

中国科学引文数据库核心期刊

中文核心期刊

中国科技核心期刊

ISSN 1006-7647
CN 32-1439/TV



河海大学 主办
HOHAI UNIVERSITY



水利水电科技进展

ADVANCES IN SCIENCE AND TECHNOLOGY OF WATER RESOURCES



2023年1月

第43卷 第1期

Vol. 43 No. 1

《水利水电科技进展》第六届编辑委员会

顾问：（以姓氏笔画为序）

孔宪京 王思敬 邓铭江 卢耀如 朱尔明 吴中如 张长宽 张建民 张超然 李华军
汪集旻 陆佑楣 陈厚群 陈祖煜 周君亮 姜弘道 胡四一 索丽生 贾金生

主任委员：徐 辉

副主任委员：沈凤生 郑金海

委员：（以姓氏笔画为序）

王卫光 王小毛 王仁坤 冯树荣 冯夏庭 包腾飞 左其亭 任国玉 刘汉龙 刘 军
刘 成 孙才志 孙树林 朱振家 吴时强 吴建华 吴普特 张国新 张宗亮 张春生
李保国 杨志峰 杨泽艳 汪基伟 苏怀智 迟世春 陆永军 陈云敏 陈龙珠 陈求稳
陈国兴 陈 喜 周惠成 林 涛 林绍忠 林鹏智 练继建 郑东健 金伟良 金 峰
金菊良 姚文艺 姜文来 姜翠玲 胡春宏 胡铁松 钟德钰 钮新强 骆 超 徐世焯
徐宗学 柴军瑞 秦伯强 钱向东 顾冲时 高广运 康绍忠 盛金昌 黄岁樑 龚 政
景来红 蒋林华 谢新民 鲁春辉 雍 斌

主 编：顾冲时

副 主 编：苏怀智 骆 超

致作者

为方便作者投稿，特将本刊的性质和对稿件的要求简要介绍如下：

- 1 本刊是一份科学技术期刊，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。因此，要求稿件内容有明确的主题，所介绍的科学技术有明显的创新性、先进性和实用性。
- 2 本刊欢迎下列内容的稿件，特别欢迎各类基金资助项目及其他重大科技项目的研究论文。
 - (1) 水资源利用、配置、节约和保护，包括：水资源形成、可再生性维持机理及时空变化规律；变化环境下的水循环及其伴生过程演化机理；水资源利用与生态保护的协调关系；河湖水系连通的水资源布局和调配；地表水、地下水及非传统水资源综合利用与调配；大区域干旱演变规律及风险评估；水资源的可持续利用方式及新型水资源的开发利用等。
 - (2) 大江大河的综合治理，包括：流域综合治理中的重大水利科技问题及关键技术；大型水工程对河流生态系统的影响；江河防洪减灾应急处置技术及机制；江河水沙调控及泥沙资源化利用；水土流失侵蚀机理和产沙规律等。
 - (3) 水利工程建设，包括：300 m 级高坝筑坝技术；水工程安全诊断、评估与修复；大型调水工程建设与安全运行；高海拔、冻土、地震频发区等复杂条件下水工程建设与安全防护；中小型水库、水闸、堤防安全诊断和除险加固的新材料新技术等。
 - (4) 水环境与水生生态保护，包括：重大水工程环境与生态效应评价及调控；河湖健康评估技术体系与评价标准；饮用水水源地安全综合保障机制；区域水资源保护和流域生态系统修复；城市水环境综合治理；内陆核电建设对水资源安全的影响等。
 - (5) 河湖治理及海岸防护，包括：河口海岸治理和滩涂资源的保护利用；河口海岸滩涂演化与海岸侵蚀防护；通江湖泊的江湖关系及水资源调配与防洪调度；风暴潮预报预警与风险评估；河道整治及中小河流综合治理；河湖疏浚与底泥的处置利用等。
 - (6) 水管理及水利信息化，包括：重大突发水事件的应急管理机制及对策；水权、水价、水市场的理论与实践；大中型灌区节水改造；数字化流域；采用 3S 技术、云计算技术、物联网技术等对传统水利实施技术改造等。
- 3 对稿件的一般要求如下（详见本刊《征稿简则》）：
 - (1) 研讨“水问题”的稿件，应力求观点鲜明，论证充分，有独到见解和指导意义。
 - (2) “研究探讨”类稿件，应报道作者科学研究中取得的科技新成果，包括有推广价值的新技术、新方法、新产品、新工艺、新材料等原创性成果。
 - (3) “工程技术”类稿件，应报道工程规划、勘察、设计、施工、管理中具有创新性的技术和方法，包括有推广价值的技术革新成果和成功经验。
 - (4) “专题综述”类稿件，应对某一学科、某一研究对象或某项技术的现状与发展进行综合分析和评述，力求以丰富、翔实、最新的文献资料作为综述的依据，并阐明作者自己的见解或观点。
 - (5) “国外动态”类稿件，一般以“编译”或“摘译”的形式介绍国外相关学科或工程建设的新进展。摘编时应注明原文出处，尊重原文的版权。

水利水电科技进展

(1981 年创刊, 双月刊)

第 43 卷第 1 期

2023

2023 年 1 月 10 日出版

SHULI SHUIDIAN KEJI JINZHAN

中国科学引文数据库核心期刊
中文核心期刊(2004—2023)
中国科技核心期刊(2003—2023)
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

刊名题写 钱正英

顾问 孔宪京 王思敬 邓铭江
卢耀如 朱尔明 吴中如 张长宽
张建民 张超然 李华军 汪集旸
陆佑楣 陈厚群 陈祖煜 周君亮
姜弘道 胡四一 索丽生 贾金生
编委会主任 徐 辉
主 编 顾冲时
副 主 编 苏怀智 骆 超
责任编辑 俞云利
英文编辑 朱 海

主 管: 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: 南京鸿润印刷有限公司
发行范围: 公 开
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: 中国国际图书贸易总公司
(北京 399 信箱 100048)
国外发行代号: BM2740
广告许可证: 苏工商 3200004960327
中国标准连 ISSN 1006-7647
续出版物号: CN 32-1439/TV
CODEN: SSKJAT

国内定价: 15.00 元

目 次

· 专题综述 ·

中国河湖长制管理规范化与标准化进展

····· 鞠茂森, 吴宸晖, 李贵宝, 刘佳玥, 曹新富(1)

过水设施水流噪声的形成机理及影响因子研究综述

····· 王 煜, 石 敏, 卢晓春(9)

· 研究探讨 ·

玛纳斯河不同峰量组合下的融雪洪水风险分析

····· 何朝飞, 王晓云, 陈伏龙, 唐 豪, 龙爱华(15)

金沙江下游主要支流对干流水温的影响

····· 徐火清, 赵红红, 吴义军(22)

考虑多重共线性影响的特高拱坝时空监控模型

····· 牛景太, 周 华, 吴邦彬, 邓志平, 任长江(29)

水上滑坡冲击涌浪的远场传播特征数值模拟分析

····· 黄瑞启, 黄筱云, 张少强, 程永舟(36)

虹吸式出水管虹吸形成过程的壁面压力及脉动特性

····· 李志祥, 徐 辉, 冯建刚, 钱尚拓(43)

基于声发射的蒸养混凝土受压损伤特性试验研究

····· 刘伟琪, 陈 波, 陈家林(50)

空气射流动力学特征与冲沙作用试验研究

····· 沈南北, 缴 健, 龚 政, 罗小峰(56)

· 工程技术 ·

南水北调中线工程冬季输水冰情风险研究

····· 练继建, 杨德明, 赵 新(63)

四川省水电开发基地水电开发程度评估

····· 罗 涵, 巨 莉, 罗茂盛, 唐云逸, 黄艳艳, 赵曦琳, 卢喜平(71)

基于改进 Deeplab V3+网络的水工混凝土裂缝语义分割方法

····· 黄思文, 包腾飞, 李扬涛, 牛慧余(81)

基于改进 Mask R-CNN 的混凝土坝裂缝像素级检测方法

····· 牛慧余, 包腾飞, 李扬涛, 黄思文(87)

基于 CEEMDAN 和 SVM 的混凝土破坏状态声发射信号识别

····· 宿 辉, 栾亚伟, 胡宝文, 白延杰(93)

黄河淤泥固化改性材料力学性能与微观结构试验研究

····· 祝 珺,
李长明, 狄龙飞, 柴泉雄, 贾东洋, 陈恒杰, 秦宋林, 尹冰涛(99)

大藤峡水利枢纽 ····· 摄影: 孟 凯(封面)

CONTENTS

Progress of management normalization and standardization of river and lake chief system in China
..... *JU Maosen, et al*(1)

A review on formation mechanism and influencing factors of water noise of overflow facilities
..... *WANG Yu, et al*(9)

Risk analysis of snowmelt flood under different combination of flood peaks and flood volumes in Manas River
..... *HE Chaofei, et al*(15)

Influence of main tributaries on water temperature of main stream in lower Jinsha River
..... *XU Huoqing, et al*(22)

Spatio-temporal monitoring model for super-high arch dams considering multicollinearity effects
..... *NIU Jingtai, et al*(29)

Numerical simulation analysis on far-field propagation characteristics of impulse waves generated by
subaerial landslides *HUANG Ruiqi, et al*(36)

Wall pressure and fluctuating characteristics of a siphon outlet pipe during siphoning formation process
..... *LI Zhixiang, et al*(43)

Experimental study on compressive damage characteristics of steam-cured concrete based on acoustic emission
..... *LIU Weiqi, et al*(50)

Experimental study on dynamic characteristics and sand flushing of aerated jet *SHEN Nanbei, et al*(56)

Study on risk of sudden ice conditions in winter for Middle Route of South-to-North Water Diversion Project
..... *LIAN Jijian, et al*(63)

Hydropower development degree evaluation of Sichuan hydropower development base *LUO Han, et al*(71)

Semantic segmentation method of hydraulic concrete cracks based on improved Deeplab V3+ network
..... *HUANG Siwen, et al*(81)

Pixel-level crack detection method of concrete dam based on improved Mask R-CNN *NIU Huiyu, et al*(87)

Acoustic emission signal recognition of concrete failure state based on CEEMDAN and SVM
..... *SU Hui, et al*(93)

Experimental study on mechanical properties and microstructures of modified Yellow River sludge materials
..... *ZHU Jun, et al*(99)

Sponsor: Hohai University

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

Editors in Chief: XU Hui, GU Chongshi

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

中国河湖长制管理规范化与标准化进展

鞠茂森¹, 吴宸晖², 李贵宝³, 刘佳玥², 曹新富⁴

(1. 河海大学河长制研究与培训中心, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098;
3. 中国水利学会, 北京 100053; 4. 南京大学政府管理学院, 江苏 南京 210023)

摘要:总结了河湖长制出台以来取得的成效,从国家和地方的政策颁布、法规制定、标准实施、专业支持等多方面分析了中国河湖长制取得成功的原因,并以浙江省绍兴市、福建省和江苏省3个典型示范建设地区的标准化管理案例佐证取得的实效,指出了河湖长制标准化管理在政策创新、法规标准执行力、公众参与等方面的不足,并从加强顶层设计、完善考核评价、提升治水能力等3方面提出了可实施的相关建议。

关键词:河长制; 湖长制; 河湖管理; 标准化

中图分类号: D035 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2023)01-0001-08

Progress of management normalization and standardization of river and lake chief system in China//JU Maosen¹, WU Chenhui², LI Guibao³, LIU Jiayue², CAO Xinfu⁴(1. *Research and Training Center for River Chief System, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 3. *Chinese Hydraulic Engineering Society, Beijing 100053, China*; 4. *School of Government, Nanjing University, Nanjing 210023, China*)

Abstract: The achievements made since the introduction of the river and lake chief system were summarized. The reasons for the success of China's river and lake chief system were analyzed from the aspects of national and local policy promulgation, regulation formulation, standard implementation, and professional support. The effectiveness of standardized management was proved by the cases of three typical demonstration construction areas in Shaoxing City, Fujian Province, and Jiangsu Province. The deficiencies of standardized management of river and lake chief system in policy innovation, enforcement of laws and regulations, and public participation were further explored, and relevant implementable suggestions were put forward from the three aspects of strengthening top-level design, improving assessment and evaluation, and improving water control ability.

Key words: river chief system; lake chief system; river and lake management; standardization

自1988年颁布第一部《中华人民共和国水法》以来,中国开始推行综合水资源管理方法,但随着经济社会的发展,其应用能力被证明是不足的^[1]。2007年太湖蓝藻暴发所导致的无锡市饮用水危机使得河长制应运而生,并在水环境治理上取得了立竿见影的成效,迅速在周边乃至全国各地复制并推广开来。河长制,即由地方各级党政主要负责人担任河长,负责组织领导相应河湖的管理和保护工作。中共中央办公厅、国务院办公厅于2016年底印发的《关于全面推行河长制的意见》(厅字〔2016〕42号),标志着河长制由地方实践上升为国家意志。中共中央办公厅、国务院办公厅又于2017年底印发了《关于在湖泊实施湖长制的指导意见》(厅字

[2017]51号),进一步加强了湖泊的管理保护,河湖长制逐渐成为维护河湖健康生命、实现河湖功能永续利用的制度保障。河长制解决了“多龙治水”的困局,压实了地方政府的治水责任,最大限度地凝聚了治水合力,努力达成各个利益相关者的互动、共生,确保治理成果的共享^[2]。河长制的发展积累了丰富的实践案例和经验,已从被动应急机制转变为常态实施制度,成为水环境政策库中的常设组成部分,并作为中国河湖可持续管理的合适解决方案,为世界各国设计河流管理系统提供了新的见解和手段^[3]。

河湖长制能取得成功,必然契合了当下的国情和水情^[4],其中制度建设和管理的标准化是使河长制从“有名”走向“有实”“有能”的根本。对标“有

实”,强化河湖长制需要持续推进河湖治理常态化规范化;对标“有能”,需要进一步夯实基础,推进河湖长制规范化、标准化、法制化^[5]。这包括了入河排污口溯源整治和规范化管理^[6]、堤防工程标准化管理^[7]、河湖规范化命名^[8]、信息规范化公开和制度标准化实施^[9]、河长职责分配及规范化培训^[10]等多方面的河湖长制工作内容。因此,标准化在规范化管理运行中的作用和地位日益凸显,有必要总结河湖长制管理规范化与标准化进展,检视河湖长制现阶段落实情况,挖掘制度潜力并排除隐忧。

1 河湖长制背景及成效

2007年夏季,为解决太湖大面积暴发蓝藻引发的问题,无锡市发文率先在全国推行由地方行政首长负责的河长制。随后,河长制逐渐拓展至江苏全省,后至江西、浙江、河北等地。2014年,水利部印发《关于加强河湖管理工作的指导意见》(水建管[2014]76号),明确要求全国各地推行由政府行政首长负责的河长制。2016年底和2017年底,中共中央办公厅、国务院办公厅先后出台河长制、湖长制文件,明确了加强水资源保护、加强水域岸线管理和保护、加强水污染防治、加强水环境治理、加强水生态修复、加强执法监管等6大工作任务,湖长制还增加了严格湖泊水域空间管控这项任务,以严格控制开发利用行为。自全面推行河湖长制五年多以来,河湖长制全面取得成效。

a. 河湖长制责任体系全面建立^[11]。31个省(自治区、直辖市)党委、人民政府主要领导担任省级总河长,省、市、县、乡4级河湖长共30万名,年均巡查河湖达700万人次,村级河湖长(含巡、护河员)90万名,省、市、县层面均成立河长制办公室。

b. 工作机制不断完善。国家层面成立由国务院分管领导同志担任召集人的全面推行河湖长制工作部际联席会议,建立完善河湖长履职、监督检查、考核问责、正向激励等制度。全国7个流域建立省级河湖长联席会议机制,7大流域管理机构分别与流域内各省、区、市河长办建立协作机制,联防联控联治机制已形成。

c. 河湖面貌持续向好。120万km²河流、1955个湖泊首次明确管控边界,共清理整治河湖突出问题18.5万个,华北部分地区地下水水位止跌回升,部分多年断流河道全线贯通。2020年全国地表水环境质量显著提升,水质显著改善^[12],I到Ⅲ类水水质断面比例达83.4%,较2016年上升15.6%。从各地来看,广西、南京、苏州、杭州、南浔、淄博、莆田等多个地区制订了幸福河湖标准。

d. 全社会关爱河湖局面基本形成。“河长+”体系不断拓展,民间河湖长、巡(护)河志愿服务组织参与河湖管理保护工作逐渐规范化、制度化。

2 河湖长制标准化管理的实践

在河湖长制全面建立和深化发展的过程中,政策引领、法规颁布、标准化管理发挥了至关重要的作用。国家和地方颁布了各类政策、法规、标准等,民间各类高校和机构在培训、宣传、研讨等各方面也给予了专业支持。

2.1 政策颁布

2.1.1 国家层面

利用政治势能有助于将制度优势转为治理效能^[13]。国家层面加强河湖长制顶层设计,使河湖长制在全国范围内的推行更具系统性、整体性和协同性。2014年《关于加强河湖管理工作的指导意见》中提出鼓励各地推行政府行政首长负责的河长制,2016年《关于全面推行河长制的意见》提出建立健全以党政领导负责制为核心的责任体系,可以看出国家对河长制组织架构进行了调整,并在之后提出了全面推行河长制的6项工作制度,强化保障了河长制各项工作任务推进。为进一步加强湖泊管理保护工作,2017年发布了《关于在湖泊实施湖长制的指导意见》,对《关于全面推行河长制的意见》中湖泊管理保护要求进行了详细解释和补充。近年来国家颁布的河湖长制政策见表1。

在履职规范化上,水利部于2019年具体提出了各级河湖长的工作职责,简要提及了河长制办公室的职责和任务,后于2021年细化了河长制办公室工作规则,进一步明确了各级河长办的主要职责、主要任务和履职方式,规范了河长办的履职行为并强化了履职效能。此外,为了充分调动和激发各地全面强化河湖长制工作的积极性、主动性和创造性,自2019年起,水利部加大了对成效明显地区的激励支持力度,并根据每年的实际情况,对激励措施及实施办法进行调整完善。

在河湖管理工作要点中,2019年开展典型示范河湖创建活动,2020年开展“逐梦幸福河湖”活动,2021年积极推进健康美丽幸福河湖建设,2022年打造人民群众满意的幸福河湖。2021年12月16日,由全面推行河湖长制工作部际联席会议办公室指导、中国水利学会主办的“强化河湖长制,建设幸福河湖”——河湖长制与河湖保护高峰论坛在湖南长沙举办,时任水利部副部长魏山忠强调,要持续推动河湖长制从“有名有责”到“有能有效”,打造河湖长制“十四五”升级版,努力建设造福人民的幸福河

表 1 国家颁布的河湖长制政策

政策名称	发布时间	发布部门
关于加强河湖管理工作的指导意见(水建管〔2014〕76号)	2014年3月	水利部
关于全面推行河长制的意见(厅字〔2016〕42号)	2016年11月	中办、国办
关于印发贯彻落实《关于全面推行河长制的意见》实施方案的函(水建管函〔2016〕449号)	2016年12月	水利部、原环境保护部
关于印发全面推行河长制工作督导检查制度的函(办建管函〔2017〕102号)	2017年2月	水利部
发文同意建立全面推行河长制工作部际联席会议制度	2017年3月	国办
关于加强全面推行河长制工作制度建设的通知(办建管函〔2017〕544号)	2017年5月	水利部
关于印发“一河(湖)一策”方案编制指南(试行)的通知	2017年9月	水利部
关于在湖泊实施湖长制的指导意见(厅字〔2017〕51号)	2017年12月	中办、国办
关于印发《河长制湖长制管理信息系统建设指导意见》《河长制湖长制管理信息系统建设技术指南》的通知	2018年1月	水利部
关于印发《“一河(湖)一档”建立指南(试行)》的通知(办建管函〔2018〕360号)	2018年4月	水利部
关于开展全国河湖“清四乱”专项行动的通知(办建管〔2018〕130号)	2018年7月	水利部
关于推动河长制从“有名”到“有实”的实施意见的通知(水河湖〔2018〕243号)	2018年10月	水利部
关于印发全面推行河长制湖长制总结评估工作方案的通知	2018年11月	水利部、生态环境部
关于印发对河长制湖长制工作真抓实干成效明显地方进一步加大激励支持力度的实施办法的通知(水河湖〔2019〕63号)	2019年2月	水利部
关于进一步强化河长湖长履职尽责的指导意见(办河湖〔2019〕267号)	2019年12月	水利部
关于印发河湖管理监督检查办法(试行)的通知(水河湖〔2019〕421号)	2019年12月	水利部
关于深入推进河湖“清四乱”常态化规范化的通知(办河湖〔2020〕35号)	2020年3月	水利部
关于印发河长湖长履职规范(试行)的通知(水河湖函〔2021〕72号)	2021年5月	水利部
河长制办公室工作规则(试行)(第85号)	2021年7月	水利部
关于印发2022年水利乡村振兴工作要点的通知(办振兴〔2022〕64号)	2022年3月	水利部

注:中办、国办分别是指中共中央办公厅、国务院办公厅。

湖。可以明显看到,随着河湖长制相关政策每年发布后产生的成效不同,河湖管理的目标也在不断发生着变化。从示范河湖建设中获取经验到明确河湖建设目标,国家政策的颁布是根据河湖长制实际运行情况循序渐进的。

2.1.2 地方层面

2019年水利部印发的《关于进一步强化河长湖长履职尽责的指导意见》中就各级河长湖长职责属地责任和部门责任、履职方式和工作方法、考核和责任追究提出了相应的意见和建议,但具体落实还需要地方上因地制宜地开展创新实践工作。只有地方政府相关政策不断跟进,才能使河湖长制在当地的深入落实更具科学性、有效性和持续性。

横向府际学习是初期推动河湖长制持续创新的

主要学习形式,后随着政策知识和地方实践经验的积累,纵向府际学习成为河湖长制推向全国后的主要学习形式^[14]。因此,河湖长制的扩散过程,既包括政府层级间自下而上的政策吸纳,又包括行政指令自上而下的高位推动^[15],且政策实施效果具有明显的区域不平衡性,东部地区优于中西部地区,南方地区优于北方地区^[16]。从近些年部分省(自治区、直辖市)颁布的河湖长制政策(表2)也可以看到,自《关于全面推行河长制的意见》发布后,上海市于1月后便在全国率先发布全面推行河长制的实施方案,后依次为湖北、陕西、辽宁、福建、河北、江苏、安徽、浙江;自《关于在湖泊实施湖长制的指导意见》发布后,浙江省于半年后发布了《浙江省关于深化湖长制的实施意见》;自《关于加强全面推行河长制

表 2 部分省(自治区、直辖市)颁布的河湖长制政策

政策名称	发布时间	发布地区	发布部门
关于本市全面推行河长制的实施方案(沪委办发〔2017〕2号)	2017年1月	上海市	中共上海市委办公厅、上海市人民政府办公厅
福建省全面推行河长制实施方案(闽委办发〔2017〕8号)	2017年2月	福建省	中共福建省委办公厅、福建省人民政府办公厅
关于在全省全面推行河长制的实施意见(苏办发〔2017〕18号)	2017年3月	江苏省	中共江苏省委办公厅、江苏省人民政府办公厅
浙江省关于深化湖长制的实施意见(浙委办发〔2018〕43号)	2018年7月	浙江省	中共浙江省委办公厅、浙江省人民政府办公厅
关于印发莆田市河长会议制度(修订)等规章制度的通知(莆河办〔2019〕11号)	2019年5月	福建省莆田市	莆田市河长制办公室
关于进一步强化地(市)河长制湖长制工作的通知(藏河办〔2020〕29号)	2020年10月	西藏自治区	西藏自治区总河长办公室
关于印发对河长制湖长制工作真抓实干成效明显地方进一步加大激励支持力度实施办法的通知(桂水河湖〔2021〕11号)	2021年11月	广西壮族自治区	广西壮族自治区水利厅、广西壮族自治区财政厅

表3 各地颁布的河湖长制法规

级别	法规名称	实施时间	发布地区
	浙江省河长制规定	2017年10月1日	浙江省
	海南省河长制湖长制规定	2018年11月1日	海南省
	江西省实施河长制湖长制条例	2019年1月1日	江西省
	吉林省河湖长制条例	2019年3月28日	吉林省
省级	辽宁省河长制湖长制条例	2019年10月1日	辽宁省
	福建省河长制规定(仅福建省是政府令发布)	2019年11月1日	福建省
	重庆市河长制条例	2021年1月1日	重庆市
	青海省实施河长制湖长制条例	2021年11月1日	青海省
	四川省河湖长制条例	2022年3月1日	四川省
	黄山市河湖长制规定	2018年7月18日	安徽省黄山市
	蚌埠市河湖长制规定	2019年2月1日	安徽省蚌埠市
	山南市实施河长制湖长制条例	2019年9月1日	西藏自治区山南市
市级	西宁市河长制湖长制规定	2020年2月1日	青海省西宁市
	龙岩市实施河长制条例	2020年5月1日	福建省龙岩市
	芜湖市河湖长制规定	2021年3月1日	安徽省芜湖市
	泰州市河长制工作条例	2022年1月1日	江苏省泰州市
村级	雅安市村级河(湖)长制条例	2020年1月1日	四川省雅安市

工作制度建设的通知》发布后,福建省水利厅于3月后发布了福建省河长制会议制度、河长制信息通报及共享制度、河长制工作督导检查制度、河长制工作考核制度、河长制巡查工作制度,莆田市河长办于2019年5月印发了河长会议制度(修订)等规章制度。可以看到,经济较为发达的东部沿海地区紧跟国家政策步伐,而北方和中西部部分省份在河湖长制推进速度上也较快,但配套制度跟进得晚。例如西藏自治区总河长办于2020年10月发布《关于进一步强化地(市)河长制湖长制工作的通知》,重点提出了加强对河长制湖长制工作的领导以及加强水域岸线管理保护的实施意见,其对当地河湖治理现状认识清晰,政策落地性强、易出成效,也正在将河湖长制从全面建立到全面见效稳步推进。

2.2 法规及标准制定

2.2.1 法规制定

河湖长制管理的规范化与标准化离不开相关法律法规的有效支撑,立法可以充分体现国家的政治决心,以专项立法为先导,通过法律法规明确河湖管理的各项工作内容,使得河湖长制实施、管理等各个环节有法可依。国家现已颁布的涉水法律法规包括《中华人民共和国水法》《中华人民共和国水土保持法》《中华人民共和国防洪法》《中华人民共和国水污染防治法》《中华人民共和国长江保护法》《中华人民共和国河道管理条例》《水库大坝安全管理条例》等等,涉及水资源、水域岸线、水污染、水环境、水生态、监督管理等河湖长制工作涵盖的相关内容。2017年6月,新修订的《中华人民共和国水污染防治法》首次将河长制写入法律,河长制作为中国水环境治理体系和保障国家水安全的制度创新,正式取得了法律地位。自此,各地根据省情、水情因地制宜颁布了河湖长制规定或条例,见表3。自全面推行河湖长制五年多以来,有9个省份发布了河湖长制规定或条例^[17],其中浙江省于2017年7月在全国首位出台河长制规定,推动河长制实施进入法治化阶段。从法规级别来看,浙江省、海南省、江西省等出台了省级河湖长制规定或条例,安徽省、西藏自治区、江苏省出台了市级河湖长制法规,青海省、福建省在省市均出台了河湖长制规定或条例,四川省雅安市还出台了村级河(湖)长制条例。此外,立法还能发挥引领作用。浙江省地方标准《河(湖)长制工作规范》正是在《浙江省河长制规定》指导下制定的,推动了全省河(湖)长制工作从“有章可循”到“有法可依”再到“依标办事”。

2.2.2 标准化进展

河湖长制管理标准化离不开各类标准规范的制

约。水利部于2020年6月发布了SL/T 793—2020《河湖健康评估技术导则》,并于2020年9月起实施。各地根据河湖、河湖长和河湖长制的特定需求,相继出台了河湖长制地方标准,见表4。自全面推行河长制6年来,6个省(自治区、直辖市)发布了共计8个河湖长制标准规范,2个地级市发布了共计3个河湖长制标准规范,多个省市发布了涉及河湖长制的标准规范^[18]。此外,还有多个省市区出台了幸福河湖建设评价标准,如DB330503/T 15—2020《平原区幸福河湖建设规范》(浙江省湖州市南浔区)、DB3301/T 0340—2021《幸福河湖评价规范》(浙江省杭州市)等;出台了幸福河湖评定办法和指标体系,如《广西美丽幸福河湖建设评价标准(试行)》《淄博市“幸福河湖”评定管理办法(试行)》《泰州市“五星”幸福河评定办法(试行)》等;出台了幸福河湖规划建设方案,如《海南省绿水行动之幸福河湖建设行动方案(2021—2023)》《南京市幸福河湖建设三年行动计划(2021—2023年)》《涟水河湘潭段幸福河湖建设总体规划方案》等,全力推动幸福河湖建设,让群众共享生态福利。

从不同层级制订的标准及其内容展开分析。以浙江省为例,绍兴市DB3306/T 015—2018《河长制工作规范》和DB3306/T 016—2018《湖长制工作规范》为全国范围内首个河湖长制地方标准,为地方层面设立河湖长制标准化制定提供了参考,浙江省DB33/T 2361—2021《河(湖)长制工作规范》较绍兴市晚3年实施。浙江省规范起草单位包括河长制办

表4 各地颁布的河湖长制和涉及河湖长制标准

级别	标准名称	实施时间	发布地区
省级	DB36/T 1219—2019 河长制湖长制工作规范	2020年6月	江西省
	DB34/T 3735.1—2020 河长制决策支持系统 第1部分:数据库设计规范	2020年12月	安徽省
	DB34/T 3735.2—2020 河长制决策支持系统 第2部分:数据资源共享规范	2020年12月	安徽省
	DB32/T 3984—2021 河长公示牌规范	2021年3月	江苏省
	DB35/T 1957—2021 河湖长制工作管理规范	2021年5月	福建省
	DB33/T 2361—2021 河(湖)长制工作规范	2021年10月	浙江省
	DB34/T 3735.3—2021 河长制决策支持系统 第3部分:数据采集加工存储规范	2021年10月	安徽省
	DB12/T 1113—2021 河湖长制工作规范	2022年2月	天津市
	DB45/T 1513—2017 城市水系生态环境修复技术指南	2017年5月	广西壮族自治区
	DB32/T 3674—2019 生态河湖状况评价规范	2019年12月	江苏省
	DB11/T 1722—2020 水生态健康评价技术规范	2020年7月	北京市
	DB37/T 4347—2021 “一河一策”方案编制规程	2021年4月	山东省
	DB12/T 1058—2021 河湖健康评估技术导则	2021年8月	天津市
	DB36/T 1404—2021 河湖(水库)健康评价导则	2022年1月	江西省
	DB42/T 1771—2021 河湖健康评估导则	2022年2月	湖北省
市级	DB3306/T 015—2018 河长制工作规范	2018年9月	浙江省绍兴市
	DB3306/T 016—2018 湖长制工作规范	2018年9月	浙江省绍兴市
	DB3405/T 0001—2020 河长制湖长制建设指南	2021年1月	安徽省马鞍山市
	DB3205/T 1016—2021 河湖健康评价规范	2021年2月	江苏省苏州市

