L-1} + BQ_{t,L-1} - RQ_{t,L-1} \cdot \right.$$

$$\left. | Q_{t,L-1} | - \frac{p_{a,t+\Delta t} - p_0}{\rho g} + h_{w,t,L} + Z_L \right) / B + Q_{t,L} \Big] dt + V_{t,R} + \frac{1}{2} \int_t^{t+\Delta t} \left[ \left( \frac{p_{a,t+\Delta t} - p_0}{\rho g} + h_{w,t,R} + Z_R - H_{t,R+1} + BQ_{t,R+1} - RQ_{t,R+1} | Q_{t,R+1} | \right) / B + Q_{t,R} \right] dt \quad (8)$$

式(8)中只有气囊压力  $p_{a,t+\Delta t}$  为  $t+\Delta t$  时刻的未知变量,其他变量均为  $t$  时刻的已知变量。

## 1.3 气囊动态边界方程

在每个时间步  $\Delta t$  结束时,根据计算得到的  $V_{a1,t+\Delta t}$  和  $V_{a2,t+\Delta t}$  对边界节点编号进行检查和更新。以左侧边界为例,当边界向外侧扩展时,左侧边界节点编号减小,即  $L=L-1$ ;当边界向内侧收缩时,左侧边界节点编号增大,即  $L=L+1$ 。因此,更新边界节点编号  $L$  后,计算的左侧气囊体积应满足如下一致性条件:

$$\sum_{j=L+1}^{n-1} V_{G,j,j+1} \leq V_{a1,t+\Delta t} \leq \sum_{j=L}^{n-1} V_{G,j,j+1} \quad (9)$$

式中:  $n$  为空气阀所在节点编号;  $V_{G,j,j+1}$  为节点  $j$  与节点  $j+1$  之间管段的容积。

若计算得到的  $V_{a1,t+\Delta t}$  不满足式(9),则需对边界节点编号进行修正:当  $V_{a1,t+\Delta t} > \sum_{j=L}^{n-1} V_{G,j,j+1}$  时,说明左侧气囊已越过当前边界节点,边界向外侧扩展,

应令  $L=L-1$ ;当  $V_{a1,t+\Delta t} < \sum_{j=L+1}^{n-1} V_{G,j,j+1}$  时,说明左侧气囊已减小至边界节点内侧的相邻节点,边界向内侧收缩,应令  $L=L+1$ 。在确定左侧边界节点编号  $L$  后,可根据左侧气囊体积进一步计算边界管段内的剩余水柱高度。由于左侧边界位于节点  $L$  与节点  $L+1$  之间,因此边界管段内的水柱高度可表示为:

$$h_{w,t+\Delta t,L} = \frac{\sum_{j=L}^{n-1} V_{G,j,j+1} - V_{a1,t+\Delta t}}{V_{G,L,L+1}} | Z_L - Z_{L+1} | \quad (10)$$

右侧气水边界可采用与左侧完全对称的方法处理,其边界节点编号更新规则和边界水柱高度计算过程不再赘述。

## 1.4 气囊质量方程

根据空气阀等熵进排气原理<sup>[13,16]</sup>,空气流入与流出的质量流量计算公式分别为:

$$m_{t+\Delta t} = \begin{cases} C_{in} A_{in} \sqrt{7p_0 \rho_0 \left[ \left( \frac{p_{a,t+\Delta t}}{p_0} \right)^{1.4286} - \left( \frac{p_{a,t+\Delta t}}{p_0} \right)^{1.714} \right]} & 0.53p_0 \leq p_{a,t+\Delta t} \leq p_0 \\ 0.686 C_{in} A_{in} \frac{p_0}{\sqrt{R_S T}} & p_{a,t+\Delta t} < 0.53p_0 \end{cases} \quad (11)$$

$$\dot{m}_{t+\Delta t} = \begin{cases} C_{out} A_{out} p_{a,t+\Delta t} \sqrt{\frac{7}{R_s T} \left[ \left( \frac{p_0}{p_{a,t+\Delta t}} \right)^{1.4286} - \left( \frac{p_0}{p_{a,t+\Delta t}} \right)^{1.714} \right]} & p_0 \leq p_{a,t+\Delta t} \leq \frac{p_0}{0.53} \\ -0.686 C_{out} A_{out} \frac{p_{a,t+\Delta t}}{\sqrt{R_s T}} & p_{a,t+\Delta t} > \frac{p_0}{0.53} \end{cases} \quad (12)$$

式中： $\dot{m}_{t+\Delta t}$  为  $t+\Delta t$  时刻空气流入流出空气阀的质量流量，kg/s； $C_{in}$ 、 $C_{out}$  分别为空气流入和流出时的流量系数； $A_{in}$ 、 $A_{out}$  分别为空气阀进、排气口面积， $m^2$ ； $\rho_0$  为标准大气压下的空气密度， $kg/m^3$ 。

气囊质量可表示为：

$$m_{t+\Delta t} = m_t + \frac{1}{2} \int_t^{t+\Delta t} (\dot{m}_t + \dot{m}_{t+\Delta t}) dt \quad (13)$$

联立式(2)、(8)~(13)可构成封闭方程组，其中仅气囊压力  $p_{a,t+\Delta t}$  为唯一未知量。采用迭代法对该方程组进行求解，可得到气囊压力  $p_{a,t+\Delta t}$ ，进而确定其余所有以气囊压力为变量的相关参数。

## 2 模型验证

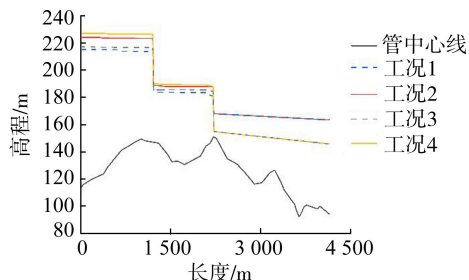
以某压力输水管道工程为例，对所建立的空气阀模型进行验证。该工程管道总长 4 144.36 m，首端与末端水池液位分别为 113.5 m 和 95 m。沿线设有两个高点：高点 1 位于桩号 K1+005，高程 149.52 m；高点 2 位于桩号 K2+215，高程 151.266 m。管道采用 DN500 钢管，壁厚 10 mm。水泵额定流量  $0.3 m^3/s$ ，额定扬程 52 m，额定转速 1 480 r/min，功率 180 kW，效率 87%。模拟工况为事故断电停泵，水泵出口设置缓闭液控蝶阀。阀门采用两阶段关闭，第一阶段快关至 78%（对应阀板角度  $70^\circ$ ），第二阶段缓慢关闭至完全封闭。

本文选取两种稳态流量（ $0.3 m^3/s$  与  $0.2 m^3/s$ ）与两种关阀时间方案（方案 1：5 s 时快关至开度 78%，30 s 时全关；方案 2：30 s 时快关至开度 78%，120 s 时全关）进行组合计算，共形成 4 种工况，其中，工况 1 对应稳态流量  $0.2 m^3/s$  与关阀方案 1，工况 2 对应稳态流量  $0.2 m^3/s$  与关阀方案 2，工况 3 对应稳态流量  $0.3 m^3/s$  与关阀方案 1，工况 4 对应稳态流量  $0.3 m^3/s$  与关阀方案 2。为了验证模型，同时采用某国际通用软件建立的固定空气阀模型进行对比分析。

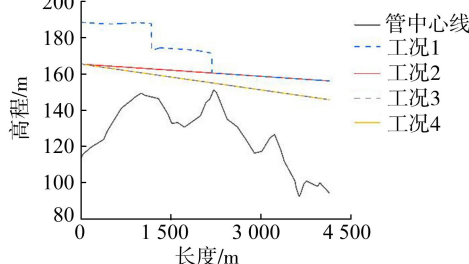
### 2.1 停泵水力过渡过程包络线

如图 2(a) 所示，采用固定空气阀模型计算停泵后水力过渡过程时，各工况下 1 号空气阀均发生水柱弥合，且最大压力均超过水泵出口正常运行压力

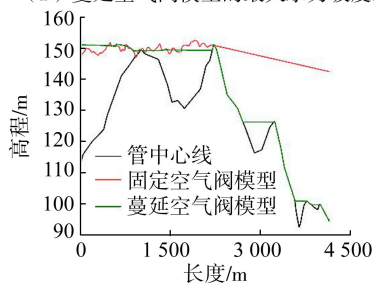
(52.02 m，以压力水头表示)的 1.5 倍(表 1)，不满足规范要求。如图 2(c) 中停泵 1 600 s 后的水力坡度线所示，由于管道末端阀门不关闭，水依靠重力从高点持续流出管道，空气阀不断进气，但是固定空气阀模型计算结果显示空气阀两侧的管道水位并未下降，该结果与实际情况不符。



(a) 固定空气阀模型的最大水力坡度线



(b) 蔓延空气阀模型的最大水力坡度线



(c) 1 600 s 时瞬时水力坡度线

图 2 水力过渡过程包络线

表 1 不同工况下两模型最大压力对比 单位：m

工况	固定空气阀模型	蔓延空气阀模型
1	101.945	75.028
2	110.906	52.02
3	103.862	52.02
4	113.863	52.02

如图 2(b) 所示，采用蔓延空气阀模型时，水力过渡过程中 1 号空气阀仅在工况 1 下出现小幅度弥合，最大压力为 75.028 m，未超过正常运行压力的 1.5 倍；其余工况下，管线最大压力为正常运行压力（52.02 m）。因为管线末端阀门不关闭，蔓延空气阀模型计算结果显示，停泵约 1 600 s 后管道泄空，泄空部分的水力坡度线降至管线高程(图 2(c))。

固定空气阀模型模拟不准确的根本原因在于其简化假设导致气囊边界模拟失真。固定空气阀模型因空气阀处的水位固定不变，不会随着进气而下降。因此，当水倒流回上游时，水体始终按照这个固定的

高水位所对应的压力加速倒流,最终产生巨大的弥合升压。同时,由于水位固定不变,模型无法对管道泄空这一现象进行模拟。改进后的蔓延空气阀模型可以准确地动态跟踪水位变化,从而避免了不真实的压力峰值,并能准确模拟管道泄空现象。

## 2.2 水力过渡过程中空气阀处气囊体积变化

如图3(a)所示,固定空气阀模型中1号空气阀处的气囊体积随稳态流速及关阀时间的增大而增大,且在各工况下,无论进气量多少,最终均会出现水柱弥合,这是导致瞬态压力升高的主要原因。如图3(b)所示,蔓延空气阀模型中1号空气阀处的气囊体积同样随稳态流速及关阀时间的增大而增大,但除工况1外,气囊并未被完全挤压排空,即未发生水柱弥合。这是由于改进后的蔓延空气阀模型中气囊边界可以自由移动,水位会动态变化。随着第二处高点进气,水位逐渐下降,倒流回第一个高点的水流流速逐渐降低,最终第一个高点并未发生弥合。而在工况1下,虽出现水柱弥合,但由于动态边界与水位变化的作用,压力波动幅度明显低于固定空气阀模型,避免了固定空气阀模型中,由于其水位固

定,第二处高点的水始终保持高流速倒流,导致多次不真实的剧烈水柱弥合。

由图3(c)可见,固定空气阀模型中2号空气阀气囊体积呈无限增大趋势,甚至超出管道容积,这与实际情况明显不符。这是由于固定空气阀模型的气囊边界和水位固定不变,无法随着末端泄水和空气阀进气过程动态变化。由图3(d)可见,在蔓延空气阀模型中,随着下游水位逐渐下降并最终泄空,泄流过程逐步终止,空气阀进气也随之停止,从而真实模拟了重力泄空过程中空气阀进气和水位变化的协同演进。此外,由于2号空气阀位于整条管线最高点,其进气阻断了大部分压力波动,因此稳态流速和关阀时间的改变对下游管线几乎无影响。这一现象在蔓延空气阀模型与固定空气阀模型的模拟结果中均得到了体现。

## 2.3 末端流量与压力

以工况3为例,由图4(a)可知,停泵后,末端阀门不关闭,随着管道泄空,固定空气阀模型因无法反映水位动态变化,导致管线末端流量与压力始终不变,这与实际情况不相符,表明固定空气阀模型无法

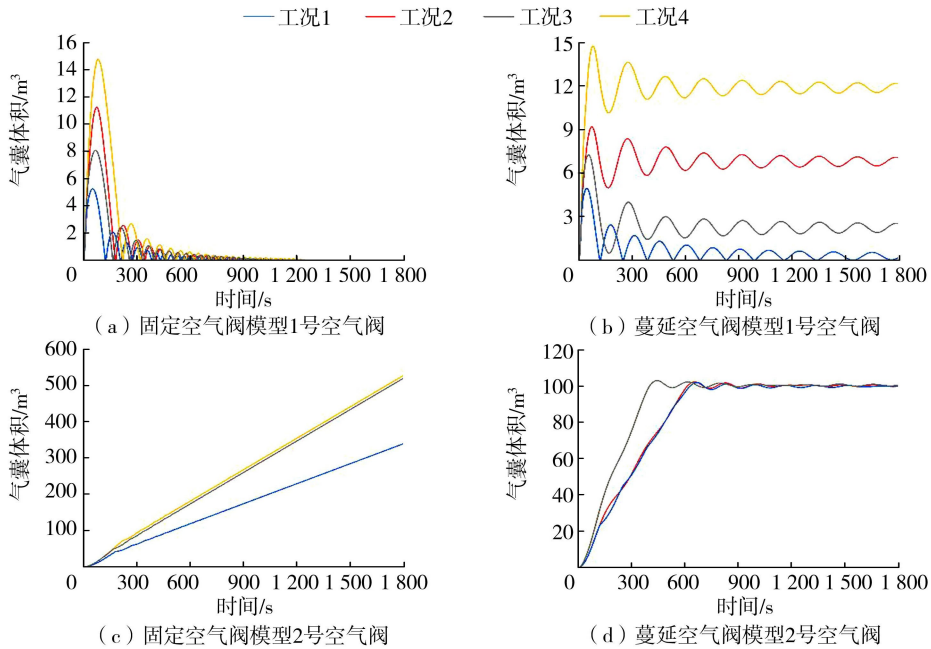


图3 空气阀处气囊体积变化曲线

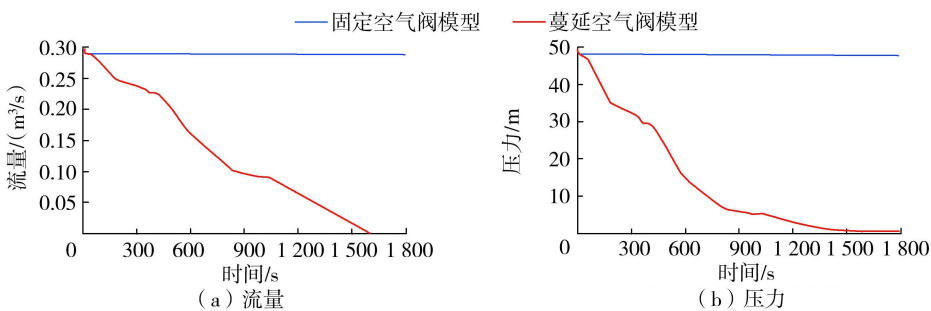


图4 工况3水力过渡过程管线末端流量和压力过程线

准确模拟泄水过程。由图 4(b)可知,采用蔓延空气阀模型时,随着管线末端泄水,空气阀进气量逐渐增加,水位逐渐下降。与此同时,管线末端的压力和流量也随着水位动态变化而逐渐下降。当压力降为 0 时,表示管道泄空。管线末端的压力和流量变化过程并非线性,而是受管线坡度影响呈现非线性变化,水位变化速度也在动态调整。蔓延空气阀模型可真实、准确地模拟这一过程,并能准确预测管道水体泄空时间。本工程案例各工况下末端管道泄空时间均约为 1600 s。

## 2.4 结果分析

由该工程案例可知,在模拟事故停泵后的水力过渡过程中,采用固定空气阀模型计算的最大水锤压力在不同工况下均出现了显著的弥合升压,数值超过水泵出口正常运行压力的 1.5 倍,不满足规范要求,因此需要额外加装水锤防护设备。而采用蔓延空气阀模型计算时,仅在个别工况(如工况 1)出现小幅度升压,其最大压力仍低于规范限值,其余各工况的最大压力均为稳态压力,满足规范要求,无需额外加装水锤防护设备,且该模型对空气阀大小排气口的切换压力也无特殊要求。

固定空气阀模型由于简化假设导致气囊边界与水位固定不变,在模拟事故停泵后的水力过渡过程以及泄水的工况时,在压力包络线、压力流量、空气阀进排气量等方面均出现较大误差,这可能误导工程防护设计。蔓延空气阀模型通过动态跟踪气囊边界与水位变化,更真实地模拟了气体蔓延、水柱运动以及泄空全过程,其计算结果具有更高的可靠性和工程应用价值。

通过对比两种空气阀模型在不同稳态流量及关阀时间下的计算结果可以看出,蔓延空气阀模型在各工况下均表现出良好的稳定性与适用性,计算结果变化规律与物理过程一致。

## 3 结论

a. 固定空气阀模型因气囊边界固定,导致空气阀两侧水位无法自然下降,易产生虚假的水柱弥合升压,从而影响水锤防护方案的合理性。

b. 蔓延空气阀模型通过动态模拟气囊体积、边界位置及边界流量,能够更合理、准确地反映水力过渡过程的压力变化,在不同工况下的计算结果变化规律与物理过程均吻合良好,表明模型具有良好的稳定性与通用性,可为水锤防护方案的制定提供依据。

c. 蔓延空气阀模型能够模拟管道泄空全过程并准确预测泄空时间,对停泵工况分析与管道系统

检修泄水具有实际指导意义。

## 参考文献:

- [1] 杨开林. 输水管线空气阀进排气孔径的合理选择[J]. 水利学报, 2024, 55(5): 537-548. (Yang Kailin. Reasonable selection of intake and exhaust diameters for air valve in water pipelines [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55(5): 537-548. (in Chinese))
- [2] 蔡付林,樊子凯,周建旭,等. 长距离多支线有压输水系统启动水锤防护[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(4): 1-6. (Cai Fulin, Fan Zikai, Zhou Jianxu, et al. Start-up water hammer protection for long-distance multi-branch pressurized water conveyance systems [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(4): 1-6. (in Chinese))
- [3] 刘竹青,毕慧丽,王福军. 空气阀在有压输水管路中的水锤防护作用[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(4): 333-337. (Liu Zhuqing, Bi Huili, Wang Fujun. Effect of air valves on water hammer protection in pressure pipelines [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(4): 333-337. (in Chinese))
- [4] 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))
- [5] 周领,王鹤鸣,徐彬,等. 输水管道水锤泄漏耦合数值模拟及反射系数特性研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2026, 54(1): 43-52. (Zhou Ling, Wang Heming, Xu Bin, et al. Numerical simulation of water hammer and leak coupling in water pipelines and study on reflection coefficient characteristics [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2026, 54(1): 43-52. (in Chinese))
- [6] 赵斌,胡斌超,刘有亮,等. 长距离泵站水锤分析及管线布置对水锤的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2024, 42(11): 1112-1119. (Zhao Bin, Hu Binchao, Liu Youliang, et al. Analysis of water hammer phenomena in long-distance pumping stations and impact of pipeline configuration on its occurrence [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2024, 42(11): 1112-1119. (in Chinese))
- [7] 杨春霞,李倩,马经童,等. 多分水口长距离输水工程停泵水锤防护措施[J]. 排灌机械工程学报, 2024, 42(3): 250-255. (Yang Chunxia, Li Qian, Ma Jingtong, et al. Water hammer protection measures for long-distance water transmission projects during pump stop with multiple water diversions outlets [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2024, 42(3): 250-255.