公室及标准化研究院,规定了河(湖)长制工作的基本要求、工作内容和实施要求等内容,针对的是适合全省河湖长制基础性工作的共性要求。绍兴市规范还包括了水利局、环境保护局、住房和城乡建设局、农业局等涉及河湖长制方面的相关部门,规定了河长制和湖长制的术语和定义、管理要求、工作职责和内容、工作任务、巡查要求、公开要求、考核与问责等内容,较浙江省规范制定得更为细致,另外增加了在当地常规化执行的“两路两侧”市级河长、河道警长等的工作职责和内容。但浙江省规范较绍兴市规范吸纳了近些年全省创新开展的成功实践,例如“绿水币”制度,并对各级河湖长的巡查内容作了补充完善,概括性地提出宜建立民间河湖长、志愿者、网格员等队伍,是对近些年创立的各类民间人员和组织的总结。

从各省份发布的河湖长制工作规范来看,各省份河湖长制工作的内容和重点存在一定的差异。浙江省规范更偏重于巡查和对问题的处理,未对各类问题整改情况的结果进行应用,江西省、福建省和天津市规范中对各类结果的应用进行了规定,其中福建省还提出了评价及改进措施。在制度建设方面,浙江省规范仅列出了相关制度的名称,福建省规范对各类工作制度的内容进行了说明,江西省和天津市规范对各类制度的内容包括流程、方式、结果运用等进行了更为详细的阐释。

此外,各省份规范的附录也有不同的内容。浙江省规范在附录中明确指出了各级河湖长的工作内容,是在《河长湖长履职规范(试行)》基础上结合实际的详细说明,还将河湖巡查问题细致分为轻微、一

般和重大3类,举例说明了典型问题类型;江西省规范在附录中列出了事件受理及处理台账表、巡查记录表、督办单、河湖保洁记录表等样表,并以图文形式详细展示了各级河湖长制公示牌的样式。天津市规范在附录中列出了河湖长制组织体系框架图、河湖长巡查工作要求、暗查暗访工作流程图及相关表格、河湖长公示牌设立要求及示例图、社会监督举报办理流程及记录单、督办工作流程图及通知单、河湖长制协调联动工作流程图,内容最为丰富和清晰。福建省规范未设置附录,仅以文字形式阐述。

2.3 专业支持

河湖长制工作涉及水利、环境、法律、管理等多学科的交叉。

截至2021年底,有10多个省份的高校或相关企业事业单位成立了河湖长制方面的学院、研究院或中心,共计约30家^[19]。例如,河海大学河长制研究与培训中心于2017年4月在全国率先成立,内部组建了涉及河湖长制政策机制、水资源保护、水域岸线管理、水污染防治、水环境治理、水生态修复、执法监管、信息化、河湖健康与幸福河湖指数、卫星遥感应用等10个研究团队,在外成立了3个河湖长培训中心和1个研修实训基地,并建立了河长云智库专业服务网站。又如,福建省九市一区河长办均成立了河湖长制方面的学院或研究院,省级成立了福建省河湖健康研究中心,并发布了全国首部《河流健康蓝皮书》。

此外,全国5年来正式出版涉及河湖长制方面的书籍共计约62部^[20]。例如,河海大学河长制研究与培训中心组织编写《河长制政策及组织实施》

《水资源保护与管理》《水污染防治》等河(湖)长制系列培训教材共计10部,编撰《全国河长制湖长制适用技术指南》《全国河长制湖长制适用技术细则》2部,浙江水利水电学院组织编写《河(湖)长能力提升系列丛书》7部,这都为河湖长们提供了有力的决策参考。

2.4 案例分析

2.4.1 浙江省绍兴市

绍兴市在全国率先开展河长制管理,于2012年10月发布《绍兴市区主要河道实施“河长制”管理工作的意见》,2013年12月发布《绍兴市“河长制”管理实施方案》,2016年6月发布《关于进一步强化“河长制”管理的意见》,2017年5月发布《绍兴市全面深化河长制工作方案(2017—2020年)》,2017年7月发布《关于全面推行“湖长制”管理工作的意见》,至此全面建立了河湖长工作体系。2018年8月,绍兴市发布DB3306/T015—2018《河长制工作规范》和DB3306/T016—2018《湖长制工作规范》,以地方标准形式明确规定了各河湖长的管理要求、工作职责与内容、巡查要求等,对推进绍兴市河湖长制及河湖管理工作具有重要的指导作用。

在标准的指导下,绍兴市河湖长制工作逐步规范化,促进了河湖面貌的变化。截至2021年底,绍兴市在全市范围内基本建成“污水零直排区”,县控及以上断面Ⅰ~Ⅲ类水比例和功能区分区达标率均达到100%。在水资源保护方面,该标准要求落实最严格水资源管理制度,实行水资源消耗总量和强度双控措施,至2021年底,绍兴市在浙江省内率先实现全县范围内覆盖“节水型社会”和“节水型城市”。在水环境治理方面,绍兴市发布了美丽河湖电子地图,以“健康码”形式管理河湖,截至2021年底,共建成省级美丽河湖38条,在全省居于首位。在公众参与方面,目前全市已形成庞大的民间河长队伍,企业河长、洋河长、红领巾河长、河嫂、河小二、河小青等不断涌现,共计538支民间志愿护水队伍参与日常护水行动,形成了全民治水、爱水、惜水、护水的良好局面。这两套标准也为全国各级河长湖长履职提供了行为规范和操作标准的参考,同时推动了全国民间河长的发展。

2.4.2 福建省

福建省于2014年8月发布《福建省“河长制”实施方案》,2015年11月通过《福建省河道保护管理条例》,2017年2月发布《福建省全面推行河长制实施方案》,2019年11月施行《福建省河长制规定》,2021年7月印发《2021年度福建省河湖长制工作考核评分细则》,2021年5月实施DB35/T

1957—2021《河湖长制工作管理规范》,切实推动全省河湖长制从“有名”向“有实”转变。

福建省自2017年3月全面推行河湖长制以来,河湖长制工作始终保持全国前列,是全国唯一连续4年获得国家正向激励的省份,“河湖长制责任落实”“河湖长制+司法协作”等39项机制作为国家生态文明试验区改革经验全国推广。《福建省河长制规定》明确了河长制工作任务、管理体制、工作机制、考核与问责等内容,法规的颁布使得福建省河湖长制工作步入法制化管理轨道。DB35/T1957—2021《河湖长制工作管理规范》进一步规定了河湖长制组织体系及工作职责、基础性工作及制度规则、资源保障及宣传教育等内容,标准的实施实现了河湖长制管理的科学化、程序化和规范化,提高了工作质量和管理水平。2022年2月,福建省幸福河湖促进会在全国率先成立,标志着福建省河湖治理保护工作迈入新征程。在法规和标准的指导下,各地积极开展探索和实践,因地制宜形成了河湖长制管理行之有效的运作模式,取得了较好的成效,莆田木兰溪于2017年获评第一届全国“最美家乡河”,九龙江西溪于2022年入选第二届“最美家乡河”名单。河湖长制的创新实践也不断涌现。厦门市于2021年7月发布《小微水体治理工作指南》,目前已将910个小微水体全面登记造册,形成“一塘(池)一档”,已完成302个小微水体治理;宁德市于2021年率先投用数字河湖平台,构建数字孪生网络,搭建“河湖管理专业工具”以服务一线基层河长;龙岩市于2020年5月实施《龙岩市实施河长制条例》;永春县将河湖长制作为党校培训必修课。在福建省河长办对九市一区2021年度河湖长制工作考核中,各地优秀率已达80%。

2.4.3 江苏省

为深入贯彻落实习近平总书记关于建设“造福人民的幸福河”的伟大号召,江苏省总河长于2021年6月签发《关于全力建设幸福河湖的动员令》(2021年第1号省总河长令),部署在全省组织开展幸福河湖建设。江苏省河长制工作领导小组于2021年8月印发《关于推进全省幸福河湖建设的指导意见》,提出新发展阶段江苏省河湖治理保护的新任务、新要求。根据上述两个文件的要求,江苏省河长制工作办公室于2021年11月印发《江苏省幸福河湖评价办法(试行)》,内附针对河道、湖泊与水库的幸福河湖评分标准和赋分细则,以规范全省幸福河湖评价工作。

在省级幸福河湖建设规范化的推动下,各地紧跟步伐。南京市于2021年11月发布了《南京市幸

福河湖评价规范(试行)》和《南京河湖建设技术指南(试行)》,从河湖水资源、河湖水环境、河湖生态、河湖水文化、河湖管理、公众满意度等方面提出了幸福河湖建设主要内容和技术要求,河湖整治与管护工作得到进一步重视,河湖面貌持续改善,2021年地表水42个国省考断面水质优良比例100%,28条入江支流水质全部达标,水环境质量继续保持全省首位,并计划于2022年完成174条幸福河湖建设,构筑起连线成网的幸福河湖水系。泰州市于2021年8月出台《“星级”幸福河湖评定办法(试行)》,针对城区河道和乡村河道的差异设定了不同的评定标准,为泰州市幸福河湖建设提供了精准指导,截至2021年底已投资4.7亿元建成264条幸福河湖,并从中评选出“十佳”幸福河湖10条,“五星”幸福河湖20条,形成了“幸福河湖样板图”。徐州市于2021年8月发布《徐州市河湖管理条例》,提出建设生态美丽幸福河湖,在法规的指导下,云龙区大龙湖于2022年2月通过幸福河湖建设验收,成为江苏省首个建成的淮河流域幸福河湖及江苏省级幸福河湖,为幸福河湖建设提供了“可复制、可借鉴、可推广”的样板。

3 存在的问题与相关建议

尽管大部分省市开展了大量的实践并取得了一定进展,但多数地区对标准化管理工作任务要求、形式、内容等都缺乏必要的认知,导致河湖长制规范化与标准化工作还流于形式,没有发挥其有效作用。因此,河湖长制管理规范化与标准化总体上仍处于起步探索阶段,规范化与标准化工作亟待加强,尤其在政策创新和落实、法规标准执行、公众参与等多个方面具有较大的空间。

3.1 存在的问题

a. 政策创新不足,难以解决实际问题。政策是否成功主要取决于其是否适合当地情境^[21],但从目前来看,河湖长制政策的创新性和可落地性不足,属于照搬式政策制定,最终导致了象征式政策执行,例如在“一河(湖)一策(档)”的制定上表现出大同小异,很多地方是多河一策,没有发力解决河湖实际问题。

b. 法规标准执行力低,难以考核评价。已制定的法规和标准较少,河湖长制工作需求仍然是供给不足,例如:已出台的涉及河湖长制标准大都为河湖健康评估,仍停留在健康水生态层次,未包含先进水文化和人民幸福感两方面指标;民间河长已成为公众参与河湖管护的主要力量,但民间河长的工作职责和内容以及如何统一组织管理等方面,均尚未出台相关标准进行明确。此外,现行标准均为推荐性

国家标准,非强制执行,除在当地有较好的实施效果外,对其他省市的影响较小,仍不能满足河湖管理和保护的需求。同时,对法规和标准的实施缺乏配套措施,贯彻执行力不足,也缺乏对河湖长制标准化管理实施效果的跟踪审计^[22]。

c. 公众参与不到位,难以推广。河湖长通过集权充分调动政府和社会资源,在最短时间内实施决策,大大提高了河湖管理效率,但集权本身又会由于各方利益容易背离公众意愿^[23],若在政策、法规和标准的制定上缺乏对公众意见的吸纳,必将导致行为后果脱离民之所向,标准化管理也难以落实。此外,治水只是当地政府承担的众多责任中的一项,部分地区受限于当地经济发展,尚未在经济发展和环境治理之间找到平衡^[24],难以促进标准化管理得到推广,这就要求公众力量的补充,长期治理必然需要保障公众参与的长效机制。

3.2 相关建议

a. 加强顶层设计,创新政策内容。政策制定过程中应加强规划引领,做好顶层设计,组织有关专家学者开展严格会审或函审,审查政策与国家方针政策、法律法规、强制性标准是否一致,重点审查政策是否因地制宜进行创新,能否满足实际工作要求。政策内容上,应总结归纳当地已开展的创新实践,加强国家层面上河湖长制政策设计,例如河湖长履职机制、工作激励机制、评估机制等,进一步明确各级河湖长在职责划分上的差异性,加强对跨界河湖的协同管理,建立常态化管护制度和机制,避免基层河湖长知政策、难执行的困境,切实提高政策内容的可行性与政策出台的合理性。

b. 加强法规标准建设,完善考核评价机制。要加大法规和强制性标准的制定力度,完善相关立法,落实法规标准,为河湖长制的顺利实施提供坚实的基础。河湖长制的实施牵涉水利、环保、财政、国土等多个部门以及多方面群体,因此仅制定水利行业标准是不合适的,但可由水利部提出并归口,其他行政主管部门以及高校和科研院所共同参与起草,集思广益、汇聚各方力量,并定期或不定期地分析和评价其实施后的有效性以及河湖长的执行力,对潜在问题及时寻求解决办法。可通过行业协会制定团体标准,如中国水利学会团体标准。在河湖长制方面,可加快建立河湖长制工作标准、评估标准、幸福河湖建设标准等^[25]。此外,完善科学有效的考核机制对于落实法规标准至关重要,考核机制不合理会削弱其在改善河流水质方面的长期有效性。因此,考核指标需因地制宜科学设计,根据不同区域的水情和治理水平实施差异化考核标准。同时,要减少重复

考核带来的资源浪费,减轻基层河湖长疲于考核的压力,并加强考核结果反馈,将考核结果与奖惩机制紧密相关,提高开展河湖管理工作的积极性。

c. 完善公众参与机制,提升全民治水能力。在政策、法规、标准等落实和发展过程中加强公众监督和参与力度,听取社会声音,且有必要制定民间河长、志愿组织参与护水巡河的相关规范章程。随着公众参与程度的提高,将更易接纳各方利益矛盾最终形成利益共识^[26],有利于深入推进河湖长制可持续规范化与标准化管理。

参考文献:

[1] LI Yinghong, TONG Jiaxin, WANG Longfei. Full implementation of the River Chief System in China: outcome and weakness [J]. Sustainability, 2020, 12 (8): 3754.

[2] 常轶军, 元帅. “空间嵌入”与地方政府治理现代化 [J]. 中国行政管理, 2018 (9): 74-78. (CHANG Yijun, YUAN Shuai. Spatial embeddedness and governance modernization of local government [J]. Chinese Public Administration, 2018 (9): 74-78. (in Chinese))

[3] WANG Longfei, TONG Jiaxin, LI Yi. River Chief System (RCS): an experiment on cross-sectoral coordination of watershed governance [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2019, 13 (4): 64.

[4] WANG Longfei, LI Y. Chinese scheme to resolve the current complicated water issues: river chief system (RCS) [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 191 (1): 012019.

[5] 王冠军, 郎勋贤, 刘卓. 强化河湖长制 推进河湖治理保护 [J]. 水利发展研究, 2021, 21 (1): 23-25. (WANG Guanjun, LANG Maixian, LIU Zhuo. Strengthen the river and lake chief system to promote the management and protection of rivers and lakes [J]. Water Resources Development Research, 2021, 21 (1): 23-25. (in Chinese))

[6] 李伟斯, 曹方晶, 齐鑫, 等. 山东省借助河长制工作平台推动水生态环境改善经验做法探讨 [J]. 水利发展研究, 2021, 21 (9): 72-75. (LI Weisi, CAO Fangjing, QI Xin, et al. Discussion on the experience and practice of promoting the improvement of water ecological environment in Shandong Province with the help of the working platform of the River Chief System [J]. Water Resources Development Research, 2021, 21 (9): 72-75. (in Chinese))

[7] 唐慧慈. 德州市三干流堤防标准化管理现状研究 [J]. 海河水利, 2021 (2): 62-64. (TANG Huici. Research on present situation of standardization management of levees in three mainstreams in Dezhou City [J]. Haihe Water Resources, 2021 (2): 62-64. (in Chinese))

[8] 卢智灵, 谢翠松, 陈嘉胤. 上海市河湖名称现状分析及命名规范化方法 [J]. 人民长江, 2021, 52 (增刊 2): 33-

36. (LU Zhiling, XIE Cuisong, CHEN Jiayin. Current situation analysis of river and lake names and standardization method of naming in Shanghai [J]. Yangtze River, 2021, 52 (Sup2): 33-36. (in Chinese))

[9] 朱景雅, 朱培武. 标准化视角下“河长制”在水环境治理中效用及对策研究 [J]. 质量探索, 2018, 15 (4): 43-47. (ZHU Jingya, ZHU Peiwu. Study on the utility and countermeasures of river chief system in water environment management from the perspective of standardization [J]. Quality Exploration, 2018, 15 (4): 43-47. (in Chinese))

[10] 单仕钰, 茅海军, 葛洋, 等. 标准化视角下河长制规范化的探究 [J]. 中国标准化, 2019 (9): 57-59. (SHAN Shiyu, MAO Haijun, GE Yang, et al. Exploration on the standardization of the river chief system [J]. China Standardization, 2019 (9): 57-59. (in Chinese))

[11] 李国英. 强化河湖长制 建设幸福河湖 [N]. 人民日报, 2021-12-08 (14).

[12] 吴宸晖, 鞠茂森. 河流生态修复的国际经验及对长江大保护的启示 [J]. 水资源保护, 2021, 37 (3): 136-144. (WU Chenhui, JU Maosen. International experience of river ecological restoration and its enlightenment to the Yangtze River Protection [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (3): 136-144. (in Chinese))

[13] 贺东航, 贾秀飞. 制度优势转为治理效能: 中国生态治理中的政治势能研究: 以“河长制”政策为案例 [J]. 中共福建省委党校 (福建行政学院) 学报, 2020 (3): 14-21. (HE Donghang, JIA Xiufei. Turning institutional advantage into governance effectiveness: a study of political potential energy in China's ecological governance [J]. Journal of Fujian Provincial Committee Party School of CPC (Fujian Academy of Governance), 2020 (3): 14-21. (in Chinese))

[14] 冷涛. 府际学习: “河长制”政策创新的核心动力 [J]. 人民论坛, 2019 (18): 42-43. (LENG Tao. Intergovernmental learning: the core power of policy innovation of “River Chief System” [J]. People's Tribune, 2019 (18): 42-43. (in Chinese))

[15] 王洛忠, 庞锐. 中国公共政策时空演进机理及扩散路径: 以河长制的落地与变迁为例 [J]. 中国行政管理, 2018 (5): 63-69. (WANG Luozhong, PANG Rui. Temporal and spatial evolution mechanism and policy diffusion path of China's public policy: a study of the implementation and changes of river-chief system [J]. Chinese Public Administration, 2018 (5): 63-69. (in Chinese))

[16] 许莹莹, 唐培钧. “河长制”政策效应及地区异质性研究 [J]. 生态经济, 2020, 36 (12): 181-186. (XU Yingying, TANG Peijun. Study on policy effect and regional heterogeneity of the river chief system [J]. Ecological Economy, 2020, 36 (12): 181-186. (in Chinese))

[17] 李贵宝. 河长制实施五年总结: (1) 发布的地方性法规 [EB/OL]. (2022-02-08). https://mp.weixin.qq.com/s/eYHpugZen6OnorX95N_4Mg.

(下转第 28 页)

过水设施水流噪声的形成机理及影响因子研究综述

王煜,石敏,卢晓春

(三峡大学水利与环境学院,湖北宜昌 443002)

摘要:为提高水流噪声对过水设施运行状态的监测效率,需明确水流噪声形成的机理及其与过水设施运行及结构参数之间的相互关系。分析和总结了河道与水电站常用过水设施水流噪声的形成机理及影响因子,指出常用过水设施水流噪声特征与其运行工况及流道结构特征密切相关,水流流速、流量与形成的水流噪声声级呈正相关关系;流道结构形式越复杂则水流紊动越激烈,水流噪声形成机理也越复杂。过水设施水流噪声声级和频率随流道水动力特性和结构边界特性同步变化,可作为过水设施运行及流道状态的信号源,实时监测过水设施的运行状态和安全,保障过水设施的安全。

关键词:水流噪声;过水设施;形成机理;影响因子;特征值

中图分类号:TV6 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)01-0009-06

A review on formation mechanism and influencing factors of water noise of overflow facilities//WANG Yu, SHI Min, LU Xiaochun(College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: To improve the monitoring efficiency of water noise on the operation status of overflow facilities, it is necessary to clarify the formation mechanism of water noise and its relationship with the operating and structural parameters of overflow facilities. The formation mechanism and influencing factors of water noise of common overflow facilities of river channels and hydropower stations were analyzed and summarized. It is concluded that the characteristics of water noise of common overflow facilities are closely related to their operating conditions and channel structure characteristics. The flow velocity and flow rate are positively correlated with the noise level of water flow. The more complex the flow channel structure is, the more intense the flow turbulence is and the more complex the formation mechanism of water noise will be. The water noise level and frequency of overflow facilities change synchronously with the hydrodynamic characteristics and structural boundary characteristics of the passage, which can be used as the state signal source for the operation of overflow facilities. Monitoring the operation state and safety in real time can ensure the safety of overflow facilities.

Key words: water noise; overflow facilities; formation mechanism; influencing factor; eigenvalue

水流通过大型过水设施,如溢流堰、水闸、水轮机、引水隧洞以及泄洪孔等,由于水流复杂的流道边界,往往导致水流高速紊动,进而引发高分贝水流噪声,对过水设施及其附属建筑的安全造成一定威胁。城市景观水体中常用过水设施如低堰、闸坝的运行也会产生一定程度的水流噪声,有的甚至会超过居住环境噪声标准,污染环境,不利于周边居民的身心健康。例如:湖南蓝山县舜水河坝产生了扰民的水流冲击声,遭到周边居民的投诉;福建永安市城市慢线1号生态坝从投入使用以来产生的冲击噪声经4次检测均超过居住环境噪声标准,严重影响了周围

居民的正常生活,最终通过降噪措施得到改善;福州市富泉乡三级电站运行中水力发电机组产生的噪声对周边居民产生了难以忍受的噪声污染。为提高过水设施的运行安全和寿命,减少环境噪声污染,有必要对常用过水设施水流噪声的形成机理及关键影响因子进行深入研究。

水流噪声特征与水流水动力特性和过流边界特性密切相关,不同水流特性及过流边界将产生不同声级(本文所述“声级”均采用A计权声级)、不同频率、不同音色的噪声。过水设施中有压流道与无压流道形成具有不同特征的水流噪声;不同类型的无

基金项目:国家自然科学基金(52279070)

作者简介:王煜(1976—),女,教授,博士,主要从事水电站过渡过程及水库调度研究。E-mail:wangyuhoney@163.com

通信作者:卢晓春(1983—),男,教授,博士,主要从事大坝长期服役性态分析与安全评估研究。E-mail:luxiaochun1014@163.com

压泄水建筑物(如溢流堰等)泄水时会在消力池中形成不同类型的水跃,水跃紊动程度及掺气浓度具有较大差别,相应地,形成的水流噪声声级不同;水电站水轮机有压流道在不同的运行工况下产生具有不同声级和频率的水流噪声。水流流经不同材料构成的压力水管形成不同声级的水流噪声,如水流流经硬聚氯乙烯塑料管道与流经铸铁管道产生的水流噪声声级明显不同^[1];水流进入水电站进水口时,由于断面收缩形成的加速收缩流会产生较大声级的水流噪声;水流进入水电站水轮机流道,由于水轮机复杂流道边界以及水轮机转轮、导叶等过流部件的阻流作用,产生较大声级及频率范围的水流噪声,同时会对水力发电机组运行安全和电站工作人员的身体健康造成较大影响^[2]。胡志华等^[3]对浑河中相同流量条件下的不同泄水建筑物进行了水流噪声研究,发现橡胶坝水流噪声频率最大,其次是渠首滚水坝,最后是翻板闸。可见,不同过水设施产生的水流噪声具有不同的特征,与过水设施结构及运行特点密切相关,可作为实时监测过水设施运行状态及流道特性的有效信号源,特别是对于有压引水隧洞、压力管道、水轮机流道等难以直接监测流道水流特性的过水设施,可通过水流噪声有效监测其运行状态及流道特征,及时识别运行故障和流道缺陷,确保过水设施运行安全。然而,不同过水设施水流噪声的产生机理不同,影响因子较多,如何识别影响水流噪声的关键因子是提高水流噪声对过水设施运行安全诊断效果的关键问题。因此,探明过水设施水流噪声的形成机理及影响因子对提高过水设施噪声监测效率、保护环境和人类健康都具有重大的意义。

1 过水设施水流噪声特征及产生机理

声音是由物体振动产生的,一切不规则的声信号称为噪声。据研究,人类长期处于超过 50 dB 噪声的环境下,容易引发听力下降以及头疼等疾病^[4]。高速水流通过过水设施,如消力池、水闸、溢流堰、水轮机流道等,往往会产生高于 50 dB 的水流噪声,对周边环境和人类健康造成威胁,例如:水流通过米易县城北闸坝工程产生的最大水噪声值为 73.9 dB^[5];某市景观坝所形成的跌水噪声在夜间达到 60 ~ 63 dB^[6]。水电工程中高速水流与流道摩擦撞击形成的水流噪声甚至会高至 100 dB 以上,例如:乌弄龙水电站运行发生异常时水机室流道噪声高达 108 dB^[7];刘殿程^[8]对某水电站水轮机机坑和蜗壳进人孔噪声进行测量,其声压高达 106 dB。水电工程中巨大的水流噪声不但造成周边环境的噪声污染,同时也给水电工程的安全运行带来威胁。

噪声根据频率可分为低频噪声(小于 500 Hz)、中频噪声(500 ~ 2000 Hz)和高频噪声(大于 2000 Hz)。人的可听音范围为 20 ~ 20000 Hz。常用过水设施水流噪声频率范围较广,低至因大坝溢洪道泄洪产生的 0 ~ 10 Hz 的超低频噪声^[9],高至因水轮机流道水流空化形成的 20 kHz 以上的超声波^[10]。

水流噪声是指在不涉及流动诱发的结构共振发声时由于运动流体与固体边界相互作用以及流体内部湍流所引起的辐射噪声,其主要激发机理是由于固体与流体的相对运动以及流体自身的不规则运动所激起的流体内部应力及压力扰动在介质中的传递^[11]。Lighthill 流体声学理论中流体动力声源根据不同的激发机理分为单极子声源、偶极子声源以及四极子声源^[12]。单极子声源是和流体介质的脉动质量有关的单点声源^[13],周围的流体通过膨胀或收缩适应该种径向运动,从而形成一个球体对称声场;偶极子声源是在流速较高的条件下流体遇到物体产生作用力引起涡流而形成,也称为力声源,辐射指向性为 8 字形;四极子声源又被称为应力声源,因运动流体自身的黏滞应力作用而产生,该种声源由两个距离相近、大小相同而相位相反的偶极子构成,声源辐射具有较强的指向性,在偶极子轴向及垂向处的声压为 0,对角处的声压值最大^[12]。Lighthill 流体声学理论建立在不存在固体边界或固体边界对流场影响不大的情况下,但实际上流体与固体边界存在的相互作用直接影响流场,已有学者对静止固体边界对流体动力声场的影响以及运动固体边界声场进行了研究^[13];Powell^[14]提出涡声理论,低马赫数条件下的等熵绝热流体,其产生的流体动力场和辐射声场的基本且唯一的源是涡。

噪声声源不同,其声辐射形成的声场也不同,根据声辐射特性可对水流噪声进行监测。过水设施水流噪声按其产生机理通常分为水流自身紊动产生的噪声(四极子声源)、水流与固定部件撞击产生的噪声(偶极子声源)、水流中的空腔从发展到破裂产生的噪声以及水流掺气产生的噪声(单极子声源)^[15]。

1.1 水流自身紊动产生的噪声

液体具有黏滞性,液体与流道边界的摩擦导致各流束之间具有相对运动,流速较快的流束与流速较慢的流束形成方向相反的切应力从而导致液体形成涡体,发生激烈的紊动,形成水流噪声。湍流中随机性和拟序结构运动的规律性,导致流体的各种物理参数(如速度、压力和温度等)随时空近乎随机变化,湍流物理参数的这种脉动是诱发水动力噪声的首要原因^[16]。胡志华^[15]在测量该类型噪声时,选择平直段水槽进行测量再减去水流与流道作用噪

声,以此计算出水流自身紊动产生的噪声,该实验测得在水流流速小于 6 m/s 时其噪声谱显示为衰减下降的曲线,主频位于 500 Hz 以下的低频段。水流通过压力管道流入水电站,在管道弯管处由于内侧水流流速梯度较大,水流易形成旋涡,管道内流速越大,流速梯度越大,则越容易形成涡体,从而产生噪声^[17]。

1.2 水流与固定部件撞击产生的噪声

水流与固定部件撞击产生的噪声是指水流流动过程中与流道中的闸墩、尾坎、阀门、转轮等固有部件发生摩擦撞击产生的噪声或是水流在水下撞击消能设施形成的冲击噪声。胡志华^[15]将消力池底板脉动压力引起的振动噪声作为水流与建筑物噪声。该种噪声的实质为脉动压力作用的结果,固体边界振动等外力对流体产生影响,使流体边界受到脉动压力作用而产生噪声。

1.3 水流中的空腔从发展到破裂产生的噪声

水流在流动过程中,因压力降低至气化压力时,水体会发生气化,形成气泡或是气泡团,这些气泡或气泡团形成的空腔会随着水流运动发展直至破裂,在这个过程中空腔的膨胀-压缩-破裂导致流体内部压力脉动。空化流的压力脉动包括 3 种不同特性的分量:紊流基础噪声,其噪声频带较宽,幅值较小,并与空化数大小无关;空化即将发生时出现的低频振荡,当空化数减小到临界空化数时发生,一般频率为几十赫兹,类似于周期振荡;空泡溃灭产生的压力脉冲,其幅值很大,可达上万个大气压,历时很短,仅数微秒至几十微秒^[18]。目前针对过水设施水流噪声的研究多集中在高速水流形成的空化噪声^[19-20],且部分高流速泄水水工建筑物针对空化噪声进行水力学安全监测^[21],本文主要集中于其余水流噪声机理的研究。

1.4 水流掺气产生的噪声

水流在紊动的过程中流速增加,紊动强度迅速增大,水流中的涡体绕流产生升力,当涡体具有的竖向瞬时动能足够大时,能够克服水流表面张力和自身重力跃出水面,在重力作用下重新落入水中,带入空气形成气泡^[22]。从空气掺入到水流中随水流掺混流动至破灭的过程,形成激烈的水流掺气噪声。田茹妍^[23]将水滴滴落水面掺入空气形成水声的机理分为:脉动辐射噪声、初生气泡噪声及次生气泡噪声。该种噪声受掺气机理、掺气水深、掺气浓度、掺气条件等因素的影响^[24],不同位置的掺气浓度与过水设施结构形式相关^[25-26],且水流掺气程度以及气泡的位置对水流断面平均流速具有影响^[27],不同工况下的噪声受诸多因子综合作用。张宏伟等^[28]研究表明适当的掺气浓度会使掺气水流的声速显著降

低;压强的减小和相间传热的增强可使声速减小、衰减加快,所以水流中掺气水流噪声的采集会受到一定的影响。

2 过水设施水流噪声关键影响因素研究

水流噪声特征与水流水动力特征、过流边界特征密切相关,是水流特性与其边界特性及其相互耦合作用的综合表征。为明确水流特性及其过流建筑物特性对水流噪声特性的影响,识别影响水流噪声表征的水力要素及产生机理,国内外学者通过大量的实际工程的噪声监测和分析进行了水流噪声特性影响因子的相关研究。

2.1 过水设施水动力特性对水流噪声的影响

Vracar 等^[29]对欧洲 3 大河流(多瑙河、萨瓦河和蒂萨河)进行观测,发现水流噪声频率动态变化区间在 100 Hz 以下,频率主要集中在 20 ~ 30 Hz,多瑙河、萨瓦河水流流速相近,所形成的噪声为 20 ~ 30 dB,蒂萨河的水流流速高于多瑙河和萨瓦河,噪声水平达 40 dB,得出影响噪声大小动态变化的原因为河流流速的结论。Dubey 等^[30]通过物理模型试验模拟城市供水系统管道得出其噪声功率谱密度的分布以及特征,在没有水流通过时,功率谱密度峰值 100 Hz,轻度取决于外部噪声,其噪声的概率密度函数呈现一个非高斯分布的稳定分布,恒定流量通过时,流场呈高斯分布,频率 10 Hz 时声级为 120 dB,超过 10 kHz 后声级下降至 40 dB 以下,说明管道内的水流噪声与管道流量密切相关。Lian 等^[9,31]对锦屏一级水电工程溢流坝进行水流噪声监测,结合数值模拟结果得出坝下水垫塘淹没射流诱发低频水流噪声的结论,同时发现水垫塘涡度与低频水流噪声具有较强的相关性,得出水垫塘强剪切层是低频噪声的主要声源区的结论,可见泄水建筑物低频水流噪声的形成与水流涡度脉动特征相关。郭维东等^[32]发现同一溢流堰产生水流噪声的声级值随流量的增大而增大。李莎莎等^[5,33]通过对无坎宽顶堰水流噪声研究发现,下泄水流产生的水流噪声会随着上游流量与堰高的增加而增加,随下游水深的增加而减小,且在下游水深由 10 cm 增加到 20 cm 时,水流噪声值减小幅度最大;在堰高和上游流量一定的条件下,水流噪声与水压力均随下游水深的增加而减小,但水流噪声的减小幅度远小于水压力,分析原因可能为噪声是由水流自身的紊动以及对堰趾的冲击产生,在后续研究中得出堰趾产生的湍流强度会随堰高、上游流量及下游水深的增加而增加,而冲击水噪声与之相反,通过不断调整水流下跌高度与堰高的比值,当比值为 0.244 时水流下跌处的水噪

声最小,说明流道边界设置条件对水流紊动程度具有决定性作用。

由此可见,过水设施运行工况参数不同,造成流道具有不同的水动力特性,影响了水流噪声特征^[34]。其中流道过流流速越大,产生的水流噪声声级越大。这是因为流道流速增大,水流紊动强度增大,水体中易形成大量涡体,造成水流噪声声级增大。另外,流道水压力不均匀分布及水流相对运动对水流噪声特征具有较大影响。

2.2 过水设施结构形式对水流噪声的影响

过水建筑物结构形式及边界特性对水流噪声也有较大影响。袁常乐等^[35]对圆柱以及方柱进行水下远场噪声分析模拟,发现在均匀流中方柱产生的辐射噪声大于圆柱,但高频噪声衰减速度较快;圆柱在水中产生的辐射噪声有更宽的频域,说明过水建筑物体型对水流噪声衰减及频域特征有较强的影响。王红艳等^[36]根据相似性原理对燕尾坎挑流消能水流噪声进行模型试验研究,发现挑流消能产生的水流噪声主频段位于低频段且噪声强度波动最大,噪声声级最大值出现在频率 32 Hz、40 Hz 处,测点越靠近坝体,低频段波动幅度越大,中频段波动幅度小。郭维东等^[32]监测了不同堰型(WES 堰、宽顶堰)在相同流量和测点条件下产生的水流噪声,发现在整个噪声声级频谱过程中宽顶堰出现 3 个波形,而 WES 堰出现 2 个波形;宽顶堰噪声声级的最大值在低频段 500 Hz 处,而 WES 堰主要在中频段 2000 Hz 处;宽顶堰噪声声级的最小值在高频段 8000 Hz 处,而 WES 堰在低频段 31.5 Hz,说明过水设施结构形式对水流噪声声级具有较大影响。杨蟠^[37]通过对比无坎宽顶堰下游的下凹型缓坡、直线型缓坡、上凸型缓坡与阶梯型缓坡 4 种不同结构形式的缓坡产生的水流噪声,得出直线型缓坡的噪声声级最低。张邱杰^[38]采用闸门与直线型缓坡衔接布置于无坎宽顶堰下游面,并对比 3 种不同的衔接方式(闸门半圆上端,闸门半圆中端,闸门半圆下端)产生的水流噪声特性,发现采用闸门半圆中端与直线型缓坡的衔接方式时,堰体过水产生的水流噪声最小。另外通过对堰体下游面跌水进行水动力数值模拟,结合水流噪声监测结果得出无坎宽顶堰跌水水流噪声主要由下泄水体对下游边界和水体的冲击摩擦引起,因此堰体下游不同的结构特征造成不同的水流噪声特征。齐春风等^[39]发现消力池底板上铺设钢膜,消力池前端旋滚区产生的涡旋更为破碎,可有效降低底板处的水流脉动能量。由此可见,过水设施结构形式的不同造成水流流态及水动力特性的不同,使其产生的水流噪声声级及频率产

生较大的差异,过水设施结构形式是水流噪声的重要影响因子。

过水设施过流面结构形式决定了水流的紊动程度。水流流经时与流道固定部件撞击分流形成涡体,产生激烈的紊动和不规则脉动压力。脉动压力在固定部件与水流之间相互传递,在高流速情况下可能在流道某些特定部位形成水体空化,增加空化噪声。

2.3 过水设施材料特征对水流噪声的影响

对于不同材质的过水设施由于表面粗糙度的不同,水流与边界的切向摩擦产生切向力,进而形成不同形态的涡体。低速水流涡体未在相邻流层相互掺混,水流较为稳定;高速水流流体紊动激烈,与低速水流相比形成的水流噪声具有较大的差异。对于明渠或管道等结构简单的过水设施,水流噪声通常应为水流与固体边界的摩擦引出的水流紊动产生。过水设施材料特性的不同,对水流的摩擦效应不同,如流道边界糙率变大后,流体的流速分布不同,紊动强度也不同^[40],进而诱发出不同声级的水流噪声。王灿祥^[41]针对水流通过塑料管道、无缝钢管和铸铁管 3 种不同材质的管道产生的水流噪声的时频特性进行了试验和分析,发现管道材质的杨氏模量越低,水流噪声信号频率越低,塑料管道水流噪声信号频率主要分布在 5 ~ 50 Hz;铸铁管道分布在 1000 Hz 左右;无缝钢管分布在 400 ~ 600 Hz。

3 结 语

过水设施产生水流噪声主要由水流高强度紊动,流层之间及与固体边界的摩擦、碰撞等相互作用引起,其噪声声级及频率特征与过水设施结构特性、材料特性、运行工况密切相关,是多种因素共同作用的结果,且过水设施水流噪声呈现出连续宽频等特点。水流噪声的形成机理不同,对应的频谱特征具有较大的差异,在噪声形成的不同阶段其呈现出的频谱也有所区别。由此可见,过水设施水流噪声声级、频率、音色是水流水动力特性变化及其与过流边界相互作用的综合动态表征,实时反映过水设施水流运行状态及流道运行状态,可作为实时监测信号,诊断过水设施的运行状态及安全,同时评估过水设施运行对环境的影响。然而,目前国内外对过水设施水流噪声的研究主要聚焦在某些具体过水设施水流的降噪方法上,针对水流噪声特征值与水流水动力参数、边界特性参数之间的相互关系却少有研究,缺乏建立水流噪声表象与流场特征之间的对应关系,难以借助噪声信号对过水设施运行和安全状态进行实时诊断。

水流通过过水设施下泄过程中,受其边界特性的影响水动力状态常发生较大变化,或加速、或湍动、或涡旋、或剪切,伴随边界形状和结构的变化将产生不同特征的水流噪声,因此,水流通过过水设施产生的水流噪声与水流特性一一对应,同时也反映了过水建筑物运行的实时状态。目前不同情况下过水设施水流噪声形成机理错综复杂,应深入开展水流噪声特征值与水流水动力特性及其边界特性的相互关系研究,明确影响过水设施水流噪声的关键因子,量化水流噪声与水动力参数及边界参数的相互关系,构建不同结构、不同形状、不同材料、不同尺寸水利设施在典型水流工况运行下的水流噪声数据库,为通过噪声特征准确识别水流及过水设施运行状态提供基础。

参考文献:

[1] 常金秋. 浅谈住宅给排水噪声防治[J]. 上海应用技术学院学报, 2002, 2 (3): 205-208. (CHANG Jinqiu. Elementary introduction on the noise control for water supply and drainage in buildings[J]. Journal of Shanghai Institute of Technology, 2002, 2 (3): 205-208. (in Chinese))

[2] ALIMOHAMMADI I, SANDROCK S, GOHARI M R. The effects of low frequency noise on mental performance and annoyance[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, 185 (8): 7043-7051.

[3] 胡志华, 郭维东, 谢芳芳, 等. 河道泄水建筑物下泄水流噪声特性分析[J]. 中国农村水利水电, 2013 (4): 72-74. (HU Zhihua, GUO Weidong, XIE Fangfang, et al. A study of characteristics of the sluice flow noise of river discharge structure [J]. China Rural Water and Hydropower, 2013 (4): 72-74. (in Chinese))

[4] BASNER M, BABISCH W, DAVIS A, et al. Auditory and non-auditory effects of noise on health[J]. The Lancet, 2014, 383 (9925): 1325-1332.

[5] 李莎莎. 无坎宽顶堰下泄水流噪声的降噪措施研究[D]. 绵阳:西南科技大学, 2020.

[6] 王恭兴, 张麒麟, 廖彬秀. 跌水景观坝噪声分析与整治方案[J]. 工程建设与设计, 2020 (23): 94-96. (WANG Gongxing, ZHANG Qilin, LIAO Binxiu. Noise analysis and treatment scheme of the landscape dam[J]. Construction & Design for Project, 2020 (23): 94-96. (in Chinese))

[7] 祁英明, 王超, 李长勇. 基于噪声频谱分析的乌弄龙水电站卡门涡共振快速判断与处理[J]. 大电机技术, 2021 (5): 82-87. (QI Yingming, WANG Chao, LI Changyong. Fast judgment and treatment of Karman vortex resonance in Wunonglong hydropower station based on noise spectrum analysis [J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2021 (5): 82-87. (in Chinese))

[8] 刘殿程. 水轮机异响问题的分析和处理[J]. 云南水力

发电, 2021, 37 (7): 210-213. (LIU Diancheng. Analysis and treatment of abnormal sound of hydroturbine [J]. Yunnan Water Power, 2021, 37 (7): 210-213. (in Chinese))

[9] LIAN Jijian, WANG Xiaoqun, ZHANG Wenjiao, et al. Multi-source generation mechanisms for low frequency noise induced by flood discharge and energy dissipation from a high dam with a ski-jump type spillway [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2017, 14 (12): 1482.

[10] 蒋小辉. 水轮机流动噪声检测与分析[D]. 武汉:华中科技大学, 2009.

[11] 周心一, 吴有生. 流体动力性噪声的相似关系研究[J]. 声学学报, 2002 (4): 373-378. (ZHOU Xinyi, WU Yousheng. Study of similarities for fluid-dynamic noise [J]. Acta Acustica, 2002 (4): 373-378. (in Chinese))

[12] 王玉. 三维刚性壁面空腔流动机制与水动噪声研究[D]. 天津:天津大学, 2012.

[13] 余鑫. 高坝泄洪诱发低频声波特性及调控降噪研究[D]. 天津:天津大学, 2020.

[14] POWELL A. Theory of vortex sound[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1964, 36 (1): 177-195.

[15] 胡志华. 消力池水流噪声产生机理及影响因素研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2015.

[16] 李环, 刘聪尉, 吴方良, 等. 水动力噪声计算方法综述[J]. 中国舰船研究, 2016, 11 (2): 72-89. (LI Huan, LIU Congwei, WU Fangliang, et al. A review of the progress for computational methods of hydrodynamic noise [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2016, 11 (2): 72-89. (in Chinese))

[17] 毛成, 苏立, 潘月国, 等. 小水电站压力管道水动力学特性研究[J]. 人民长江, 2021, 52 (1): 151-157. (MAO Cheng, SU Li, PAN Yueguo, et al. Study on hydrodynamic characteristics of pressure pipelines in small hydropower stations [J]. Yangtze River, 2021, 52 (1): 151-157. (in Chinese))

[18] 孙小鹏, 薛盘珍, 吕家才. 泄流的压力脉动及其概化设计[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 1997, 12 (1): 102-112. (SUN Xiaopeng, XUE Panzhen, LYU Jiakai. Release pressure fluctuation and its conceptual design [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 1997, 12 (1): 102-112. (in Chinese))

[19] 李昕, 张建民, 彭勇, 等. 有压闸室通气孔布置优化研究[J]. 水电能源科学, 2017, 35 (5): 120-123. (LI Xin, ZHANG Jianmin, PENG Yong, et al. Optimization arrangement of air vent pipe in pressure gate chamber [J]. Water Resources and Power, 2017, 35 (5): 120-123. (in Chinese))

[20] 王佳俊, 潘罗平, 曹树良. 小波变换应用于水轮机空化信号检测[J]. 水力发电学报, 2013, 32 (4): 215-220. (WANG Jiajun, PAN Luoping, CAO Shuliang. Wavelet transforms applied to cavitation noise analysis for hydro-

- turbine[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2013,32(4):215-220. (in Chinese)
- [21] 於三大,邓浩,陈绪春. 三峡大坝泄洪建筑物水力学安全监测[J]. 水电自动化与大坝监测,2004,28(2):47-50. (YU Sanda, DENG Hao, CHEN Xuchun. Hydraulic safety monitoring of flood discharge structure of Three Gorges Dam [J]. Dam Observation and Geotechnical Tests,2004,28(2):47-50. (in Chinese))
- [22] 吴持恭. 明渠水气二相流[M]. 成都:成都科技大学出版社,1989.
- [23] 田茹妍. 水滴入水过程及其水噪声试验研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2017.
- [24] 邓军,许唯临,曲景学,等. 明渠水流自掺气对断面平均流速的影响[J]. 水力发电学报,2003(4):88-94. (DENG Jun, XU Weilin, QU Jingxue, et al. The influence of aeration on average velocity of self-aerated chute flow [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2003(4):88-94. (in Chinese))
- [25] 张红梅,刘经强,于新雨,等. 突扩式跌坎消力池掺气特性试验[J]. 水利水电科技进展,2021,41(6):82-87. (ZHANG Hongmei, LIU Jingqiang, YU Xinyu, et al. Experimental research on aeration characteristics of a stilling pool with drop sill and sudden expansion [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021,41(6):82-87. (in Chinese))
- [26] 李贵吉,张建民. 前置突扩突跌掺气设施曲线阶梯水流掺气特性数值计算[J]. 水利水电科技进展,2021,41(4):46-52. (LI Guiji, ZHANG Jianming. Numerical calculation of aerated flow characteristics in a curve-floor stepped tunnel with pre-sudden lateral enlargement and bottom drop aerator [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021,41(4):46-52. (in Chinese))
- [27] 练继建,任盼红,刘东明,等. 明渠完全掺气水流水力特性数值模拟研究[J]. 水力发电学报,2022,41(4):1-8. (LIAN Jijian, REN Panhong, LIU Dongming, et al. Numerical simulations on hydraulic characteristics of fully aerated water flows in open channel [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(4):1-8. (in Chinese))
- [28] 张宏伟,刘之平,张东,等. 掺气水流声速的研究[J]. 水利学报,2013,44(9):1015-1022. (ZHANG Hongwei, LIU Zhiping, ZHANG Dong, et al. Study on the sound velocity in an aerated flow [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013,44(9):1015-1022. (in Chinese))
- [29] VRACAR M S, MIJIC M. Ambient noise in large rivers (L) [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2011, 130(4):1787-1791.
- [30] DUBEY A, LI Zhao, LEE P, et al. Measurement and characterization of acoustic noise in water pipeline channels[J]. IEEE Access, 2019, 7:56890-56903.
- [31] LIAN Jijian, ZHANG Wenjiao, GUO Qizhong, et al. Generation mechanism and prediction model for low frequency noise induced by energy dissipating submerged jets during flood discharge from a high dam [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2016, 13(6):594.
- [32] 郭维东,谢方芳,胡志华,等. 溢流堰下泄水流噪声频谱分析[J]. 沈阳农业大学学报, 2011, 42(2):235-237. (GUO Weidong, XIE Fangfang, HU Zhihua, et al. Spectrum analysis of discharge flow noise of the overflow weir [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2011, 42(2):235-237. (in Chinese))
- [33] 李莎莎,李硕,王大国,等. 无坎宽顶堰水噪声产生机理物理模型试验研究[J]. 人民长江, 2020, 51(1):195-202. (LI Shasha, LI Shuo, WANG Daguo, et al. Physical model test on water noise generating mechanism in broad-crested ridge-free weir [J]. Yangtze River, 2020, 51(1):195-202. (in Chinese))
- [34] 许志雯,赵兰浩,杜帅群,等. 高坝泄洪诱发场地振动响应分析及传播规律[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(2):36-41. (XU Zhiwen, ZHAO Lanhao, DU Shuaiqun, et al. Response analysis and propagation law of site vibration induced by high dam flood discharge [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(2):36-41. (in Chinese))
- [35] 袁常乐,万德成. 不同几何形状水下远场噪声分析[C]//第三十一届全国水动力学研讨会论文集(上册). 厦门:上海《水动力学研究与进展》杂志社, 2020:474-481.
- [36] 王红艳,张法星,刘昶. 燕尾坎挑流消能噪声的影响因素分析[J]. 水电能源科学, 2019, 37(8):80-83. (WANG Hongyan, ZHANG Faxing, LIU Chang. Analysis of influencing factors of ski-jump energy dissipation noise with dovetail camp [J]. Water Resources and Power, 2019, 37(8):80-83. (in Chinese))
- [37] 杨蟠. 无坎宽顶堰水噪声产生机理与降噪措施的物理模型实验研究[D]. 绵阳:西南科技大学, 2018.
- [38] 张邱杰. 底横轴翻转闸门水噪声产生机理及降噪措施研究[D]. 绵阳:西南科技大学, 2021.
- [39] 齐春风,练继建,刘昉,等. 底流钢膜消力池底板上表面脉动压力试验[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(2):33-38. (QI Chunfeng, LIAN Jijian, LIU Fang, et al. Experimental study on fluctuating pressure acting on the upper surface of the slab in a underflow stilling basin with a steel membrane [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(2):33-38. (in Chinese))
- [40] 江会昌,吴军君. 不同糙率对水流和糙率特性影响试验研究[J]. 浙江水利科技, 2021, 49(3):22-28. (JIANG Huichang, WU Junjun. Experimental study on influence of different roughness on flow and roughness characteristics [J]. Zhejiang Hydraulics, 2021, 49(3):22-28. (in Chinese))
- [41] 王灿祥. 基于声信号的供水管道泄漏检测定位系统研究[D]. 阜新:辽宁工程技术大学, 2015.

(收稿日期:2022-03-02 编辑:俞云利)

玛纳斯河不同峰量组合下的融雪洪水风险分析

何朝飞¹, 王晓云², 陈伏龙¹, 唐豪¹, 龙爱华^{1,3}

(1. 石河子大学水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832000; 2. 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222; 3. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要:以玛纳斯河肯斯瓦特出山口水文站控制流域为研究区, 考虑变异条件下的频率结构特征, 基于 Copula 函数建立洪水峰量联合分布, 推求各峰量相互作用下的风险概率, 构建了风险评估模型。结果表明:混合分布能较好地反映变异条件下的洪水变量频率分布;基于 Gumbel Copula 函数建立的峰量联合分布能很好地描述洪水组合特性。在玛纳斯河 500 年一遇峰量两变量防洪设计标准下, 联合风险与同现风险均达到最小值, 洪水发生概率较低, 因此选择频率较为接近的峰量设计标准, 既能保证洪水发生的低风险概率, 又符合工程险情的实际需要。

关键词:融雪洪水; 风险分析; 非一致性; 混合分布; 联合概率分布; Copula 函数; 玛纳斯河

中图分类号:TV122 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)01-0015-07

Risk analysis of snowmelt flood under different combination of flood peaks and flood volumes in Manas River// HE Chaofei¹, WANG Xiaoyun², CHEN Fulong¹, TANG Hao¹, LONG Aihua^{1,3} (1. College of Water Conservancy & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China; 2. China Water Resources Beifang Investigation, Design and Research Co., Ltd., Tianjin 300222, China; 3. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Taking the control basin of the Kenswat hydrological station of the Manas River as the study area, considering the frequency structure characteristics under variation conditions, the joint distribution of flood peaks and flood volumes was established based on Copula function, and the risk probability under the interaction between each flood peak and flood volume was calculated to build the risk assessment model. The results show that the mixed distribution can better reflect the frequency distribution of flood variables under the condition of variation. The flood combination characteristics can be well described by the joint distribution of flood peak and flood volume based on Gumbel Copula function. Under the 500-year flood control design standard of the Manas River flood peak and flood volume, the joint risk and co-occurrence risk both reach the minimum value, and the probability of flood occurrence is low. Therefore, the design standard of flood peak and flood volume with relatively close frequency can not only ensure the low risk rate of flood occurrence, but also meet the actual needs of project hazards.

Key words: snowmelt flood; risk analysis; inconsistency; mixed distribution; joint probability distribution; Copula function; Manas River

融雪洪水作为西北干旱区一种典型的自然灾害事件, 严重危害了人们的人身财产安全, 如何控制洪水的发生并有效降低财产损失是灾害风险研究的重点。在随机性洪水事件中, 频率分析是评估其风险的有效手段。近年来, 随着全球气候变化及人类活动的影响, 洪水序列的随机独立同分布假设面临极大的挑战^[1]。如果直接利用实测洪水资料进行分布拟合会大大降低其结果的可靠性, 因此必须进行序列变异诊断, 并对已经发生变异的洪水序列进行

一致性处理^[2]。

随着水文频率分析研究的不断深入, 非一致性频率分析方法及基于 Copula 函数的多变量组合分析方法得到了很好的应用研究。目前水文非一致性频率分析方法主要从两个角度进行, 一是基于水文序列还原、还现的间接分析方法, 即将水文序列修正到过去或现在的状态; 二是非平稳极值序列的直接分析^[3-4]。Singh 等^[5]针对洪水序列的非一致性问题首次提出了混合分布模型, 并有效应用于非一致

基金项目:国家自然科学基金(52169005, 51769029); 石河子大学高层次人才科研启动资金(RCZK2018C23)

作者简介:何朝飞(1992—), 男, 博士研究生, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: 530731798@qq.com

通信作者:陈伏龙(1978—), 男, 教授, 博士, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: cfl103@shzu.edu.cn

性洪水序列频率分析中。该分布模型既能避免水文时间序列修正和分解等转化的烦琐步骤,又能克服人工适线法带来的较大误差,因此得到了较为广泛的应用^[6-9]。郑锦涛等^[10]在多种变异诊断方法的基础上,对玛纳斯河年径流量进行了混合分布模型和条件概率分布模型的频率分析,很好地描述了混合分布模型的拟合效果。

为解决单变量频率分析与风险评估方法不足以描述极端事件的失效概率和重现时间的问题^[11-12],陈晶等^[13]将 Copula 函数引入到水文学中,并阐述了其在构建水文多变量联合分布方面的相关问题;黄强等^[14]在多变量分布模型的基础上,提出了二次重现期概念,并分析探讨了“且”“或”以及二次重现期在洪水风险分析中的可靠性;高玉琴等^[15]在 G-H Copula 函数的基础上对比分析了洪水单变量风险概率及二维、三维变量联合风险概率,发现它们之间存在明显差异。但以上联合分布研究均建立在水文序列一致的基础上,缺少对于非一致性条件的必要考虑。

现阶段对于干旱区融雪洪水峰量组合风险规律的研究仅以单一变量为主要参考值,其结果往往较为片面,且在联合分析中缺乏对变量间组合的风险量化,风险指标过于单一,不能较全面地反映其设计水平值。因此,本文选取玛纳斯河流域出山口肯斯瓦特水文站 1957—2014 年逐日径流量,并根据该站融雪型洪水一日一峰的典型特点,建立年最大洪峰和年最大 1 d 洪量的设计频率分析样本,结合序列变异诊断结果,选用不同子序列频率分布构建的混合分布为联合分布模型的边际函数。由联合函数特性分析及数据结构特征,将 Gumbel Copula 函数作为联合函数进行建模,并以流域 500 年一遇设计防洪标准为例,多角度分析组合风险类型,以期对玛纳斯河流域防洪工程设计提供参考。

1 研究区概况

玛纳斯河发源于新疆天山北麓的依连哈比尔尕山,东西长 198.7 km,南北宽 260.8 km,流域总面积为 24 300 km²,平均气温为 4.7~5.7℃。流域地处中纬度欧亚大陆中心带(85°01'E~86°32'E,43°27'N~45°21'N),天山北麓,准噶尔盆地南部,具有明显的大陆性干旱气候特征。河流属于冰雪融水和雨水混合补给型,平均年径流总量约 12.99 亿 m³,其中海拔 3 600 m 以上终年积雪覆盖,平均雪线高度为 3 970 m,冰川面积多年维持在 608.25 km²左右,占玛纳斯河径流补给量的 35.3%^[16],是河流的主要补给源。本文研究对象为玛纳斯河肯斯瓦特水文站(85°57'E,43°58'N)控制流域(图 1),该水文站位于

玛纳斯河出山口处,是干支流汇合后的主要控制点,控制面积为 4 637 km²,它的建立为玛纳斯河流域融雪洪水观测及预报起到了重要的作用。

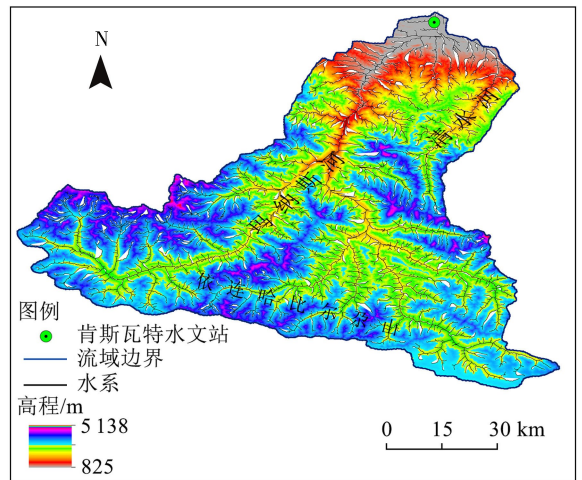


图 1 肯斯瓦特水文站控制区域

2 研究方法

2.1 累积距平法与滑动 t 检验

累积距平法是由曲线来直观判断时间序列变化趋势的方法^[17]。对于洪水时间序列,其某一要素洪水变量 x_i 与多年平均值 \bar{x} 之差即为该要素的距平值,某一时刻 t' 的累积距平为

$$x_i = \sum_{i=1}^{t'} (x_i - \bar{x}) \quad (t' = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

由式(1)可得 n 个时刻的累积距平值,其中序列突变为绝对值最大指标所对应的年份。

滑动 t 检验是根据两组样本平均值的差异是否显著来判断其突变情况^[18]。对于具有 n 个样本量的时间序列 X ,基于某一基准点前后两子序列 X_1 和 X_2 的样本分别为 n_1 和 n_2 ,则统计量为

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{S \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (2)$$

其中

$$S = \sqrt{\frac{n_1 S_1^2 + n_2 S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}$$

式中: \bar{X}_1 、 \bar{X}_2 分别为两子序列的平均值; S_1^2 、 S_2^2 为序列方差。给定显著性水平 α ,当 $|t|$ 大于此显著性水平下的临界值时,两样本序列存在显著差异,即序列发生突变。

2.2 混合分布模型

混合分布模型可直接用于非一致性时间序列的频率分析。假设该水文时间序列是由若干个一致性子分布赋予一定的权重系数累加而成:

$$F(x) = \alpha_1 F_1(x) + \alpha_2 F_2(x) + \dots + \alpha_k F_k(x) \quad (3)$$

式中: $F_1(x)$ 、 $F_2(x)$ 、 \dots 、 $F_k(x)$ 为各子分布的累积分布函数; α_1 、 α_2 、 \dots 、 α_k 为各子分布的权重, 且各权重之和为 1。

为保证模型参数估计的准确性, 根据洪水形成机制, 对洪水时间序列进行子序列的合理划分, 使子序列的个数保持在最低限度, 避免了模型的过度拟合。当非一致性融雪洪水特征时间序列 X 的样本容量为 n , 变异点为 τ 时, 变异点之前的时间序列为 F_1 , 子序列服从概率密度函数为 $f_1(x)$ 的分布; 变异点之后的时间序列为 F_2 , 子序列服从概率密度函数为 $f_2(x)$ 的分布; 整体融雪洪水时间特征序列 X 服从概率密度函数为 $f(x)$ 的混合分布, 其表达式为

$$f(x) = \alpha' f_1(x) + (1 - \alpha') f_2(x) \quad (4)$$

式中 α' 、 $1-\alpha'$ 为两个一致性子序列的权重系数。

2.3 Copula 函数及尾部相关关系

近年来, 随着水文研究工作的快速发展, 多变量水文联合分析得到了深入的研究, 其中, Copula 函数作为连接或耦合两个或多个独立变量的数学函数^[19], 得以普遍的应用。将一个 k 元联合分布函数用多个边缘分布和一个 Copula 函数连接起来构建多维分布, 依次用来描述变量间的相关关系。本文利用二元 Copula 函数建立模型, 其表达式为

$$C(u, v) = \varphi^{-1}[\varphi(u) + \varphi(v)] \quad (5)$$

式中: u 、 v 分别为随机变量; φ 为连续、严格递减的凸函数, 满足 $\varphi(0) = \infty$ 和 $\varphi(1) = 0$; φ^{-1} 为 φ 的反函数, 且满足 $\varphi^{-1}(\infty) = 0$ 和 $\varphi^{-1}(0) = 1$ 。

常见的单参数 Archimedean Copula 函数有 Clayton Copula、Frank Copula 和 Gumbel Copula。Clayton Copula 函数对变量分布的下尾部变化十分敏感, 能够快速捕捉到其下尾的变化, Gumbel Copula 函数则对变量分布的上尾部变化十分敏感, 能够快速捕捉到其上尾的变化。由于 Frank Copula 函数的密度函数具有对称性, 无法捕捉随机变量间非对称的相关关系^[20], 因此在洪水等极端事件中局限性较大。Archimedean 族系的双参数 Copula 函数可以同时刻画上尾和下尾的相关性, 因此本文采用 Clayton Copula 和 Gumbel Copula 两种单参数 Copula 函数以及 BB1 Copula 和 BB5 Copula 两种双参数 Copula 函数^[21] 进行分析。

2.4 组合分析计算

洪水的发生是由多种影响因素共同决定的, 各变量间的相互作用也复杂多变。因此分析不同条件下的洪峰和洪量组合发生的概率, 即峰量组合风险分析是极其有必要的。本文分别选取联合、同现、组合 3 种风险模型^[22-24], 以多角度刻画不同量级峰量的风

险概率来评价洪水设计值, 其风险概率模型见表 1。

表 1 风险概率模型

风险模型	风险概率	重现期
联合风险模型	$P(W_1 > w_1 \cup Q > q) = 1 - C(u, v)$	$\frac{1}{1 - C(u, v)}$
同现风险模型	$P(W_1 > w_1 \cap Q > q) = 1 - u - v + C(u, v)$	$\frac{1}{1 - u - v + C(u, v)}$
组合风险模型	$P(W_1 > w_1 \mid Q < q) = \frac{u - C(u, v)}{u}$	$\frac{u}{u - C(u, v)}$