- (in Chinese))
- [ 8 ] 赵莉, 栗金晶, 杨玉思, 等. 压力管道中有压气囊运动的试验研究[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(5):18-22. (Zhao Li, Li Jinjing, Yang Yusi, et al. Experimental study on movement of pressurized air pockets in a pressure pipeline [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(5):18-22. (in Chinese))
- [ 9 ] Li Xiaozhou, Wang Tao, Zhang Yanhe, et al. Study on the factors influencing air valve protection against water hammer with column separation and rejoinder [J]. AQUA—Water Infrastructure, Ecosystems and Society, 2022, 71(9):949-962.
- [10] 胡建永, 张健, 索丽生. 长距离输水工程中空气阀的进排气特性研究[J]. 水利学报, 2007, 38(增刊1):340-345. (Hu Jianyong, Zhang Jian, Suo Lisheng. Study on air admission and exhaust characteristics of air valve in long water supply system [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(S1):340-345. (in Chinese))
- [11] Streeter V L, Wylie E B. Hydraulic transients[M]. New York: McGraw-Hill International Book Company, 1967:10-42.
- [12] Lee T S, Leow L C. Numerical study on the effects of air valve characteristics on pressure surges during pump trip in pumping systems with air entrainment[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1999, 29(6):645-655.
- [13] 王玲, 王福军, 黄靖, 等. 安装有空气阀的输水管路系统空管充水过程瞬态分析[J]. 水利学报, 2017, 48(10):1240-1249. (Wang Ling, Wang Fujun, Huang Jing, et al. Filling transient analysis in pipelines with air valves[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(10):1240-1249. (in Chinese))
- [14] Coronado-Hernández O E, Fuertes-Miquel V S, Besharat M, et al. Experimental and numerical analysis of a water emptying pipeline using different air valves[J]. Water, 2017, 9(2):98.
- [15] 杨开林. 空气阀水力瞬变数学模型[J]. 水利学报, 2023, 54(7):775-784. (Yang Kailin. Mathematical models for hydraulic transients of air valves[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(7):775-784. (in Chinese))
- [16] 杨春霞, 耿魏强, 严杰, 等. 不同开度防水锤空气阀的进排气特性数值模拟[J]. 水电能源科学, 2022, 40(8):181-185. (Yang Chunxia, Geng Weiqiang, Yan Jie, et al. Numerical simulation of air inlet and exhaust characteristics of anti-water hammering air valve with different opening degrees [J]. Water Resources and Power, 2022, 40(8):181-185. (in Chinese))
- [17] 柯颯, 胡云进, 万五一. 空气阀防护水锤的研究进展[J]. 人民黄河, 2010, 32(12):229-232. (Ke Xie, Hu Yunjin, Wan Wuyi. Research progress on water hammer protection by air valves[J]. Yellow River, 2010, 32(12):229-232. (in Chinese))
- [18] 边少康, 张小莹, 李刚, 等. 重力流关阀规律及空气阀优化研究[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(1):55-61. (Bian Shaokang, Zhang Xiaoying, Li Gang, et al. Study on valve-closure law of gravity flow and optimization of air valve[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(1):55-61. (in Chinese))
- [19] 王福军, 王玲. 大型管道输水系统充水过程瞬变流研究进展[J]. 水力发电学报, 2017, 36(11):1-12. (Wang Fujun, Wang Ling. Advances in water filling transients in large pipeline transfer systems [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(11):1-12. (in Chinese))
- [20] García-Todolí S, Iglesias-Rey P L, Mora-Meliá D, et al. Computational determination of air valves capacity using CFD techniques[J]. Water, 2018, 10(10):1433.
- [21] Bergant A, Simpson A R, Tijsseling A S. Water hammer with column separation: a historical review[J]. Journal of Fluids and Structures, 2006, 22(2):135-171.
- [22] Mousavifard M, Norooz R. Numerical analysis of transient cavitating pipe flow by Quasi 2D and 1D models[J]. Journal of Hydraulic Research, 2022, 60(2):295-310.
- [23] Autrique R, Rodal E, Sánchez A, et al. Physical model studies of water column separation [C]//Proceedings of the 26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. Beijing: IOP, 2012:1-8.
- [24] 赵莉, 范闯, 申虎贲, 等. 液柱分离型水锤新空腔模型[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(2):37-41. (Zhao Li, Fan Chuang, Shen Huben, et al. New cavity model for water hammer with liquid column separation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(2):37-41. (in Chinese))

(收稿日期:2025-03-23 编辑:雷燕)



# 基于低场核磁共振技术的非织造土工织物有效孔径测定

张宪雷<sup>1</sup>, 杨鹏鹏<sup>2</sup>, 马少帅<sup>3</sup>

(1. 华北水利水电大学水利学院; 2. 松花江水力发电有限公司吉林白山发电厂; 3. 国网新源集团有限公司新安江水力发电厂)

**摘要:**为精确测定针刺非织造土工织物有效孔径,运用湿筛法和低场核磁共振技术开展了试验研究,分别绘制了累积百分率与孔径尺寸之间的关系曲线,得到非织造土工织物的有效孔径值,并进行了对比分析;利用低场核磁共振成像技术与 Python 程序像素点识别相结合的方法验证了低场核磁共振测量技术成果的可靠性。结果表明:以氢原子为探针的低场核磁共振测量技术能够精确测定非织造土工织物的有效孔径;低场核磁共振成像技术和 Python 程序像素点识别相结合的方法可验证低场核磁共振技术测定非织造土工织物有效孔径的准确性;低场核磁共振测量技术可避免湿筛法的缺点,提高有效孔径测定成果的准确性。

**关键词:**非织造土工织物;孔径分布;孔隙度;有效孔径;低场核磁共振技术

**Determination of effective pore size of nonwoven geotextiles based on low-field nuclear magnetic resonance technology**//Zhang Xianlei<sup>1</sup>, Yang Pengpeng<sup>2</sup>, Ma Shaoshuai<sup>3</sup>(1. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power; 2. Jilin Baishan Hydropower Plant, Songhuajiang Hydropower Co., Ltd.; 3. Xinanjiang Hydropower Plant of State Grid Xinyuan Group Co., Ltd.)

**Abstract:** In order to accurately determine the effective pore size of needle-punched nonwoven geotextiles, the wet sieving method and the low-field nuclear magnetic resonance (NMR) technology were used to carry out experimental research. The relationship curves between the cumulative percentage and the pore size were drawn, and the effective pore size value of nonwoven geotextiles was obtained and compared. The reliability of the low-field NMR measurement results was verified by combining the NMR imaging technology and Python programming pixel recognition method. The results show that the low-field NMR measurement technology with hydrogen atom as probe can accurately determine the effective pore size of nonwoven geotextiles. The combination of the NMR imaging technology and Python programming pixel recognition method can verify the accuracy of the low-field NMR technology in determining the effective pore size of nonwoven geotextiles. The low-field NMR measurement technology can avoid the shortcomings of the wet sieving method and improve the accuracy of the effective pore size measurement results.

**Key words:** nonwoven geotextiles; pore size distribution; porosity; effective aperture; low-field nuclear magnetic resonance technology

非织造土工织物是主要的土工合成材料之一,具有良好的力学性能、水力特性、耐久性等优点,起到反滤、排水、加筋等作用<sup>[1-3]</sup>,被广泛应用于环境保护、水利工程(如水库大坝、渠堤)、交通运输等领域<sup>[4-7]</sup>。土工织物的保土性、透水性和抗堵塞性一般采用有效孔径表征,有效孔径常用干筛法和湿筛法测定。Blond等<sup>[8]</sup>指出颗粒形状、样品选择和筛分设备决定了干筛法试验成果;苏树清等<sup>[9]</sup>开展了土工织物有效孔径测定试验,认为干筛法适用于编织土

工织物,湿筛法能直接模拟工作特性,适用于所有类型土工织物。大部分学者认为干筛法测定过程中的静电吸附效应导致测定的有效孔径偏低;湿筛法不存在静电吸附效应,测定成果优于干筛法,但试验程序繁杂、周期长。

为解决干筛法和湿筛法存在的问题,学者们采用数字图像法测定非织造土工织物孔隙结构特征,实现了高精度无损测量,并用于土工织物微观结构特性研究。例如:Chen等<sup>[10]</sup>研究了非织造土工织

**基金项目:**国家自然科学基金项目(51609087,51709114);河南省科技厅面上基金项目(252300420051);河南省研究生教育改革与质量提升工程项目(YJS2026YBGZZ03)

**作者简介:**张宪雷(1984—),男,副教授,博士,主要从事高面膜堆石坝土工膜防渗研究。E-mail:zhangxianlei@ncwu.edu.cn

物 NSST 的融合算法,实现了多聚焦图像融合,并根据图像测量了纤维直径、纤维取向和孔隙度;Kothari 等<sup>[11]</sup>基于种子生长技术算法获取了非织造土工织物的孔径分布曲线;Li 等<sup>[12]</sup>基于扫描电子显微镜 (SEM) 二维图像和计算机断层扫描 (CT) 三维图像,分析了连续长丝土工织物微观结构特征。

数字图像技术 (CT、SEM 等) 实现了土工织物内部孔隙结构和纤维分布的可视化,但图像分辨率的差异导致样品孔径测定成果存在较大误差<sup>[13]</sup>;低场核磁共振技术具有快速、直接、无损、精确等优点,被广泛用于测定煤炭、砂岩、水泥砂浆<sup>[14-20]</sup> 等各类多孔介质的孔隙度、孔径等;尹春杰等<sup>[21-23]</sup> 基于低场核磁共振技术分析 PVC-P 土工膜的孔隙结构特征,为研究土工合成材料孔隙结构开辟了新途径。

为消除数字图像法的局限性,本文基于低场核磁共振技术获取了针刺非织造土工织物孔径分布曲线、孔隙度和有效孔径  $O_{90}$  值,结合 Python 程序像素点识别和低场核磁共振成像技术验证了试验成果的准确性,并对比分析了与湿筛法测定的有效孔径  $O_{90}$  存在差异的原因。

## 1 试验条件

### 1.1 湿筛试验

#### 1.1.1 试样制备

试验材料选用针刺非织造土工织物,其厚度为 3.50 mm,单位面积质量为  $360 \text{ g/m}^2$ ,纵横向断裂强度为  $18 \text{ kN/m}$ ,单幅卷材长 100 m,宽 6 m。

依据 GB/T 13760—2009《土工合成材料 取样和试样制备》对有效孔径测定的试样要求,选择在表面无积垢、无可见损坏或折痕的针刺非织造土工织物上截取直径为 200 mm 的试样。参照 GB/T 17634—2019《土工布及其有关产品 有效孔径的测定 湿筛法》,3 块试样中任意一块试样的颗粒通过率与平均值的绝对差值占平均值的百分比小于 25%,则接受 3 块试样的数据,反之应对另外保留的 2 块试样进行试验。为保证试验数据的准确性,本文共设置 3 组湿筛试验,每组 5 块试样,测量并记录每块试样的厚度及干重。调制十二烷基苯磺酸钠与水的体积比为 0.1% 的溶液,并将试样放置于溶液中浸泡 15 h,使之达到饱和状态。

#### 1.1.2 试验设备

湿筛法试验设备选用天津市美特斯试验机厂研发的 MTSY-02 型土工布有(等)效孔径测定仪(湿筛法)。具体参数为筛分频率 50 Hz(即振动频率 3000 次/min),主振的垂直筛动振幅 1.5 mm(即振动高度 3 mm),夹持器内径 176 mm,外界环境温度

10~30℃、湿度不超过 80%,筛分时间范围 0~999 s。

### 1.1.3 试验方法

选用不施加张力的单层试样作为筛分网,在试样上投放一定量无黏性标准颗粒材料,并在无外界压力及 GB/T 17634—2019《土工布及其有关产品有效孔径的测定 湿筛法》规定的振动频率和振幅下,对试样及其连续级配粒径喷水,使颗粒粒径通过试样,收集通过的颗粒,并对试样进行分析。以通过颗粒材料累积百分率为纵坐标,相应筛子孔径尺寸为横坐标绘制半对数曲线图,在图中获取累积百分率为 90% 对应的横坐标值,即有效孔径  $O_{90}$  值。

## 1.2 低场核磁共振试验

### 1.2.1 试样制备

为降低非织造土工织物不均匀性对试验结果的影响,选择内径为 50 mm 的圆形环刀在湿筛法裁剪的直径为 200 mm 的圆形试样周围有效区域截取 3 个核磁试样,测量试样厚度并计算其体积。将核磁试样浸泡于 ZK-270 真空饱和装置,启动真空泵,使缸体顶盖压力表数值稳定在 0.1 MPa 并持续 24 h,打开顶盖泄压阀对缸体内部充分泄压,取出饱水核磁试样。

### 1.2.2 试验设备

a. 低场核磁共振测量。选用苏州纽迈分析仪器股份有限公司研制的 MicroMRI12-150H-I 型号大口径核磁共振成像分析仪,设备集低场核磁共振弛豫分析和成像功能于一体。基本参数包括:磁体磁场强度为  $(0.28 \pm 0.05) \text{ T}$ ;射频信号频率主值为 12.84 MHz;磁体温度为  $32.0^\circ\text{C}$ ;工作温度为  $25.0 \sim 28.0^\circ\text{C}$ ;探头线圈口径为 5.08 cm(2 英寸),型号为 RF Coil 3#。本次试验选用硬脉冲 CPMG (Carr-Purcell-Meiboom-Gill) 序列,接收机带宽为 125.0 kHz,重复采样时间为 6000 ms,重复采样次数为 32 次,两个相邻回波的时间间隔为 1.5 ms,模拟增益为 20.0 dB,信号采样得到的回波数量为 18000。

b. 图像分析处理。计算机配置为 Windows10 64 位操作系统。采用纽迈低场核磁共振成像软件和图像处理软件 V3.0 版本和 Python 2022.2.2。

## 2 试验方法

### 2.1 低场核磁共振测量方法

本次测量的非织造土工织物处于均匀分布的低磁场,回波时间较短,主要考虑表面弛豫而忽略自由弛豫和扩散弛豫对测量结果的影响。低场核磁共振弛豫时间  $T_2$  曲线表达式为:

$$1/T_2 \approx 1/T_{2sr} = \rho(S/V) = \rho(2F_s/d) \quad (1)$$

式中: $T_2$  为弛豫时间; $T_{2sr}$  为表面弛豫时间; $S$  为孔

隙表面积;  $V$  为孔隙的体积;  $F_s$  为孔隙形状尺寸系数, 取 1.0、2.0、3.0, 分别用于孔隙结构为扁平形模型、毛细管束模型、球形模型, 本文选用毛细管束模型,  $F_s$  取 2.0;  $d$  为孔径;  $\rho$  为表面弛豫率, 与试样的物理和化学性质有关。

选用 1%、5%、10%、20%、30% 的孔隙度标样定标, 并对单位体积信号强度与孔隙度进行线性拟合, 绘出决定系数  $R^2 = 0.9998$  的高精度拟合曲线 (图 1) 作为标线, 对非织造土工织物饱水试样进行测量。依据低场核磁共振测得非织造土工织物饱水试样的第  $i$  个核磁信号强度及标线, 对应孔隙度  $\varphi_i$  为:

$$\varphi_i = \frac{M_{ri}}{n_r \sigma_r} \frac{n_w \sigma_w V_w}{M_w V_r} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $M_{ri}$  为非织造土工织物试样第  $i$  个  $T_2$  信号强度;  $n_r$  为测试样品的累加次数;  $\sigma_r$  为测试样品的接受增益;  $n_w$  为标准样品的累加次数;  $\sigma_w$  为标准样品的波谱仪接受增益;  $M_w$  为标准样品的信号强度;  $V_w$  为标准样品的体积;  $V_r$  为测试样品的体积。

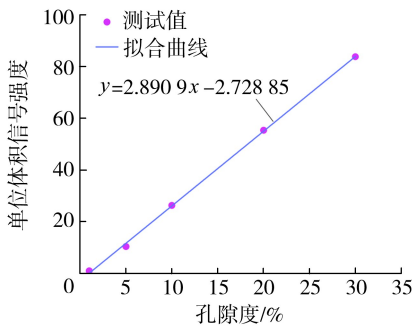


图 1 单位体积信号强度与孔隙度的关系曲线

则非织造土工织物饱水试样的总孔隙度  $\varphi$  为:

$$\varphi = \sum_{i=1}^l \varphi_i \quad (3)$$

式中:  $l$  为质子开始释放吸收的脉冲能量至释放结束接收线圈获得的所有信号强度对应的孔隙度数量。

Lawal 等<sup>[24]</sup> 构建了表面弛豫率  $\rho$  与孔隙度  $\varphi$ 、比表面积  $S/V$ 、单位质量表面积  $S_m$  之间的数学模型:

$$S/V = S_m \rho (1 - \varphi) / \varphi \quad (4)$$

本文基于此模型建立了适用于非织造土工织物表面弛豫率的预测模型, 并得出非织造土工织物的表面弛豫率为  $10 \mu\text{m}/\text{s}$ 。将核磁共振设备接收到的 CPMG 序列自旋回波衰减信号进行回波串反演得到信号强度与  $T_2$  弛豫时间曲线, 结合式 (1) 得到试样所有孔径及其分布, 并绘出累积百分率与孔径的半对数曲线, 由半对数曲线确定试样的有效孔径  $O_{90}$  值。

## 2.2 低场核磁共振成像方法

低场核磁共振成像是从矢状轴、冠状轴、垂直轴 3 个基本轴定位非织造土工织物饱水试样位置, 利用 3 个基本轴所在的矢状面、冠状面、横断面将非织造土工织物饱水试样分为若干小块, 每一小块内氢质子受到外部磁场激励产生弛豫现象, 经反演获得每一小块的信号强度, 依据信号越强、像素越亮原理确定每一个像素亮度大小, 将各像素亮度组合得到成像图。

低场核磁共振测量结束后, 为避免非织造土工织物饱水试样在试验过程中孔隙内部水分蒸发等因素影响测量精度, 选用直径为 60 mm 的样品仓将其密封, 并将样品仓推入探头线圈内进行核磁成像。经图像处理软件获得伪彩图, 结合 Python 程序对每张核磁图像进行像素点的识别, 统计不同像素点占整张图像中总像素点数的比值, 分析计算试样的孔隙度。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 湿筛法有效孔径