表 1 中 Q 和 W_1 分别为年最大洪峰和年最大 1 d 洪量; q 和 w_1 分别为年最大洪峰和年最大 1 d 洪量的设计值; $u = F_Q(q)$ 为年最大洪峰边缘分布函数; $v = F_{W_1}(w_1)$ 为年最大 1 d 洪量边缘分布函数; $C(u, v) = C(F_Q(q), F_{W_1}(w_1))$ 为设计年最大洪峰和设计年最大 1 d 洪量的联合分布函数。 $P(W_1 > w_1 \cup Q > q)$ 为 Q 与 W_1 中至少有一个变量超过设定值的概率; $P(W_1 > w_1 \cap Q > q)$ 为 Q 与 W_1 两变量同时超过设计值的概率; $P(W_1 > w_1 \mid Q < q)$ 表示以“洪峰为主”设计工况中, 当洪水不超过某一标准的设计洪峰值 q 时, 所对应的 W_1 超过 w_1 的概率。该概率表明若以 q 和 w_1 为设计组合, 即使洪水峰值没有超过设计标准, 却仍有受灾的风险, 将此概率称为组合风险概率。

3 结果与分析

3.1 洪水序列特征

1957—2014 年玛纳斯河肯斯瓦特水文站控制流域年最大洪峰和最大 1 d 洪量的累积距平曲线如图 2 所示, 可以很直观地看出峰量都具有先下降后上升的变化趋势, 并在 1993 年出现了较大的转折。

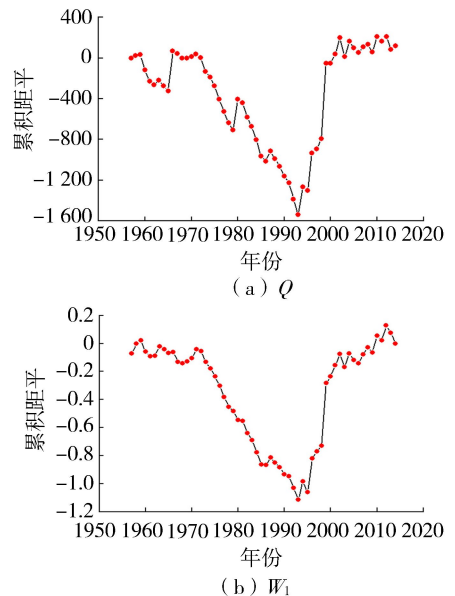


图 2 峰量累积距平变化

为了进一步确定洪水时间序列的突变年份, 利用滑动 t 检验, 取步长 $n_1 = n_2 = 10$, 显著性水平

$\alpha=0.01$, 结果如图 3 所示, 其中年最大洪峰在 1992 年和 1993 年发生突变, 年最大 1 d 洪量在 1971—1975 年、1992 年和 1993 年发生突变。

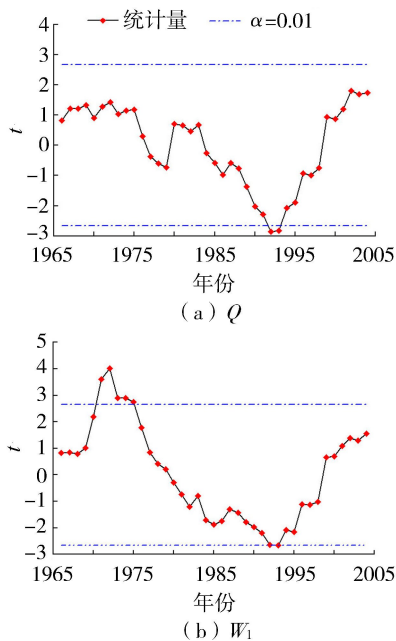


图 3 滑动 t 检验统计量变化

IPCC 第五次评估报告显示, 1980—2012 年全球气温升高了 0.85°C [25]。由于受冰川补给影响, 从 20 世纪 70 年代至本世纪初, 玛纳斯河流域冰川退缩面积为 159.02 km^2 。在 1990 年前后, 肯斯瓦特水文站控制流域内下垫面变化不大。因此, 气温变化对玛纳斯河流域洪水时间序列变化产生了重要影响 [26-27]。综合洪水特征分析以及滑动 t 检验, 最终确定年最大洪峰序列和最大 1 d 洪量序列的突变年份发生在 1993 年, 这与陈伏龙等 [28] 的研究结论一致, 故将玛纳斯河肯斯瓦特控制流域洪水变化过程分为 1957—1993 年和 1994—2014 年两个阶段。

3.2 混合分布拟合

对于洪水变量的分布方式, 本文分别就极端分布中的广义极值 (generalized extreme value, GEV) 分布, 广义帕累托 (generalized Pareto, GP) 分布, 对数逻辑斯谛克 (log-logistic, LLG) 分布和对数正态 (log-normal, LOGNO) 分布方式进行分析比较, 其中前两个为三参数概率分布函数, 后两个为两参数概率分布函数。分布函数参数采用最大似然法进行估计 [29], 并以 Kolmogorov-Smirnov [30] (K-S) 检验进行拟合优选。图 4 为各分布函数拟合优度 D , 经比较, 最大洪峰 1957—1993 年和 1994—2014 年两个子序列 Q_1 和 Q_2 分别采用 GEV 分布和 LLG 分布; 年最大 1 d 洪量 1957—1993 年和 1994—2014 年两个子序列 W_{1-1} 和 W_{1-2} 分别采用 GP 分布和 LLG 分布拟合。

对于混合分布模型, 以频率离差绝对值和

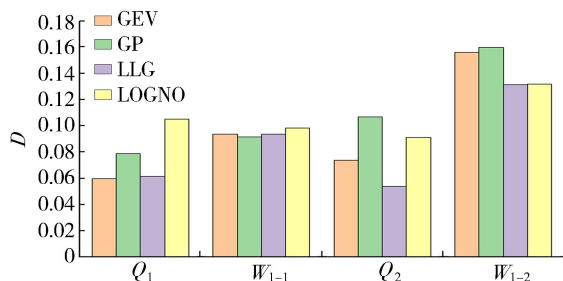


图 4 各分布函数拟合优度

(ABS) 最小为目标函数, 采用模拟退火算法 [6] 对参数进行估计, 其执行策略为: 在矩法初步估计的基础上, 给定一个最优初始点 X_0 开始探测整个解空间, 通过扰动该解产生一个新解 X_N , 按照 Metropolis 准则判定是否接受新解, 相应地降低控制温度, 直到满足收敛准则, 即没有新解产生或者控制参数小到一定程度 [31]。表 2 给出了混合分布模型的参数估计结果, 根据式 (3) 计算洪水时间序列混合分布理论频率。

表 2 混合分布模型参数估计结果

分布类型	时间序列	系数	尺度参数	位置参数	形状参数
洪峰混合分布	Q_1	0.6540	58.041	302.997	0.263
	Q_2	0.3460	0.365	5.786	
年最大 1 d 洪量混合分布	W_{1-1}	0.8803	0.103	0.143	-0.008
	W_{1-2}	0.1197	0.171	-1.566	

混合分布和未考虑其变异特性的整体时间序列的边缘分布函数的拟合曲线如图 5 所示。就年最大洪峰而言, 混合分布拟合曲线的上部与单一拟合函数 GEV 和 LLG 存在较大差异, 但混合分布拟合曲线上部更贴近洪水实测值能较好地描述洪水时间序列; 年最大 1 d 洪量模拟中混合分布曲线的下部与

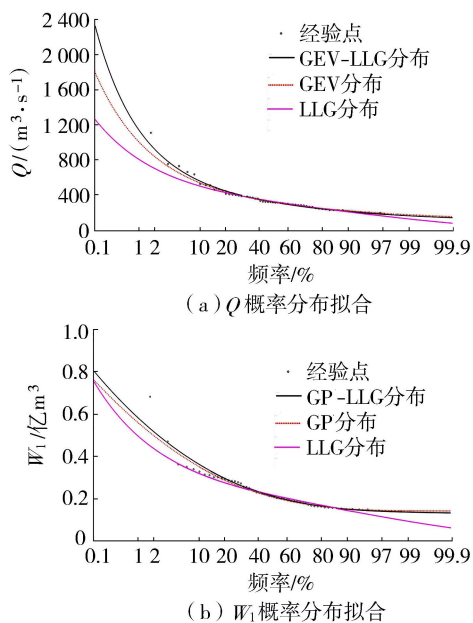


图 5 边缘分布概率拟合

单一拟合函数 GP 为一致,而其上部分布存在一定的差异。同时拟合曲线中部单一 LLG 分布拟合曲线有更大概率通过洪水实测值,但对于洪水极端事件,线性上尾分布是设计洪水拟合效果更佳的选择。由于混合分布模型考虑了洪水序列的非一致性,采用两条不同分布的子序列进行拟合分布比传统单一分布经验点据拟合效果更好,且更好地保证了洪水设计的安全需求。通过采用 K-S 拟合优度检验,确定统计数据是否服从于 5% 显著性水平的拟合分布,得出年最大洪峰与年最大 1 d 洪量混合分布对应的 D 值分别为 0.054 和 0.062,均小于临界值 $D_{58,0.05} = 0.179$,即混合分布函数均满足假设检验,因此考虑变异情况下的混合分布拟合曲线是可行的。

3.3 联合分布及组合风险

考虑到变量间的相互依存关系,利用 Pearson 相关分析计算年最大洪峰和年最大 1 d 洪量的相关系数为 0.846,由此可见,玛纳斯河流域肯斯瓦特水文站控制流域的年最大洪峰和年最大 1 d 洪量存在着较强的正相关性。利用贝叶斯框架中的马尔可夫链蒙特卡罗 (Markov chain Monte Carlo, MCMC) [32-33] 模拟来估计其参数值。同时采用 AIC、贝叶斯信息准则 (BIC) 和 Max-Likelihood (MAX-L) 方法对联合概率分布拟合优度进行检验,其结果见表 3。

表 3 Copula 函数参数估计及拟合优度

Copula 函数	函数参数值		拟合优度		
	θ_1	θ_2	AIC	BIC	MAX-L
Clayton Copula	10.873		-419.270	-417.210	210.635
Gumbel Copula	5.574		-433.963	-431.902	217.981
BB1 Copula	0.016	5.490	-431.961	-427.840	217.980
BB5 Copula	3.674	0.782	-432.104	-427.983	218.052

本文采用图形分析法直观地描述函数的拟合优劣程度。将理论联合概率值与经验联合概率值点绘到同一张图中,当点集越靠近 45° 线,表明联合分布模型拟合较好。其中两变量经验联合概率分布计算公式为

$$F_{emp}(x, y) = P(X \leq x, Y \leq y) = \sum_{g=1}^n \sum_{k=1}^n n_{gk} - 0.44 / (n + 0.12) \quad (6)$$

式中: F_{emp} 为联合经验概率; n_{gk} 为满足 $X \leq x, Y \leq y$ 的观测值,其中 g 和 k 分别为两实测数据从小到大排列后的序号; n 为系列长度。其概率散点 Q-Q 图见图 6。

Gumbel Copula 函数与两参数函数 BB1 Copula 和 BB5 Copula 的理论与联合概率点均落在 45° 对角线附近,起到了较为满意的拟合效果;而 Clayton Copula 函数高频率概率点偏差较大,拟合效果并不理想(图 6)。由表 3 可以得出;Gumbel Copula 函数拟合年最大洪峰与年最大 1 d 洪量效果最好,其中

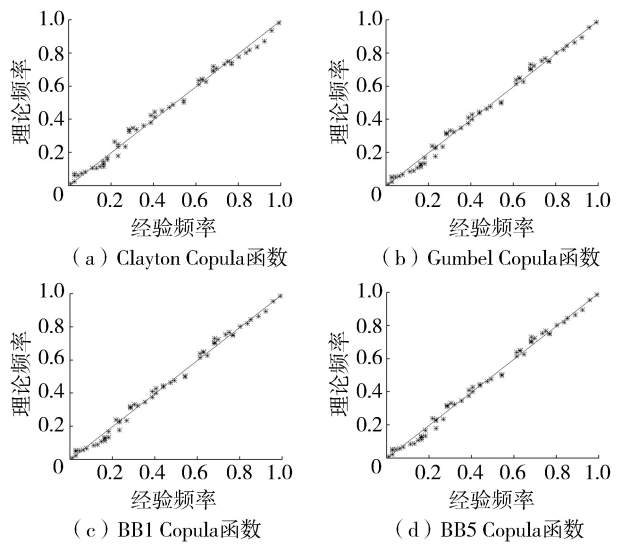


图 6 经验联合分布与理论联合分布 Q-Q 图

AIC 值为 -433.963, BIC 值为 -431.902, 均为各函数最低,这与图形分析检验结果一致。因此,采用对变量分布上尾部变化较为敏感的 Gumbel Copula 函数进行联合是合理的。

分别取重现期 10 a、20 a、50 a、100 a 和 500 a 的年最大洪峰与年最大 1 d 洪量相互组合,并计算联合分布概率,根据表 1 风险概率模型计算其组合风险概率,以此确定任一重现期标准的设计洪峰和设计最大 1 d 洪量组合的风险情况。各量级洪峰和年最大 1 d 洪量组合的风险概率计算结果见表 4。

表 4 各量级峰量组合风险概率

年最大洪峰/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	洪峰重 现期/a	年最大 1 d 洪量/亿 m^3	洪量重 现期/a	联合风险 概率/%	同现风险 概率/%	组合风险 概率/%
565.882	10	0.369	10	10.89	8.45	1.57
565.882	10	0.436	20	9.51	4.99	0.05
565.882	10	0.525	50	9.47	2.06	0.00
565.882	10	0.592	100	9.47	1.05	0.00
565.882	10	0.748	500	9.47	0.21	0.00
698.963	20	0.369	10	9.91	5.06	5.07
698.963	20	0.436	20	5.72	4.41	0.65
698.963	20	0.525	50	5.10	2.06	0.01
698.963	20	0.592	100	5.10	1.05	0.00
698.963	20	0.748	500	5.10	0.21	0.00
922.705	50	0.369	10	9.88	2.29	7.77
922.705	50	0.436	20	5.04	2.28	2.82
922.705	50	0.525	50	2.48	1.88	0.19
922.705	50	0.592	100	2.29	1.05	0.01
922.705	50	0.748	500	2.29	0.21	0.00
1140.231	100	0.369	10	9.88	1.25	8.74
1140.231	100	0.436	20	5.03	1.25	3.83
1140.231	100	0.525	50	2.09	1.23	0.85
1140.231	100	0.592	100	1.32	0.98	0.07
1140.231	100	0.748	500	1.25	0.21	0.00
1880.519	500	0.369	10	9.88	0.30	9.60
1880.519	500	0.436	20	5.03	0.30	4.74
1880.519	500	0.525	50	2.07	0.30	1.77
1880.519	500	0.592	100	1.05	0.30	0.75
1880.519	500	0.748	500	0.31	0.21	0.01

表4中,当洪水峰量组合为10年一遇时,即洪峰($565.882\text{ m}^3/\text{s}$)与年最大1d洪量(0.369 亿 m^3) 在相同低重现期的情况下联合风险(10.89%)与同现风险(8.45%)最高,说明这种组合设计标准最为危险,同时也反映出该组合下防洪设计标准设置过低。在洪峰防洪设计标准一定的情况下,只要稍微提高洪量设计标准,则3项风险指标均呈显著下降趋势。对于500年一遇峰量两变量防洪设计标准,联合风险与同现风险均达到最小值,反映这种组合的设计标准相对最为安全,因此在高防洪设计标准下,洪水峰量共同影响下的洪水发生概率较低。

本文组合风险概率是在“以洪峰为主”设计工况中洪峰变量 Q 没有超过设计值 q ,而年最大1d洪量变量 W_1 超过设计值 w_1 的概率。在500年一遇洪峰组合10年一遇洪量中,由于其年最大1d洪量的设计标准偏低,故组合风险增加,风险概率达到最大值9.60%;若以10年一遇洪峰组合500年一遇洪量,500年一遇年最大1d洪量远大于10年一遇洪峰设计标准,故此组合风险几乎可以忽略不计,从而反映出该组合的设计标准相对安全,但这并不符合防洪设计需求。因此,选择频率较为接近的洪峰和洪量设计标准时,其风险概率相对较小,且符合实际需求,如500年一遇的年最大洪峰和500年一遇的年最大1d洪量的组合风险概率仅为0.01%。

以流域500年一遇设计防洪标准为例,洪水峰量联合重现期为322a,联合风险概率为0.31%,即洪峰、洪量中至少有一个变量超过设定值时的概率为0.31%。其同现风险概率为0.21%,即同时遭遇超过设计标准洪峰及洪量的重现期为476a。组合风险概率为0.01%,即洪峰量级未超过设计标准,但年最大1d洪量超过设计标准时的概率为0.01%。这表明在利用水库对洪量进行调节来分担风险效果的同时,也不能忽略洪峰对水工建筑工程的不利影响。根据肯斯瓦特水利枢纽工程实际防洪需求,对多个洪水变量间的相关作用进行分析,能更准确地掌握洪水防范效果,为玛纳斯河流域风险评估提供参考。

4 结 论

a. 玛纳斯河洪水峰量时间序列在1993年发生了显著性跳跃变化;混合分布模型能有效地对非一致性洪水时间序列进行模拟。

b. 对于玛纳斯河流域,以高重现期参照下的峰量两变量为防洪设计标准,联合风险与同现风险均能接近最小值,即在较高的防洪设计标准约束下,峰量共同影响的洪水发生概率较低。

c. 根据实际工程需求,选择频率较为接近的洪水要素设计标准,可降低其组合风险概率,满足低成本承受较大风险的实际需求,考虑洪水多属性的联合特征可为防洪工程设计提供更为全面可靠的理论依据。

参考文献:

- [1] 丁文学,陈伏龙,吴泽斌,等.基于条件概率分布的玛纳斯河年径流序列频率分析[J].灌溉排水学报,2017,36(8):103-108. (DING Wenxue, CHEN Fulong, WU Zebin, et al. Frequency analysis of the annual runoff series of Manas River based on conditional probability distribution[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(8):103-108. (in Chinese))
- [2] 吴国栋,刘廷玺,薛河儒.一种基于ITA改进的水文气象序列趋势分析法[J].河海大学学报(自然科学版),2022,50(1):1-6. (WU Guodong, LIU Tingxi, XUE Heru. An improved trend analysis method for hydro-meteorological time series based on ITA[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(1):1-6. (in Chinese))
- [3] 胡义明,梁忠民,姚轶,等.变化环境下水文设计值计算方法研究综述[J].水利水电科技进展,2018,38(4):89-94. (HU Yiming, LIANG Zhongmin, YAO Yi, et al. Review on computational methods of hydrological design values in changing environment[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(4):89-94. (in Chinese))
- [4] 李婧,闫磊,屈春来,等.分位数回归和GAMLSS模型在非一致性洪水频率分析中的比较[J].水利水电科技进展,2020,40(5):48-54. (LI Jing, YAN Lei, QU Chunlai, et al. Comparison of quantile regression and GAMLSS model in non-stationary flood frequency analysis[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(5):48-54. (in Chinese))
- [5] SINGH K P, SINCLAIR R A. Two-distribution method for flood frequency analysis[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1972, 98(1):29-44.
- [6] 张悦.基于混合分布的非一致性长江口潮位序列频率计算方法[J].水电能源科学,2020,38(8):26-28. (ZHANG Yue. Hydrologic frequency calculating methods of inconsistent tidal level series in Yangtze River estuary based on mixed distribution[J]. Water Resources and Power, 2020, 38(8):26-28. (in Chinese))
- [7] HASAN M M, CROKE B F W, LIU Shuangzhe, et al. Using mixed probability distribution functions for modelling non-zero sub-daily rainfall in Australia[J]. Geosciences, 2020, 10(2):43.
- [8] 贾一凡,宋松柏.基于TL矩法的洪水频率分布参数估计方法优选[J].水资源保护,2021,37(6):34-39. (JIA Yifan, SONG Songbai. Optimization of flood frequency distribution parameter estimation method based on TL-

- moments[J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(6): 34-39. (in Chinese)
- [9] 唐亦汉,陈晓宏,叶长青,等. 考虑历史洪水的混合分布对不同尾型分布的应用对比研究[J]. *水力发电学报*, 2015, 34(4): 31-37. (TANG Yihan, CHEN Xiaohong, YE Changqing, et al. Application of historical flood-concerned mixed distribution with different tail types of PDFs[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2015, 34(4): 31-37. (in Chinese))
- [10] 郑锦涛,陈伏龙,张鑫厚,等. 新疆玛纳斯河年径流频率分析[J]. *水利水电科技进展*, 2018, 38(1): 68-74. (ZHENG Jintao, CHEN Fulong, ZHANG Xinhou, et al. Annual runoff frequency analysis of the Manas River in Xinjiang[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2018, 38(1): 68-74. (in Chinese))
- [11] 晋恬,闻昕,方国华,等. 不同重现期标准双变量设计洪水计算方法[J]. *水利水电科技进展*, 2018, 38(4): 7-13. (JIN Tian, WEN Xin, FANG Guohua, et al. Calculation method for bivariate design flood of different return periods[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2018, 38(4): 7-13. (in Chinese))
- [12] 姜尚文. 变化环境下河流水文极值与生态问题研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2019.
- [13] 陈晶,王文圣. Copula 预测方法及其在年径流预测中的应用[J]. *水力发电学报*, 2015, 34(4): 16-21. (CHEN Jing, WANG Wensheng. Copula function method and its application to prediction of runoff [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2015, 34(4): 16-21. (in Chinese))
- [14] 黄强,陈子桑. 基于二次重现期的多变量洪水风险评估[J]. *湖泊科学*, 2015, 27(2): 352-360. (HUANG Qiang, CHEN Zishen. Multivariate flood risk assessment based on the secondary return period[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, 27(2): 352-360. (in Chinese))
- [15] 高玉琴,叶柳,赖丽娟. 基于 G-H copula 函数的秦淮河流域洪水风险分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(1): 172-177. (GAO Yuqin, YE Liu, LAI Lijuan. Analysis of flood risk in Qinhuai River Basin based on G-H copula [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2018, 29(1): 172-177. (in Chinese))
- [16] 邹全,王国亚,贺斌,等. 1957—2010 年天山玛纳斯河流域夏季径流及洪水过程对极端气候事件的响应[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(3): 733-740. (ZOU Quan, WANG Guoya, HE Bin, et al. Responding of summer runoff and flood processes to extreme climate events in Manas River Basin, Tianshan Mountains during 1957-2010[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(3): 733-740. (in Chinese))
- [17] PHUONG H T, TIEN N X, CHIKAMORI H, et al. A hydrological tank model assessing historical runoff variation in the Hieu River Basin [J]. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 2018, 15(1): 75-86.
- [18] 张硕,邓博文,许瑶瑶,等. 1958—2019 年漠河市气温及降水突变分析[J]. *气候与环境研究*, 2020, 25(6): 667-676. (ZHANG Shuo, DENG Bowen, XU Yaoyao, et al. Abrupt change of temperature and precipitation in Mohe of China from 1958 to 2019[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2020, 25(6): 667-676. (in Chinese))
- [19] GENEST C, MACKAY J. The joy of copulas: bivariate distributions with uniform marginals [J]. *The American Statistician*, 1986, 40(4): 280-283.
- [20] 宋松柏. Copulas 函数及其在水文中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [21] GENEST C, FAVRE A C. Everything you always wanted to know about copula modeling but were afraid to ask [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2007, 12(4): 347-368.
- [22] 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))
- [23] 黄锦林,范嘉炜,唐造造. 基于最大熵-Copula 方法的降雨潮位关联性分析:以广州为例[J]. *灾害学*, 2017, 32(1): 65-71. (HUANG Jinlin, FAN Jiawei, TANG Zaozao. Correlation study of rainstorm and tidal level using the maximum entropy-copula method: a case study of Guangzhou [J]. *Journal of Catastrophology*, 2017, 32(1): 65-71. (in Chinese))
- [24] 武传号,黄国如,吴思远. 基于 Copula 函数的广州市短历时暴雨与潮位组合风险分析[J]. *水力发电学报*, 2014, 33(2): 33-40. (WU Chuanhao, HUANG Guoru, WU Siyuan. Risk analysis of combinations of short duration rainstorm and tidal level in Guangzhou based on Copula function [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2014, 33(2): 33-40. (in Chinese))
- [25] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014: 37.
- [26] 徐春海,王飞腾,李忠勤,等. 1972—2013 年新疆玛纳斯河流域冰川变化[J]. *干旱区研究*, 2016, 33(3): 628-635. (XU Chunhai, WANG Feiteng, LI Zhongqin, et al. Glacier variation in the Manas River Basin during the period from 1972 to 2013 [J]. *Arid Zone Research*, 2016, 33(3): 628-635. (in Chinese))
- [27] 韩蓉. 气候变化对玛纳斯河流域积雪消融的影响研究[D]. 石河子:石河子大学, 2017.
- [28] 陈伏龙,李绍飞,冯平,等. 考虑融雪洪水跳跃变异的水库极限防洪风险复核[J]. *水利水电科技进展*, 2019, 39(6): 9-16. (CHEN Fulong, LI Shaofei, FENG Ping, et al. Recheck analysis of reservoir extreme flood control risk considering snowmelt flood sequences with jump up components [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2019, 39(6): 9-16. (in Chinese))
- [29] ROSSI F, FIORENTINO M, VERSACE P. Two-component extreme value distribution for flood frequency analysis [J]. *Water Resources Research*, 1984, 20(7): 847-856.

(下转第 35 页)

金沙江下游主要支流对干流水温的影响

徐火清¹,赵红红²,吴义军³

(1. 中国三峡建工(集团)有限公司,四川 成都 610041; 2. 日照市政务服务中心,山东 日照 276827;
3. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要:为研究金沙江下游主要支流入汇后对其下游干流水温的影响,选取金沙江下游16个测站的流量及水温实测资料,统计分析了金沙江下游各支流的流量占比,探讨了岷江、嘉陵江和乌江等较大流量支流入汇后下游干流水温变化规律。结果表明:宜昌站水体组成中岷江来流占18.8%,嘉陵江占14.2%,乌江占10.79%;金沙江下游干流水温变化规律与支流基本一致,且随着距离的增大,滞后效应逐渐明显,其中岷江对干流水温影响最大,其次为嘉陵江和乌江;通过线性函数拟合法得到岷江、嘉陵江和乌江干支流温差与汇口上下游沿程温差的相关系数分别为0.9502、0.8845和0.7863。

关键词:水温监测;干支流;金沙江;岷江;嘉陵江;乌江

中图分类号:TV697.21

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2023)01-0022-07

Influence of main tributaries on water temperature of main stream in lower Jinsha River //XU Huoqing¹, ZHAO Honghong², WU Yijun³(1. China Three Gorges Construction Engineering Corporation, Chengdu 610041, China; 2. Rizhao Municipal Government Service Center, Rizhao 276827, China; 3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To study the influence of the main tributaries in the lower reaches of the Jinsha River on the water temperature of the main stream, the measured data of flow and water temperature at 16 stations in the lower reaches of the Jinsha River were selected. The discharge proportions of each tributary in the lower reaches of the Jinsha River were statistically analyzed, and the water temperature change regularity of the main stream in the lower reaches of the Minjiang River, Jialing River, Wujiang River and other large tributaries after confluence was discussed. The results show that the Minjiang River, the Jialing River and the Wujiang River accounts for 18.8%, 14.2% and 10.79% of the flow discharge at the Yichang Station respectively. The change rule of water temperature downstream the main stream of Jinsha River is basically consistent with that of the tributaries, and the lag effect is gradually obvious with the increase of distance. The Minjiang River has the largest impact on the water temperature in the main stream, followed by the Jialing River and the Wujiang River. Through the linear function fitting method, the correlation coefficients of the temperature difference between the main stream and tributaries of the Minjiang River, the Jialing River and the Wujiang River and the temperature difference along the upstream and downstream of river confluences are 0.9502, 0.8845 and 0.7863 respectively.

Key words: water temperature monitoring; main and branch streams; Jinsha River; Minjiang River; Jialing River; Wujiang River

水温是水环境中最重要的影响因素之一,其对水的物理、化学性质,水生生物的繁殖、生长和分布,以及生态系统的稳定性等都存在直接或间接的影响^[1-4]。水温受人类活动和气候变化等多因素影响,水温的变化尤其涉及水生生物的生存与发展^[5]。金沙江下游及川江段入汇支流众多,各支流自然环境复杂且存在明显差异性,该江段含有鱼类国家级自然保护区,支流的入汇引起干流水温变化,从而影

响干流的水生态系统。三峡水库蓄水后,下泄低温水引起下游水温出现升温期滞冷、降温期滞热的温度延迟现象,水温的变化改变了四大家鱼及中华鲟的繁殖条件,造成鱼类的繁殖产卵时间有不同程度的推迟甚至产卵规模大幅下降^[6-9]。作为水生物种生存的重要条件,长期的水温变化可能会加快物种的进化和更迭^[10]。近年来,国内外学者对河流水温变化及其影响因素的研究热度居高不下,气候变化、

基金项目:国家自然科学基金(52179130)

作者简介:徐火清(1973—),男,高级工程师,主要从事水电生态保护研究。E-mail:xu_huoqing@ctg.com.cn

通信作者:赵红红(1979—),女,高级工程师,主要从事水工结构工程及水环境保护研究。E-mail:zhqh79318@163.com

水文过程和人类活动被认为是导致水温波动的主要诱因^[1]。Peaker 等^[11]依据多瑙河长期水温资料,确定了气候变化是引起多瑙河水温变化的主要因素,Zganec^[12]认为喀斯特地区诸河的水温变化除了与气候变化有关外,水电工程的影响也不容忽视。国内众多学者对河流水温变化的研究也有相似结论,即水电工程和气候变化是改变下游河道水温的重要因素^[13-14]。随着梯级水电站的逐渐运行,其对河流水温影响方面的研究也不断增加^[15-18]。由于支流与干流水温不同,导致入汇后干流水温发生变化的研究也有许多案例,如蒋博等^[19]采用原型观测和数值模拟方法分析了澜沧江支流补远江入汇对干流的水温影响。然而,目前针对长江各支流入汇对干流水温变化的影响研究鲜见报道。

本文分别选择金沙江下游及川江段 11 个流量监测点和 11 个表层水温断面共计 16 个测站的测量资料,采用线性函数拟合法,系统地进行了干支流流量关系、各支流与干流的水温关系以及干流水温流量相关性分析,可为该江段水环境影响评价和生态保护提供科学依据。

1 研究区概况

1.1 监测点布置及采集频率

2012—2017 年,布置金沙江下游及川江段流域流量监测点共计 11 个,其中长江干流有 6 个(三堆子、向家坝、朱沱、寸滩、清溪场、宜昌),支流有 5 个(宁南、横江、高场、赤水镇、北碚),流量资料为日均流量。2019 年 8 月至 2020 年 7 月,布置金沙江下游及川江段流域表层水温监测点共计 11 个,其中长江干流有 8 个(向家坝、李庄、合江、朱沱、江津区、寸滩、清溪场、万州),支流有 3 个(高场、北碚、武隆),每天 0:00、2:00、4:00、8:00、12:00、14:00、16:00、20:00 监测温度 1 次,共计 8 次,各监测点位置见图 1。对于表层水温监测点,需要说明的是:向家坝、高场、李庄、合江、朱沱、北碚、武隆水文站为河流段

监测水温;万州水文站为水库段监测水温;江津区、寸滩、清溪场在水库蓄水期为水库段监测水温,泄洪期为河流段河流监测水温。河流段监测水温由于河流水深较浅,水热交换作用较多,水温受气温影响明显,而水库段监测水温在一定程度上受水库滞后效应影响,且由于库区水深,水热交换作用较少,对研究结果有一定的影响。

1.2 监测设备及安装

1.2.1 监测设备

表层水温监测采用由北京基康仪器有限公司生产的精度为 0.1℃ 的铂电阻温度计(BGK3700P),表层水温数据采集及传输采用由北京基康仪器有限公司生产的 BGK-GM2 采集终端,数据的传输采用中国移动物联卡为载体,传输到设在湖南长沙的中国水利水电第八工程局有限公司总部的 GIS 地理信息系统。

1.2.2 监测仪器安装方式

表层水温监测设备的安装主要分为趸船安装、浮漂船安装和固定安装 3 种方式:①在有趸船的河流部位直接将 BGK-GM2 采集终端固定在趸船护栏边沿,温度计用镀锌钢管保护并牢固地固定在趸船上。②在没有趸船的河流部位,采用宽 1.3 m、高 1.4 m 的浮漂船将 BGK-GM2 采集终端和温度计固定在浮漂船上,浮漂船下部悬挂配重块,并用钢丝绳牵引牢固。③在因水流湍急无法安装浮漂船且距离坝址较近之处,认为水温不分层,观测断面任意深度处的水温即为出库平均水温。从坝址到监测断面沿程环境因素对平均水温的影响忽略不计,取任意深度点水温代表断面平均水温。

利用无线终端等配套自动采集传输装置实现自动化,并应用于从金沙江下游乌东德水电站库尾至长江大通水文站的表层水温监测中,以减少人工投入,确保采集数据的精准性和时效性。

2 结果与分析

2.1 金沙江下游干支流流量关系

图 2 给出了 2012—2017 年金沙江下游及川江段各支流日均流量实测过程线,可以看出各支流的流量普遍出现在 6—8 月,1—4 月和 11—12 月各支流下泄流量均较小,基本在 1500 m³/s 以下,各支流的流量大小与其所在河段的水库调度以及当地的降雨情况密切相关^[20-21]。嘉陵江日均流量在 7 月达到最大峰值,8 月急剧下降后于 9 月有所回升,流量变化主要与山区河段特殊的自然地理和气象条件,以及嘉陵江梯级水库的水库调度相关。黑水河、赤水河和横江 3 条支流平均入汇流量分别

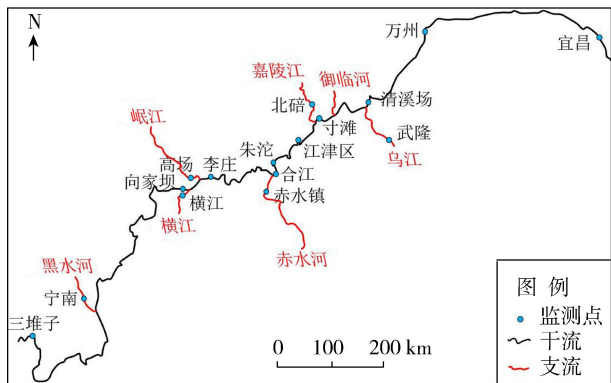
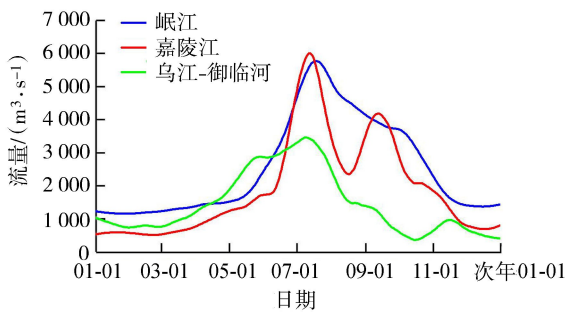
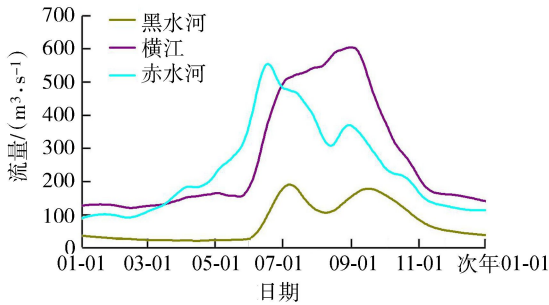


图 1 监测点布置



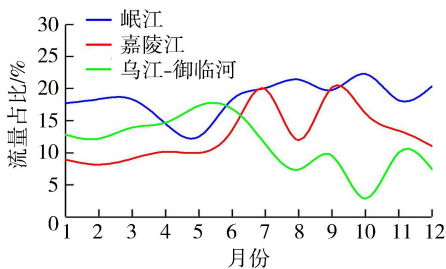
(a) 岷江、嘉陵江、乌江-御临河



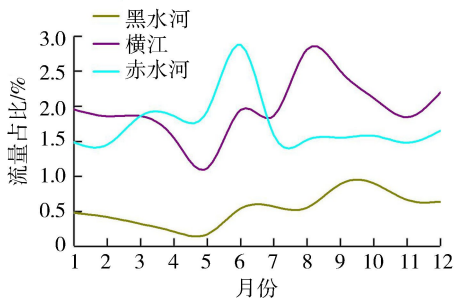
(b) 黑水河、横江、赤水河

图2 2012—2017年各支流日均流量

为 $75.7 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $238.6 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $273.5 \text{ m}^3/\text{s}$, 相对较小, 对干流流量变化影响较微。利用各支流每月平均流量与宜昌站月均流量监测资料, 分析宜昌站各支流每月来流量占比变化(图3)。从图3(a)可以看出, 岷江除5月和9月外全年占比始终保持最高, 其中10月占比最高, 达22.27%, 可见岷江对干流流量变化有着重要影响。嘉陵江9月流量占比20.17%, 与岷江相当, 嘉陵江和岷江9月流量合计占比高达40%, 超过其他支流总和(14.51%); 此外, 乌江-御临河对宜昌站流量组成也有较大影响(因流量分析时仅有乌江和御临河的合计流量, 且御临河流量较



(a) 岷江、嘉陵江、乌江-御临河



(b) 黑水河、横江、赤水河

图3 2012—2017年主要支流月均流量

小, 故将两条支流合并分析), 4—6月乌江-御临河合计流量与岷江基本相当, 5月甚至超过岷江, 流量占比达17.33%, 可见乌江-御临河是该河段支流中流量变化幅度最大的支流。如图3(b)所示, 黑水河、赤水河和横江合计占比基本维持在5%以下, 因此这3条支流对宜昌站流量组成影响也相对较小。结合各支流整体来看, 1—4月支流平均流量占比岷江最大, 乌江-御临河次之, 嘉陵江第三; 5月支流平均流量占比乌江-御临河最大, 岷江次之, 嘉陵江排第三; 6—12月支流平均流量占比岷江最大, 嘉陵江次之, 乌江-御临河第三。上述分析表明不同月份宜昌站主要水体来源不同, 也反映了宜昌站流量组成的复杂性。

为得出各支流在该江段的流量组成分布, 以宜昌站流量监测数据为依据, 分析流量来源比例。金沙江上游(干流)来水占比最多, 占宜昌站流量的25.53%; 各支流中岷江占比最多, 为18.83%, 其次是嘉陵江(14.19%)和乌江-御临河(10.79%), 黑水河、赤水河和横江占比较小, 分别为0.56%、1.77%、2.03%, 合计仅为4.36%。需要说明的是, 三堆子至宜昌江段还有众多流量较小的支流(如白水河、普渡河、牛栏江、澎溪、沱江等), 其多年平均流量明显小于岷江、嘉陵江和乌江, 因为这些支流没有流量及水温监测数据, 本文暂不考虑其对干流水温的影响。

根据支流各月平均流量与支流入汇后汇口上游测站的平均流量实测数据, 可得支流流量占汇口下游合计流量之比(表1)。由表1可知, 各支流入汇干流的流量不断变化, 最大值普遍出现在5—7月, 其中岷江6月占比最大, 岷江入汇流量占汇口下游的47%, 即支流与干流流量基本相当; 嘉陵江7月占比最大, 占汇口下游流量的24.3%; 乌江5月占比最大, 为25.3%。综合来看岷江高场站流量占岷江汇口下游流量30%以上, 嘉陵江北碛站流量占嘉陵江汇口下游流量约13%~25%, 乌江流量占下游清溪场水文站流量比值变化较大, 在2.9%~25%之间, 乌江平均流量占汇口下游13.7%, 对干流流量组成也有较大影响。

表1 2012—2017年各支流月均流量占汇口下游流量比例
单位: %

支流	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
岷江	37.1	40.0	39.6	38.2	43.8	47.0	39.4	36.2	30.7	34.1	34.5	39.4
嘉陵江	13.7	13.5	14.4	18.1	21.7	21.4	24.3	14.5	20.5	17.0	17.3	15.2
乌江	16.4	16.3	17.3	19.6	25.3	20.0	11.8	8.0	5.7	2.9	11.6	9.2

2.2 各支流与干流的水温关系

汇口下游的水温与入汇支流和上游支流的水温

密切相关,两股水流汇聚后共同影响下游水温。图4、图5、图6分别为岷江、嘉陵江和乌江2019年8月至2020年7月与汇口上下游测站的水温关系曲线。可见水温变化趋势总体呈先降温后升温的趋势,表层水温的年内变化规律与气温变化规律一致,气温变化特性较好地反映了表层水温年内分布特征。

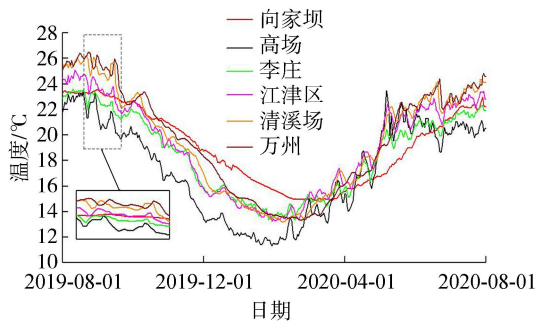


图4 岷江与上下游测站的水温关系曲线

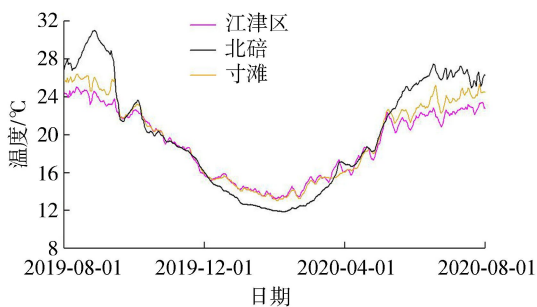


图5 嘉陵江与上下游测站的水温关系曲线

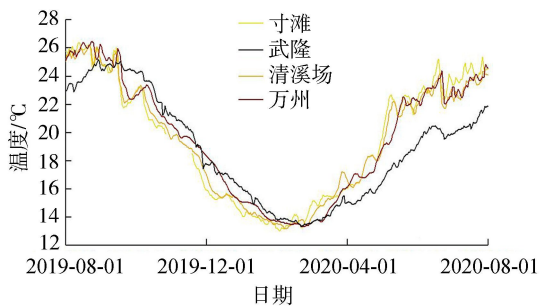


图6 乌江与上下游测站的水温关系曲线

岷江是该江段最大的支流,其入汇流量占下游汇口流量年均值超过38%,对下游水温影响明显。岷江高场水文站全年平均水温为17.35℃,日均水温在11.4~23.5℃之间变化,单日温度在-2~1.8℃之间变化。从图4可以看出,2019年9月至2020年1月岷江入汇水温整体呈下降趋势,2020年2—7月水温整体呈回升趋势,其中最高温度为23.5℃,出现在5月。岷江高场水文站月平均水温1月最低,为11.9℃,上游向家坝水文站1月平均水温为16.38℃,岷江入汇后,汇口下游李庄水文站1月平均水温仅为13.97℃,岷江入汇后,干流水温下降了2.4℃;5月岷江平均水温为21.03℃,上游

向家坝平均水温为17.98℃,下游李庄平均水温为19.82℃,岷江入汇后,干流水温上升了1.84℃。结合局部放大图可知,向家坝水文站水温日波动幅度较小,岷江相对较大,汇流后李庄水文站到清溪场水文站均出现轻微的日波动,其温度波动主要受岷江下泄水体影响,万州水文站也出现相似的水温日波动,但其波动具有相对的滞后性,主要是因为万州水文站与岷江汇口距离较远,可见岷江入汇后对李庄至万州段干流水温具有明显的影响。结合李庄水文站到万州沿程各水温监测站点的全年水温变化曲线可以看出,向家坝下泄低温水与岷江下泄低温水混合后,其水温一直保持到清溪场水文站,即李庄水文站到清溪场水文站之间的监测点水温变化不大。伴随着沿程气温上升,李庄到清溪场测站的水温也在逐步上升,但水温日波动与岷江保持着相同的趋势。万州属于三峡库区范围,结合万州水温变化曲线可以看出,清溪场水文站之前江段水温受向家坝和岷江影响显著,过清溪场后与三峡库区水体掺混,水温波动规律逐渐接近三峡库区水温变化规律。

嘉陵江下游北碚水文站全年平均水温为20.06℃,日均水温在11.9~31.0℃之间变化,单日温度变化在-2.2~1.1℃之间。如图5所示,嘉陵江夏季水温相对较高,冬季水温相对较低,年均水温(20℃)高于下游川江干流水温(寸滩水文站年均水温19.4℃),嘉陵江入汇后,较高的水温将会影响干流的水温分布,带动下游一定范围内的水体温度上升。2019年9月至2020年2月嘉陵江水温整体呈下降趋势,2020年3—6月水温整体呈上升趋势,进入7月后出现小幅度降温趋势(约下降2.3℃)。与上游江津区水温相比,嘉陵江2019年8—9月中旬和2020年5月中旬至7月水温相对较高,在2019年12月至2020年3月中旬水温相对较低。从上游江津区和下游寸滩水温曲线对比来看,两者水温也略有差异,具体表现为冬季寸滩水文站水温略低于江津区,夏季寸滩水文站水温略高于江津,与嘉陵江和干流的水温对比规律基本一致。嘉陵江流量相对较大,对干流水温有一定的影响,在嘉陵江水温高于干流时有助于提高水温,在嘉陵江水温低于干流时会助力降低水温。

乌江武隆水文站全年平均水温为18.82℃,日均水温在13.3~25.2℃之间变化,单日温度变化在-1.2~0.5℃之间。如图6所示,2019年9月至2020年2月,武隆水文站月均水温从最高24.6℃逐月下降,2月时月均水温降至最低值13.7℃,其中9月和2月水温分布较为集中,日均变化幅度较小;2020年3—7月月均水温逐月升高,3月月均水温仅

为 14.1℃,至 7 月时月均水温已升高至 20.5℃,表层水温变化主要受当地气温影响。2019 年 9 月中旬至 2020 年 1 月乌江水温略高于干流水温,而在 2020 年 3—7 月低于干流水温,年最低和最高水温出现日期相对滞后,具有水库下泄低温水温变化特征。结合汇口上下游测站水温变化曲线来看,乌江会拉低干流该江段升温期的水温,抬升该江段降温期的水温,与嘉陵江作用相反,两支流汇入并充分掺混后进入三峡库区,与库区水温再次掺混,结合万州水温变化曲线来看,万州的水温日波动幅度相比上游清溪场有所减小,水温变化特征趋于库区水温特征,所以乌江对该江段水温有一定影响。乌江和嘉陵江的共同影响导致该江段沿程水温变化并不明显。

2.3 干支流水温流量相关性分析

支流的流量是干支流水温关系分析中最关键的因素之一,假定 A、B 和 C 点分别为干流上游、干流下游和支流监测点位, O 点为 C 支流入干流河口点位,不考虑沿程热能转换损失,根据热能守恒可得

$$F_B = F_A + F_C + f_{AO+CO+OB} \quad (1)$$

式中: F_A 为干流上游监测点储蓄的热能; F_B 为干流下游监测点储蓄的热能; F_C 为支流监测点储蓄的热能; $f_{AO+CO+OB}$ 为 AO 段、CO 段和 OB 段沿程吸收的热能。

各监测点储蓄的热能与它的流量和温度成正比,根据温度热能转换公式可得

$$F_B = cM\Delta T \quad (2)$$

$$\text{其中} \quad M = Qt \quad (3)$$

式中: c 为水的比热容; ΔT 为温度变化; M 为水的质量; Q 为流量; t 为时间。

将式(2)(3)代入式(1)可得

$$Q_B T_B = Q_A T_A + Q_C T_C + C_1 f_{AO+CO+OB} \quad (4)$$

$$\text{其中} \quad C_1 = \frac{1}{ct} \quad (5)$$

式中: C_1 为综合系数; T_A 、 T_B 、 T_C 分别为 A 点、B 点和 C 点的温度。A 点和 B 点之间不考虑其他支流汇入,即 $Q_B = Q_A + Q_C$,代入式(4)可得

$$Q_A(T_B - T_A) = Q_C(T_C - T_B) + C_1 f_{AO+CO+OB} \quad (6)$$

由式(6)可知,在不考虑沿程温升(温降)影响时,干流和支流的水温关系由干流上游来流量和支流流量决定,因此可以由干支流流量比值和水温变化的相关性来衡量各支流与干流水温的关系。

金沙江下游及川江段水温监测段流量较大的 3 条支流分别为岷江、嘉陵江和乌江,这 3 条支流年均流量分别占宜昌站流量的 18.83%、14.19% 和 10.79%。由年均流量占比确定本文主要分析的 3 条支流为岷江、嘉陵江和乌江,在分析支流对干流的水温作用时着重考虑支流在汇口下游的流量变化影响,依据各支流每月占汇口下游流量比值数据进行整理分析。

分别统计岷江、嘉陵江、乌江,以及干流汇口上下游监测点的水温,分析支流对干流沿程水温的影响,根据入汇口上下游沿程温差和干支流温差绘制这 3 条支流与干流温差相关曲线(图 7)。由图 7 可以看出,岷江、嘉陵江和乌江干支流温差和汇口上下游沿程温差的相关方程分别见式(7)(8)(9),相关系数分别为 0.9502、0.8845 和 0.7863。

$$y = 1.1726x + 0.7483 \quad (7)$$

$$y = 0.4032x + 0.2587 \quad (8)$$

$$y = 0.19x + 0.019 \quad (9)$$

式中: y 为汇口上下游沿程温差; x 为支流与干流温差。

根据上述方程可知,岷江、嘉陵江和乌江支流流量与汇口上游流量的比值分别为 1.1726、0.4032 和 0.19。岷江高场站流量占岷江汇口下游流量 30% 以上,且月均流量占比波动幅度较小,月均流量占比标准差为 0.042,因此对岷江进行相关性分析时点数据更加集中,相关系数达 0.9502,岷江对干流沿程水温的变化起到关键作用;嘉陵江占汇口下游 13%~25%,月均流量占比波动幅度略大于岷江,标准差为 0.055,点数据相对岷江也略分散,相关系数为 0.8845,对干流水温同样具有重要影响;乌江占汇口下游的比值相对较小,且月均流量占比波动幅度相对较大,波动幅度达 22.4%,标准差为 0.063,相关系数也较前两者小,仅为 0.7863,对干

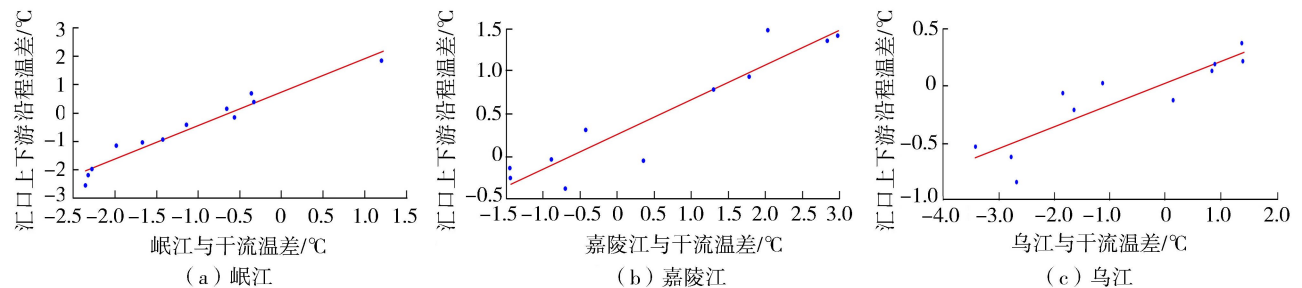


图 7 各支流与干流温差相关曲线

流水温影响相对较弱,这也与武隆水文站距汇口距离较远相关。由此可见,在不考虑沿程升(降)温影响时,支流流量越大,对干流水温的影响也越大。沿程升(降)温与大气温度、太阳辐射、光照条件、两岸地形、沿程流长、水深和流量等因素有关,还受降雨、空气湿度、风速等气象因素影响。

3 结 语

对金沙江下游及川江段 16 个测站的流量和表层水温监测数据进行分析,结果表明:各支流的最大流量均出现在 6—8 月,其中岷江对干流流量影响最大,多年平均流量占下游宜昌站达 18.8%,其次是嘉陵江和乌江。各支流的水温变化规律同当地气温变化规律相同,均为 2019 年 8 月开始降温,2020 年 2 月左右温度开始回升直至当年 7 月。岷江入汇流量较大,对干流水温影响距离较远,直到下游清溪场水温日波动幅度还保持和岷江相同的变化趋势;嘉陵江流量相对较大,在嘉陵江水温高于干流时会助力提升水温,而嘉陵江水温低于干流时会助力降低水温;与嘉陵江作用相反,乌江会拉低干流该江段升温期的水温,抬升该江段降温期的水温,两支流汇入并充分掺混后进入三峡库区,与库区水温再次掺混,导致该江段沿程水温变化并不明显。通过对干流水温流量的相关性分析可知,岷江对干流水温影响最大,其次是嘉陵江和乌江。因此,在对金沙江下游及川江段进行水电开发时,不仅要考虑梯级水库调度对下游水温的影响,也应考虑岷江、嘉陵江和乌江等主要支流对干流水温的影响。

参考文献:

[1] 邹珊,李雨,陈金凤,等. 长江攀枝花—宜昌江段水温时空变化规律[J]. 长江科学院院报,2020,37(8):35-41. (ZOU Shan, LI Yu, CHEN Jinfeng, et al. Temporal and spatial variation of water temperature in Panzhihua-Yichang segment of Changjiang River [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(8): 35-41. (in Chinese))

[2] 纪道斌,成再强,龙良红,等. 三峡水库不同运行期库首水温分层特性及生态效应[J]. 水资源保护,2022,38(3):34-42. (JI Daobin, CHENG Zaiqiang, LONG Lianghong, et al. Characteristics of thermal stratification in head area of Three Gorges Reservoir and ecological effects in different operation periods [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3): 34-42. (in Chinese))

[3] PRATS J, VAL R, ARMENGOL J, et al. Temporal variability in the thermal regime of the Lower Ebro River (Spain) and alteration due to anthropogenic factors[J]. Journal of Hydrology, 2010, 387(1/2): 105-118.

[4] BROWN L E, HANNAH D M, MILNER A M.

Hydroclimatological influences on water column and streambed thermal dynamics in an Alpine River system [J]. Journal of Hydrology, 2006, 325(1): 1-20.

[5] 李褪来,陈黎明,王向明. 梯级水电站对库区和河道水温的影响预测[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(3): 23-28. (LI Tilai, CHEN Liming, WANG Xiangming. Influence forecast of the cascade power station on water temperature of reservoirs and rivers [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(3): 23-28. (in Chinese))

[6] 惠二青,毛劲乔,戴会超. 上游水库水温情势变化对中华鲟产卵江段水温的影响[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(2): 44-48. (HUI Erqing, MAO Jingqiao, DAI Huichao. Effects of temperature variation at upstream of the Three Gorges Reservoir on Chinese sturgeon spawning reach [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(2): 44-48. (in Chinese))

[7] 蔡玉鹏,杨志,徐薇. 三峡水库蓄水后水温变化对四大家鱼自然繁殖的影响[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(1): 70-77. (CAI Yupeng, YANG Zhi, XU Wei. Effect of water temperature variation after impoundment of the Three Gorges Reservoir on natural reproduction of the four major Chinese carps [J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(1): 70-77. (in Chinese))

[8] 彭期冬,廖文根,李狮,等. 三峡工程蓄水以来对长江中游四大家鱼自然繁殖影响研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(增刊2): 228-232. (PENG Qidong, LIAO Wengen, LI Chong, et al. Impacts of four major Chinese carps' natural reproduction in the middle reaches of Changjiang River by Three Gorges Project since the impoundment [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2012, 44 (Sup2): 228-232. (in Chinese))

[9] 陶雨薇,王远坤,王栋,等. 三峡水库坝下水温变化及其对鱼类产卵影响[J]. 水力发电学报, 2018, 37(10): 48-55. (TAO Yuwei, WANG Yuankun, WANG Dong, et al. Assessing water temperature variations and impacts on fish spawning downstream of Three Gorges dam [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(10): 48-55. (in Chinese))

[10] 郭文献,王鸿翔,徐建新,等. 三峡水库对下游重要鱼类产卵期生态水文情势影响研究[J]. 水力发电学报, 2011, 30(3): 22-26. (GUO Wenxian, WANG Hongxiang, XU Jianxin, et al. Effects of Three Gorges Reservoir on the downstream eco-hydrological regimes during the spawning of important fishes [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(3): 22-26. (in Chinese))

[11] PEAKER J, SKODA P. Is the water temperature of the Danube River at Bratislava, Slovakia, rising? [J] Journal of Hydrometeorology, 2008, 9: 1115-1122.

[12] ZGANEC K. The effects of water diversion and climate change on hydrological alteration and temperature regime of karst rivers in central Croatia [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2012, 184: 5705-5723.

- [13] 蒲灵,李克锋,庄春义,等.天然河流水温变化规律的原型观测研究[J].四川大学学报(自然科学版),2006,52(3):614-617. (PU Ling, LI Kefeng, ZHUANG Chunyi, et al. Field measurement of distribution of water temperature's change along a river [J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2006, 52(3):614-617. (in Chinese))
- [14] 刘昭伟,吕平毓,于阳,等.50年来金沙江干流水温变化特征分析[J].淡水渔业,2014,44(6):49-54. (LIU Zhaowei, LYU Pingyu, YU Yang, et al. Variation in water temperature of the mainstream of the Jinsha River over last 50 years [J]. Freshwater Fisheries, 2014, 44(6):49-54. (in Chinese))
- [15] 雷丽萍.大型梯级水库蓄水运行后对下游河道水温的影响[J].西北水电,2020(5):21-23. (LEI Liping. Impact of large-scale cascade reservoirs on the water temperature of downstream rivers after impounding and operation [J]. Northwest Hydropower, 2020(5):21-23. (in Chinese))
- [16] 王煜,李金峰,翟振男.优化中华鲟产卵场水动力环境的梯级水库联合调度研究[J].水利水电科技进展,2020,40(1):56-63. (WANG Yu, LI Jinfeng, ZHAI Zhenan. Research on joint operation of cascade reservoirs to optimize hydrodynamic environment for Chinese sturgeon spawning ground [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(1):56-63. (in Chinese))
- [17] 任玉峰,赵良水,曹辉,等.金沙江下游梯级水库生态调度影响研究[J].三峡生态环境监测,2020,5(1):8-13. (REN Yufeng, ZHAO Liangshui, CAO Hui, et al. Influence of ecological regulation of cascade reservoirs in the lower Jinsha River [J]. Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges, 2020, 5(1):8-13. (in Chinese))
- [18] 程帅,左新宇,黄蕙,等.溪洛渡、向家坝库区及坝下水温分布特性及成因分析[J].水利水电快报,2019,40(8):35-39. (CHENG Shuai, ZUO Xinyu, HUANG Hui, et al. Characterization and causes of water temperature distribution in Xiluodu and Xiangjiaba reservoirs and below the dam [J]. Express Water Resources and Hydropower Information, 2019, 40(8):35-39. (in Chinese))
- [19] 蒋博,王福山,沈忱,等.澜沧江支流补远江对干流水温影响研究[J].水力发电学报,2019,38(2):82-88. (JIANG Bo, WANG Fushan, SHEN Chen, et al. Water temperature of Lancang River influenced by its tributary Buyuan River [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38(2):82-88. (in Chinese))
- [20] 郭生练,熊立华,熊丰,等.梯级水库运行期设计洪水理论和方法[J].水科学进展,2020,31(5):734-745. (GUO Shenglian, XIONG Lihua, XIONG Feng, et al. Theory and method of design flood in cascade reservoir operation period [J]. Advances in Water Science, 2020, 31(5):734-745. (in Chinese))
- [21] 周根富,王佰伟,陈小田.大宁河流域降雨径流模拟研究[J].水资源开发与管理,2021(10):54-57. (ZHOU Genfu, WANG Baiwei, CHEN Xiaotian. Simulation of rainfall and runoff in Daning River basin [J]. Water Resources Development and Management, 2021(10):54-57. (in Chinese))

(收稿日期:2022-03-14 编辑:骆超)

(上接第8页)

- [18] 李贵宝.河长制实施五年总结之发布的地方标准规范篇[EB/OL]. (2022-02-10). <https://mp.weixin.qq.com/s/iBxlw2NRYkdhFrDM2ognaA>.
- [19] 李贵宝,张亮,鞠茂森.河长制实施五年总结:(4)河长学院(河湖长制研究院或中心)知多少?[EB/OL]. (2022-02-16). <https://mp.weixin.qq.com/s/eO8s3b4xpeXYvKuORuKETg>.
- [20] 李贵宝,鞠茂森.河长制实施五年总结:(5)出版的书籍[EB/OL]. (2022-02-20). <https://mp.weixin.qq.com/s/eqQvke7HT7aOffgT9tgASQ>.
- [21] 王亚华,陈相凝.探寻更好的政策过程理论:基于中国水政策的比较研究[J].公共管理与政策评论,2020,9(6):3-14. (WANG Yahua, CHEN Xiangning. Explore better theory of policy process: insights from comparative study of China's water policies [J]. Public Administration and Policy Review, 2020, 9(6):3-14. (in Chinese))
- [22] 胡耘通,樊雪.协同治理视角下河长制政策跟踪审计研究[J].会计之友,2022(1):132-137. (HU Yuntong, FAN Xue. Research on policy tracking audit of river chief system from the perspective of collaborative governance [J]. Friends of Accounting, 2022(1):132-137. (in Chinese))
- [23] WU Chenhui, JU Maosen, WANG Longfei, et al. Public participation of the river chief system in China: current trends, problems, and perspectives [J]. Water, 2020, 12(12):3496.
- [24] LI Jing, SHI Xing, WU Huaqing, et al. Trade-off between economic development and environmental governance in China: an analysis based on the effect of river chief system [J]. China Economic Review, 2020, 60:101403.
- [25] 贡力,田洁,靳春玲,等.基于ERG需求模型的幸福河综合评价[J].水资源保护,2022,38(3):25-33. (GONG Li, TIAN Jie, JIN Chunling, et al. Comprehensive evaluation of Happy River based on ERG demand model [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3):25-33. (in Chinese))
- [26] 刘芳,朱玉春.农户参与度对河长制政策获得感的影响[J].中国农村水利水电,2022(4):85-91. (LIU Fang, ZHU Yuchun. The influence of farmers' participation on the sense of gain of the river chief system policy [J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(4):85-91. (in Chinese))

(收稿日期:2022-05-27 编辑:俞云利)

考虑多重共线性影响的特高拱坝时空监控模型

牛景太, 周 华, 吴邦彬, 邓志平, 任长江

(南昌工程学院水利与生态工程学院, 江西 南昌 330099)

摘要:为了解决特高拱坝时空监控模型中因子数目众多、因子之间存在多重共线性以及各测点之间存在空间关联性的问题,基于大坝变形原型监测资料,采用核独立分量分析(KICA)方法提取独立分量,将多个测点信息转化为少数几个综合指标;将提取的独立分量代入利用灰狼优化(GWO)算法优化的支持向量机(SVM)模型,对特高拱坝空间测点进行回归预测,构建了KICA-GWO-SVM特高拱坝时空监控模型。工程实例分析结果表明,KICA-GWO-SVM特高拱坝时空监控模型与多元回归模型、BP模型及SVM模型相比,其非线性表达能力强且性能良好,能够降低多重共线性对大坝变形监测的影响,对特高拱坝变形序列的拟合与预测精度高,可以更加准确全面地表征大坝整体的时空变形性态。

关键词:特高拱坝;多重共线性;时空监控模型;核独立分量分析;灰狼优化算法;支持向量机

中图分类号:TV698.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)01-0029-07

Spatio-temporal monitoring model for super-high arch dams considering multicollinearity effects//NIU Jingtai, ZHOU Hua, WU Bangbin, DENG Zhiping, REN Changjiang(School of Hydraulic and Ecological Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China)

Abstract: In order to solve the problem of large number of factors, multicollinearity between factors and spatial correlation among measuring points in the spatio-temporal monitoring model of super-high arch dams, the kernel independent component analysis (KICA) method was used to extract independent components based on the prototype monitoring data of dam deformation, and the information of multiple measuring points was transformed into a few comprehensive indicators. On this basis, the support vector machine (SVM) model was optimized by using the advantages of grey wolf optimization (GWO) algorithm with good convergence speed and solution accuracy in parameter optimization. The extracted independent components were substituted into the SVM model optimized by GWO algorithm, the regression prediction on the spatial measuring points of the super-high arch dam was performed, and the KICA-GWO-SVM spatio-temporal monitoring model for super-high arch dams was constructed. Analysis of engineering examples shows that, compared with the multiple regression model, BP model and SVM model, the KICA-GWO-SVM spatio-temporal monitoring model has strong nonlinear expression ability and good performance, which can reduce the influence of multicollinearity on dam deformation monitoring, and the fitting and prediction accuracy of the deformation sequence of super-high arch dams is excellent. It can more accurately and comprehensively grasp the overall spatio-temporal deformation behavior of the dam.