参照 GB/T 17634—2019《土工织物及其有关产品有效孔径的测定 湿筛法》规范, 对颗粒材料进行逐级筛分试验, 并将得到的颗粒材料平均通过百分率作为分析数据, 计算颗粒材料累积通过百分率, 将得到的 3 组湿筛试验数据点进行拟合, 绘制累积通过率与筛孔尺寸的半对数曲线 (图 2)。图 2 中 3 组试验数据点均匀散布在拟合曲线附近, 当筛孔尺寸为  $90 \sim 140 \mu\text{m}$  时, 累积通过百分率为  $72.5\% \sim 97.7\%$ , 曲线呈大幅上升趋势; 当筛孔尺寸为  $140 \sim 160 \mu\text{m}$  时, 累积通过百分率为  $97.7\% \sim 99.3\%$ , 曲线上升变缓。通过作图法得到累积通过百分率为 90% 时颗粒粒径为  $115.84 \mu\text{m}$ , 即  $d_{90} = 115.84 \mu\text{m}$ , 取土工织物有效孔径  $O_{90}$  与颗粒尺寸分布曲线的  $d_{90}$  相等, 即  $O_{90} = d_{90} = 115.84 \mu\text{m}$ 。

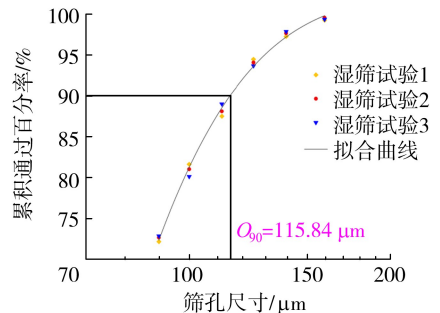


图 2 颗粒材料的累积通过百分率曲线

### 3.2 低场核磁共振测量结果

利用 CPMG 序列对土工织物饱水试样内部孔隙水的氢质子群重复施加  $180^\circ$  脉冲, 使其产生一系

列自旋回波串衰减数据,经反演转换为信号强度与弛豫时间  $T_2$  的分布曲线(图 3(a))。由于非织造土工织物内部孔隙通道类似毛细管束型,孔隙形状尺寸系数  $F_s$  取 2.0;根据构建的适用于非织造土工织物的表面弛豫率预测模型,预测  $\rho$  值为  $10 \mu\text{m/s}$ ,结合式(1)得到孔径分布百分率与孔口直径关系曲线(图 3(b))。依据孔隙度定义,结合孔径分布曲线计算所有不同尺寸孔径所对应的占比总和作为非织造土工织物的孔隙度。

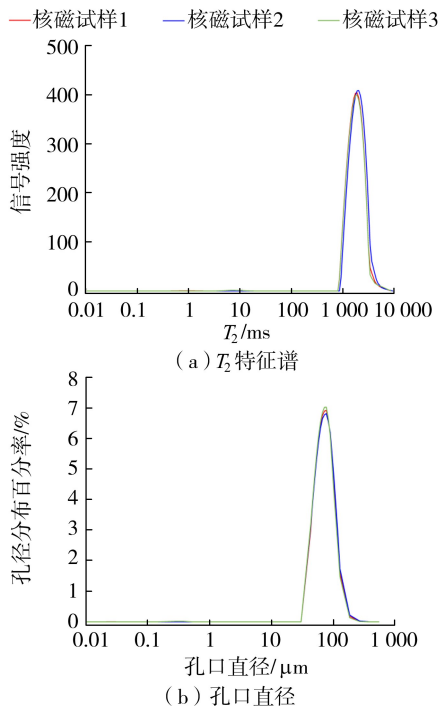


图 3 非织造土工织物  $T_2$  特征谱和孔口直径分布曲线

湿筛法中  $O_{90}$  定义为 90%的颗粒材料通过土工织物的孔径尺寸,转变到核磁测量的孔口直径分布中  $O_{90}$  即 90%孔径的尺寸均小于该孔口直径。3 个样品的有效孔径为 106.37、107.59、104.63  $\mu\text{m}$ ,以此计算得到核磁试样有效孔径  $O_{90}$  均值为 106.20  $\mu\text{m}$ 。

### 3.3 低场核磁共振成像结果

低场核磁共振测量分析后,利用纽迈低场核磁共振成像软件 V3.0 对针刺非织造土工织物饱水试样进行成像。采用 3DSE 序列对每个核磁试样整体激励 3.50 mm 层厚,选择在试样上、下层厚 0.25 mm 之间均匀无间隔切割 3 层图像,层厚 1.00 mm,图像以 .dcm 格式储存,经图像处理软件导出每个核磁试样的 3 组 K 空间原始数据并取均值,绘制伪彩图,如图 4 所示。伪彩图中颜色不同代表信号强度不同,颜色越深表示信号越强,孔隙分布越稠密;颜色越浅表示信号越弱,孔隙分布越稀疏。核磁试样 2 颜色相对较深,核磁试样 1 次之,核磁试样 3 颜色最

浅,说明核磁试样 2 的信号强度高于另外 2 个试样,即试样内部孔隙分布密集。

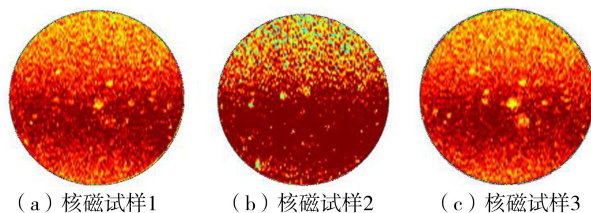


图 4 非织造土工织物饱水试样伪彩图

为验证低场核磁共振测量数据反演得到  $T_2$  特征谱和孔径分布曲线所假定的孔隙尺寸系数与表面弛豫率预测值在非织造土工织物核磁共振测量中的适用性,本文结合 Python 程序利用加权平均法将核磁伪彩图像灰度化,运用高斯滤波法对灰度图进行去噪,遍历各像素点并统计其 RGB 占整图 RGB 总量的比例,输出统计表格并以 .xls 格式存储,结合低场核磁共振成像原理设定 RGB 从  $[0,0,0]$  至  $[32,32,32]$  之间的像素点位置孔隙信号强度为零,即不存在孔隙,其余 RGB 组合均为不同尺寸孔隙的原则,对 3 个核磁试样的图像进行多次识别统计,得出 3 个核磁试样的孔隙度分别为 86.25%、87.39%、86.05%(表 1),最大差值为 1.34%,核磁共振测量测得 3 个试样的孔隙度分别为 87.24%、87.91%、87.14%,最大差值为 0.77%,两者吻合度较高。这表明经核磁共振测量数据反演成  $T_2$  特征谱和孔径分布曲线时,孔隙尺寸系数假定值与表面弛豫率预测值适用于针刺织造土工织物有效孔径测定,验证了低场核磁共振技术测定针刺非织造土工织物有效孔径的准确性。

表 1 Python 程序像素点占比识别数据

像素点 RGB 范围	占比/%		
	核磁试样 1	核磁试样 2	核磁试样 3
$[0,0,0] \sim [32,32,32]$	13.75	12.61	13.95
$[33,33,33] \sim [64,64,64]$	0.44	0.74	0.46
$[65,65,65] \sim [96,96,96]$	1.03	1.21	0.64
$[97,97,97] \sim [128,128,128]$	1.34	1.28	1.01
$[129,129,129] \sim [160,160,160]$	1.47	1.72	1.32
$[161,161,161] \sim [192,192,192]$	1.64	1.83	1.54
$[193,193,193] \sim [224,224,224]$	1.87	2.08	1.87
$[225,225,225] \sim [255,255,255]$	78.46	78.53	78.21
$[33,33,33] \sim [255,255,255]$	86.25 <sup>a</sup>	87.39 <sup>a</sup>	86.05 <sup>a</sup>

注:<sup>a</sup> 表示核磁试样孔隙度。

### 3.4 结果分析

图 5 为低场核磁和湿筛试样孔径分布累积百分率与孔径的分布趋势,湿筛法曲线整体低于低场核磁共振曲线。3 个核磁试样在孔径尺寸为  $0 \sim 32.04 \mu\text{m}$  时累积百分率为零;在孔径尺寸为  $32.04 \sim 169.31 \mu\text{m}$  时曲线呈大幅上升趋势,累积百

分率从 0.33% 增至 99.52%; 在孔径尺寸为 169.31~720.00  $\mu\text{m}$  时曲线趋于水平, 累积百分率逐渐趋于 100%。湿筛试样孔径在 90~160  $\mu\text{m}$  之间时累积通过百分率为 72.50%~99.30%, 曲线整体呈先大幅上升后逐渐变缓趋势, 与 3 个核磁试样在孔径 32.04~169.31  $\mu\text{m}$  之间曲线走势基本吻合。

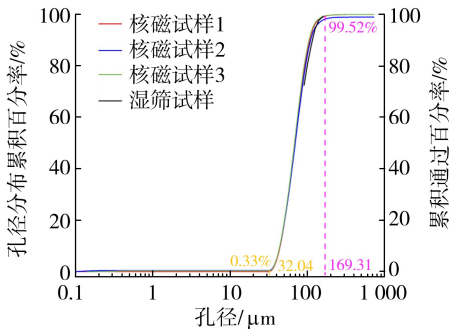


图5 累积百分率与孔口直径关系曲线

由于湿筛试验测定有效孔径所用标准颗粒粒径局限于 45~710  $\mu\text{m}$  之间, 湿筛法只能测量分布在该区间内的有效孔径, 而低场核磁共振技术以  $^1\text{H}$  为探针, 可测量从原子至毫米级之间所有孔隙大小及分布, 故低场核磁共振技术可全面测量土工织物的孔径分布, 更精准测定其有效孔径。

通过作图法在图 5 中获取湿筛试样和核磁试样的平均有效孔径  $O_{80}$ 、 $O_{85}$ 、 $O_{90}$  和  $O_{95}$ , 结果见表 2。由表 2 可知, 湿筛法和低场核磁共振技术测得的有效孔径  $O_{80}$ 、 $O_{85}$ 、 $O_{90}$  和  $O_{95}$  差值分别为 7.11、8.72、9.62、8.96  $\mu\text{m}$ , 湿筛法得到的有效孔径皆高于低场核磁共振技术测量成果。这是由于湿筛法在测量过程中使用的标准颗粒材料的粒径是范围值, 且某一范围值内粒径分布存在一定的不均匀性, 此外, 针刺非织造土工织物中聚酯纤维网排列错综复杂, 土工织物内部孔隙通道各层尺寸大小不一, 试验过程中大颗粒被卡在土工织物的孔隙通道中, 小颗粒无法及时顺利通过, 造成土工织物孔隙淤堵, 降低了颗粒材料通过率, 最终使得湿筛法相较于核磁测量方法得出的累积曲线整体下移, 有效孔径偏大。

表 2 不同试验方法有效孔径对比 单位:  $\mu\text{m}$

试验方法	$O_{80}$	$O_{85}$	$O_{90}$	$O_{95}$
湿筛法	98.93	106.74	115.84	128.09
低场核磁共振	91.82	98.02	106.22	119.13

依据低场核磁共振分析与湿筛试验所得的孔径分布累积百分率与孔径关系的数据点, 分别拟合出孔径分布累积百分率/累积通过百分率与孔口直径的曲线, 如图 6 所示, 决定系数  $R^2$  分别为 0.9998、0.9999。目前国内通常将有效孔径  $O_{90}$  作为评价指标, 确保土工织物具有良好的反滤、颗粒截留能力和

排水性能以满足工程要求。故本文选用  $O_{90}$  作为非织造土工织物的有效孔径, 其值为 106.20  $\mu\text{m}$ 。

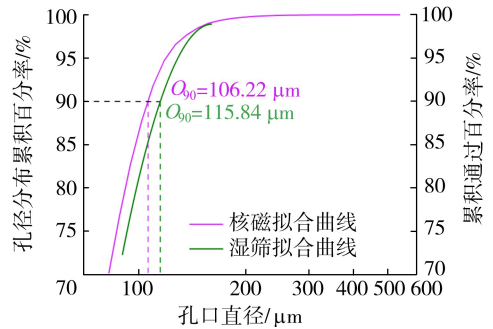


图 6 累积百分率与孔口直径关系拟合曲线

## 4 结论

a. 低场核磁共振技术可精确测定非织造土工织物有效孔径, 试验流程简便、周期短、量测成果精准, 为非织造土工织物有效孔径测定提供了一种新方法。

b. 低场核磁共振成像技术可清晰地呈现针刺非织造土工织物孔隙分布, 验证了低场核磁共振测试方法的准确性。

c. Python 程序识别核磁图像像素点占比得到的孔隙度与核磁测量测得的孔隙度相近, 表明低场核磁共振测量技术测定非织造土工织物有效孔径  $O_{90}$  的准确性。

d. 运用低场核磁共振分析与成像时, 氢质子受外部磁场作用自旋产热, 使试样温度略升, 影响试验数据的可重现性, 后续可增设恒温装置保持测试温度的稳定, 提高量测数据准确性。

## 参考文献:

[1] Sabiri N E, Caylet A, Montillet A, et al. Performance of nonwoven geotextiles on soil drainage and filtration [J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2020, 24(5): 670-688.

[2] 张达德, 王淳, 方力. 塑料排水板加固软土地基失效案例分析 [J]. 岩土工程学报, 2020, 42(11): 2034-2039. (Chang T T, Wang C H, Fang Li. An unfunctional case of vertical drains-reinforced soft foundation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(11): 2034-2039. (in Chinese))

[3] 徐超, 柴菲, 刘若彤, 等. 无纺布过滤黏土的梯度比试验及机理研究 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2018, 46(3): 227-233. (Xu Chao, Chai Fei, Liu Ruotong, et al. Gradient ratio tests and filtration mechanism of cohesive soil-geotextile system [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(3): 227-233. (in Chinese))

[4] Hosney M S, Rowe R K. Changes in geosynthetic clay liner

- (GCL) properties after 2 years in a cover over arsenic-rich tailings[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2013, 50(3):326-342.
- [5] 朱朝荣,束一鸣,姜俊红,等. 管袋堤坝在水流作用下的稳定性模型试验[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2008,36(3):333-336. (Zhu Chaorong, Shu Yiming, Jiang Junhong, et al. Experiment on the stability of geotube embankments in river current [J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2008,36(3):333-336. (in Chinese))
- [6] 姜红,雷国辉,杨明昌. 土工织物垂直渗透特性的研究进展[J]. *水利水电科技进展*, 2014, 34(3):89-94. (Jiang Hong, Lei Guohui, Yang Mingchang. Research progress of vertical infiltration characteristics of geotextiles [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2014,34(3):89-94. (in Chinese))
- [7] 邱双,王智远. 有纺土工织物在软土地基中的应用[J]. *水利水电科技进展*, 2012, 32(增刊1):49-50. (Qiu Shuang, Wang Zhiyuan. Application of woven geotextiles in soft soil foundation [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2012,32(S1):49-50. (in Chinese))
- [8] Blond E, Veermersch O, Diederich R. A comprehensive analysis of the measurement techniques used to determine geotextile opening size: AOS, FOS,  $O_{90}$ , and ‘bubble point’ [C]//*Proceedings of the Geosynthetics 2015*. Portland:Geosynthetics, 2015.
- [9] 苏树清,吴伟俊. 土工织物有效孔径测定方法探讨[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(增刊1):156-159. (Su Shuqing, Wu Weijun. Determination methods for effective opening size of geotextiles [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(S1):156-159. (in Chinese))
- [10] Chen Yang, Deng Na, Xin Binjie, et al. Nonwovens structure measurement based on NSST multi-focus image fusion[J]. *Micron*, 2019, 123:102684.
- [11] Kothari V K, Agarwal G. Determination of pore size parameters and its distribution of hydroentangled fabrics by image processing[J]. *Journal of the Textile Institute*, 2008,99(4):317-324.
- [12] Li Keyi, Tang Xiaowu, Zhao Wenfang, et al. Microstructure characteristics of nonwoven geotextiles using SEM and CT methods [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2023, 51(2):293-302.
- [13] 王佳部. 基于数字图像技术的陆相页岩微观结构特征研究[D]. 西安:西安石油大学, 2020.
- [14] Zhao Yixin, Sun Yingfeng, Liu Shimin, et al. Pore structure characterization of coal by NMR cryoporometry[J]. *Fuel*, 2017, 190:359-369.
- [15] Yang Zairong, Zhao Yu, Wang Chaolin, et al. Pore structure and fractal analysis of coal subjected to multiple treatments based on nuclear magnetic resonance [J]. *Energy Science & Engineering*, 2022, 10(8):2842-2849.
- [16] 方锐. 四川盆地凉高山组页岩储层成储机制与流体赋存状态研究[D]. 成都:西南石油大学, 2024.
- [17] Zhou Yuan, Wu Zhijun, Weng Lei, et al. Seepage characteristics of chemical grout flow in porous sandstone with a fracture under different temperature conditions: an NMR based experimental investigation [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, 142:104764.
- [18] 田佳丽,王惠民,刘星星,等. 考虑不同尺度孔隙压缩敏感性的砂岩渗透特性研究[J]. *岩土力学*, 2022, 43(2):405-415. (Tian Jiali, Wang Huimin, Liu Xingxing, et al. Study on permeability characteristics of sandstone considering pore compression sensitivity at different scales [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(2):405-415. (in Chinese))
- [19] Zhang Chaoyang, Liu Taoying, Jiang Chong, et al. The freeze-thaw strength evolution of fiber-reinforced cement mortar based on NMR and fractal theory: considering porosity and pore distribution [J]. *Materials*, 2022, 15(20):7316.
- [20] Ning Lin, Zhao Yu, Bi Jing, et al. Effect of aggregate size on water distribution and pore fractal characteristics during hydration of cement mortar based on low-field NMR technology [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 389:131670.
- [21] 尹春杰,张宪雷. 基于低场核磁共振技术变形状态下PVC膜孔隙特征研究[J]. *水电能源科学*, 2022, 40(7):180-183. (Yin Chunjie, Zhang Xianlei. Study on pore characteristics of PVC geomembrane under low field NMR deformation [J]. *Water Resources and Power*, 2022, 40(7):180-183. (in Chinese))
- [22] 徐国雷,张宪雷,马仲阳. 基于低场核磁共振技术面膜堆石坝中PVC膜渗透机理[J]. *水电能源科学*, 2022, 40(12):138-142. (Xu Guolei, Zhang Xianlei, Ma Zhongyang. Mechanism of PVC membrane permeation in face rock fill dam based on low-field NMR technology [J]. *Water Resources and Power*, 2022, 40(12):138-142. (in Chinese))
- [23] 张宪雷,尹春杰,马仲阳,等. 基于低场核磁共振技术PVC-P土工膜细观渗透机理研究[J]. *岩土工程学报*, 2024, 46(4):880-889. (Zhang Xianlei, Yin Chunjie, Ma Zhongyang, et al. Micropermeation mechanism of PVC-P geomembranes by low-field NMR technology [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2024, 46(4):880-889. (in Chinese))
- [24] Lawal L O, Adebayo A R, Mahmoud M, et al. A novel NMR surface relaxivity measurements on rock cuttings for conventional and unconventional reservoirs [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2020, 231:103605.