Key words: super-high arch dam; multicollinearity; spatio-temporal monitoring model; kernel independent component analysis; grey wolf optimization algorithm; support vector machine

近年来,我国特高拱坝建设发展迅速,先后建成小湾、锦屏、溪洛渡、白鹤滩等300 m级特高拱坝。鉴于高拱坝服役环境复杂且特高拱坝一旦失事会严重威胁下游人民群众安全以及带来巨大的社会经济财产损失,其安全稳定问题已成为当前坝工界关注的热点^[1-3]。因此,构建基于原型监测资料的特高拱坝时空监控模型,对于保证特高拱坝安全稳定运行

与长效服役具有十分关键的现实意义。

变形是最能直观反映混凝土坝运行性能的宏观效应量^[4]。大坝时空监控模型克服了传统单测点模型不能合理表征空间变形场内联系的缺陷,成为当前众多学者竞相研究的热点。王少伟等^[5]利用主成分分析法提取高拱坝空间变形场综合效应量,有效融合了多测点变形监测数据,减少了监控模

基金项目:国家自然科学基金(51969018,51769017,52009054)

作者简介:牛景太(1977—),男,教授,博士,主要从事水工建筑物安全监控研究。E-mail:niujingtai@163.com

通信作者:吴邦彬(1986—),男,讲师,博士,主要从事水工结构工程安全监控与数值仿真研究。E-mail:wubangbin1986@126.com

型数量,并结合有限元模型对大坝变形性态进行计算分析,实现了对高拱坝变形性态的快速诊断;王娟^[6]利用 FastICA 算法,对多个测点特征信息进行提取,再利用相关向量机进行回归预测,建立了基于 FastICA-RVM 的大坝多测点监控模型。但是,大坝时空监控模型中因子数目众多,各测点之间空间关联性以及影响因子间存在严重的多重共线性,使得计算方程不能有效反映各因子对大坝位移造成的影响,很难保证时空模型的拟合精度与稳健性,影响了模型预测结果的真实合理性^[7]。特高拱坝是一个复杂的动态结构,与一般拱坝相比,其坝体结构特性和运行环境更复杂,由此决定了其变形性态更具复杂性、多样性及相关不确定性^[8-9],加之各影响因子之间的多重共线性,如何提高其时空监控模型精度问题显得尤为突出。目前常用的如多元线性回归、逐步回归等回归方法,由于其计算简单高效,常在实际工程建立预测模型时被采用^[10],然而它们不能有效解决和诠释变量中存在的多重共线性问题。近年来,随着人工智能技术高速发展,众多机器学习方法,如支持向量机 (support vector machine, SVM)^[11]、人工神经网络^[12-13]、极限学习机^[14]等在大坝时空监控中得到应用,其中 SVM 通过引入核参数将非线性不可分的数据映射到高维空间,其泛化学习能力强,风险误差小,能够较好地处理高维、小样本、非线性数据。但是, SVM 模型的有效性关键在于参数的选取,因此需要找到合适的方法对 SVM 参数进行优化。为了消除多重共线性对大坝监控模型带来的不利影响,部分学者对该问题开展了研究: Chen 等^[15]考虑拱坝变形数据之间的空间关联性,提出一种多目标预测方法,用于拱坝变形的预测和异常检测; Salazar 等^[16]提出了基于增强回归树的大坝变形和渗漏模型,探索了每个预测因子的相对影响;胡德秀等^[17]建立改进的极限学习机大坝变形安全监控模型,改进后的模型较好地解决了由于训练数据存在共线性造成的计算结果较差的问题;欧斌等^[18]应用长短期记忆网络构建了混凝土坝变形预测模型,所建模型具有优秀的非线性数据分析能力;刘斌等^[19]基于五强溪水平位移原型监测资料,利用独立分量回归方法对大坝多点位移进行回归预测,相较于传统的回归方法,此方法有效解决了多测点回归预测模型中影响因子多重共线性导致的病态问题;曹延明等^[20]采用双支持向量机对高拱坝位移数据进行预测分析,并使用人工免疫算法对双支持向量机进行优化,得到了精度更高、速度更快的大坝回归预测模型,较好地处理了复杂的非线性问题。现有的研究成果虽在一定程度上削弱了多重共线性问

题的影响,但本身所存在的局限性也显而易见,特别是对于高坝大库,由于其监测点众多,数据处理量大,海量的测点之间空间关联性与影响因子的多重共线性问题尤为突出,传统时空模型无法综合考虑各测点之间的相互影响,多重共线性消除不够彻底,严重影响了模型的预测精度,因此难以全面掌握特高拱坝整体变形性态^[21]。

为有效解决多重共线性问题,合理有效地表征混凝土特高拱坝的整体变形性态,本文引入核独立分量分析 (Kernel independent component analysis, KICA) 方法,实现对多个测点位移数据以及影响因子的非线性提取,提取出的位移独立分量去除了冗余信息的干扰,包含了大坝多点监测数据的综合指标,可以通过对少量综合数据的分析实现多个测点的同时监控^[22]。在上述研究的基础上,利用灰狼优化 (grey wolf optimization, GWO) 算法在参数寻优方面具有良好收敛速度与求解精度的优点,寻求 SVM 模型中参数的最优解,将提取出的独立分量代入 GWO 算法优化的 SVM 模型,进一步对特高拱坝变形序列进行拟合与预测,从而可以获得精度更高且非线性表达能力强的 KICA-GWO-SVM 特高拱坝时空监控模型,降低多重共线性对大坝变形监测的影响,以期更加准确全面地掌握大坝整体的时空变形性态。

1 KICA-GWO-SVM 大坝时空监控模型构建

1.1 特高拱坝变形监测数据核独立分量提取

特高拱坝位移量主要受水压、温度、时效 3 类因子的影响^[23],在外部环境、材料特性以及荷载等因素共同作用之下,各影响因子之间存在较为明显的多重共线性^[24]。同时特高拱坝空间测点数量多,各测点之间也存在一定关联性的影响。KICA 方法在独立分量分析方法的基础上引入核参数,基于整个非线性函数空间来解决问题,提高了对复杂非线性问题的求解精度^[25]。因此,引入 KICA 方法可实现对多测点特征信息综合提取,进一步降维去除各影响因子间的线性相关性,降低测点间的空间关联性,降低影响因子间的多重共线性,为数据应用及预测分析奠定基础。

假设大坝 n 个测点形成的监测向量 $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$,对监测向量进行数据预处理,使监测向量成为零均值和单位方差向量。源信号 $\mathbf{S} = (s_1, s_2, \dots, s_n)$, \mathbf{X} 与 \mathbf{S} 满足线性组合:

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{S} \quad (1)$$

KICA 方法即是求解解混矩阵 \mathbf{P} ,用已知的 \mathbf{X} 输出估计信号 \mathbf{Y} :

$$Y = PX \quad (2)$$

基于上述原理,结合特高拱坝变形原型监测数据,对变形信息进行降维融合处理提取出独立分量,具体步骤如下:

- a. 给定 KICA 的核参数 $K(x, y)$, 分别输入环境影响因子以及大坝各测点效应量。
- b. 对输入数据进行中心化和白化处理。
- c. 利用 Cholesky 分解计算初始独立分量信号 (y_1, y_2, \dots, y_n) 的中心化格莱姆核矩阵。
- d. 计算解混矩阵 P 的最小化对比函数。
- e. 给定合适的迭代步长, 计算解混矩阵 P 。
- f. 若迭代收敛, 则输出环境影响因子、大坝各测点效应量对应的解混矩阵 P 以及独立分量 Y , 否则重新计算。

1.2 GWO 算法优化 SVM

SVM 在解决小样本、非线性以及高维数据时具有较大优势,且有良好的泛化能力^[26],其具有的良好非线性分析能力能够有效解决复杂的非线性回归问题,避免过拟合现象,因此,SVM 在处理大坝变形预测问题时具有较大的优势,对于大坝变形与环境量之间复杂的非线性关系,用 SVM 模型进行回归能取得较好的预测结果^[27]。

由于 SVM 在惩罚因子 c 、核参数 σ 等参数选择方面具有较强的依赖性,且参数的选取对 SVM 的拟合效果影响较大,参数选择的合理性决定了 SVM 的学习泛化能力与拟合精度问题。在处理非线性问题时,SVM 核参数选取的合理性直接决定了非线性映射特征空间选取的合理性,影响计算精度。基于以上问题,在选取 SVM 参数时应选择最优参数,使其能够得到良好的计算结果。

GWO 算法^[28]基于狼群中的等级制度与灰狼捕食猎物活动,通过由上至下依次为 α 狼、 β 狼、 δ 狼以及最底层的 ω 狼 4 个等级构成的群狼协作机制达到优化的目的,具备全局搜索能力强、参数少、精度高的优点。考虑到 SVM 的学习能力和泛化能力受参数的影响较为显著,鉴于 GWO 算法在参数寻优方面调整参数少、全局搜索能力强的良好性能,通过 GWO 算法对 SVM 的惩罚因子、核参数等参数进行优化,从而确定最佳参数。

进一步将提取出的降低多重共线性影响的独立分量数据代入 GWO 算法优化的 SVM 进行拟合预测分析,大坝独立分量变形数据拟合预测主要步骤如下:

- a. 分别取前 80% 环境影响因子独立分量和效应量独立分量作为训练集,后 20% 作为测试集。
- b. 设定灰狼数目、迭代次数以及初始化 α 、 β 、 δ 狼的位置,确定需要寻优的两个参数为惩罚因子和

核参数,并设置寻优参数的上下界。

- c. 计算输出最优参数分别赋给惩罚因子和核参数。
- d. 使用上述得到的最优参数建立优化的 SVM 模型。
- e. 将测试集数据导入到优化的 SVM 中进行回归预测。
- f. 输出预测结果,对比效应量预测值与特征信息测试集,并对其进行误差分析。

1.3 KICA-GWO-SVM 时空监控模型构建步骤

本文基于上述方法,首先采用 KICA 方法实现对特高拱坝变形数据及环境影响因子的特征信息独立分量提取,再利用 GWO 算法优化的 SVM 模型对监测数据进行非线性预测,最终构建融合 KICA-GWO-SVM 的大坝时空监控模型。模型实现流程如图 1 所示。

2 算例验证

某水电站位于四川省境内,总装机容量 840 万 kW,混凝土双曲拱坝最大坝高 305 m,坝顶高程 1885 m,坝顶宽度 16 m,水库正常蓄水位 1880 m。该特高拱坝由 26 个坝段构成,选取 2013 年 6 月 16 日至 2015 年 9 月 28 日时段内第 5、9、11、13、16、19 坝段垂线的位移测点进行分析,共布置 24 个监测点,各测点位置分布如图 2 所示,该时段内共 274 个径向位移监测数据,水位过程线及各测点实测位移值如图 3 所示。

持续影响大坝位移的因素包括水压、温度和时效。考虑影响因素对坝体位移影响具有滞后性,水压因子取 H 、 H^2 、 H^3 、 H^4 , H 代表坝前水深;温度因子取 $\sin \frac{2\pi t}{365}$ 、 $\cos \frac{2\pi t}{365}$ 、 $\sin \frac{4\pi t}{365}$ 、 $\cos \frac{4\pi t}{365}$;时效因子取 θ 和 $\ln \theta$, θ 为观测日至始测日的累计天数 t 除以 100。

首先将 24 个测点的位移数据与上述 10 个环境影响因子用 KICA 方法进行独立分量提取,通过该模型的计算,提取出 3 个位移独立分量,如图 4 所示。经计算得独立分量一的贡献率为 95.12%,独立分量二的贡献率为 3.36%,独立分量三的贡献率为 0.99%,其余独立分量贡献率几乎为 0,由此可见,提取出的这 3 个分量消除了冗余信息的干扰且融合了多测点位移监测数据 99.3% 的主要信息,便于后续通过分析这几个包含大坝多测点数据的综合信息指标,实现对多测点的同步监测,从而掌握大坝整体的变形性态。经此模型提取出的环境影响因子独立分量的个数为 6 个,经计算分析,6 个分量也已

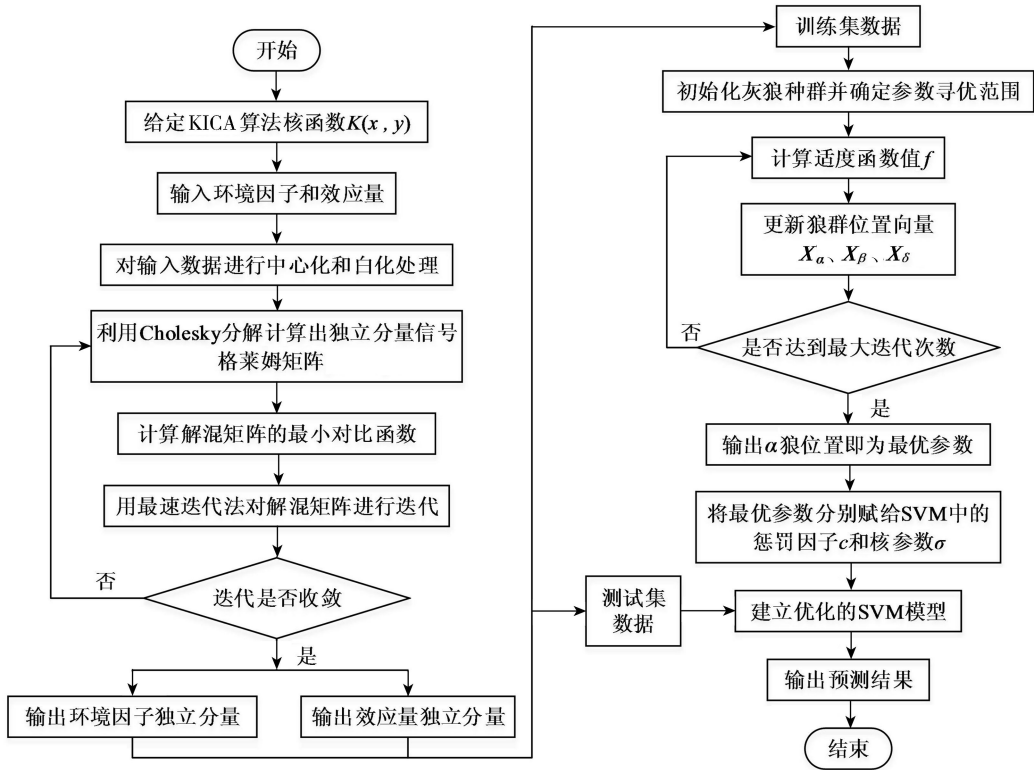


图1 模型构建流程

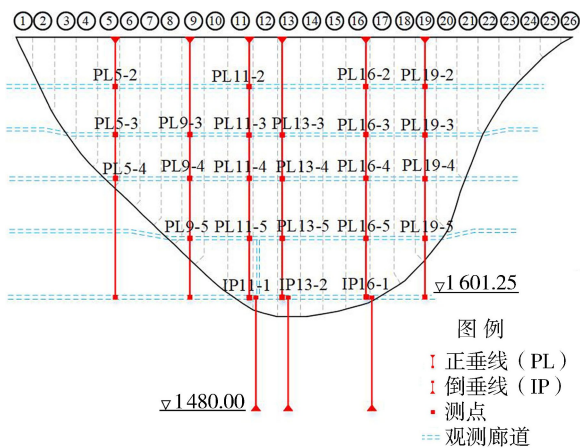


图2 大坝垂线位移测点分布(单位:m)

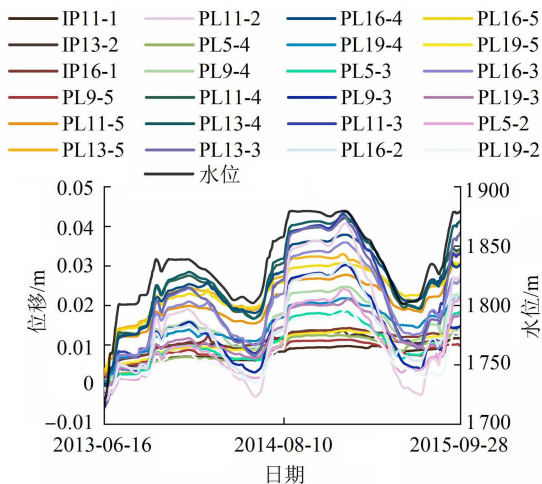


图3 研究时段库水位过程线及各测点实测位移值

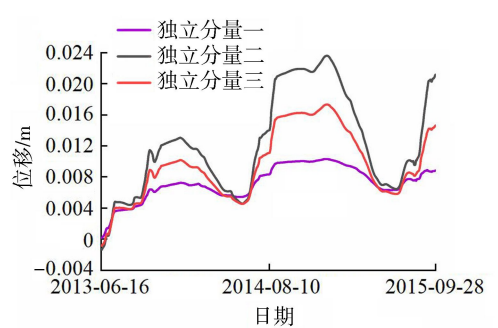


图4 KICA方法所分离的位移独立分量

包含了原始数据 99.3% 的特征信息,通过此方法合理地选取独立分量个数,可以降低数据维数,减少噪声影响,从而消除影响因子之间的多重共线性。

将上述得到的 3 个独立分量数据分别按贡献率权重计算得一组综合数据 I_{IC} 。将环境影响因子独立分量和效应量 I_{IC} 分别作为模型的输入与输出代入模型进行拟合预测,选取监测日序的前 220 个数据作为训练样本,后 54 个数据作为预测样本,同时设置 GWO 算法参数,设置狼群总数量为 20,最大迭代次数为 50,通过训练 SVM 模型得到惩罚因子与核参数的一组最佳参数为 $c = 1.37, \sigma = 2.60$ 。经 KICA-GWO-SVM 时空监控模型计算后得到一组综合的拟合与预测结果,可以反映大坝整体的时空变形形态,如图 5 所示。

为评价 KICA-GWO-SVM 时空监控模型的性能,将其拟合与预测结果同经 KICA 处理后的多元回归 (MLR) 模型、SVM 模型、BP 模型进行比较,结果如图 6

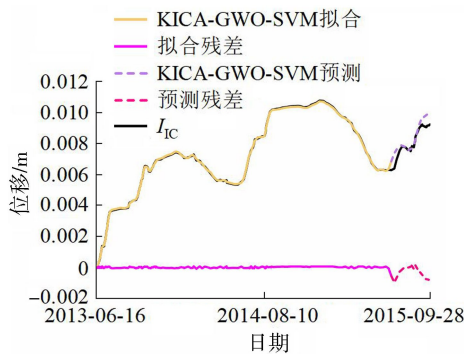


图5 KICA-GWO-SVM 模型拟合与预测

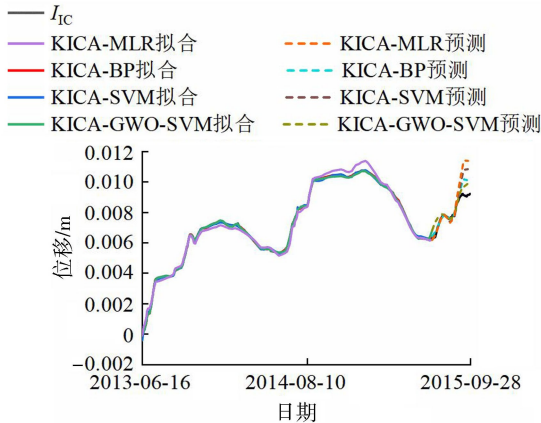


图6 I_{1c} 值拟合与预测曲线

所示,从图中可以看出,本文所建立的模型相比其他模型对表征大坝整体性态的 I_{1c} 值具有更好的拟合与预测效果。为评价 KICA 对该模型的贡献,取测点 PL11-2 作为对照,未对其监测信息进行核独立分量提取,从而建立各类模型对其实测位移进行拟合与预测,结果如图7所示。

通过对上述各模型的预测结果进行分析,得到模型预测残差如图8所示,可以看出,与其他模型相比,KICA-GWO-SVM 模型残差曲线最平滑,整体预测残差最小,由此可知,KICA-GWO-SVM 时空监控模型的预测效果最佳。

通过最后一步分析对上述各模型的拟合与预测精度进行比较,采用复相关系数 R^2 作为精度评价指标,采用均方误差 MSE、平均绝对误差 MAE、平均绝对百分比 MAPE 作为误差评价指标。

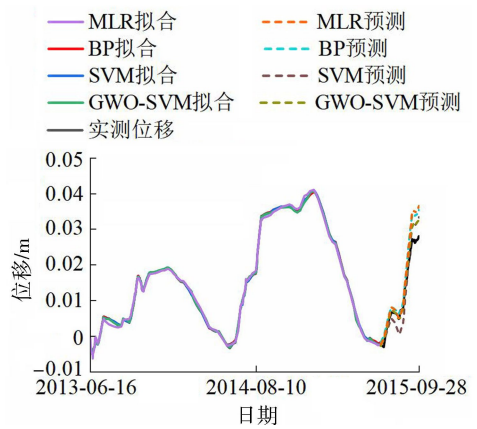


图7 PL11-2 测点拟合与预测曲线

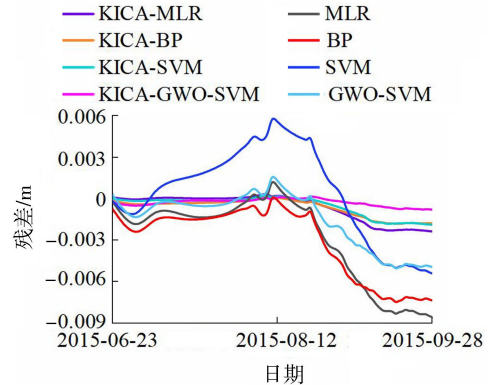


图8 各模型残差对比

各模型复相关系数拟合及预测误差分析结果见表1。由表1可以看出,KICA-GWO-SVM 时空监控模型复相关系数为 0.9624,精度最高。KICA-GWO-SVM 时空监控模型拟合与预测的 MAE 分别为 0.0210 和 0.3734,MSE 分别为 0.0011 和 0.2132,MAPE 分别为 1.34% 和 4.25%,与其他各模型相比,均为最小。未采用核独立分量提取的 PL11-2 测点较组合模型相比,误差较大,由此可验证 KICA 方法可在一定程度上削弱多重共线性问题的影响。综上,KICA-GWO-SVM 时空监控模型为特高拱坝最优监控模型,适于大坝时空监控。

3 结语

基于原型监测数据,利用 KICA 方法融合了坝

表1 各模型误差及复相关系数计算结果

模型	MAE/mm		MSE/mm		MAPE/%		R^2	
	拟合	预测	拟合	预测	拟合	预测	拟合	预测
KICA-MLR	0.1818	1.1866	0.0471	2.2900	9.24	13.13	0.9969	0.9473
KICA-BP	0.0513	0.9811	0.0042	1.4317	3.67	10.96	0.9997	0.9556
KICA-SVM	0.0620	0.9034	0.0071	1.3768	7.22	10.00	0.9995	0.9455
KICA-GWO-SVM	0.0210	0.3734	0.0011	0.2132	1.34	4.25	0.9999	0.9624
MLR	0.5375	4.5061	0.4736	30.6504	12.20	22.69		
BP	0.2242	4.3683	0.0979	26.5978	5.49	24.64		
SVM	0.2532	3.4961	0.1238	14.9707	6.44	28.58		
GWO-SVM	0.1859	2.6272	0.0773	10.3970	2.78	13.59		

体多测点位移监测数据,即用少数几个可以反映大坝整体性态的综合指标来代替包含冗余信息的多测点数据信息,减少了监控模型数量,便于后续通过分析这几个少量综合信息实现对大坝整体的监控,同时实现了对多个测点位移数据以及影响因子的非线性提取,达到消除各测点、各影响因子间相关性的目的。利用 GWO 算法优化 SVM 模型,将提取的独立分量代入 SVM 模型,对特高拱坝空间测点进行回归预测,构建了 KICA-GWO-SVM 特高拱坝时空监控模型。通过工程实例验证了模型的有效性。与其他模型相比,KICA-GWO-SVM 特高拱坝时空监控模型非线性表达能力强且性能良好,能够降低多重共线性对大坝变形监测的影响,对特高拱坝变形序列进行拟合与预测精度高,可以更加准确全面地表征大坝整体的时空变形性态。

参考文献:

[1] 张冲,王仁坤,汤雪娟. 溪洛渡特高拱坝蓄水初期工作状态评价[J]. 水利学报,2016,47(1):85-93. (ZHANG Chong, WANG Renkun, TANG Xuejuan. Safety evaluation of Xiluodu ultra-high arch dam during the initial impoundment period [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(1): 85-93. (in Chinese))

[2] 黄海兵,吴云星,谷艳昌. 应用聚类算法的大坝安全监控方法[J]. 水利规划与设计,2021(8):122-126. (HUANG Haibing, WU Yunxing, GU Yanchang. Overview of application research on dam safety monitoring based on clustering algorithm [J]. Water Resources Planning and Design, 2021(8): 122-126. (in Chinese))

[3] 赵二峰,顾冲时. 特高拱坝结构性态诊断与监控方法述评[J]. 水利水运工程学报,2022:1-12. (ZHAO Erfeng, GU Chongshi. Review on diagnosis and monitoring methods of structural behavior of superhigh arch dams [J]. Hydro-Science and Engineering, 2022: 1-12. (in Chinese))

[4] 胡江,马福恒,王春红. 特高拱坝变形监测的分区及其模型构建方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(2):148-154. (HU Jiang, MA Fuheng, WANG Chunhong. Zoned deformation monitoring and its model building method for super high arch dams [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(2): 148-154. (in Chinese))

[5] 王少伟,包腾飞,胡坤. 基于 PCA 的高混凝土坝变形空间融合监控模型[J]. 水利水电技术,2018,49(8):123-127. (WANG Shaowei, BAO Tengfei, HU Kun. PCA-based monitoring model for spatial integration of deformation of high concrete dam [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(8): 123-127. (in Chinese))

[6] 王娟. 基于盲源分离和相关向量机的大坝安全监测研

究[D]. 西安:西安理工大学,2017.

[7] 徐初,苏怀智,杨立夫. 基于 GP XGBoost 的大坝变形预测模型[J]. 水利水电科技进展,2021,41(5):41-46. (XU Ren, SU Huaizhi, YANG Lifu. Dam deformation prediction model based on GP-XGBoost [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(5): 41-46. (in Chinese))

[8] 张石,郑东健,陈卓研. 基于改进 PSO-RF 算法的大坝变形预测模型[J]. 水利水电科技进展,2022,42(6):39-44. (ZHANG Shi, ZHENG Dongjian, CHEN Zhuoyan. Dam deformation prediction model based on improved PSO-RF algorithm [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(6): 39-44. (in Chinese))

[9] 李明超,任秋兵,沈扬. 贝叶斯框架下的大坝变形交互式时变预测模型及其验证[J]. 水利学报,2018,49(11):1328-1338. (LI Mingchao, REN Qiubing, SHEN Yang. Prediction model for interactive time series evolution and its verification of dam deformation under Bayesian framework [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(11): 1328-1338. (in Chinese))

[10] KANG Fei, LIU Xi, LI Junjie. Temperature effect modeling in structural health monitoring of concrete dams using kernel extreme learning machines [J]. Structural Health Monitoring, 2020, 19(4): 987-1002.

[11] 魏博文,柳波,徐富刚,等. 融合 PSO-SVM 的混凝土拱坝多测点变形监控混合模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2021:1-14. (WEI Bowen, LIU Bo, XU Fugang, et al. Multi-point hybrid model based on PSO-SVM for concrete arch dam deformation monitoring [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021: 1-14. (in Chinese))

[12] 侯回位,郑东健,刘永涛,等. 基于 EEMD-SE-LSTM 的混凝土坝变形监测模型[J]. 水利水电科技进展,2022,42(1):61-66. (HOU Huiwei, ZHENG Dongjian, LIU Yongtao, et al. Deformation monitoring model of concrete dams based on EEMD-SE-LSTM [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(1): 61-66. (in Chinese))

[13] 李鹏鹏,苏怀智,郭芝韵,等. 基于人工蜂群算法与 Elman 神经网络的大坝变形监控模型[J]. 水利水电技术,2017,48(3):104-108. (LI Pengpeng, SU Huaizhi, GUO Zhiyun, et al. Artificial bee colony algorithm and Elman neural network-based model for dam deformation monitoring [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(3): 104-108. (in Chinese))

[14] 陈优良,肖钢,胡敏,等. 极限学习机与弹性网络支持下的大坝变形预测[J]. 测绘科学,2020,45(11):20-27. (CHEN Youliang, XIAO Gang, HU Min, et al. Dam deformation prediction based on extreme learning machine and elastic network [J]. Science of Surveying and

- Mapping,2020,45(11):20-27. (in Chinese))
- [15] CHEN Siyu, GU Chongshi, LIN Chaoning, et al. Prediction of arch dam deformation via correlated multi-target stacking[J]. Applied Mathematical Modelling, 2021, 91: 1175-1193.
- [16] SALAZAR F, TOLEDO M Á, OÑATE E, et al. Interpretation of dam deformation and leakage with boosted regression trees [J]. Engineering Structures, 2016, 119: 230-251.
- [17] 胡德秀, 屈旭东, 杨杰, 等. 基于 M-ELM 的大坝变形安全监控模型[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(3):75-80. (HU Dexiu, QU Xudong, YANG Jie, et al. A safety monitoring model of dam deformation based on M-ELM [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(3):75-80. (in Chinese))
- [18] 欧斌, 吴邦彬, 袁杰, 等. 基于 LSTM 的混凝土坝变形预测模型[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(1):21-26. (OU Bin, WU Bangbin, YUAN Jie, et al. LSTM-based deformation prediction model of concrete dams [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(1):21-26. (in Chinese))
- [19] 刘斌, 戴吾蛟, 曾凡河, 等. 利用独立分量回归建立大坝多测点位移模型[J]. 大地测量与地球动力学, 2016, 36(2):124-128. (LIU Bin, DAI Wujiao, ZENG Fanhe, et al. Modeling dam displacement of multi-points using independent component regression method [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2016, 36(2):124-128. (in Chinese))
- [20] 曹延明, 井德泉, 刘春高. 人工免疫算法优化双支持向量机在拱坝变形预测中的应用[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(12):54-58. (CAO Yanming, JING Dequan, LIU Chungao. Predicting arch dam displacement using twin support vector machine optimized by artificial Immune algorithm [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(12):54-58. (in Chinese))
- [21] 李子阳, 李涵曼, 李政颢, 等. 基于多测点云相似的混凝土坝变形形态关联分析[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(6):13-17. (LI Ziyang, LI Hanman, LI Zhengxie, et al. Correlation analysis of deformation behavior of concrete dams based on similarity of multi-point cloud [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(6):13-17. (in Chinese))
- [22] 李斌. 大坝安全监控的多测点效应量模型研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2016.
- [23] 吴中如. 水工建筑物安全监控理论及其应用[M]. 南京: 河海大学出版社, 2003.
- [24] 牛景太, 姜灵, 邓志平, 等. 基于原型监测资料的特高拱坝变形实时风险率模型[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(5):166-174. (NIU Jingtai, JIANG Ling, DENG Zhiping, et al. Real-time risk rate model for deformation of ultra-high arch dams based on prototype monitoring data [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2021, 32(5):166-174. (in Chinese))
- [25] BACH F R, JORDAN M I. Kernel independent component analysis[J]. The Journal of Machine Learning Research, 2003, 3:1-48.
- [26] 王颖慧, 苏怀智. 基于 PCA-GWO-SVM 的大坝变形预测[J]. 人民黄河, 2020, 42(11):130-134. (WANG Yinghui, SU Huaizhi. Dam deformation prediction based on PCA-GWO-SVM model [J]. Yellow River, 2020, 42(11):130-134. (in Chinese))
- [27] 钱秋培, 崔伟杰, 包腾飞, 等. 基于 SVM 的混凝土坝变形监控模型预测能力实例分析[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(8):46-50. (QIAN Qiupei, CUI Weijie, BAO Tengfei, et al. Case analysis of the prediction ability of SVM-based monitoring model for concrete dam deformation [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(8):46-50. (in Chinese))
- [28] MIRJALILI S, MIRJALILI S M, LEWIS A. Grey wolf optimizer [J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69:46-61.

(收稿日期:2022-09-04 编辑:俞云利)

(上接第 21 页)

- [30] LILLIEFORS H W. On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown[J]. Journal of the American Statistical Association, 1967, 62(318):399-402.
- [31] 成静清, 宋松柏. 基于混合分布非一致性年径流序列频率参数的计算[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(2):229-234. (CHENG Jingqing, SONG Songbai. Calculation of hydrological frequency parameters of inconsistent annual runoff series based on mixed distribution [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2010, 38(2):229-234. (in Chinese))
- [32] 谷洪钦, 刘开磊, 刘玉环, 等. 综合多源不确定性的洪水概率预报试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(2):99-104. (GU Hongqin, LIU Kailei, LIU Yuhuan, et al. Experiments on flood probability forecasting accounting for multi-source uncertainty [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(2):99-104. (in Chinese))
- [33] ANDRIEU C, THOMS J. A tutorial on adaptive MCMC [J]. Statistics and Computing, 2008, 18(4):343-373. (收稿日期:2021-11-23 编辑:俞云利)

水上滑坡冲击涌浪的远场传播特征数值模拟分析

黄瑞启¹, 黄筱云^{1,2}, 张少强¹, 程永舟^{1,2}

(1. 长沙理工大学水利与环境工程学院, 湖南长沙 410114;

2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南长沙 410114)

摘要:为分析三维滑坡冲击涌浪的远场传播特征,采用 FLOW-3D 软件建立三维模型,选取不同的滑坡体厚度、宽度与入水速度,模拟滑坡体入水、水体飞溅以及涌浪产生和传播过程。结果表明:滑坡涌浪在传播 7 倍水深距离后趋于稳定,其相对波高与周期由滑坡体弗劳德数、相对下滑时间以及滑坡体相对体积决定,滑坡体对远场涌浪能量的传递率在 8.0% ~ 19.7% 之间。

关键词:水上滑坡;冲击涌浪;远场传播;FLOW-3D;三维模型

中图分类号:TV139.2

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2023)01-0036-07

Numerical simulation analysis on far-field propagation characteristics of impulse waves generated by subaerial landslides//HUANG Ruiqi¹, HUANG Xiaoyun^{1,2}, ZHANG Shaoqiang¹, CHENG Yongzhou^{1,2}(1. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Water and Sediment Science and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China)

Abstract: To investigate the far-field propagation characteristics of three-dimensional impulse waves generated by subaerial landslide, a three-dimensional landslide-generated wave model was established using FLOW-3D. The process of the landslide mass impact with water splash followed by landslide-induced wave generation and propagation were investigated under the condition of slides with different thickness, width and variable entry speeds. The results show that the landslide wave propagation keeps stable beyond a distance of 7 times of water-depth from the slide entry point. The dimensionless wave height and wave period are determined by the Froude number of landslide mass, the dimensionless motion time and the landslide body size. The energy conservation rate from the landslide to the far-field wave fluctuates from 8.0% to 19.7%.

Key words: subaerial landslide; impulse wave; far-field propagation; FLOW-3D; three-dimensional model

库岸边坡失稳、崩落,滑坡体以一定速度冲击水体,将产生巨大的涌浪。国内外滑坡浪事件屡见不鲜,如 1963 年意大利的瓦伊昂水库滑坡^[1]、2007 年清江水布垭水库大堰塘滑坡^[2]、2008 年长江巫峡龚家方滑坡^[3]等。按照滑坡发生位置,可以将滑坡分为水上滑坡(subaerial)、水下滑坡(submarine)和滨水滑坡(partially submerged)3 种类型^[4]。与滨水滑坡、水下滑坡相比,水上滑坡会冲击水面,涌浪的初始形态更加复杂,且与滑坡体运动与动力特征密切相关^[5]。水上滑坡产生涌浪过程可分为以下 4 个阶段^[6]:①滑坡体开始移动、加速、冲击水面;②滑坡体入水滑行产生涌浪;③涌浪向外传播;④涌浪抵达岸线、爬高。按近场首波的非线性特征,滑坡涌浪大致可分为线性波、孤立波、椭圆余弦波和涌潮^[7],具

体类型与滑坡体体积以及滑坡体与水之间的动量交换有关。

滑坡涌浪的特征研究主要采用理论分析^[8-12]、物理模型试验^[13-19]和数值模拟^[20-26]方法。现阶段滑坡涌浪的数值模拟方法有基于 N-S 方程的数值模拟^[27-28]、基于浅水方程的数值模拟^[29-30]、基于 Boussinesq 波方程的数值模拟^[31-32]和基于势流方程的数值模拟^[33-34]4 类。若要完全模拟滑坡体冲击水面造成水花飞溅和涌浪的传播过程,基于 N-S 方程的数值模型是唯一选择。基于 N-S 方程的数值模型又分为二维和三维两类。在二维模型中,滑坡体宽度与水体宽度一致,涌浪只在一个方向上传播;而三维模型可以呈现涌浪的不同径向传播。滑坡涌浪的三维数值模拟研究远少于二维数值模拟研究,且滑

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52171245);湖南省教育厅科学研究重点项目(20A011);湖南省自然科学基金青年项目(2021JJ40607)

作者简介:黄瑞启(1997—),男,硕士研究生,主要从事边坡稳定与滑坡涌浪研究。E-mail:864344627@qq.com

通信作者:黄筱云(1980—),男,副教授,博士,主要从事水波运动数值模拟研究。E-mail:xiaoyun.huang@csust.edu.cn

坡涌浪传播远场特征的分析与讨论较少见。

本文采用 FLOW-3D 软件模拟水上滑坡产生涌浪的三维过程,分析不同径向上周期与波高变化过程以及涌浪传播近远场的界限,并探讨了远场涌浪能量大小及其能量转换率,以期为滑坡涌浪地质灾害的预警提供参考。

1 数值模型及验证

1.1 模型概况

三维滑坡涌浪模型(以下简称“本文模型”)采用 FLOW-3D 软件建模,其中流体控制方程为不可压缩流体运动的 Navier-Stokes 方程,采用标准 RNG $k-\epsilon$ 模型描述流体紊动特征,GMO 模型控制滑坡体运动,TruVOF 技术捕捉水面起伏和飞溅。通过调整 GMO 模型中的摩擦系数和碰撞系数可以改变滑坡体下滑、撞击水面、触底等状态,以获得准确的涌浪结果,碰撞系数取 1 表示碰撞物完全弹性,取 0 则是完全塑性。

1.2 模型验证

通过与 Liu 等^[35]的物理试验结果对比来检验本

文模型的有效性。该物理试验在长 104 m、宽 3.7 m、高 4.6 m 的水槽中进行,槽内水深为 3 m,滑坡坡度为 27°,滑坡体长 91 cm、宽 65 cm、高 46 cm,质量为 475.52 kg,初始时刻滑坡体顶面距水面高度为 0.46 m。本文模型采用渐变网格,最小网格尺寸是 0.02 m,时间步长根据柯朗条件自动调整,摩擦系数和碰撞系数均取 0.1。

图 1 为 6 个测点(图 2)波面高度 η 实测结果与模拟结果的比较。总体上,本文模型模拟结果较 Liu 等^[35]模拟结果更接近实测结果,说明本文模型各参数设置合理。

2 数值模拟试验

2.1 试验设置

整个试验区域纵向长度设为 200 m,水面横向宽度为 100 m,水深为 10 m,滑坡坡度为 45°。滑坡体为前缘角度为 45°的四棱柱,长 9 m、宽 8 m、厚 3 m,置于区域中线上,如图 3 所示。为节省计算资源,将整个区域按中线分开,并将与中线重合的边界设为对称边界,其余边界设置为出流边界,并布置多

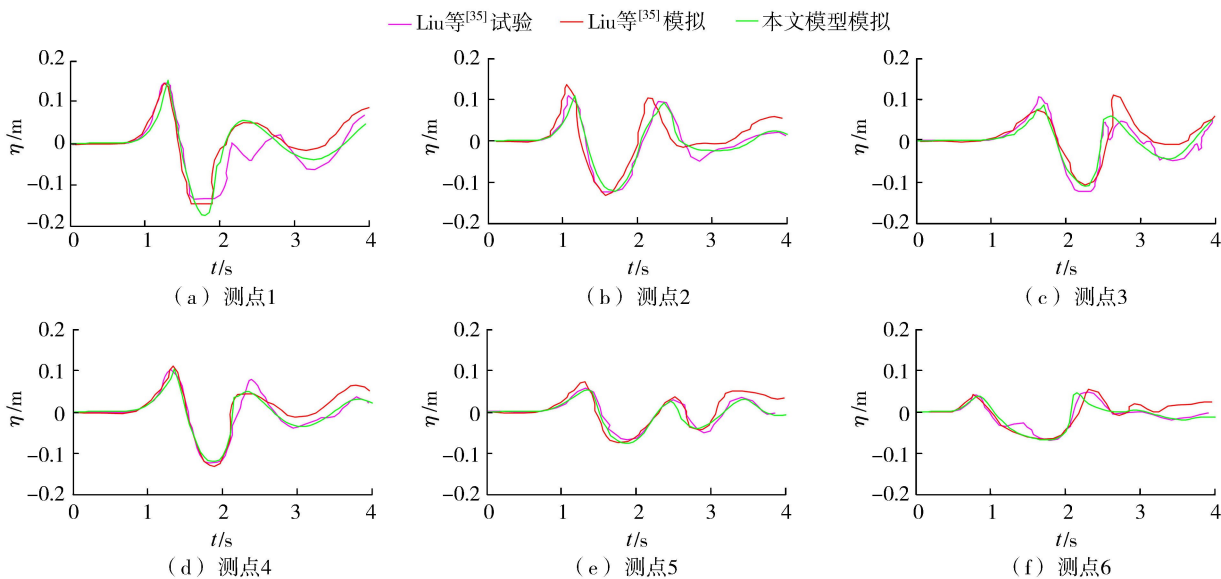


图 1 本文模型模拟结果与 Liu 等^[35]模拟和试验结果比较

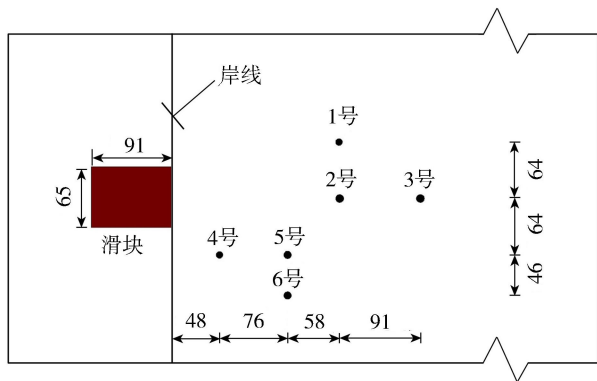


图 2 Liu 等^[35]物理试验测点布置(单位:cm)

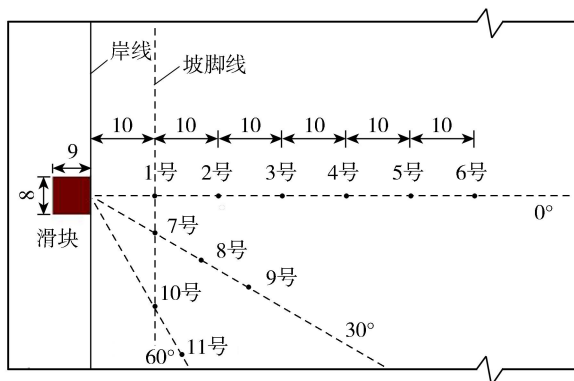


图 3 三维滑坡涌浪数值模拟试验测点布置(单位:m)

孔介质用于消波。

2.2 数值模拟结果

滑坡涌浪的产生与传播区域可以分为飞溅区、近场和远场。一般而言,入水点至滑坡体停止点的水域属于飞溅区;从停止点开始,波浪出现色散的区域称为近场;呈现振荡波特点的区域则为远场^[5]。就本文数值模拟试验而言,坡脚线可以看作飞溅区与近场的界限。为获取滑坡涌浪近远场涌浪三维特征,在0°径向上等间距布置6个测点,30°径向上布置3个测点,60°径向上布置2个测点,如图3所示,其中,2、8号测点和10号测点径距一致,3、9号测点和11号测点径距相等。表1为滑坡体以4 m/s初始速度下滑时各测点的首、次波波峰高度 η_c 与周期 T 模拟结果。

表1 各测点首、次波波峰高度与周期

测点	η_c/m		T/s	
	首波	次波	首波	次波
1号	1.42	0.33	4.15	4.37
2号	0.71	0.42	5.00	3.10
3号	0.43	0.65	8.06	3.00
4号	0.25	0.76	7.75	3.74
5号	0.18	0.75	7.95	4.50
6号	0.14	0.61	8.20	4.50
7号	0.94	0.76	5.50	2.65
8号	0.48	0.78	6.75	2.90
9号	0.28	0.78	7.55	3.66
10号	0.25	0.37	6.03	2.28
11号	0.17	0.44	7.10	3.30

图4给出了1~6号测点相对波面高度时程变化(图中 $\eta^* = \eta/h$ 为相对波面高度, $t^* = t\sqrt{g/h}$ 为相对时间,其中 h 为水深, g 为重力加速度, t 为时间)。可以看出,首波向外传播时,出现明显色散,低频波与高频波分离;次波则吸收了首波的高频部分能量,波幅逐渐增大,在4倍水深位置达到最大,并在相当长距离(2倍水深距离以上)缓慢减小,特别是5倍水深距离后,次波周期也保持不变,故认为该滑坡涌浪的近远场界线位于5倍水深以外。从坡脚3个测点的波面时程图(图5)可以看出,首波依次经过1、7、10号测点,波幅与频率依次减小。另外,在0°和30°径向上,坡脚处首波波幅大于次波波幅,而在

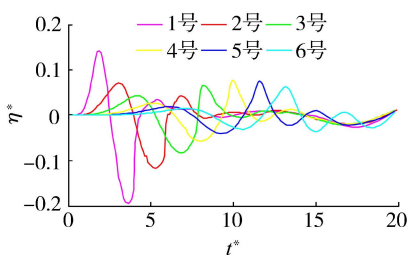


图4 0°径向各测点波面时程变化

60°径向上情况相反。从不同径向等径距测点波面时程变化来看(图6),等径距测点波面首次达到波峰高度的时间接近,波幅随径向角增大而减小,同时,30°、60°径向上2倍水深以外测点次波波幅变化较小,但周期变化较大。

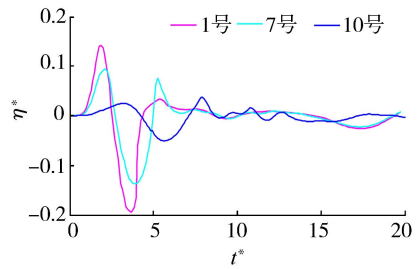
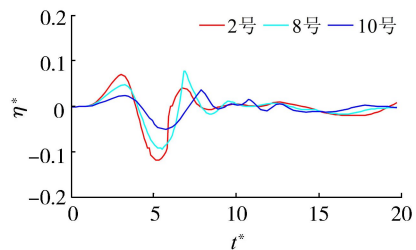
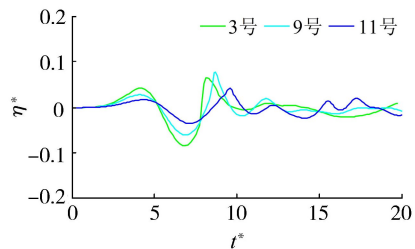


图5 坡脚各测点波面时程变化



(a) 20 m径距



(b) 30 m径距

图6 不同径向等径距测点波面时程变化

3 滑坡涌浪特征分析

为分析滑坡涌浪特征,本文通过改变滑坡体厚度 s 、宽度 b 与入水速度 v 以获得不同的涌浪形态,数值模拟试验具体工况见表2。

3.1 滑坡体运动

滑坡体撞击水面入水后做减速运动,触底后会停止或翻滚。相对滑坡特征时间形式为 $t_s^* = t_s\sqrt{g/h}$ (t_s 为滑坡体入水至触底的时长,称为滑坡特征时间)。相对滑坡特征时间可认为是滑坡体弗劳德数 Fr 、斜坡角度 α 以及相对滑坡体体积 V_s^* 的函数^[6],即

$$t_s^* = f(Fr, \sin\alpha, V_s^*) \quad (1)$$

其中

$$V_s^* = lbs/h^3$$

式中 l 为滑坡体长度。由于滑坡体下滑主要受到水体的正面阻力,若不考虑侧向阻力,有

$$t_s^* = f(Fr, \sin\alpha, A_s^*) \quad (2)$$

其中

$$A_s^* = bs/h^2$$

表2 数值模拟试验工况与结果

工况	s/m	b/m	v/(m·s ⁻¹)	E _w /MJ	t _s /s
1	3	6	4	3.72	1.73
2	3	9	4	7.10	1.72
3	3	12	4	1.15	1.72
4	3	6	5	3.90	1.67
5	3	9	5	7.17	1.66
6	3	12	5	1.22	1.66
7	3	6	6	3.33	1.62
8	3	9	6	7.66	1.61
9	3	12	6	1.28	1.61
10	4	6	4	5.00	1.72
11	4	9	4	1.12	1.72
12	4	12	4	1.37	1.71
13	4	6	5	5.43	1.66
14	4	9	5	1.12	1.65
15	4	12	5	1.38	1.65
16	4	6	6	5.31	1.61
17	4	9	6	1.08	1.61
18	4	12	6	1.43	1.60
19	5	6	4	6.17	1.72
20	5	9	4	1.39	1.71
21	5	12	4	2.16	1.71
22	5	6	5	6.01	1.66
23	5	9	5	1.32	1.65
24	5	12	5	1.98	1.65
25	5	6	6	6.11	1.61
26	5	9	6	1.51	1.60
27	5	12	6	1.92	1.60

注: E_w 为通过近远场分界断面的涌浪总能量。

根据27组工况的滑坡体滑坡特征时间数值模拟结果(表2),相对滑坡特征时间的拟合公式为

$$t_s^* = 1.466 A_s^{*-0.011} Fr^{-0.1607} \quad (3)$$

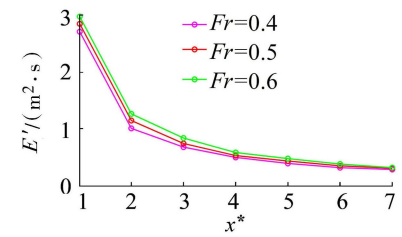
式(3)的拟合度为0.991,均方误差为3.47×10⁻⁴。

3.2 近远场

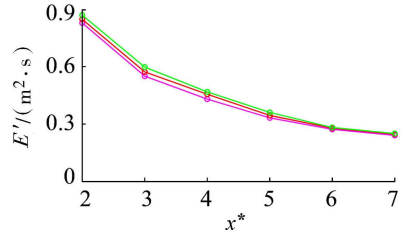
Walder等^[5]将近场定义为从飞溅区边界至涌浪动能与势能趋近于某一渐近值的位置,Watts^[13]则采用如下能量积分表示通过位置x断面的涌浪总势能:

$$E'(x/h) = \int_0^\infty \eta^2(t, x/h) dt \quad (4)$$

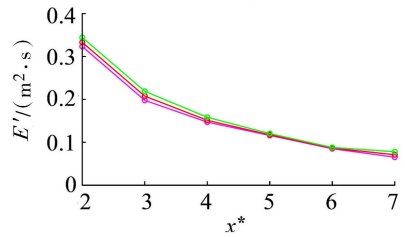
当上述积分沿程趋近一定值时,便可确定近场的外边界。图7~9为不同径向上沿程各测点的涌浪总势能(图中s^{*}=s/h为滑坡体相对厚度,b^{*}=b/h为滑坡体相对宽度),横坐标x^{*}=x/h。可以看出,总势能沿程减小,其中,弗劳德数对近场总势能的沿程变化影响较小,而相对厚度与相对宽度的影响明显。在1~3倍水深之间,总势能的下降幅度较大,而后下降幅度开始减少,当涌浪达到6~7倍水深区间时,各径向涌浪总势能变化较小,且在7倍水深位置不同径向的涌浪总势能几乎相等。因此,7倍水深距离可看作三维滑坡涌浪近场的外边界。



(a) 0° 径向

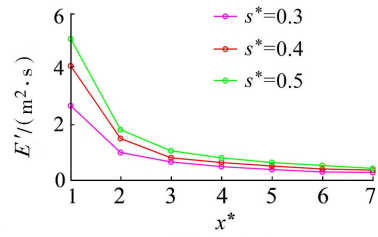


(b) 30° 径向

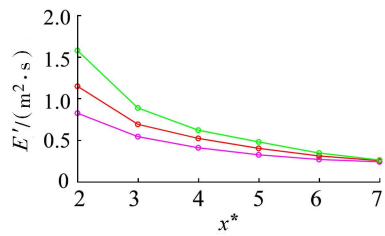


(c) 60° 径向

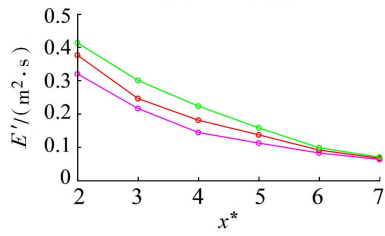
图7 不同滑坡体弗劳德数下各径向涌浪能量积分沿程变化



(a) 0° 径向



(b) 30° 径向



(c) 60° 径向

图8 不同滑坡体相对厚度下各径向涌浪能量积分沿程变化

3.3 波峰高度

这里主要分析近场涌浪最大波峰高度和远场涌浪最大波峰高度。从空间上看,近场区域各径向坡

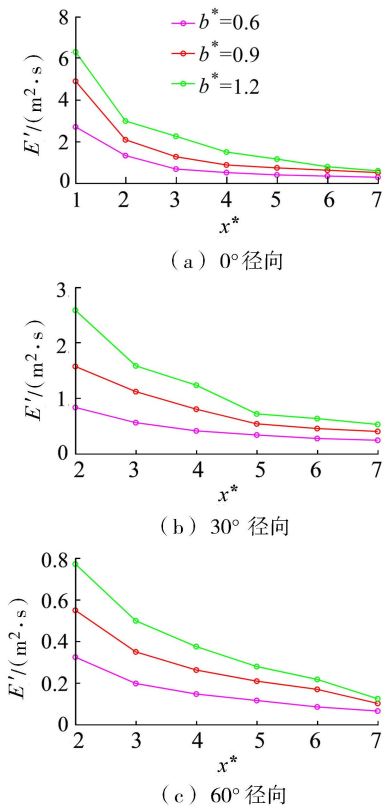


图9 不同滑坡体相对宽度下各径向涌浪能量积分沿程变化

脚线处波峰高度最大;而从时间上来看,最大波峰高度可能现于首波或次波。对于远场涌浪,取径距为7倍水深位置处的涌浪进行讨论。在三维情形中,相对波峰高度 η_c^* 可认为是滑坡体弗劳德数 Fr 、斜坡角度 α 、径向角 θ 、相对滑坡特征时间 t_s^* 以及滑坡体相对体积 V_s^* 的函数^[6],即

$$\eta_c^* = f(V_s^*, Fr, \sin\alpha, \cos\theta, t_s^*) \quad (5)$$

Walder等^[5]通过二维物理试验指出涌浪相对最大波高是 t_s^*/V_s^* 的函数,而Panizzo等^[6]通过三维涌浪试验进一步指出 0° 径向上相对最大波高可看作是 t_s^*/A_s^* 的函数。基于此,式(5)可写成

$$\eta_c^* = f(t_s^*/A_s^*, \cos\theta) \quad (6)$$

根据27组工况的数值模拟结果,近场首波相对波峰高度 η_{c1}^* 和近场次波相对波峰高度 η_{c2}^* 的拟合公式分别为

$$\eta_{c1}^* = 0.6102(t_s^*/A_s^*)^{-0.7785}(\cos\theta)^{2.9457} \quad (7)$$

$$\eta_{c2}^* = 0.6866(t_s^*/A_s^*)^{-1.1039}(\cos\theta)^{8.0623} \quad (8)$$

式(7)的拟合度为0.9336,均方误差为 8.25×10^{-4} ;式(8)的拟合度为0.8819,均方误差为 4.3×10^{-3} 。故近场最大相对波峰高度为 $\eta_{cmax1}^* = \max(\eta_{c1}^*, \eta_{c2}^*)$ 。

在远场,涌浪几乎以固定频率传播,远场涌浪最大波幅将出现在近远场交界处。取径距为7倍水深位置作为远场起始位置,最大相对波峰高度出现在次波,其试验值与预测值关系如图10所示,其拟合

公式为

$$\eta_{cmax2}^* = 0.1704(t_s^*/A_s^*)^{-0.9394}(\cos\theta)^{1.3165} \quad (9)$$

式(9)的拟合度为0.9845,均方误差为 7×10^{-7} 。

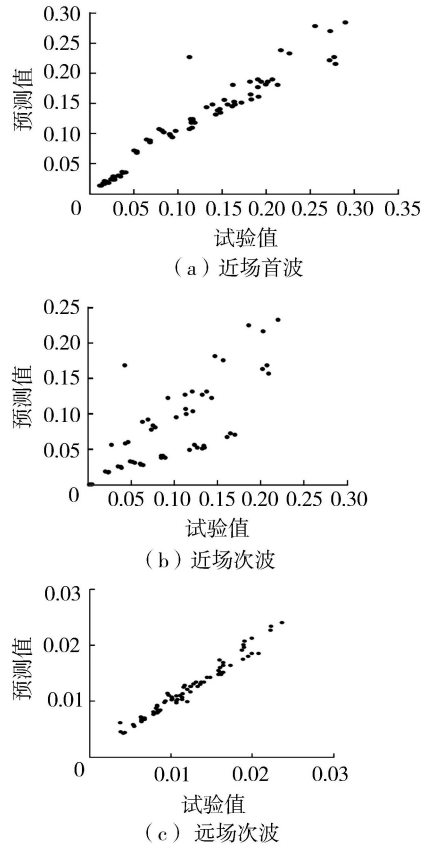


图10 近远场相对波峰高度试验值与预测值关系

3.4 周期

滑坡涌浪在近场水域的特点是频带宽,会出现明显色散。这里讨论的周期是指远场涌浪的最大波幅波浪的周期 T_∞ ,即远场起始点次波的周期。在远场,不同径向的波浪周期基本保持一致,根据模拟结果(图11)得到相对周期 T_∞^* ($T_\infty^* = T_\infty \sqrt{g/h}$)拟合公式:

$$T_\infty^* = 2.2647t_s^*^{-0.1093} \quad (10)$$

式(10)拟合度为0.85,均方误差为 7×10^{-6} 。

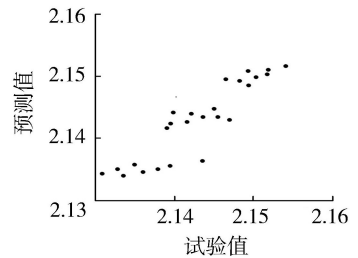


图11 远场次波相对周期试验值与预测值的关系

3.5 波形

远场涌浪的相对波长为

$$L^* = L/h = T\sqrt{gh}/h = T_\infty^* \quad (11)$$

根据式(9)(10)(11),推导出远场涌浪非线性

Ursell 数公式为

$$U_r = \left(\frac{L}{h}\right)^2 \frac{H}{h} = 0.7718 t^*^{-1.0487} A^*^{0.9394} (\cos\theta)^{1.3165} \quad (12)$$

式中波高 H 近似为波幅的 2 倍。27 组工况数值模拟试验得到的 Ursell 数如图 12 所示, 不难发现, 远场涌浪均属于线性波。

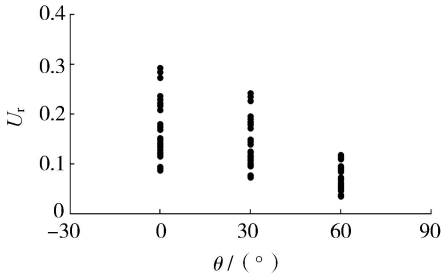


图 12 各径向远场涌浪的 Ursell 数

3.6 远场涌浪能量

计算远场涌浪能量对滑坡涌浪灾害的预测评估具有重要的影响。通过径距为 R 处的半圆断面的涌浪总势能 $E_p(R)$ 为

$$E_p(R) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} R \int_0^{\infty} \frac{g}{2} \eta^2(t, R) \sqrt{gh} dt d\theta \quad (13)$$