(收稿日期:2025-03-05 编辑:俞云利)

# 基于流量-水质 T-Copula 联合分布的赣江尾闾水系骨干河道氟化物水环境容量研究

杨 焯<sup>1,2</sup>, 褚克坚<sup>1,2,3</sup>, 秦 硕<sup>1,2</sup>, 叶福竹<sup>1,2</sup>, 顾 莉<sup>1,2,3</sup>

(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;  
3. 河海大学长江保护与绿色发展研究院)

**摘要:**为解析赣江尾闾水系骨干河道氟化物水环境容量的时空特征,引入 T-Copula 函数构建了基于流量-水质联合概率密度分布的不确定性水环境容量计算框架。以氟化物为目标污染物,解析了2024年不同时期赣江尾闾水系骨干河道的氟化物水环境容量分布特征,并基于修正 OAT 方法开展了敏感性分析。结果表明,全年各骨干河道均具有一定的水环境容量,但部分河道存在潜在的超容量风险;赣江尾闾水系干流段与北支渔业用水区分别具有最大、最小水环境容量期望值;不同时期尾闾水系水环境容量期望值呈现一定的往复波动情势;河流流量的季节性分异是造成尾闾水系氟化物水环境容量动态变化的关键驱动因素。

**关键词:**河道水环境容量;流量-水质联合概率密度;T-Copula 函数;氟化物;赣江尾闾水系

**Research on fluoride water environmental capacity in main channels of the lower Ganjiang River network based on joint distribution of flow rate with water quality using T-Copula model//Yang Xuan<sup>1,2</sup>, Chu Kejian<sup>1,2,3</sup>, Qin Shuo<sup>1,2</sup>, Ye Fuzhu<sup>1,2</sup>, Gu Li<sup>1,2,3</sup> (1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University; 2. College of Environment, Hohai University; 3. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University)**

**Abstract:** To analyze the spatiotemporal characteristics of the fluoride water environmental capacity in the main channels of the lower Ganjiang River network, the T-Copula function was introduced to construct an uncertainty water environmental capacity calculation framework based on the flow rate-water quality joint probability density distribution. Taking fluoride as the target pollutant, the distribution characteristics of the fluoride water environmental capacity in the main channels of the lower Ganjiang River network during different periods in 2024 were analyzed, and a sensitivity analysis was conducted based on the modified one-variable-at-a-time (OAT) method. The results indicate that all main channels possess a certain water environmental capacity throughout the year, although some channels face a potential risk of exceeding this capacity. The highest and lowest expected values of water environmental capacity were observed in the mainstream section of the lower Ganjiang River network and the northern branch's fishery water use zone, respectively. The expected values of the water environmental capacity in the river network during different periods exhibit a certain fluctuating pattern. The seasonal variation in river flow is identified as the key driving factor causing the dynamic changes in the fluoride water environmental capacity in the lower river network.

**Key words:** river water environmental capacity; flow rate-water quality joint probability density; T-Copula function; fluoride; the lower Ganjiang River network

随着城市化进程的不断加快和经济社会的快速发展,水资源供需矛盾日益尖锐,由此引发的环境压力日益凸显<sup>[1]</sup>。河流作为重要的水资源供给来源,其水质和生态状况直接影响着区域水安全和城市的可持续发展<sup>[2]</sup>。在推进污染物总量控制的大背景

下,对水环境容量的研究已成为学界关注的焦点<sup>[3-5]</sup>,其核算工作有利于区域环境质量评价工作的开展,并能促进区域水环境污染的综合防治和污染排放的合理布局<sup>[6]</sup>。赣江作为江西省的母亲河,承担着重要的水资源供应和生态保护功能,其尾闾水

**基金项目:**赣江下游尾闾综合整治工程科研课题研究项目(JXTC2023020257C1);国家自然科学基金长江水科学联合基金项目(U2040209);国家自然科学基金项目(51879078)

**作者简介:**杨焯(2001—),男,硕士研究生,主要从事水环境模拟与污染治理研究。E-mail:231305020030@hhu.edu.cn

**通信作者:**褚克坚(1976—),男,副教授,博士,主要从事水环境模拟与污染治理研究。E-mail:kejianc@hhu.edu.cn

系在为南昌市及周边区域供水的同时,也接纳了其排放的绝大部分污染物<sup>[7]</sup>。为判断水系河道污染物的容许接纳阈值,胡锋平等<sup>[8]</sup>调查了赣江南昌段的化学需氧量(COD)和氨氮(NH<sub>3</sub>-N)的污染负荷,并计算了相应的水环境容量;周刚等<sup>[9]</sup>对赣江下游河段的COD和NH<sub>3</sub>-N水环境容量进行了核算,给出了各控制断面的超标破坏段数以及各排污口的水环境容量方案;张丽凤<sup>[10]</sup>对赣江流域自赣州至赣江入湖口各河段的COD和NH<sub>3</sub>-N水环境实际容量与理想容量分别进行了核算。已有的河流水环境容量核算大多关注COD、氮、磷等水质指标<sup>[3-5,8-10]</sup>;而氟化物作为一种河流环境中广为检出的污染物质,因其高毒性和长期积累特性,对水生态系统与人体健康构成了不容忽视的威胁<sup>[11]</sup>。刘正芳<sup>[12]</sup>收集并分析了赣江上游8个水文站的氟化物水质监测数据,发现黄龙大桥断面氟化物质量浓度最大值为1 mg/L,达到Ⅲ类水质标准临界值,表明流域存在氟化物污染超标风险。尽管赣江流域部分河段已经存在氟化物容量不足的问题,但对其水环境容量的实质性研究迄今仍鲜见报道。因此,有必要深入探查河流氟化物水环境容量及其动态,为河流生态系统健康的维护与管控提供理论和数据支持。

以往河流水环境容量大多采用确定性方法进行核算,即以90%保证率或近10年最枯月平均流量作为设计流量,以河道实测目标污染物浓度作为设计背景浓度,计算得出确定性水环境容量<sup>[8,10]</sup>。事实上,受气候及人类活动等影响,上游来流流量、污染物浓度、降解系数等关键控制参数往往存在随机性,使水环境容量表现出一定的不确定性<sup>[3-5]</sup>。在赣江尾间水系工程上游区域,其骨干河道受闸控影响较弱,自然变异性较强,给水环境容量参数的计算带来了相当大的不确定性。因此,对赣江尾间水系开展考虑不确定性的水环境容量研究,不仅是科学严谨性的要求,更是实现有效环境管理、保障水生态安全的关键。

国内外学界对不确定性水环境容量开展了一系列研究,提出了蒙特卡罗<sup>[3-5]</sup>、盲数理论<sup>[13]</sup>、区间数法<sup>[14]</sup>等考虑不确定性的容量计算方法。其中,区间数法将计算参数用区间表示,进行区间运算以得到目标函数结果范围,适用于已知参数最值而不知其精确分布及概率的情况;盲数理论基于计算参数值的区间范围及对应可信度,借助隶属函数进行模糊运算来处理由于语言描述、信息缺失或主观判断带来的不确定性;而蒙特卡罗方法基于参数概率分布,通过大量随机抽样,估计目标函数结果分布。与其他不确定性分析方法相比,蒙特卡罗方法在量化客

观不确定性方面具有更高的精度、灵活性和准确性<sup>[15]</sup>,在河流水环境容量计算方面得到了广泛应用。例如:Liu等<sup>[3]</sup>采用蒙特卡罗方法对白溪水库流域的总氮与总磷水环境容量进行了不确定性核算;Li等<sup>[5]</sup>借助蒙特卡罗方法,开展了对太湖水系总氮与总磷水环境容量的核算工作。这些研究虽然考虑了流量、水质等关键控制参数的不确定性,却选择分别考察各项参数的随机分布状况,即假设参数间相互独立,但是对于河流系统,流量、水质之间往往具有显著非线性关联<sup>[16]</sup>。蒙特卡罗方法完全依赖于输入变量的分布情况,其本身无法处理流量与水质之间的相关性<sup>[17]</sup>,若将流量、水质参数分别以各自边缘分布的形式输入蒙特卡罗方法意味着忽略了流量与水质之间的统计相关性,而现实河道中流量变化将直接驱动河道水质同步发生改变。因此,选择不合理的输入分布可能会降低不确定性分析结果的可靠度,不可避免地制约了该方法的有效性与可靠性。

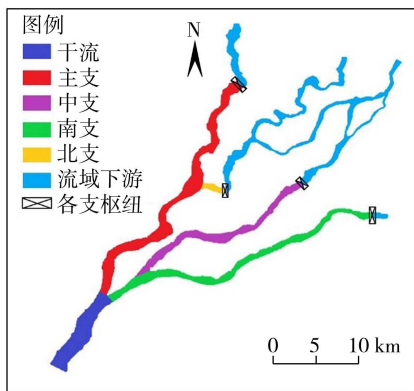
为进行更准确的不确定性分析,必须识别并恰当处理流量与水质参数之间的相关性,并构建流量、水质联合分布作为蒙特卡罗方法的输入分布。T-Copula函数<sup>[18]</sup>是基于Sklar定理提出的概率统计方法,其核心在于通过参数或非参数方法,针对随机变量间的依赖结构建模,并度量随机变量间的相关性特征<sup>[19]</sup>,灵活刻画变量间的非线性、非对称性等复杂依赖关系,能够有效处理水环境中多元随机变量之间的相关性,为构建流量与水质的联合分布提供有效框架<sup>[4,20]</sup>。为此,本文引入T-Copula函数构建河道流量-水质联合概率密度分布,提出了基于流量-水质联合概率密度分布的不确定性河流水环境容量计算方法,并以赣江尾间水系骨干河道为研究对象,以氟化物为目标污染物,计算了2024年不同时期骨干河道氟化物水环境容量的概率密度分布,解析了骨干河道水环境容量的时空动态特征,以期当地氟化物污染管控策略的制定与优化提供目标导向和理论支撑。

## 1 研究区概况

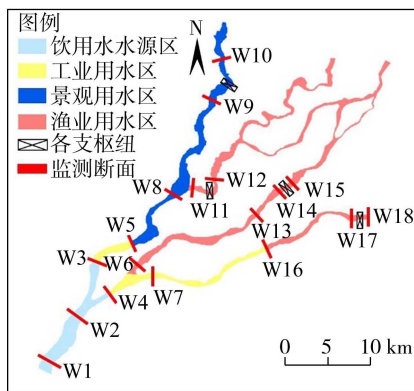
赣江是江西省最大的河流,也是长江主要支流之一,位于长江中下游南岸,源出赣闽边界武夷山西麓,自南向北纵贯江西全省,有13条主要支流汇入。赣江全长766 km,流域面积83 500 km<sup>2</sup>,其下游横穿南昌市境内。赣江尾间水系干流在八一大桥处分为东河和西河,东河在蛟溪头分为中支与南支;西河下游为主支,在樵舍分汊出北支,随后众多分支均汇入下游鄱阳湖。本文研究区域是指从南昌市生米大桥

到赣江各支流所建尾间工程所包含的河段,全长 106.3 km,包含了尾间水系的干流、主支、北支、中支及南支的部分河段。

赣江尾间水系干流及支流划分如图 1(a)所示,各支枢纽工程位置、水功能区划分如图 1(b)所示。研究区域包括干流至各支流枢纽上游骨干河道,共分布有四种水功能区。分别于 2024 年 3 月、5 月、7 月、10 月及 12 月开展赣江尾间水系河道水质原位监测工作,共布设 18 个监测断面。监测断面位置示意图 1(b),断面名称与经纬度坐标见表 1。其中,W1、W3 与 W4 断面所截河道为饮用水水源区,面积约 17 km<sup>2</sup>,执行Ⅲ类水质标准,根据分支情况将该区域划分为 W1—W2 断面的干流段饮用水水源区、W2—W3 断面的西河饮用水水源区、W2—W4 断面的东河饮用水水源区三大计算河段。W3—W5 断面(主支工业用水区)、W4—W7 断面(东河工业用水区)、W7—W16 断面(南支工业用水区)为工业用水区,河道面积分别为 2.3、3.2、2.5 km<sup>2</sup>,执行Ⅳ类水质标准。W5—W9 断面(主支景观用水区)为景观娱乐用水区,面积约 14.3 km<sup>2</sup>,执行Ⅲ类水质标准。W11—W12 断面(北支渔业用水区)、W6—W14 断面(中支渔业用水区)、W16—W17 断面(南支渔业用水区)均为渔业用水区,面积分别为 0.6、11.6、4.0 km<sup>2</sup>,执行Ⅲ类水质标准。



(a) 干流及支流划分



(b) 水功能区概化及水质监测断面布设

图 1 赣江尾间水系概况

表 1 赣江尾间水系水质监测点位

编号	断面名称	位置
W1	外洲水文站/国控生米	(28°62'N,115°83'E)
W2	八一大桥	(28°69'N,115°87'E)
W3	双港水厂	(28°74'N,115°89'E)
W4	城北水厂	(28°69'N,115°89'E)
W5	江豚观测点	(28°77'N,115°93'E)
W6	中支上游	(28°73'N,115°93'E)
W7	南支上游	(28°72'N,115°93'E)
W8	樵舍	(28°83'N,116°00'E)
W9	主支枢纽上游/鱼道	(28°95'N,116°04'E)
W10	主支枢纽下游/昌邑	(29°01'N,116°04'E)
W11	北支枢纽上游	(28°83'N,116°01'E)
W12	北支枢纽下游/蒋埠	(28°83'N,116°03'E)
W13	楼前	(28°79'N,116°07'E)
W14	中支枢纽上游/鱼道	(28°80'N,116°07'E)
W15	中支枢纽下游	(28°80'N,116°08'E)
W16	滁槎	(28°76'N,116°09'E)
W17	南支枢纽上游/省控吉里	(28°83'N,116°20'E)
W18	南支枢纽下游	(28°83'N,116°21'E)

## 2 研究方法

### 2.1 水环境容量计算方法

根据 DB32/T 4542—2023《河网水功能区水环境容量核定技术规范》,采用总体达标法计算水环境容量。总体达标法根据河网水功能区水质目标、设计水文条件及污染物综合降解系数,采用完全混合模型计算各时间和空间单元的水环境容量,经时间和空间求和得到河网区域水环境容量值。

### 2.2 T-Copula 联合分布构建与抽样

运用 T-Copula 函数<sup>[18]</sup>构建流量与水质联合分布,具体步骤是:①确定流量与水质各自的边际分布;②将流量与水质的原始样本通过概率积分变换转化为服从[0,1]区间均匀分布的序列;③引入 T-Copula 函数对变换后的数据进行拟合;④对拟合好的 T-Copula 联合分布进行随机抽样,生成大量符合联合特征的流量与水质样本;⑤通过边际分布的逆变换将样本还原到原始物理量尺度,从而获得流量与水质的联合抽样值。

### 2.3 蒙特卡罗抽样与模型参数设定

#### 2.3.1 蒙特卡罗方法

本文采用蒙特卡罗方法<sup>[21]</sup>对赣江尾间水系骨干河道的氟化物水环境容量进行不确定性核算。具体做法是,将大量基于流量与水质联合分布生成的抽样值输入水环境容量计算模型,从而获得水环境容量的概率分布特征。

#### 2.3.2 模型参数设定

##### 2.3.2.1 设计流量

根据以往经验,水文参数基本服从皮尔逊Ⅲ型

(P-Ⅲ型)分布。以多年流量监测数据作为初始数据对 P-Ⅲ型曲线进行参数估计,并基于优化适线法<sup>[22-23]</sup>得到最终的流量概率密度分布曲线,具体步骤是:①计算初始数据的样本均值、变差系数和偏态系数<sup>[24]</sup>;②计算 P-Ⅲ型分布的参数,包含形状参数 $\alpha$ 、尺度参数 $\beta$ 和位置参数 $\alpha_0$ ;③根据不同月的流量概率密度分布,使用蒙特卡罗方法进行随机抽样,并将多组抽样值作为水环境容量计算设计流量。

### 2.3.2.2 污染物监测浓度与水质标准

在水质监测过程中,各项步骤(如采样、保存、运输、仪器测量、数据记录等)均存在微小误差,导致水质监测值存在不确定性<sup>[25-26]</sup>。其中,采样过程带来的不确定性通常呈现对数正态分布特征<sup>[25]</sup>,分析过程带来的不确定性则呈现正态分布特征<sup>[26]</sup>,水质监测值的不确定性往往是多误差叠加的结果。在许多研究中,通常假定监测浓度适用对数正态分布,而 Van Buren 等<sup>[27]</sup>对水体中 14 种污染物的监测浓度分布进行了研究,发现对数正态分布对可溶性成分分布拟合效果较差,而正态分布的拟合效果较好,氟化物为可溶性污染物,因此,选择正态分布作为氟化物监测浓度分布是更合理的。

正态分布通常由均值与标准差两项参数决定,以往研究指出,对于那些未收集到大量数据的水质参数可以假定其单一监测值为均值,且变异系数约等于该值的 10%<sup>[28]</sup>。本文综合考虑监测过程中引入的不确定性大小以及水质参数取样范围的合理性,选择以氟化物质量浓度的实测值作为均值,以其 5%作为标准差构建正态分布。该设定反映了监测过程可能产生的有限偏差,同时确保抽样值主要分布在均值附近,避免出现较多极端值,使所得水质分布更符合实测数据特征,从而获得更贴近实际的水环境容量分布。

河流各计算单元的水质目标值由该河段的水功能区划确定,根据不同水功能区划的水质标准,结合 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》,获得河流各计算单元的水质目标值。

### 2.4 参数敏感性分析

采用修正 OAT(one-variable-at-a-time)方法<sup>[29]</sup>对水环境容量计算模型的各项参数的敏感度进行测试。其基本思路是,对水环境容量计算模型的流量或水质参数引入一定程度的扰动(通常取 10%<sup>[30-31]</sup>),计算扰动对计算结果的影响程度,以此作为该参数对计算模型的敏感度。由于传统 OAT 方法仅适用于单一自变量指标的波动情形<sup>[31]</sup>,而本文所建模型的自变量为流量或水质参数抽样值组成的数据集,某一参数扰动即对该参数抽样数据集中

所有元素均引入 10%的变化。为此,本文对传统 OAT 方法进行改进,引入范数来量化参数抽样数据集扰动下氟化物水环境容量数据集的变化水平,具体计算公式为:

$$S_Q = \frac{\|W_{1.1} - W_{0.9}\| / 0.2 \|W\|}{(Q_{1.1} - Q_{0.9}) / 0.2 \|Q\|} \quad (1)$$

$$S_C = \frac{\|W_{1.1} - W_{0.9}\| / 0.2 \|W\|}{(C_{1.1} - C_{0.9}) / 0.2 \|C\|} \quad (2)$$

式中: $S_Q$ 、 $S_C$ 分别为流量与水质参数的敏感度; $W_{1.1}$ 、 $W_{0.9}$ 分别为将对应参数抽样值提高、降低 10%得到的水环境容量计算结果数据集; $Q_{1.1}$ 、 $Q_{0.9}$ 分别为将流量抽样值提高、降低 10%得到的流量抽样值数据集; $C_{1.1}$ 、 $C_{0.9}$ 分别为将水质抽样值提高、降低 10%得到的水质抽样值数据集; $W$ 、 $Q$ 、 $C$ 分别为水环境容量、流量、水质初始计算结果或抽样值数据集。

## 3 结果与分析

### 3.1 不确定性氟化物水环境容量核算参数分布

基于赣江尾间水系外洲水文站在三峡大坝蓄水后的流量监测数据(2004—2022年),以各年 3 月、5 月、7 月、10 月、12 月流量监测数据对 P-Ⅲ型分布进行参数估计,得到外洲站不同时期流量概率密度分布情况,以此作为赣江尾间水系干流段设计流量概率密度分布。而尾间工程干流下游分支众多,参考周苏芬等<sup>[32-33]</sup>对赣江尾间区域分流特征的研究结果,干流下游各分支设计流量由干流设计流量抽样值及各支流分流比计算获得。基于 2024 年 5 次氟化物质量浓度原位监测数据,对正态分布进行参数估计,得到各监测断面不同时期氟化物质量浓度概率密度分布情况。随后将外洲站流量概率密度分布与其氟化物质量浓度概率密度分布作为边际分布,基于 Sklar 定理与 T-Copula 函数计算公式,构建流量-氟化物质量浓度联合概率密度分布,结果见图 2。由图 2 可知,外洲站 2024 年 3 月联合概率密度峰值位于氟化物质量浓度为 0.245~0.255 mg/L、流量为 1500~2500 m<sup>3</sup>/s 处,表明 3 月外洲站流量及氟化物质量浓度以该组合出现的概率较大;5 月联合概率密度峰值出现在流量极端值附近,流量监测值常在 2000 m<sup>3</sup>/s 左右及 7000 m<sup>3</sup>/s 以上,对应氟化物质量浓度为 0.180~0.190 mg/L;7 月联合概率密度峰值位于氟化物质量浓度为 0.180~0.185 mg/L、流量为 500~5000 m<sup>3</sup>/s 处,说明该月河道氟化物质量浓度在全年中有较大概率相对较低,且该月流量分布范围相对较广;10 月外洲站氟化物质量浓度与流量的联合概率密度呈双峰分布,其峰值位于氟化物质量浓度为 0.300~0.320 mg/L、流量分别为

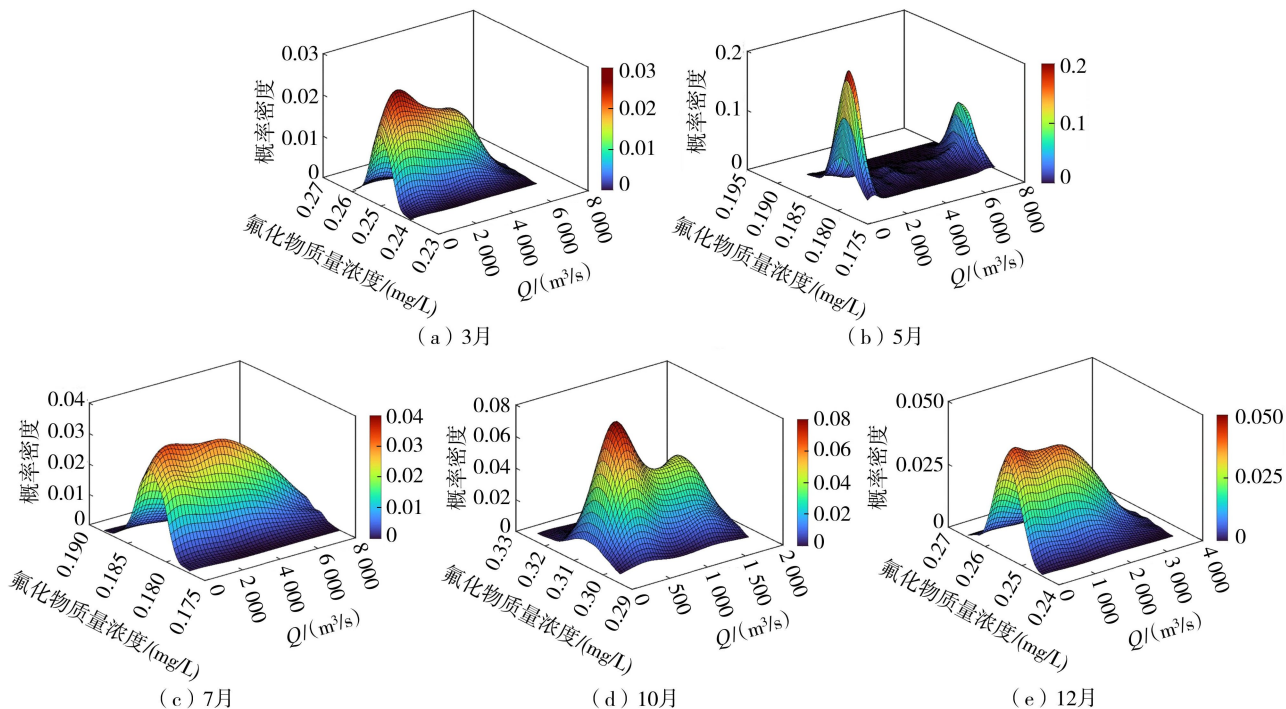


图2 外洲站流量-氟化物质量浓度联合概率密度分布

300~500 m<sup>3</sup>/s 及 1 300 m<sup>3</sup>/s 左右处;12 月联合概率密度峰值则位于氟化物质量浓度为 0.250~0.260 mg/L、流量为 500~2 000 m<sup>3</sup>/s 处,表明该月外洲站流量通常小于 2 000 m<sup>3</sup>/s,且常年流量数据相对稳定。

总体上看,3 月、7 月及 12 月的联合分布表现为单峰形态,且概率密度集中,说明这几个月的流量与氟化物质量浓度之间存在相对固定的搭配关系,水质-流量组合的不确定性较弱,对应的水环境容量分布范围也较窄。相比之下,5 月与 10 月则呈现多峰特征,概率密度分散,说明这两个月水质-流量组合波动性较强,直接导致水环境容量计算结果的上下限差距较大,表现出更强的不确定性。这可能与季节过渡期的水文特征有关:5 月处于春夏交替阶段,10 月处于秋冬交替阶段,降水过程波动显著,易造成流量在高值与低值区间的聚集,从而形成联合分布的双峰格局。

### 3.2 氟化物水环境容量动态变化

基于赣江干流、主支、北支、中支和南支的流量-氟化物质量浓度 T-Copula 联合概率密度分布,采用蒙特卡罗方法对联合分布进行随机抽样,得到流量及氟化物质量浓度抽样值。根据 DB32/T 4542—2023《河网水功能区水环境容量核定技术规范》得出氟化物日水环境容量,并换算得到月水环境容量。各骨干河道不同时期的概率密度分布见图 3,累积概率密度分布见图 4。

由图 3 和图 4 可知,各骨干河道在各时期均具

有较高概率具备水环境容量。2024 年氟化物水环境容量在空间上表现出明显差异,总体呈现北支最小,中支次之,干流显著高于中支,而南支与主支水环境容量相近且整体处于较高水平的分布格局。氟化物水环境容量在时间上总体呈现出 3—5 月先有所上升,后持续下降至 10 月最低值,随后又在 12 月有所回升的波动情势。主支和南支在 5 月具有相对较高的氟化物水环境容量,这可能与 5 月河道流量较大有关,且赣江尾间水系主支与南支均分布有工业用水区,其相对较低的水质要求(执行 IV 类水质标准)也导致其具有更大的氟化物水环境容量。

值得注意的是,从图 3 可以看出,仍有部分河道在特定时期存在超容量风险。部分河道氟化物水环境容量概率密度函数曲线在水环境容量为零处截断,表明其有概率不具备水环境容量。其中,干流、北支和中支存在较高的超容量风险,尤其是在 10 月和 12 月,这可能是因为这两月河道流量较低,且以上 3 个河道水功能区为饮用水水源区或渔业用水区,均执行 III 类水质标准,对氟化物质量浓度要求相对严格。

### 3.3 氟化物水环境容量时空分布特征

为进一步分析氟化物水环境容量的空间分布与时间动态特征,对各功能区河段水环境容量概率密度分布期望值进行计算。

图 5 为尾间水系骨干河道各水功能区河段氟化物水环境容量期望值空间分布特征箱线图。总体上看,各河段氟化物水环境容量期望值存在明显的空

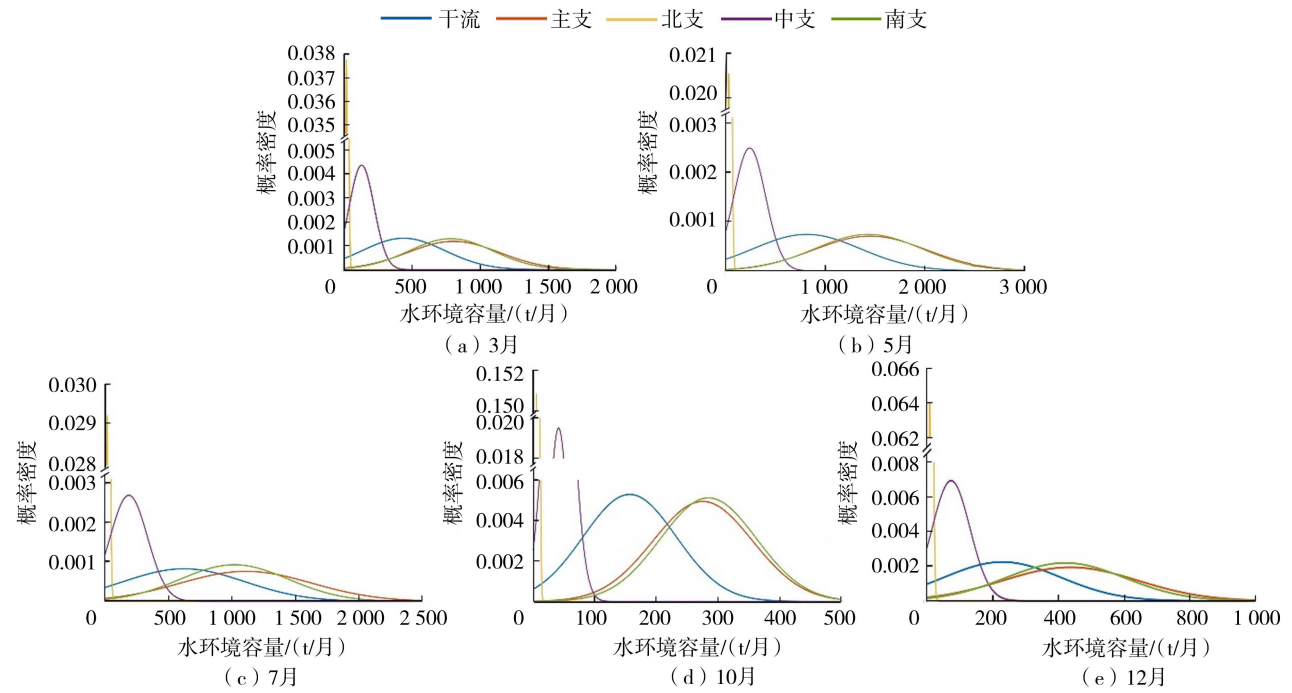


图3 各骨干河道不同时期氟化物水环境容量概率密度分布

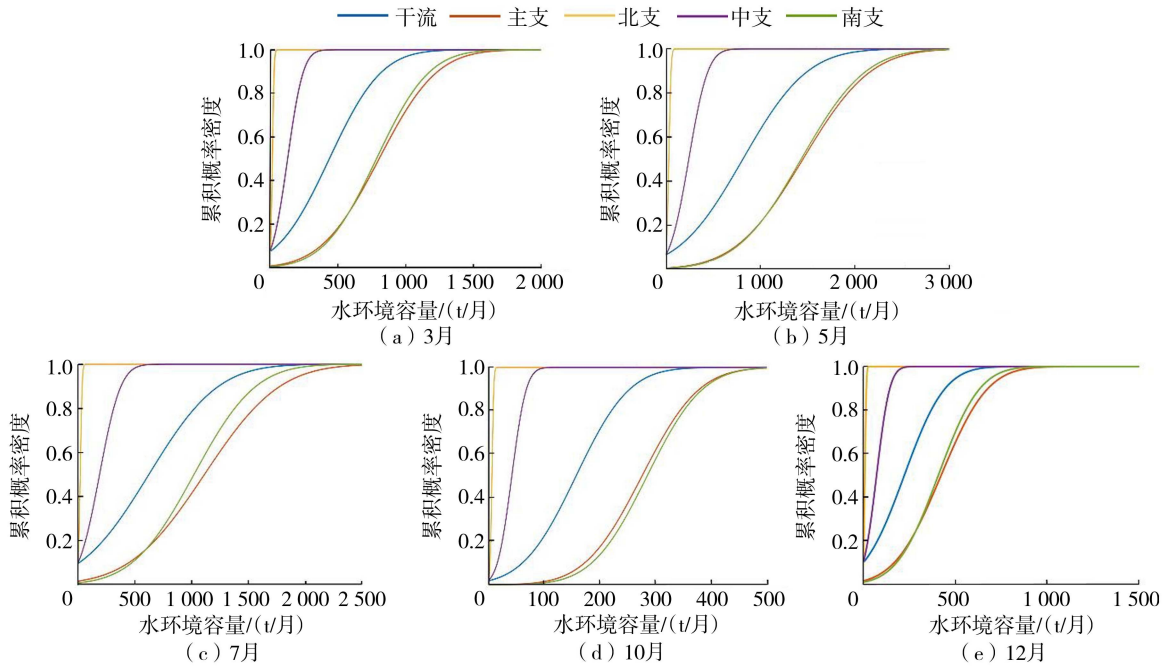


图4 各骨干河道不同时期氟化物水环境容量累积概率密度分布

间差异,整体表现为北支渔业用水区最小,南支渔业用水区略高于北支;南支工业用水区与中支渔业用水区水环境容量相近,且均高于前两者;东河饮用水水源区、主支景观用水区与西河饮用水水源区水环境容量基本相当,并进一步增大;主支工业用水区与东河工业用水区水环境容量相近,且高于前述各功能区;赣江干流段水环境容量最大,显著高于其他所有功能区。这一排序清晰地反映了氟化物水环境容量在尾闾水系各河段的空间分异规律。值得注意的是,尽管赣江干流段与北支渔业用水区全年氟化物物质

量浓度未见显著差异,但前者水环境容量期望值(157.35~822.92 t/月)达到后者(5.85~29.46 t/月)的27.1~33.5倍。

图6为各水功能区河段氟化物水环境容量期望值在2024年不同时期的动态变化特征。各水功能区河段氟化物水环境容量的时变过程基本一致,总体呈3—5月上升,而后持续下降至10月、12月有所回升的振荡波动情势。其中,5—10月全流域整体氟化物水环境容量变化幅度最大,10月水环境容量各河段平均期望值(枯水期,765.29 t/月)约为

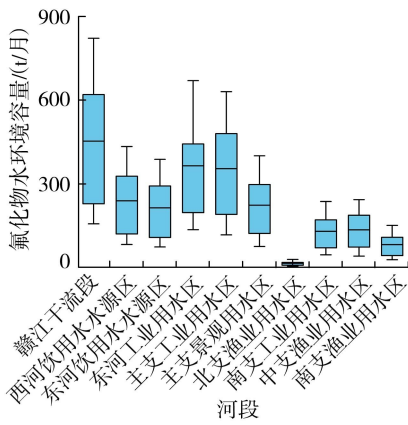


图5 各水功能区河段氟化物水环境容量期望值空间分布特征箱线图

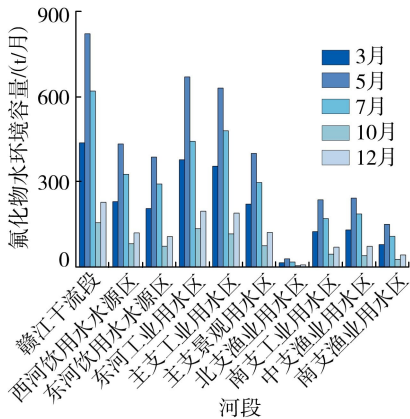


图6 各水功能区河段氟化物水环境容量期望值时间动态特征

5月(丰水期,4011.43 t/月)的19.1%;中支渔业用水区降幅最高,10月水环境容量各河段平均期望值(41.14 t/月)仅为5月(243.83 t/月)的16.9%。

结合研究区域实际情况来看,其骨干河道氟化物水环境容量的时间动态变化特征可能受降雨量、气温、区域污染物点源和面源排放等因素的综合影响。其中,南昌气象站所收集的1993—2022年各月实测降水与气温数据的季节性变化显著,降水量由低到高排序为:秋季(9—11月)、冬季(12月至次年2月)、春季(3—5月)、夏季(6—8月),同时相关研究月份气温呈现出3—7月连续上升,后持续下降至12月最低值的变化情势;长三角地区氟化物污染物排放主要源于工业企业,特别是光伏及半导体企业的废水点源排放<sup>[34]</sup>,各时期工业废水排放强度主要与生产计划有关<sup>[35]</sup>;区域城市用水强度在7—10月相对较高,其他时期则相对较低<sup>[36-37]</sup>。

2024年3月区域陆续开展春耕工作<sup>[38]</sup>,含氟化肥和农药的使用量随着农业活动的增强而增加,且区域3月降水量处于全年较高水平,迫使河道接受更多的氟化物农业面源污染。同时,该月河道流量高于冬季而低于夏季,虽氟化物农业污染入河量相

对其他时期较高,但该月河道氟化物水环境容量相对高于10月与12月,低于5月与7月;5—7月区域逐渐过渡到夏季,农业活动有所减弱,城市用水量逐渐增加<sup>[36]</sup>,同时受季风气候影响,降水量与气温在该时期逐渐提升,大量降水使得城市氟化物面源入河量有所增加,也为河道带来大量流量,加速了河道氟化物污染物的迁移扩散行为,而气温的提升也促进了氟化物污染物的生物转化过程,综合使得5月与7月的河道具有全年最大的氟化物水环境容量;10月与12月区域进入秋冬季节,该时期降水量与气温相对较低,虽然城市与农村面源也相对较少,但河道流量、水位、流速都相对较低,氟化物污染物在河道中聚集且难以迁移至下游,再加上生物转化过程逐渐受限,使得该时期氟化物水环境容量远低于春夏两季。

### 3.4 水环境容量动态变化关键驱动因子

赣江尾间工程各骨干河道流量及水质的敏感度计算值见表3。其中,各支流量参数敏感度介于0.629~0.908之间,干流流量参数敏感度最高;各支水质参数敏感度介于0.182~0.296之间,北支水质参数敏感度最高。总体上看,流量敏感度平均值为0.722,水质敏感度平均值为0.240,前者约为后者的3.01倍,说明尾间水系中驱动氟化物水环境容量动态变化的关键因素为河道流量。流量扰动通过改变河道的水动力条件和稀释扩散能力,直接驱使水环境容量发生改变:当流量增加时,河道稀释能力增强、紊动加剧,污染物混合效率提升,从而显著提高了水体自净能力,水环境容量也有所提升;流量减少时,稀释效应减弱,水环境容量相应缩减。水质则主要通过改变水体的剩余承载空间来驱动水环境容量变化:当污染物浓度上升时,河流可容纳的新增污染量迅速下降,水环境容量随之下降;当污染物浓度降低时,水体可容纳污染物余量增加,水环境容量相应提升。相较流量扰动,水质的扰动往往不能完整地作用到水环境容量,导致水环境容量对水质变化的敏感度较低,这可能与工业排放特征及氟化物在河道中的转化过程有关。其中,工业污染排放具有相对稳定和连续的特征<sup>[35]</sup>,受稳定的流量与排放源影响,一段时间内河道会形成相对稳定的浓度场。当某断面水质被引入扰动时,污染物仍在持续输入,同时污染物在河道中的迁移扩散过程会对水质局部扰动产生削弱和平滑作用,使得断面水质逐渐趋于原有水平,从而直接导致水环境容量计算结果未发生较大改变。而在短时间尺度内,氟化物的去除或转化过程(如沉淀、吸附)对其浓度的影响有限,远

不及流量带来的迁移扩散过程的影响。

表 3 各骨干河道流量与水质参数敏感度

参数	干流	主支	北支	中支	南支
流量	0.908	0.680	0.714	0.629	0.680
水质	0.182	0.290	0.296	0.251	0.182

## 4 结 论

a. 各骨干河道全年均具有一定的氟化物水环境容量,但部分河道存在潜在的超容量风险。其中,北支水环境容量最小,中支次之,干流显著高于中支,而南支与主支水环境容量基本持平且相对高于其他河道。

b. 空间上,赣江尾闾水系干流段与北支渔业用水区分别具有最大、最小氟化物水环境容量期望值;时间上,不同时期尾闾水系水环境容量期望值呈现一定的往复波动情势,总体呈 3—5 月上升、而后持续下降至 10 月、12 月有所回升的振荡波动情势。

c. 敏感度计算结果显示流量参数敏感度显著高于水质参数,表明河流流量的季节性分异是造成尾闾水系氟化物水环境容量动态变化的关键驱动因素。

## 参考文献:

[ 1 ] Wang Shijun, Wang Dan, Yang Xianghua. Urbanization and its impacts on water environment in Tumen River Basin[J]. Chinese Geographical Science, 2002, 12(3): 273-281.

[ 2 ] 范中亮,王剑楠,许佳,等. 浅析水环境对城市可持续发展的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2009, 20(2): 83-86. (Fan Zhongliang, Wang Jiannan, Xu Jia, et al. Impact analysis of water environment on urban sustainable development[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2009, 20(2): 83-86. (in Chinese))

[ 3 ] Liu Ruimin, Sun Chengchun, Han Z X, et al. Water environmental capacity calculation based on uncertainty analysis: a case study in the Baixi watershed area, China [J]. Procedia Environmental Sciences, 2012, 13: 1728-1738.

[ 4 ] Li Jiaqi, Shen Zhenyao. Uncertainty analysis and economic value prediction of water environmental capacity based on Copula and Bayesian model: a case study of Yitong River, China[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 359: 121059.

[ 5 ] Li Ranran, Zou Zhihong. Water environmental capacity analysis of Taihu Lake and parameter estimation based on the integration of the inverse method and Bayesian modeling [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2015, 12(10): 12212-

12224.

[ 6 ] 夏青. 水环境容量[J]. 环境保护科学, 1981(4): 21-29. (Xia Qing. Water environmental capacity [J]. Environmental Protection Science, 1981(4): 21-29. (in Chinese))

[ 7 ] 刘文强, 郁达伟, 李昆, 等. 降雨特征对赣江南昌段河流断面不同水期的水质影响分析[J]. 环境工程, 2023, 41(8): 91-99. (Liu Wenqiang, Yu Weida, Li Kun, et al. Effects of rainfall characteristics on river water quality in different water periods: a case study of Nanchang section in the Ganjiang River [J]. Environmental Engineering, 2023, 41(8): 91-99. (in Chinese))

[ 8 ] 胡锋平, 侯娟, 罗健文, 等. 赣江南昌段污染负荷及水环境容量分析[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(12): 192-195. (Hu Fengping, Hou Juan, Luo Jianwen, et al. Analysis of pollution loading and water environmental capacity of Gan River in Nanchang [J]. Environmental Science & Technology, 2010, 33(12): 192-195. (in Chinese))

[ 9 ] 周刚, 雷坤, 富国, 等. 河流水环境容量计算方法研究 [J]. 水利学报, 2014, 45(2): 227-234. (Zhou Gang, Lei Kun, Fu Guo, et al. Calculation method of river water environmental capacity [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(2): 227-234. (in Chinese))

[ 10 ] 张丽凤. 赣江流域水污染物总量分配及控制方案研究: 以袁河为例[D]. 南昌: 南昌大学, 2010.

[ 11 ] Zuo Huan, Chen Liang, Kong Ming, et al. Toxic effects of fluoride on organisms [J]. Life Sciences, 2018, 198: 18-24.

[ 12 ] 刘正芳. 2007—2019 年桃江水水质变化及其驱动因子分析[D]. 赣州: 江西理工大学, 2021.

[ 13 ] 李如忠, 汪家权, 王超, 等. 不确定性信息下的河流纳污能力计算初探[J]. 水科学进展, 2003, 14(4): 459-463. (Li Ruzhong, Wang Jiaquan, Wang Chao, et al. Calculation of river water environmental capacity under unascertained information [J]. Advances in Water Science, 2003, 14(4): 459-463. (in Chinese))

[ 14 ] Parmele L H. Errors in output of hydrologic models due to errors in input potential evapotranspiration [J]. Water Resources Research, 1972, 8(2): 348-359.

[ 15 ] Papadopoulos C E, Yeung H. Uncertainty estimation and Monte Carlo simulation method [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2001, 12(4): 291-298.

[ 16 ] Zavareh M M J, Mahjouri N, Rahimzadegan M, et al. A drought index based on groundwater quantity and quality: application of multivariate copula analysis [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 417: 137959.

[ 17 ] Chang Chehao, Tung Y K, Yang J C. Monte Carlo simulation for correlated variables with marginal distributions [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994, 120(3): 313-331.

- [18] Demarta S, McNeil A J. The  $t$  copula and related copulas [J]. *International Statistical Review*, 2005, 73 (1): 111-129.
- [19] Sklar M. Fonctions de répartition à  $n$  dimensions et leurs marges [J]. *Annales de l'ISUP*, 1959, 8 (3): 229-231.
- [20] Li Jiaqi, Shen Zhenyao, Cai Jianying, et al. Copula-based analysis of socio-economic impact on water quantity and quality: a case study of Yitong River, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 859: 160176.
- [21] James F. Monte Carlo theory and practice [J]. *Reports on Progress in Physics*, 1980, 43 (9): 1145-1189.
- [22] 邢广军. P-III 曲线拟合软件的研发与应用 [J]. *水文*, 2009, 29 (2): 74-77. (Xing Guangjun. Development and application of P-III curve fitting software [J]. *Journal of China Hydrology*, 2009, 29 (2): 74-77. (in Chinese))
- [23] 金光炎. 论水文频率计算中的适线法 [J]. *水文*, 1990 (2): 1-6. (Jin Guangyan. On line fitting method in hydrologic frequency calculation [J]. *Journal of China Hydrology*, 1990 (2): 1-6. (in Chinese))
- [24] 慕平, 慕星. 经验频率公式的比较与选择 [J]. *人民黄河*, 2023, 45 (7): 48-51. (Mu Ping, Mu Xing. Comparison and selection of empirical frequency formulas [J]. *Yellow River*, 2023, 45 (7): 48-51. (in Chinese))
- [25] Ramsey M H, Ellison S L R. Combined uncertainty factor for sampling and analysis [J]. *Accreditation and Quality Assurance*, 2017, 22 (4): 187-189.
- [26] Thompson M, Howarth R J. The frequency distribution of analytical error [J]. *Analyst*, 1980, 105 (1257): 1188-1195.
- [27] Van Buren M A, Watt W E, Marsalek J. Application of the log-normal and normal distributions to stormwater quality parameters [J]. *Water Research*, 1997, 31 (1): 95-104.
- [28] Liu C, Bennett D H, Kastenber W E, et al. A multimedia, multiple pathway exposure assessment of atrazine: fate, transport and uncertainty analysis [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 1999, 63 (2): 169-184.
- [29] Cho E, Arhonditsis G B, Khim J, et al. Modeling metal-sediment interaction processes: parameter sensitivity assessment and uncertainty analysis [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2016, 80: 159-174.
- [30] Hamby D M. A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 1994, 32 (2): 135-154.
- [31] Lenhart T, Eckhardt K, Fohrer N, et al. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2002, 27 (9-10): 645-654.
- [32] 周苏芬, 黄志文, 唐立模, 等. 赣江尾间多级分汊河道分流影响因素及联动响应分析 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2019, 47 (2): 163-169. (Zhou Sufen, Huang Zhiwen, Tang Limo, et al. Analysis on influencing factors of flow diversion ratio and linkage response of multistage bifurcations in the Ganjiang River [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2019, 47 (2): 163-169. (in Chinese))
- [33] 陈珺, 嵇敏, 林江, 等. 赣江尾间河段水沙特性及河床演变 [J]. *水利水电科技进展*, 2012, 32 (3): 1-5. (Chen Jun, Ji Min, Lin Jiang, et al. Runoff-sediment characteristics and riverbed evolution of Ganjiang River sink [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2012, 32 (3): 1-5. (in Chinese))
- [34] 陈恒飞. 半导体行业废水中氟化物排放标准及处理技术分析 [J]. *广东化工*, 2024, 51 (17): 131-133. (Chen Hengfei. Emission standards and treatment of fluoride in semiconductor industry wastewater technical analysis [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2024, 51 (17): 131-133. (in Chinese))
- [35] Sun Chu, Li Baojie, Chen Lei, et al. An improved hourly-resolved atmospheric  $\text{NO}_x$  emission inventory of industrial sources based on Continuous Emission Monitoring System data: case of Jiangsu Province, China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 419: 138192.
- [36] 张誉, 徐巧, 刘志刚, 等. 沿海某城市居民生活用水趋势与特性研究 [J]. *城镇供水*, 2023 (1): 89-93. (Zhang Yu, Xu Qiao, Liu Zhigang, et al. Research on the trend and characteristic of water consumption in a coastal city [J]. *City and Town Water Supply*, 2023 (1): 89-93. (in Chinese))
- [37] 刘波, 汪紫薇, 王文鹏, 等. 我国城市用水效率关键指标时空格局分析 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2020, 48 (6): 534-541. (Liu Bo, Wang Ziwei, Wang Wenpeng, et al. Spatiotemporal characteristics analysis of major indicators of urban water use efficiencies over mainland China [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2020, 48 (6): 534-541. (in Chinese))
- [38] 刘华星, 李天荣. 江西发布春耕春播农事建议: 早稻大面积直播期安排在 4 月上中旬 [EB/OL]. (2024-03-07) [2025-09-05]. <https://www.jxcn.cn/system/2024/03/07/020421969.shtml>.

(收稿日期: 2025-03-31 编辑: 俞云利)

# 赣江尾间工程运行前后底栖动物群落结构演变特征

胡小飞<sup>1,2</sup>, 吴挺峰<sup>3</sup>, 燕文明<sup>3</sup>, 张奇<sup>3</sup>, 刘玉栋<sup>4</sup>, 周亚东<sup>3</sup>, 李皋翔<sup>3</sup>, 龚志军<sup>1</sup>

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所; 2. 中国科学院大学; 3. 河海大学水灾害防御全国重点实验室; 4. 江西省南昌市水文局)

**摘要:**为评估赣江尾间工程对赣江水生态系统的影响,对工程运行前后赣江尾间段干流及其下游四支支河(主支、北支、中支、南支)底栖动物开展了为期2年的监测,共记录底栖动物3门23属32种,并基于底栖动物完整性指数对监测结果进行了评价。结果表明:赣江尾间段动物群落以滤食性和耐污性软体动物为优势类群;空间分布上,主支及其坝前缓流区群落结构稳定、多样性较高,中支、北支、南支群落相对简单,生物完整性偏低;工程运行后,主支底栖动物的生物完整性最优,表现出较强的抗干扰能力,干流及北支、南支各监测点的底栖动物完整性指数也达到“无干扰”或“轻度干扰”状态,中支底栖动物群落变化较大,水生态系统受到重度干扰。

**关键词:**底栖动物;群落结构;完整性指数;赣江尾间工程

**Evolution characteristics of benthic macroinvertebrate community structure before and after operation of tail reach project of the Ganjiang River**//Hu Xiaofei<sup>1,2</sup>, Wu Tingfeng<sup>3</sup>, Yan Wenming<sup>3</sup>, Zhang Qi<sup>3</sup>, Liu Yudong<sup>4</sup>, Zhou Yadong<sup>3</sup>, Li Gaoxiang<sup>3</sup>, Gong Zhijun<sup>1</sup>(1. *Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences*; 3. *State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University*; 4. *Nanchang Municipal Hydrology Bureau of Jiangxi Province*)

**Abstract:** To evaluate the disturbance caused by the tail reach project of the Ganjiang River on the river's aquatic ecosystem, a two-year monitoring program was conducted on benthic macroinvertebrates within the main stem and its four downstream branches (the Main, North, Middle, and South branches). A total of 32 species belonging to 23 genera across 3 phyla were recorded. The ecological status was assessed using the benthic index of biotic integrity (B-IBI). The results indicated that the benthic community in the tail reach of the Ganjiang River was dominated by filter-feeding and pollution-tolerant mollusks. In terms of spatial distribution, the Main Branch and the slow-flowing areas upstream of the dam exhibited stable community structures and higher biodiversity. Conversely, the community compositions of the Middle, North, and South branches were relatively simple, characterized by lower biotic integrity. After the operation of the project, the Main Branch maintained the highest biotic integrity, demonstrating robust resistance to disturbance. Monitoring sites in the main stem, as well as the North and South branches, reached undisturbed or slightly disturbed status according to the B-IBI. However, the Middle Branch experienced significant shifts in community structure, indicating that its aquatic ecosystem was heavily disturbed by the project.

**Key words:** benthic macroinvertebrates; community structure; index of biotic integrity; tail reach project of the Ganjiang River

河流生态系统作为地球上最重要的淡水生态系统之一,在维持生物多样性、提供生态服务和支持人类社会发展等方面发挥着不可替代的作用<sup>[1]</sup>。健康的河流生态系统不仅有助于保障水资源供给,还在气候调节、水质净化及生物栖息地维持等方面发挥着关键作用<sup>[2]</sup>。然而,受全球气候变化与人类活动影响,河流生态系统正面临着前所未有的压力,表

现为水文情势改变、水质恶化和生物多样性下降等<sup>[3-4]</sup>。随着流域开发强度持续增加,水利工程在改善防洪、供水与航运条件的同时,也改变了水动力格局与水文连通性,从而引起河流生态系统的深层次响应<sup>[5]</sup>。

近年来,随着我国大中型流域水利工程相继投入运行,其对水生态系统的影响已成为生态水文学

**基金项目:**国家自然科学基金项目(41971047,42001028,42220104010);中央高校基本科研业务费专项资金项目(B240201015-2013)

**作者简介:**胡小飞(1997—),男,硕士研究生,主要从事河流水动力学及水生态研究。E-mail:xfhu@niglas.ac.cn

**通信作者:**吴挺峰(1981—),男,研究员,博士,主要从事湖库水动力学研究。E-mail:tfwu@niglas.ac.cn

研究的热点<sup>[6-9]</sup>。然而,目前针对工程运行前后水生生态系统响应机制的研究多侧重于响应迅速的浮游生物,从底栖生物视角揭示水生生态系统结构与功能变化的研究相对不足<sup>[10-11]</sup>。底栖动物作为淡水生态系统的重要生物类群,在物质循环和能量传递过程中发挥着关键作用<sup>[12-14]</sup>。不同类群的底栖动物对溶解氧、营养盐、底质结构及污染物具有差异化的生态耐受性,其群落组成和分布格局能够直观反映水体环境状况及其变化趋势<sup>[15-16]</sup>。相较于生命周期较短、响应迅速的浮游生物,底栖动物因生活史较长、迁移能力有限,在环境变化下往往无法主动回避不利条件,而是被动承受环境胁迫<sup>[17-18]</sup>。因此,其群落结构能够在较长时间尺度上整合并记录水体受扰与恢复的过程,成为反映生态系统长期变化的重要指示生物。基于这一特性,底栖动物被广泛应用于河流生态健康评估与人类活动影响监测<sup>[19-23]</sup>。

赣江尾间区域位于南昌市境内,承担着流域来水调蓄、污染削减与生态连通的重要功能,其水生态环境质量与物种多样性受多种因素的影响,包括水量分配不均、污染物排放、农业径流、采砂、工业废水以及过度开发等<sup>[24-27]</sup>。尾间工程的建设在改善城市水资源调控能力的同时,也显著改变了下游的水动力条件和沉积环境,可能导致底栖动物栖息地的重构及群落结构的演变。由于该区域同时受工程调控与人类活动双重影响,其生态系统变化特征复杂<sup>[28-30]</sup>,亟须基于长期监测数据开展系统的生态效应研究。

因此,本文以赣江尾间为研究对象,基于赣江尾间工程运行前后底栖动物监测数据,系统分析群落组成、结构特征及功能的时空演变规律,并以底栖动物为核心构建底栖动物完整性指数(benthic index of biotic integrity, B-IBI),从生物学视角评估工程运行对尾间水生生态系统的影响,以期揭示工程扰动下底栖动物群落演替的生态机制,阐明其生态指示意义,为赣江流域以及类似河流尾间地区的生态系统评估与管理提供参考。

## 1 研究区概况和数据来源

### 1.1 研究区概况

赣江是江西省第一大河流,也是鄱阳湖流域五大水系之首、长江八大支流之一。赣江发源于石城县洋地乡石寮崇(赣源崇),在流经丰城和南昌后,进入其尾间段。赣江干流在八一桥下游的扬子洲处分为东、西两河。西河在樵舍镇分为主支和北支,主支是赣江进入鄱阳湖和长江的主要通道,经昌邑后在吴城注入鄱阳湖,北支经蒋埠后在下堡村分为官

港河和沙汊河,分别在朱港和成新注入鄱阳湖。东河在礁矶头处分为中支和南支,中支经南新后在朱港注入鄱阳湖,南支经滁槎后在三江口处注入鄱阳湖。赣江尾间水系图见图1。

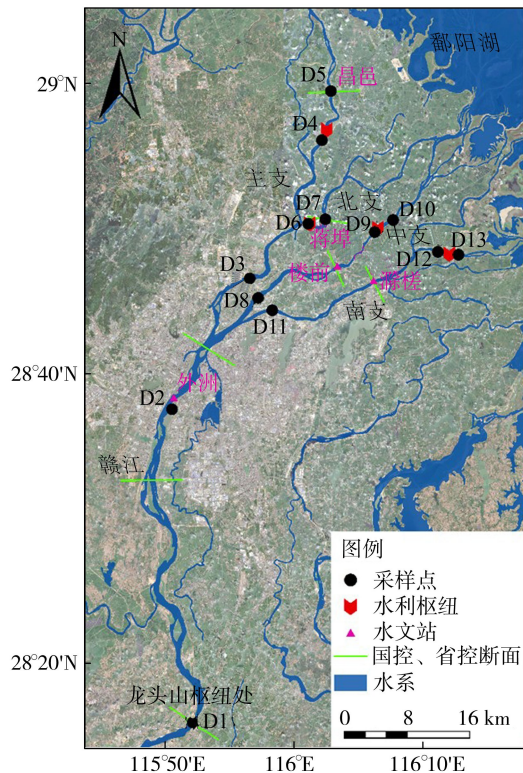


图1 赣江尾间段水系及采样点分布

赣江尾间段属于亚热带季风气候,气候温和,雨量丰沛,年平均气温 17.0~17.7℃。冬季多偏北风,夏季多偏南风,年平均风速为 2.3 m/s,多年平均降水量为 1600 mm。降水量年内分配极不均匀,主要集中在 4—6 月,约占全年降水量的 50%。外洲水文站是赣江下游尾间段的控制站,位于南昌市桃花乡外洲村上游。根据 1957—2022 年赣江外洲水文站实测数据,赣江尾间段流域表现出明显的季节性水文特征。汛期一般在 3—9 月,主汛期 4—7 月,洪峰多出现在 6 月。枯期在 10 月至次年 2 月,年最低水位一般出现在 1 月和 12 月。

近年来,随着人口增长、城市化进程加快以及水资源开发利用程度的提高,赣江流域面临着供水和航运保障能力不足、水质污染和水体富营养化等问题<sup>[31]</sup>。为抬高枯水期水位,优化水资源配置,提升河湖水域岸线景观品质,并改善航运及水资源利用条件,赣江尾间枢纽工程于 2024 年 9 月建成并投入运行。工程通过抬高并维持赣江南昌段枯水期水位至 15.5 m,提高了赣江南昌段供水和航运安全保障,大幅提升了枯水期水资源承载能力,改善了低枯流量时段以滕王阁为核心的水文化和水景观,但是也对其原有生态系统产生了扰动,亟须加以研究。

## 1.2 数据来源

根据赣江尾间段的地形地貌、水文特征和人类活动,在赣江尾间段的上游干流和下游四支汉河共布设 13 个底栖动物采样点(图 1 中的 D1~D13)。其中,D1 和 D2 位于尾间段干流,D3、D4、D5 分别位于主支上、中、下游,D6 和 D7 位于北支,D8~D10 位于中支,D11~D13 位于南支。

分别于 2024 年 8 月(丰水期)、2024 年 10 月(枯水期)、2025 年 3 月(平水期)、2025 年 8 月(丰水期)和 2025 年 10 月(枯水期)对底栖动物进行采集和分析。螺、蚌等较大型底栖动物用带网夹泥器采集;水生昆虫、水栖寡毛类和小型软体动物用改良彼得森采泥器采集。采集的泥样先用 40 目分样筛反复筛洗,带回实验室后在解剖镜下进一步分检,用显微镜进行观察鉴定与计数。

## 2 研究方法

为准确评估物种组成、空间分布及环境稳定性,可采用优势度、香农-维纳多样性指数和 Pielou 均匀度指数等从不同维度反映群落的复杂程度与稳定性。

底栖动物完整性指数通常基于群落丰富度(如总分类单元数)、多样性指数(如香农-维纳多样性指数)和功能特征(如丰度、生物量)等指标构建<sup>[32-34]</sup>。根据赣江尾间段底栖动物群落的结构特征,本文共筛选出 15 项候选生物指标,包括香农-维纳多样性指数( $x_1$ )、Margelef 丰富度指数( $x_2$ )、Pielou 均匀度指数( $x_3$ )、总分类单元数( $x_4$ )、甲壳动物和软体动物分类单元数( $x_5$ )、摇蚊分类单元数( $x_6$ )、摇蚊百分比( $x_7$ )、颤蚓百分比( $x_8$ )、甲壳动物和软体动物百分比( $x_9$ )、优势分类单元个体数百分比( $x_{10}$ )、耐污类群分类单元百分比( $x_{11}$ )、捕食者个体相对丰度( $x_{12}$ )、滤食者个体相对丰度( $x_{13}$ )、刮食者个体相对丰度( $x_{14}$ )、收集者个体相对丰度( $x_{15}$ ),并对各指标进行描述性统计分析。

参照点的确定依据以下流程:①利用主成分分析与偏相关分析,从所有采样点的水环境理化因子中筛选出独立且关键的环境驱动变量;②对筛选出的环境因子进行聚类分析;③结合聚类结果与生境特征,选取受干扰程度最低、生态状态最优的采样点作为参照点<sup>[35-36]</sup>。最终确定 D2、D3、D7、D12 为参照点,其他采样点为受损点。

经过初步选取候选生物指标,测定或计算候选生物指标参数并分析其分布范围、判别能力及相关性等步骤<sup>[37]</sup>,筛选出生物学意义明确且对干扰反应敏感的参数。候选生物指标的判别能力采用参照点

与受损点间的箱体重叠指数(interquartile overlap, IQ)评估。当 IQ 不低于 2 时,认为该指标具有良好的判别能力<sup>[38]</sup>。为避免指标间的重复信息,将通过判别能力分析的候选生物指标进行 Pearson 相关性分析,当任意 2 个生物指标的相关性系数绝对值  $|r|$  大于 0.75 时,视为高度相关,需剔除其中一个<sup>[35]</sup>,由此确定构建赣江尾间段底栖动物完整性指数的核心生物指标。

采用比值法<sup>[39]</sup>对赣江下游采样点进行底栖动物完整性指数的计算及确定健康等级分界点,对于受损点数值大于参照点的生物指标,采取 5% 分位数法;对于受损点数值小于参照点的生物指标,采取 95% 分位数法,计算方式如下:

$$I_m = \sum_i \frac{M_i - x_{im}}{M_i - P_{5i}} + \sum_j \frac{x_{jm}}{P_{95j}} \quad (1)$$

式中: $I_m$  为采样点  $m$  的底栖动物完整性指数; $x_i$  为受损点数值大于参照点的生物指标; $M_i$  为指标  $x_i$  所有采样点的最大值; $x_{im}$  为采样点  $m$  对应的指标  $x_i$  的值; $P_{5i}$  为指标  $x_i$  的 5% 分位数; $x_j$  为受损点数值小于参照点的生物指标; $x_{jm}$  为采样点  $m$  对应的指标  $x_j$  的值; $P_{95j}$  为指标  $x_j$  的 95% 分位数。

根据比值法计算结果,以参照点 25% 分位数为健康评价的标准,对小于 25% 分位数的分布范围进行三等分<sup>[20,35]</sup>,即无干扰(指数超过 25% 分位数)、轻度干扰、中度干扰、重度干扰。

本文所涉及的所有数据基本统计指标(包括最小值、最大值、均值、标准差、25% 分位数、中位数和 75% 分位数)均通过 SPSS Statistics 27 软件进行计算与分析。相关性分析采用 Pearson 相关系数,并通过 SPSS Statistics 27 进行相关性检验,以确定变量之间的线性关系。所有数据的可视化分析使用 Origin 2022 软件完成,以保证图表的精确性和可读性。

## 3 结果与分析

### 3.1 底栖动物群落分布特征

赣江尾间段共鉴定底栖动物 3 门 23 属 32 种(表 1),其中软体动物门 18 种,节肢动物门 8 种,环节动物门 6 种。总体来看,软体动物门占据明显优势,其种类数和个体数量均显著高于其他门类。主要优势类群为螺类。节肢动物门以摇蚊科幼虫为主,环节动物门则以水丝蚓科和尾鳃蚓科为主。整体上,赣江尾间底栖动物群落组成相对简单,以大型耐污性软体动物为主导,反映典型的河口型水域生态特征<sup>[40]</sup>。

表 1 赣江尾间段底栖动物名录

门类	属或种	拉丁文名称
软体动物门	角形环棱螺	<i>Bellamyia angularis</i>
	梨形环棱螺	<i>Bellamyia purificata</i>
	双旋环棱螺	<i>Bellamyia dispiralis</i>
	铜锈环棱螺	<i>Bellamyia aeruginosa</i>
	椭圆萝卜螺	<i>Radix swinhoei</i>
	竖环棱螺	<i>Bellamyia lapillorum</i>
	大沼螺	<i>Parafossarusulus eximius</i>
	耳河螺	<i>Rivularia auriculata</i>
	中国淡水蛭	<i>Novaculina chinensis</i>
	河蚬	<i>Corbicula fluminea</i>
	河螺	<i>Rivularia</i> sp.
	中华圆田螺	<i>Cipangopaludina cathayensis</i>
	福寿螺	<i>Pomacea canaliculata</i>
	鱼尾楔蚌	<i>Cuneopsis pisciculus</i>
	环棱螺	<i>Bellamyia</i> sp.
	纹沼螺	<i>Parafossarusulus striatulus</i>
	方格短沟蜷	<i>Semisulcospira cancellata</i>
淡水壳菜	<i>Limnoperna fortunei</i>	
节肢动物门	秀丽白虾	<i>Exopalaemon modestus</i>
	长足摇蚊	<i>Tanypus</i> sp.
	多足摇蚊	<i>Polypedilum</i> sp.
	隐摇蚊	<i>Cryptochironomus</i> sp.
	沼虾	<i>Macrobrachium</i> sp.
	摇蚊	<i>Chironomus</i> sp.
	前突摇蚊	<i>Procladius</i> sp.
环节动物门	小摇蚊	<i>Microchironomus</i> sp.
	苏氏尾鳃蚓	<i>Branchiura sowerbyi</i>
	尾鳃蚓	<i>Branchiura</i> sp.
	巨毛水丝蚓	<i>Limnodrilus grandisetosus</i>
	霍甫水丝蚓	<i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>
	齿吻沙蚕	<i>Nephtys</i> sp.
	拟扁蛭	<i>Hemiclepsis</i> sp.

### 3.2 工程运行前后底栖动物群落演变特征

2024年8月(丰水期)赣江尾间底栖动物总数量为1401.5个/L(表2),以软体动物门为主(740个/L),节肢动物门次之(413.5个/L),环节动物门较少(248个/L)。工程运行初期(2024年10月,枯水期),随着流量和流速的降低,底栖动物群落结构出现初步响应。此时总数量略有增加,但香农-维纳多样性指数下降至0.70。软体动物门数量下降至420个/L,而节肢动物门显著增加至954个/L,环节动物门数量保持在248个/L。水文条件的改变在短期内为摇蚊等节肢动物提供了适宜的生境条件,导致其种群数量迅速增加,群落优势度

表 2 赣江尾间段底栖动物群落分布及香农-维纳多样性指数

时间	数量/(个/L)				香农-维纳多样性指数
	软体动物门	节肢动物门	环节动物门	底栖动物	
2024年8月	740.0	413.5	248.0	1401.5	0.86
2024年10月	420.0	954.0	248.0	1622.0	0.70
2025年3月	225.0	1.0	1.5	227.5	0.42
2025年8月	359.0	113.5	0	472.5	0.54
2025年10月	227.5	93.7	0	321.1	0.49

集中,进而引起整体多样性下降。

工程稳定运行后,底栖动物数量显著减少。2025年8月(丰水期)和10月(枯水期)底栖动物总数量仅为2024年同期的33.7%(472.5个/L)和19.8%(321.5个/L)。群落结构由软体动物门单一主导,节肢动物门显著减少,环节动物门完全消失,物种丰富度和多样性均显著降低。

空间分布上,工程运行前后底栖动物群落呈现显著差异(图2)。相较于工程运行前(2024年8月)及运行初期(2024年10月),2025年同水期赣江尾间除主支外的北支、中支和南支底栖动物数量均有所减少。主支断面中,D3点位变化较小,而D4点位底栖动物数量显著增多(8月为2024年同期的3.8倍,10月为2024年同期的60倍)。D4位于主支枢纽坝上游回水区,受闸坝拦蓄作用形成缓流与细粒泥沙沉积环境,食物资源相对丰富,适宜软体动物栖息与繁殖。因此,在工程运行后的多个时期(2025年8月与10月),该断面表现出较高的个体密度与生物量水平。

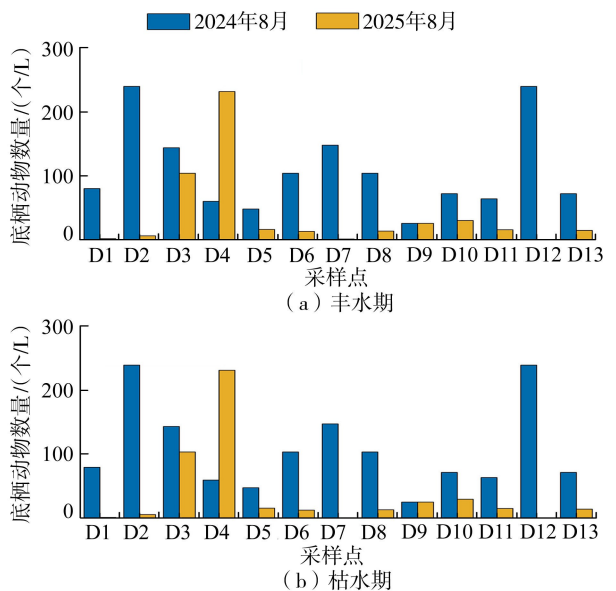


图 2 不同水期各采样点底栖动物数量

### 3.3 工程运行前后底栖动物完整性对比

#### 3.3.1 赣江尾间段底栖动物完整性指数构建

为了构建底栖动物完整性指数,以评估工程前后水生态系统的变化,需要预先确定适应赣江尾间段的生物指标体系。本文基于工程运行前(2024年8月)及运行初期(2024年10月)的底栖动物监测数据的统计分析,量化其最小值、最大值、均值、标准差、25%分位数、中位数及75%分位数等分布特征。候选生物指标判别能力结果(图3)表明: $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_4$ 、 $x_5$ 、 $x_6$ 、 $x_{13}$ 共6项指标的IQ不低于2,具备较强的判别能力。相关性分析结果(图4)表明, $x_1$ 、 $x_2$ 和 $x_4$ 间

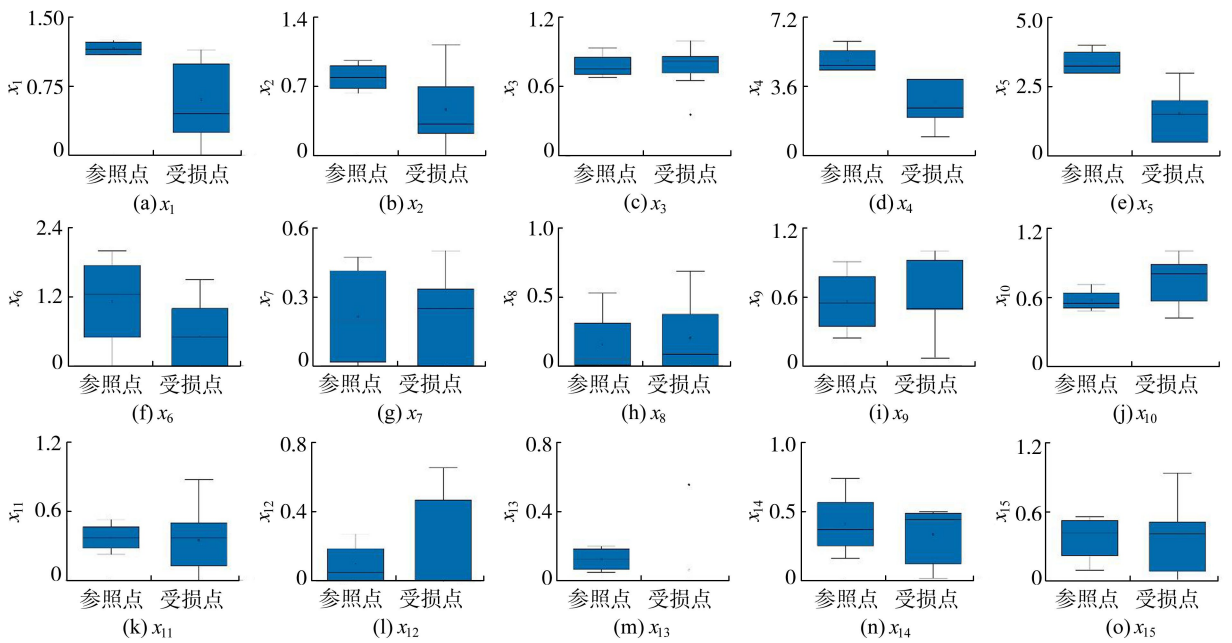


图3 参照点和受损点候选生物指标判别能力

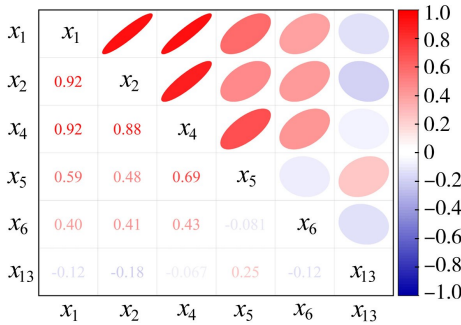


图4 候选生物指标的相关性分析

的相关系数 $|r| > 0.75$ , 据此, 剔除 $x_2$ 和 $x_4$ , 保留其余指标。最终确定 $x_1, x_5, x_6$ 及 $x_{13}$ 为构成赣江尾间段底栖动物完整性指数的核心指标。

据以上所确定的评价指标, 采用比值法对核心生物指标进行归一化处理(式(1))。由于 $x_1, x_5, x_6$ 和 $x_{13}$ 在受损点的数值均低于参照点(图3), 因此均采用95%分位数法进行标准化计算(计算参数见表3)。基于各采样点计算结果, 以工程运行前(2024年8月)及运行初期(2024年10月)底栖动物完整性指数( $I_B$ )的25%分位数(1.09)作为运行后不同阶段(2025年3月、8月和10月)评价的标准。当 $I_B \geq 1.09$ 时, 判定该采样点为无干扰, 低于该值的采取三分法划分干扰等级: 当 $0 < I_B \leq 0.36$ 时, 判定为重度干扰; 当 $0.36 < I_B \leq 0.73$ 时, 判定为中度干扰; 当 $0.73 < I_B < 1.09$ 时, 判定为轻度干扰。

表3 采样点核心生物指标计算参数

分位数	$x_1$	$x_5$	$x_6$	$x_{13}$
5%分位数	0.15	0.5	0	0
95%分位数	1.23	3.7	1.7	0.34
最大值	1.25	4.0	2.0	0.56

### 3.3.2 工程运行后赣江尾间段水生态评价

基于构建的底栖动物完整性指数评价结果(图5), 赣江尾间段在工程运行后呈现显著的时空异质性, 其分布格局与枢纽调控下的水文动力条件变化密切相关。工程运行后, 尾间生态系统经历了明显的扰动和再平衡过程。与运行前(2024年8月)及运行初期(2024年10月)相比, 在自然水文情势与工程调度的共同作用下, 2025年8月大部分采样点的底栖动物完整性指数达到“无干扰”或“轻度干扰”状态; 2025年10月, 多数采样点仍维持较高的完整性, 表明工程运行后赣江尾间生态系统在自然和人为双重调控的水文体制下逐步建立新的动态平衡。

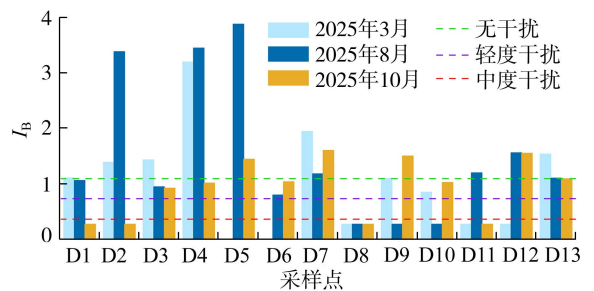


图5 工程运行后赣江尾间段水生态健康评价结果

空间分布特征显示, 水利枢纽工程显著改善并稳定了主干河道的生物完整性。其中主支断面(D3、D4、D5)在多数时期表现为“无干扰”或“轻度干扰”状态, 尤其在2025年8月, D4(主支枢纽坝上)与D5(主支下游)点位的底栖动物完整性指数分别达到3.45和3.88。这主要归因于枢纽运行后主支获得了相对稳定且充足的流量, 坝前形成的缓

流区促进了泥沙沉积和底质稳定,为滤食性软体动物等底栖动物群落提供了适宜的生境,从而显著提升了系统的生物完整性。

相较之下,干流(D1、D2)、北支(D6、D7)及南支(D11~D13)的完整性虽存在一定季节性波动,但整体仍维持在“轻度干扰”或“无干扰”水平。这些区域受季节性径流与枢纽调控共同影响,水文节律发生变化,但生态系统仍具备较强的自然恢复弹性。中支断面(D8~D10)则干扰较为明显,3次监测中均有点位处于“重度干扰”状态,表明该支流生态系统对工程调控的敏感性较高。

总体而言,赣江尾间水利枢纽运行后,不同支流水动力与底质生境均发生了不同程度的变化。在气候变化及水利工程双重胁迫下,未来尾间区域水资源管理和水环境保护应统筹各支流生态需水过程要求,优化水利调度方式,以促进尾间段乃至下游入湖河口区水生态系统向更稳定、更健康的方向演进。

## 4 结 论

**a.** 赣江尾间段共检测出底栖动物 3 门 23 属 32 种,以软体动物门为优势类群,数量和生物量均明显高于节肢动物门与环节动物门。群落以滤食性、耐污性软体动物为主导。空间上,主支及其坝前缓流区底质稳定,群落结构稳定且多样性较高;中支、北支、南支及裸露或硬化底质区域底栖动物数量下降,多样性偏低,生物完整性较弱。

**b.** 香农-维纳多样性指数、甲壳动物和软体动物分类单元数、摇蚊分类单元数及滤食者个体相对丰度是构成赣江尾间段底栖动物完整性指数的核心指标。

**c.** 工程运行后赣江尾间段水生态状况呈现显著的时空差异。整体上,生态系统在运行后逐步建立新的动态平衡,2025 年各时期大部分点位处于“无干扰”或“轻度干扰”水平。空间上,主支断面生物完整性最高,坝上与下游区域生境条件显著改善;干流及北、南支总体处于“轻度干扰”或“无干扰”状态,具有一定的恢复能力;中支断面干扰较为严重,部分点位处于“重度干扰”状态。

## 参考文献:

[ 1 ] 孙然好,魏琳沅,张海萍,等. 河流生态系统健康研究现状与展望:基于文献计量研究[J]. 生态学报,2020,40(10):3526-3536. (Sun Ranhao, Wei Linyuan, Zhang Haiping, et al. Research status and prospects of river ecosystem health: a bibliometric analysis [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(10):3526-3536. (in

Chinese))

- [ 2 ] 易雨君,丁航,叶敬吁. 基于生态完整性的水生态健康评价研究综述[J]. 水资源保护,2024,40(5):1-10. (Yi Yujun, Ding Hang, Ye Jingxu. Review of water ecological health assessment based on ecological integrity [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(5):1-10. (in Chinese))
- [ 3 ] Cui Tong, Tian Fuqiang, Yang Tao, et al. Development of a comprehensive framework for assessing the impacts of climate change and dam construction on flow regimes [J]. Journal of Hydrology, 2020, 590:125358, doi:10.1016/j.jhydrol.2020.125358.
- [ 4 ] Jiang Shanhu, Zhou Le, Ren Liliang, et al. Development of a comprehensive framework for quantifying the impacts of climate change and human activities on river hydrological health variation [J]. Journal of Hydrology, 2021, 600:126566, doi:10.1016/j.jhydrol.2021.126566.
- [ 5 ] 潘玉波,段丽群. 水利工程建设对流域生态系统影响的量化评估与缓解设计[J]. 中国水运,2025(18):104-106. (Pan Yubo, Duan Liqun. Quantitative assessment and mitigation design of the impact of water conservancy project construction on watershed ecosystem [J]. China Water Transport, 2025(18):104-106. (in Chinese))
- [ 6 ] 李晋鹏,彭明春,董世魁,等. 澜沧江小湾水坝运行前后大型底栖动物群落及水质评价[J]. 环境科学研究,2018,31(11):1900-1908. (Li Jinpeng, Peng Mingchun, Dong Shikui, et al. Assessment of benthic macroinvertebrate assemblages and water quality in Xiaowan Reservoir before and after dam operation, Lancang River [J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31(11):1900-1908. (in Chinese))
- [ 7 ] 陈雪,徐富刚,李琴,等. 基于水情变化的河流生态流量阈值及多时间尺度保障率计算[J]. 水资源保护,2024,40(4):128-136. (Chen Xue, Xu Fugang, Li Qin, et al. River ecological flow threshold and multi-time scale guarantee rate calculation based on hydrological regime changes [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(4):128-136. (in Chinese))
- [ 8 ] Li Yanlin, Yang Jiaojiao, Wang Yuchun, et al. Sediment eDNA reveals damming triggered changes in algal and fish communities at the Three Gorges Reservoir in China [J]. Environmental Research, 2025, 276:121474, doi:10.1016/j.envres.2025.121474.
- [ 9 ] Hao Haoran, Dong Ningpeng, Yang Mingxiang, et al. The changing hydrology of an irrigated and dammed Yangtze River: streamflow, extremes, and lake hydrodynamics [J]. Water Resources Research, 2024, 60(10):e2024WR037841, doi:10.1029/2024WR037841.
- [ 10 ] 吴利,唐会元,龚云,等. 三峡水库正常运行下库区干流浮游动物群落特征研究[J]. 水生态学杂志,2021,42(1):58-65. (Wu Li, Tang Huiyuan, Gong Yun, et al. Temporal-spatial distribution of zooplankton community in

- the main stem of Three Gorges Reservoir under normal operation[J]. *Journal of Hydroecology*, 2021, 42(1): 58-65. (in Chinese)
- [11] 唐炳然,何艺欣,杨国峰,等. 三峡库区调控下泄水期支流浮游植物生长限制因子解析[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2023, 45(3): 138-151. (Tang Bingran, He Yixin, Yang Guofeng, et al. Identification of phytoplankton growth limiting factors during flood seasons in tributary of the Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2023, 45(3): 138-151. (in Chinese))
- [12] 黄彬彬,李光锦,丰茂成,等. 赣江干流底栖动物群落结构与环境因素的关系[J]. *中国水利水电科学研究院学报(中英文)*, 2022, 20(2): 120-128. (Huang Binbin, Li Guangjin, Feng Maocheng, et al. Characteristics of benthos community structure and its relationship with environmental factors within the mainstream of Ganjiang River [J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2022, 20(2): 120-128. (in Chinese))
- [13] 张敏,蔡庆华,渠晓东,等. 三峡成库后香溪河库湾底栖动物群落演变及库湾纵向分区格局动态[J]. *生态学报*, 2017, 37(13): 4483-4494. (Zhang Min, Cai Qinghua, Qu Xiaodong, et al. Macroinvertebrate succession and longitudinal zonation dynamics in Xiangxi Bay, after impoundment of the Three Gorges Reservoir [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(13): 4483-4494. (in Chinese))
- [14] 栾清华,连秋岩,王东,等. 滏阳河大型底栖动物群落特征及影响因子分析[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2025, 53(5): 65-72. (Luan Qinghua, Lian Qiuyan, Wang Dong, et al. Analysis of macrobenthos community characteristics and influencing factors in the Fuyang River [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2025, 53(5): 65-72. (in Chinese))
- [15] 费娇娇,温舒珂,董芮,等. 近 40 年巢湖底栖动物演变特征及驱动因素[J]. *湖泊科学*, 2025, 37(4): 1381-1395. (Fei Jiaojiao, Wen Shuke, Dong Rui, et al. Macrozoobenthic community succession and its drivers in Lake Chaohu over the past 40 years [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2025, 37(4): 1381-1395. (in Chinese))
- [16] Chauvel N, Raoux A, Weill P, et al. Sediment grain size and benthic community structure in the eastern English Channel: species-dependent responses and environmental influence [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2024, 200: 116042, doi:10.1016/j.marpolbul.2024.116042.
- [17] 张敏,邵美玲,蔡庆华,等. 丹江口水库大型底栖动物群落结构及其水质生物学评价[J]. *湖泊科学*, 2010, 22(2): 281-290. (Zhang Min, Shao Meiling, Cai Qinghua, et al. Macroinvertebrate community structure and the biological assessment to the water quality of the Danjiangkou Reservoir [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(2): 281-290. (in Chinese))
- [18] 王雪,黄锦平,苏玉萍,等. 基于浮游植物生物完整性指数的福建省水库健康状态评价[J]. *水利水电科技进展*, 2024, 44(2): 54-60. (Wang Xue, Huang Jinping, Su Yuping, et al. Health status assessment of reservoirs in Fujian Province based on phytoplankton biotic integrity index [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2024, 44(2): 54-60. (in Chinese))
- [19] 张远,徐成斌,马溪平,等. 辽河流域河流底栖动物完整性评价指标与标准[J]. *环境科学学报*, 2007, 27(6): 919-927. (Zhang Yuan, Xu Chengbin, Ma Xiping, et al. Biotic integrity index and criteria of benthic organisms in Liao River Basin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(6): 919-927. (in Chinese))
- [20] 慕林青,张海萍,赵树旗,等. 永定河底栖动物生物完整性指数构建与健康评价[J]. *环境科学研究*, 2018, 31(4): 697-707. (Mu Linqing, Zhang Haiping, Zhao Shuqi, et al. River health assessment of Yongding River based on benthic integrated biotic index [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(4): 697-707. (in Chinese))
- [21] 游清徽,刘玲玲,方娜,等. 基于大型底栖无脊椎动物完整性指数的鄱阳湖湿地生态健康评价[J]. *生态学报*, 2019, 39(18): 6631-6641. (You Qinghui, Liu Lingling, Fang Na, et al. Assessing ecological health of Poyang Lake wetland, using benthic macroinvertebrate-based index of biotic integrity (B-IBI) [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(18): 6631-6641. (in Chinese))
- [22] 杨青瑞,陈求稳. 漓江大型底栖无脊椎动物及其与水环境的关系[J]. *水利水电科技进展*, 2010, 30(6): 8-10. (Yang Qingrui, Chen Qiwen. Relationship between macroinvertebrates and aquatic environment in Lijiang River [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2010, 30(6): 8-10. (in Chinese))
- [23] 徐宗学,武玮,殷旭旺. 渭河流域水生态系统群落结构特征及其健康评价[J]. *水利水电科技进展*, 2016, 36(1): 23-30. (Xu Zongxue, Wu Wei, Yin Xuwang. Community structure characteristics and health assessment of aquatic ecosystem in Weihe Basin, China [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2016, 36(1): 23-30. (in Chinese))
- [24] 郭强,叶许春,刘佳,等. 土地利用变化对流域水文过程时空分异的影响:以赣江流域为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(12): 2747-2759. (Guo Qiang, Ye Xuchun, Liu Jia, et al. Impact of land use change on spatio-temporal differentiation of watershed hydrological processes: a case study of Ganjiang River Basin [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29(12): 2747-2759. (in Chinese))
- [25] 胡强,王姣,刘颖,等. 水库建设对赣江流域水沙情势的

- 影响[J]. 人民长江,2021,52(4):1-5. (Hu Qiang, Wang Jiao, Liu Ying, et al. Effect of reservoir construction on runoff and sediment characteristics in Ganjiang River[J]. Yangtze River,2021,52(4):1-5. (in Chinese))
- [26] 王克军,陈锐琪,毛劲乔,等. 基于生境模拟法的赣江尾闾四大家鱼产卵生境模拟[J]. 水利水电科技进展,2025,45(6):120-125. (Wang Kejun, Chen Ruiqi, Mao Jingqiao, et al. Simulation of spawning habitat for four major Chinese carps in lower reaches of the Ganjiang River based on habitat simulation method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45 (6):120-125. (in Chinese))
- [27] 陈珺,嵇敏,林江,等. 赣江尾闾河段水沙特性及河床演变[J]. 水利水电科技进展,2012,32(3):1-5. (Chen Jun, Ji Min, Lin Jiang, et al. Runoff-sediment characteristics and riverbed evolution of Ganjiang River sink[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2012,32(3):1-5. (in Chinese))
- [28] 仝路路,郭传波,王瑞,等. 多重人类活动干扰下赣江流域水环境和鱼类资源的研究现状分析[J]. 长江流域资源与环境,2019,28(12):2879-2892. (Tong Lulu, Guo Chuanbo, Wang Rui, et al. Research status of water environment and fish resources under multiple human disturbances in the Ganjiang River Basin; a review[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2019,28(12):2879-2892. (in Chinese))
- [29] 乔时雨,李国芳,李国文,等. 变化环境下赣江流域水文情势演变及归因分析[J]. 人民长江,2024,55(5):99-106. (Qiao Shiyu, Li Guofang, Li Guowen, et al. Analysis of hydrologic regime evolution and attribution in Ganjiang River Basin under changing environment [J]. Yangtze River,2024,55(5):99-106. (in Chinese))
- [30] 胡芳,刘聚涛,冯倩,等. 河道采砂对赣江中下游水生态环境的影响研究[J]. 人民长江,2019,50(11):69-74. (Hu Fang, Liu Jutao, Feng Qian, et al. Impact of sand mining on aquatic ecological environment of middle and lower reaches of Ganjiang River[J]. Yangtze River,2019,50(11):69-74. (in Chinese))
- [31] 王鹏,齐述华,陈波. 赣江流域土地利用方式对河流水质的影响[J]. 生态学报,2015,35(13):4326-4337. (Wang Peng, Qi Shuhua, Chen Bo. Influence of land use on river water quality in the Ganjiang basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35 (13): 4326-4337. (in Chinese))
- [32] 王业耀,阴琨,杨琦,等. 河流水生态环境质量评价方法研究与应用进展[J]. 中国环境监测,2014,30(4):1-9. (Wang Yeyao, Yin Kun, Yang Qi, et al. Research and application progress of assessment for river water ecosystem quality [J]. Environmental Monitoring in China,2014,30(4):1-9. (in Chinese))
- [33] 文威,李双双,冯桃辉,等. 基于浮游生物完整性的汉江中下游生态健康评价[J]. 水生生态学杂志,2023,44(4):85-91. (Wen Wei, Li Shuangshuang, Feng Taohui, et al. Ecological health assessment of the middle and lower Hanjiang River based on plankton integrity[J]. Journal of Hydroecology,2023,44(4):85-91. (in Chinese))
- [34] 周莹,渠晓东,赵瑞,等. 河流健康评价中不同标准化方法的应用与比较[J]. 环境科学研究,2013,26(4):410-417. (Zhou Ying, Qu Xiaodong, Zhao Rui, et al. Standardized methods for selecting reference and impaired sites to evaluate river health[J]. Research of Environmental Sciences,2013,26(4):410-417. (in Chinese))
- [35] 陈宇飞,严航,夏霆,等. 基于浮游动物生物完整性指数的太湖流域生态系统评价[J]. 南京工业大学学报(自然科学版),2022,44(3):335-343. (Chen Yufei, Yan Hang, Xia Ting, et al. Ecosystem assessment of Taihu Lake Basin based on zooplankton index of biological integrity [J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition),2022,44(3):335-343. (in Chinese))
- [36] 王瑜,李黎,林岩璇,等. 松花江流域大型底栖动物生物完整性指数构建及其适用性[J]. 中国环境监测,2019,35(4):20-30. (Wang Yu, Li Li, Lin Kuixuan, et al. Development and applicability analysis of benthic-macroinvertebrate index of biotic integrity in the Songhua River Basin [J]. Environmental Monitoring in China, 2019,35(4):20-30. (in Chinese))
- [37] 周彦锋,王东伟,何利聪,等. 基于浮游植物生物完整性指数的淮河流域中游水生态健康评价[J]. 湿地科学,2024,22(4):477-486. (Zhou Yanfeng, Wang Dongwei, He Licong, et al. Assessment of water ecological health in the middle reaches of Huaihe River based on phytoplankton biological integrity index [J]. Wetland Science, 2024, 22 (4):477-486. (in Chinese))
- [38] Barbour M T, Gerritsen J, Griffith G E, et al. A framework for biological criteria for Florida streams using benthic macroinvertebrates [J]. Journal of the North American Benthological Society, 1996, 15(2):185-211.
- [39] 宋蒙蒙,田爽,卢奥然,等. 渭河河流生态系统完整性评价体系的构建[J]. 大连海洋大学学报,2020,35(2):288-295. (Song Mengmeng, Tian Shuang, Lu Aoran, et al. Establishment of evaluation system of an ecosystem integrity in Weihe River [J]. Journal of Dalian Ocean University,2020,35(2):288-295. (in Chinese))
- [40] 张嵩,张崇良,徐宾铎,等. 基于大型底栖动物群落特征的黄河口及邻近水域健康度评价[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2017,47(5):65-71. (Zhang Song, Zhang Chongliang, Xu Binduo, et al. Ecological status assessment based on macrobenthic community characteristics in Yellow River estuary and its adjacent waters[J]. Periodical of Ocean University of China,2017,47(5):65-71. (in Chinese))

(收稿日期:2025-03-30 编辑:俞云利)