根据线性波理论, 远场涌浪的势能与动能相同, 故通过远场断面 ($R=7h$) 的涌浪总能量 $E_w = 2E_p$, 27 组工况的近远场分界面涌浪总能量见表 2。涌浪的总能量来自于滑块的能量, 包括动能和势能, 故定义能量传递率 ε 为远场涌浪能量与滑坡体能量的比值 ($\varepsilon = E_w/E_s$, 其中 E_s 为滑坡体的能量)。计算结果表明, 27 组工况的能量传递率在 8.0% ~ 19.7% 之间。能量传递率主要与波峰高度时程变化有关, 根据数值模拟结果, 拟合的能量传递率公式为

$$\varepsilon = 0.2951 (t^*/A^*)^{-0.5034} \quad (14)$$

式(14)的拟合度为 0.8601, 均方误差为 2.08×10^{-4} 。能量传递率的试验值与预测值关系见图 13。

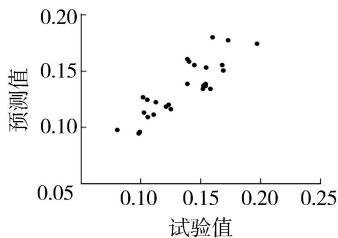


图 13 能量传递率的预测值与试验值的关系

4 结论

a. 三维滑坡涌浪在不同径向上均出现衰减, 但在 7 倍水深距离后保持稳定, 该距离外的波峰高度基本与滑坡体弗劳德数、厚度以及宽度无关, 故可认为冲击滑坡涌浪的近远场界线位于 7 倍水深处。

b. 相对滑坡特征时间是滑坡体弗劳德数、斜坡角度以及相对滑坡体尺寸的函数, 决定了近远场最大波峰高度和远场次波周期的大小, 也对远场次波的非线性特征有一定影响。

c. 定义了滑坡体的能量传递率, 本文工况中能量传递率在 8.0% ~ 19.7% 之间。

参考文献:

- [1] GENEVOIS R, GHIROTTI M. The 1963 Vaiont landslide [J]. *Giornale di Geologia Applicata*, 2005, 1(1): 41-52.
- [2] 殷坤龙, 杜娟, 汪洋. 清江水布垭库区大堰塘滑坡涌浪分析[J]. *岩土力学*, 2008, 29(12): 3267-3270. (YIN Kunlong, DU Juan, WANG Yang. Analysis of surge triggered by Dayantang landslide in Shuibuya Reservoir of Qingjiang River[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(12): 3267-3270. (in Chinese))
- [3] HUANG B L, CHEN L D, PENG X M, et al. Assessment of the risk of rockfalls in Wu Gorge, Three Gorges, China [J]. *Landslides*, 2010, 7(1): 1-11.
- [4] FRITZ H M, HAGER W H, MINOR H E. Landslide generated impulse waves: 1. instantaneous flow fields [J]. *Experiments in Fluids*, 2003, 35(6): 505-519.
- [5] WALDER J S, WATTS P, SORENSEN O E, et al. Tsunamis generated by subaerial mass flows [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(B5): JB00070
- [6] PANIZZO A, DE GIROLAMO P, PETACCIA A. Forecasting impulse waves generated by subaerial landslides [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(C12): C12025.
- [7] PRINS J E. Characteristics of waves generated by a local disturbance [J]. *Transaction, American Geophysical Union*, 1958, 39(5): 865-874.
- [8] NODA E. Water waves generated by landslides [J]. *Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division*, 1970, 96(4): 835-855.
- [9] GOZALI S, HUNT B. Water waves generated by close landslides [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 1989, 27(1): 49-60.
- [10] DI RISIO M, SAMMARCO P. Analytical modeling of landslide-generated waves [J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2008, 134(1): 53-60.
- [11] 韩林峰, 王平义. 基于动量平衡的三维滑坡涌浪最大近场波幅预测 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(11): 2584-2592. (HAN Linfeng, WANG Pingyi. Prediction of the maximum near-field wave amplitude of impulse waves generated by three-dimensional landslides based on momentum balance [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(11): 2584-2592. (in Chinese))
- [12] 徐卫亚, 秦创创, 张贵科, 等. 基于分流比的复杂分汊河

- 道滑坡涌浪远场传播计算方法[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(3): 20-24. (XU Weiya, et al. Calculation method for far-field propagation of landslide surge based on flow diversion ratio of a bifurcated river[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(3): 20-24. (in Chinese))
- [13] WIEGEL R L. Laboratory studies of gravity waves generated by the movement of a submerged body [J]. Transactions, American Geophysical Union, 1955, 36(5): 759-774.
- [14] WATTS P. Tsunami features of solid block underwater landslides [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2000, 126(3): 144-152.
- [15] FRITZ H M, HAGER W H, MINOR H E. Near field characteristics of landslide generated impulse waves [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2004, 130(6): 287-302.
- [16] ATAIE-ASHTIANI B, NIK-KHAH A. Impulsive waves caused by subaerial landslides [J]. Environmental Fluid Mechanics, 2008, 8(3): 263-280.
- [17] HELLER V, HAGER W H. Wave types of landslide generated impulse waves [J]. Ocean Engineering, 2011, 38: 630-640.
- [18] TANG G Q, LU L, TENG Y F, et al. Impulse waves generated by subaerial landslides of combined block mass and granular material [J]. Coastal Engineering, 2018, 141: 68-85.
- [19] 殷坤龙, 刘艺梁, 汪洋, 等. 三峡水库库岸滑坡涌浪物理模型试验 [J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2012, 37(5): 1067-1074. (YIN Kunlong, LIU Yiliang, WANG Yang, et al. Physical model experiments of landslide-induced surge in Three Gorges Reservoir [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2012, 37(5): 1067-1074. (in Chinese))
- [20] HEINRICH P. Nonlinear water waves generated by submarine and aerial landslides [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 1992, 118(3): 249-266.
- [21] JIANG L, LEBLOND P H. The coupling of a submarine slide and the surface waves which it generates [J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97(C8): 12731-12744.
- [22] SANDER J, HUTTER K. Evolution of weakly non-linear shallow water waves generated by a moving boundary [J]. Acta Mechanica, 1992, 91(3/4): 119-155.
- [23] VERRIERE M, LENOIR M. Computation of waves generated by submarine landslides [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1992, 14(4): 403-421.
- [24] 徐卫亚, 胡业凡, 吴伟伟, 等. 基于云模型和 D-S 证据理论的多源信息融合滑坡安全性评价 [J]. 淮海大学学报 (自然科学版), 2022, 50(1): 59-66. (XU Weiya, HU Yefan, WU Weiwei, et al. Landslide safety evaluation by multi-source information fusion based on cloud model and D-S evidence theory [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(1): 59-66. (in Chinese))
- [25] 司鹏飞, 田利勇. 基于流固耦合方法的滑坡涌浪数值模拟 [J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(6): 28-32. (SI Pengfei, TIAN Liyong. Numerical simulation of landslide-induced impulse waves based on fluid-solid coupling method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(6): 28-32. (in Chinese))
- [26] 赵兰浩, 侯世超, 毛佳. 库区滑坡涌浪数值模拟方法研究进展 [J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(2): 79-86. (ZHAO Lanhao, HOU Shichao, MAO Jia. Review of numerical simulation of landslides and surges in reservoir districts [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(2): 79-86. (in Chinese))
- [27] MAO J, ZHAO L H, LIU X N, et al. A three-phases model for the simulation of landslide-generated waves using the improved conservative level set method [J]. Computers & Fluids, 2017, 159: 243-253.
- [28] ROMANO A, LARA J, BARAJAS G, et al. Tsunamis generated by submerged landslides; numerical analysis of the near-field wave characteristics [J]. Journal of Geophysical Research: Ocean, 2020, 125(7): e2020JC016157.
- [29] SERRANO-PACHECO A, MURILLO J, GARCIA-NAVARRO P. A finite volume method for the simulation of the waves generated by landslides [J]. Journal of Hydrology, 2009, 373(3/4): 273-289.
- [30] BOSA S, PETTI M. Shallow water numerical model of the wave generated by the Vajont landslide [J]. Environmental Modelling & Software, 2011, 26(4): 406-418.
- [31] ATAIE-ASHTIANI B, YAVARI-RAMSHE S. Numerical simulation of wave generated by landslide incidents in dam reservoirs [J]. Landslides, 2011, 8(4): 417-432.
- [32] HUANG B L, WANG S C, ZHAO Y B. Impulse waves in reservoirs generated by landslides into shallow water [J]. Coastal Engineering, 2017, 123: 52-61.
- [33] GRILLI S T, WATTS P. Tsunami generation by submarine mass failure: I. modeling, experimental validation, and sensitivity analyses [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2005, 131(6): 283-297.
- [34] WATTS P, GRILLI S T, TAPPIN D R, et al. Tsunami generation by submarine mass failure: II. predictive equations and case studies [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2005, 131(6): 298-310.
- [35] LIU P L F, WU T R, RAICHLEN F, et al. Runup and rundown generated by three-dimensional sliding mass [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2005, 536: 107-14.

(收稿日期: 2022-03-01 编辑: 熊水斌)

虹吸式出水管虹吸形成过程的壁面压力及脉动特性

李志祥¹, 徐辉², 冯建刚^{2,3}, 钱尚拓²

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏南京 210098; 2. 河海大学农业科学与工程学院, 江苏南京 210098;
3. 西藏农牧学院水利土木工程学院, 西藏林芝 860000)

摘要:通过物理模型试验测量虹吸式出水管在虹吸形成过程中典型断面的压力过程线,采用邻域平均法提取脉动压力数据,采用统计特征和短时傅里叶变换信号处理方法分析时均和脉动压力特征。结果表明:管壁时均压力沿水流方向先减小后增大,驼峰段的上壁面时均压力随着流量增大逐渐大于下壁面;虹吸形成过程中,压力脉动呈正偏态分布,均方差沿水流方向不断降低;压力脉动主要由水泵旋转和水气运动引起,频率在0~30 Hz之间,主频与水泵转频相近;相比虹吸稳定流阶段,水力驱气阶段存在的气囊压缩和释放过程使得压力脉动频率及幅值上升,接近泵站系统自振频率,容易产生结构振动,需要通过设计和运行的优化减少该阶段的持续时间。

关键词:虹吸式出水管;虹吸形成过程;脉动压力;脉动频率;振幅

中图分类号:TV675

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2023)01-0043-07

Wall pressure and fluctuating characteristics of a siphon outlet pipe during siphoning formation process//LI Zhixiang¹, XU Hui², FENG Jianguang^{2,3}, QIAN Shangtu² (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Water Conservancy & Civil Engineering, Tibet Agriculture & Animal Husbandry University, Linzhi 860000, China)

Abstract: The pressure process line at typical sections of a siphon outlet was measured by physical experiment. Pressure pulsation of the siphoning formation process was obtained by the neighborhood average method, and the statistical characteristics and short-time Fourier transform signal processing method were conducted to systematically analyze the universal change law for time-averaged pressure and pressure pulsation. The results show that the time-averaged pressure on the wall, along the flow direction, first decreases and then increases. The time-averaged pressure on the upper wall of the hump segment changes with the flow rate and is gradually greater than that of the lower wall. The pressure pulsation in the process of siphon formation has a positive skew distribution, and the quadratic mean deviation keeps decreasing along the direction of the flow. The pressure pulsation in the process of siphon formation is composed of the rotation of the pump and the movement of water-air, which has a frequency between 0 and 30 Hz, with the dominant frequency close to the rotation frequency. Compared to the entrainment stage and siphoning flow stage, a significant increase in pressure frequency and amplitude occurs in the purging stage, which is close to the natural frequency of pumping station, leading to structural vibration. Design and operation should be optimized to reduce the duration time of the purging stage.

Key words: siphon outlet pipe; siphoning formation process; pulsating pressure; pulsating frequency; amplitude

泵站虹吸式出水管广泛应用于低扬程的立式、斜式泵站,它主要由上升段、驼峰段和下降段组成,具有停机断流方便、冲击水锤小等优势。水泵机组启动后,水体首先填充流道上升段,然后翻过驼峰段,在下降段形成溢流,管道内空气受水流挟带由下游出水池排出,最终形成满管稳定虹吸。从水泵启动到管内空气排尽的整个过程称为虹吸形成过程,

可分为水力驱气、水力挟气和虹吸稳定流3个阶段^[1-2]。虹吸形成过程中,流态、管壁压力和水泵扬程均随着时间发生复杂变化,实测资料表明,该过程中管壁压力和扬程均显著大于虹吸稳定后的正常工作状态^[3-4]。水泵机组工作的加压方式为间隙加压,间隙加压和两相流湍流均会使虹吸管内产生很大的压力脉动^[5-7]。管道受到水流压力脉动的激发作用,

基金项目:国家自然科学基金(51779082,51009051)

作者简介:李志祥(1994—),男,博士研究生,主要从事工程水力学研究。E-mail:2513286620@qq.com

通信作者:冯建刚(1976—),男,教授,博士,主要从事工程水力学研究。E-mail:jgfeng@hhu.edu.cn

引发振动和噪声,可能导致管道疲劳破坏,机组损坏等,严重威胁泵站运行与居民生活的安全。虹吸形成过程属于水泵作为动力源的复杂两相流动,系统研究虹吸式出水管虹吸形成过程的管壁压力和脉动特性对泵站工程的安全高效运行具有重要理论意义和实用价值。

国内外针对泵站虹吸式出水管的水力特性开展了大量研究。虹吸式出水管的流场观测表明,由于管道的复杂弯曲体型,管内易产生漩涡、贴壁流等不良流态^[8-11]。研究人员采用三维流道优化技术和整流措施改善虹吸管流态,减少水力损失,提升水力性能^[12-14]。针对虹吸形成过程中管道内复杂的水力瞬变流,现已开展丰富的研究,包括流场分析及其对机组性能的影响^[3,15-18]、虹吸形成过程各阶段的相似准则^[19-20]、虹吸形成时间和虹吸形成机理等^[14,21-24]。虹吸形成过程中,由于复杂水气相互作用和水泵叶轮转动影响,管壁将产生复杂的脉动压力,可能影响结构和机组的稳定和效率,目前相关研究有限。

本文采用物理模型试验方法测量了虹吸式出水管虹吸形成过程典型断面的管壁压力过程线。通过邻域平均法提取压力过程线的脉动压力,应用统计学及短时傅里叶变换(short-time Fourier transform, STFT)信号处理等方法分析典型断面时均和脉动压力分布规律,揭示虹吸形成过程各阶段脉动压力特征。

1 模型设计与量测

以上海某正向进水,虹吸式出水的典型排水泵站为原型设计1:7正态物理模型,包括水泵进水池、模型泵机组、虹吸式出水管、出水池、回水系统^[23,25]。图1是虹吸式出水管试验装置照片。试验模型泵选用蜗壳型混流泵,设计扬程为8 m,流量为50 L/s,叶轮叶片数为4,转速为1480 r/min。试验需求的流量通过安装在管路的蝶阀控制和电磁流量计测量,精度为±0.5%。出水池内设置挡水墙以控制出水池水位恒定,保持虹吸管出口淹没深度为0.1 m。

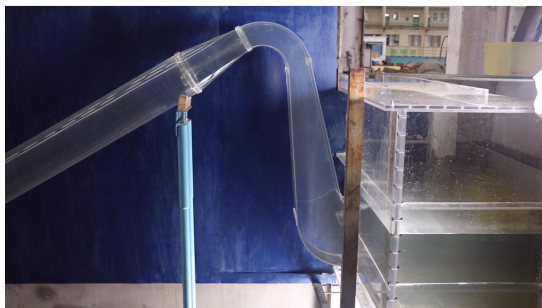


图1 虹吸式出水管试验装置

吸管详细设计参数见文献[1]。图2(a)是虹吸管沿程选取的5个典型断面,断面1位于上升段,断面2~4位于驼峰段起始、中间和末尾位置,断面5位于出口断面。以断面1为例,说明断面管壁压力测点设置情况。如图2(b)所示,沿圆周方向将管壁4等分,a位于断面上壁,b和d分别位于右侧和左侧,c位于下壁,采用脉动压力传感器测量各测点的压力数据。

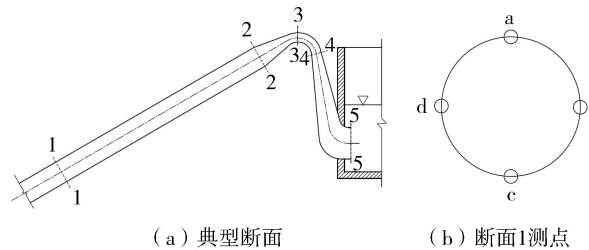


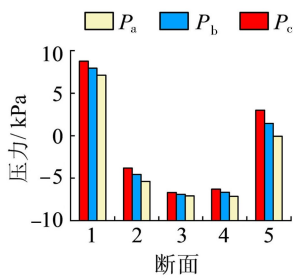
图2 典型断面及脉动压力测点布置示意图

2 时均压力分布规律

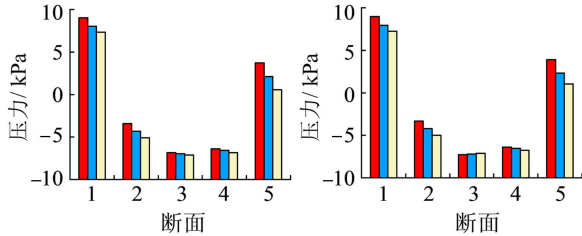
虹吸形成后,虹吸管内为纯水满管流动,整个流场各物理量不随时间发生显著变化,可认为是稳态流动。将虹吸稳定流阶段持续10 s的脉动压力均值作为时均压力,试验得到不同流量下($Q = 11.34 \sim 28.15 \text{ L/s}$)断面1~5的管壁时均压力分布,如图3所示。 P_a 和 P_c 分别表示上壁面测点a和下壁面测点c的时均压力。由于各断面均为轴对称,左右两侧壁面测点b和d所受压力几乎一致,取b和d测点压力的平均值 P_b 表示侧壁时均压力。

由图3可知,断面1、5的管壁各测点时均压力都为正压。断面2、3、4的时均压力均为负压,因为这些断面高程均位于出水池水位之上。断面1~5的均值压力沿程具有先下降后上升的变化规律,即水流流向驼峰压力逐渐减小,越过驼峰流向虹吸管出口压力恢复。断面1、2、5的管壁时均压力周向分布受流量变化影响较小,在各流量下均表现为下壁、侧壁和上壁依次减小的规律。断面1、2、5的上下壁面压差最大值依次为1698.2 Pa、1672.6 Pa和3069.7 Pa。

断面3和4位于虹吸管驼峰段,由于边界扭曲,流态复杂,管壁时均压力周向分布随流量变化而显著改变。随流量增大,断面3和4的上壁面时均压力先低于下壁面时均压力,然后逐渐高于下壁面时均压力,在此过程中,侧壁时均压力总是位于上下壁面时均压力之间。图4反映断面3和4上下壁面压差 $\Delta P = P_c - P_a$ 随流量 Q 的变化规律。断面3和4的 ΔP 均随流量增大线性减小, ΔP 的绝对值则随流量增大先减小后增大,表明管壁压力周向分布的不均匀程

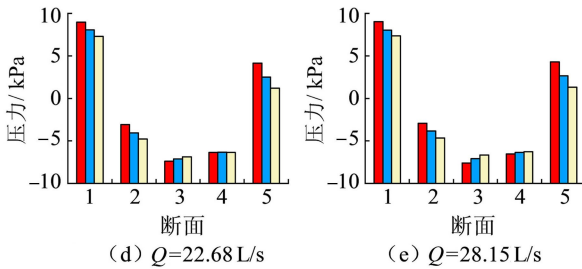


(a) $Q=11.34\text{ L/s}$



(b) $Q=15.12\text{ L/s}$

(c) $Q=18.90\text{ L/s}$



(d) $Q=22.68\text{ L/s}$

(e) $Q=28.15\text{ L/s}$

图3 不同流量下断面1~5管壁时均压力

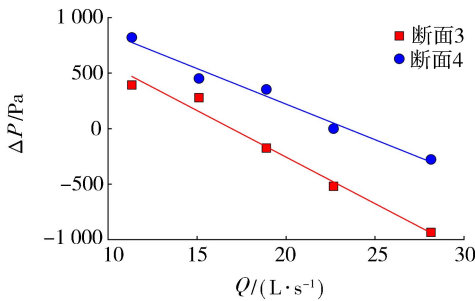


图4 断面3、4上下壁面时均压力差随流量变化规律

度随流量增大先减小后增大。大流量下,虹吸管内水流流速较大,经过驼峰段弯转产生较大离心力,上壁面受到更大的水流冲击压力,表现为该处时均压力随流量增大而增大,逐渐高于下壁面时均压力。

3 脉动压力特性

3.1 压力过程线

试验量测了虹吸管断面1~5管壁的压力过程线。以位于驼峰段的断面3为例,分析 $Q=22.68\text{ L/s}$ 时上壁、下壁和侧壁面的脉动压力,如图5所示。驼峰段上壁、侧壁和下壁面的压力均先上升再下降直至稳定。虹吸形成过程中,上壁、侧壁和下壁面的压力脉动趋势基本一致,最大振幅发生 $0\sim 4\text{ s}$ 。形成虹吸稳定流后,平均振幅均为 324 Pa 。下文中将进一步分析 $Q=22.68\text{ L/s}$ 时断面1~5的上壁面脉动

压力数据。

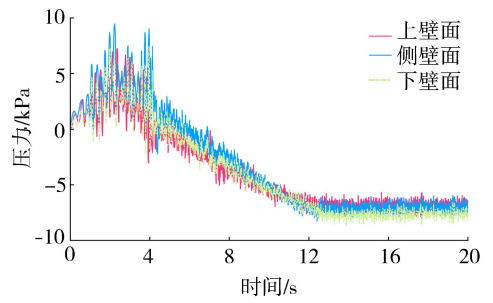


图5 断面3上壁、侧壁和下壁面的压力过程线($Q=22.68\text{ L/s}$)

由图6可知,压力脉动在水力驱气、水力挟气和虹吸稳定流各阶段呈现出不同特征。试验观测表明, $0\sim 4\text{ s}$ 为水力驱气阶段, $4\sim 13\text{ s}$ 为水力挟气阶段, 13 s 之后为虹吸稳定流阶段。断面1~4的时均压力随时间先增大后降低,最终趋于稳定,断面5位于出口处,受到出水池静水压力影响,时均压力基本保持不变。各断面的脉动振幅在水力驱气阶段逐渐增大并达到最大值,在水力挟气阶段减小并趋于稳定。脉动振幅还与断面所处位置有关:断面1位于上升段,脉动振幅最大,整个虹吸形成过程的振幅均值为 1324.30 Pa ;断面5位于出口段,脉动振幅最小,整个虹吸形成过程的振幅均值为 374.56 Pa 。

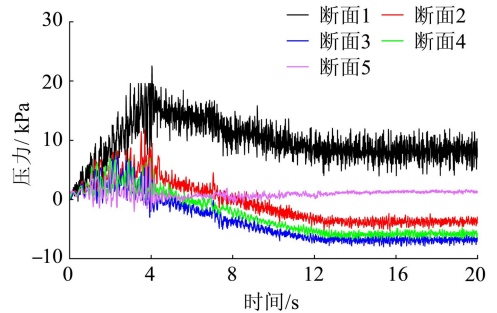


图6 断面1~5上壁面压力过程线($Q=22.68\text{ L/s}$)

3.2 压力脉动分解

脉动压力可由压力过程线减去该段过程线的时均压力值获得。虹吸形成过程中,壁面的时均和脉动压力在水力驱气、水力挟气阶段显著变化,而在虹吸稳定流阶段保持基本恒定。本文通过邻域平均法^[26]分解虹吸形成过程,得到各时刻的时均压力,简述如下:对于任意时刻 i ,取邻域 S ,范围为 $(i-S+1, i+S-1)$,则邻域 S 内含有 $2S-1$ 个实测压力数据,计算上述压力数据的平均值即为 i 时刻的时均压力 \bar{P}_i :

$$\bar{P}_i = \frac{1}{2S-1} \sum_{j=i-S+1}^{i+S-1} P_j \quad (1)$$

由图6可得,虹吸形成过程的压力过程线存在较大起伏,如果计算选取的邻域范围过大会略去压力过程线的起伏变化,如果选取的邻域范围过小,其

时均平滑性难以保证。为此,通过对比不同的邻域范围,最终确定 $S=10$ 。

压力脉动均方差 σ_p 能反映压力脉动的幅值大小,它反映的实际是 n 个由邻域平均法提取的压力脉动绝对值的平均值,即脉动压力幅值的平均值。选取的 n 越大,计算的脉动数据就越多,计算时段就越长。选取 n 为 12、24、64、128 不同均方差计算范围,分析不同计算范围内压力脉动均方差的差异。由于试验采用的压力传感器采集频率为 128 Hz,因此 4 个 n 值对应的时间间隔分别为 0.09 s、0.19 s、0.5 s 和 1 s。以断面 1 的压力过程线为例,做上壁面的压力均方差过程线,如图 7 所示。如图 7 所示, n 越大过程线波动越小。水力驱气阶段压力脉动振幅很大,压力均方差逐渐升高,约在 4 s 时达到最大峰值。此后进入水力挟气阶段,压力均方差快速降低,逐渐趋于稳定。虹吸稳定流阶段, $n=128$ 的时候,压力脉动均方差基本不随时间变化。由此可见,压力脉动均方差在虹吸形成过程的 3 个阶段呈现不同的变化性质,下文将按照这 3 个阶段进行讨论。

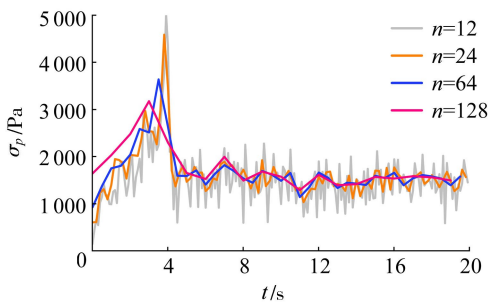


图 7 断面 1 压力均方差过程线

3.3 振幅统计特性

图 8 反映水力驱气、水力挟气和虹吸稳定流阶段断面 1~5 上壁面的 σ_p 。 σ_p 在水力驱气阶段最大,在虹吸稳定流阶段最小。在水力挟气和虹吸稳定流阶段, σ_p 表现出随着水流方向逐渐减小的规律,而在水力驱气阶段规律不显著。 σ_p 在断面 1 最大,原因为断面 1 靠近水泵机组,受到旋转运动和入流不均匀性的影响。

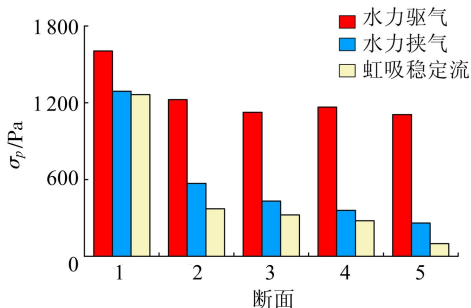


图 8 虹吸管上壁面 σ_p 沿程变化

压力脉动特性的偏态系数 C_s 表示脉动信号的不对称程度,峰态系数 C_k 表示脉动信号的陡峭程度,两者的计算公式参见文献[27]。

图 9 为不同阶段断面 1~5 壁面脉动振幅的偏态系数 C_s 和峰态系数 C_k 。

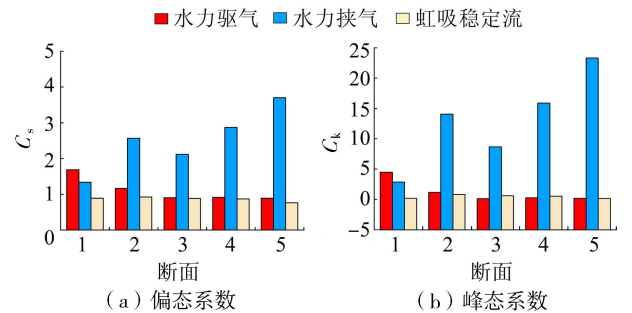


图 9 虹吸形成过程各阶段断面 1~5 的偏态系数和峰态系数

C_s 、 C_k 的沿程变化规律基本一致,在水力驱气和虹吸稳定流阶段沿程逐渐减小,在水力挟气阶段沿程逐渐增加并在位于驼峰段的断面 3 降低。由图 9(a)可知, C_s 在各阶段均大于 0,表明虹吸形成过程中脉动幅值的概率分布为正偏态分布。在水力挟气阶段,断面 1 之后,由于受到水泵出流影响, C_s 显著大于其他阶段,压力脉动偏斜程度增加。在断面 1, C_s 随时间持续减小,而在断面 2~5, C_s 随着时间先增大后减小。由图 9(b)可知,在水力驱气和虹吸稳定流阶段,脉动压力振幅沿程逐渐收敛至 $C_k=0$,表明该段时间的振幅向标准正态峰度逼近,在水力挟气阶段则表现为越来越陡峭。与 C_s 类似,在断面 1, C_k 随时间持续减小,而在断面 2~5, C_k 随着时间先增大后减小。由此可得,在虹吸形成过程中,虹吸管内的复杂的气液两相运动会引起脉动压力的偏态系数和峰态系数显著变化,与虹吸形成稳定流后的脉动振幅分布存在很大差异。虹吸稳定流的偏态系数约为 1,是正偏态分布,其峰态系数值约为 0,为标准峰度。

3.4 频率特性

对于存在周期变化,平稳的压力脉动,应用快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)能确定复杂被测信号的组成频率[28]。虹吸形成过程中时均压力及压力脉动随时间不断发生剧烈变化,为复杂瞬态变化。不同于 FFT,STFT 利用窗函数可以实现任意时刻的频谱局域化,构建反映频率的幅值随时间变化的 STFT 频谱图[29-30]。因此,为分析虹吸形成过程脉动压力的频率特性,对虹吸管断面 1~5 上壁测点压力脉动数据进行 STFT,如图 10 所示。其中,STFT 使用的窗函数为 Hamming 窗,窗口采样数为 128。

总体而言,所有断面均以低频信号(30 Hz 以下)为主导,该压力脉动信号按频域分布特点可分为两类:一是贯穿整个虹吸形成过程的压力脉动主

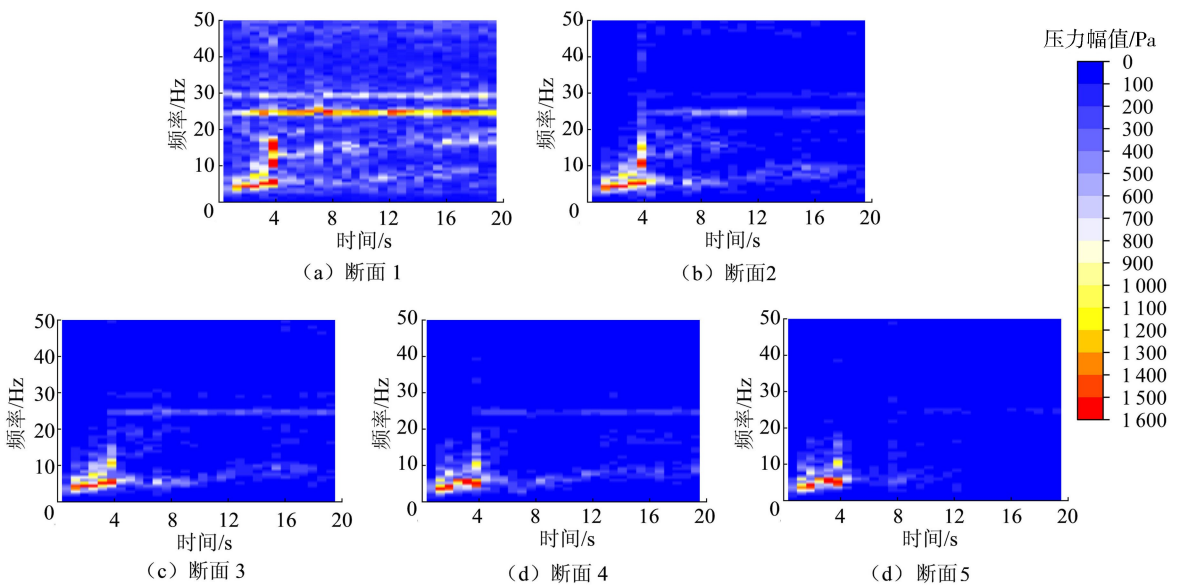


图 10 虹吸形成过程各断面测点 STFT 频谱

频(24.71 Hz),由水泵旋转引起,为模型泵的一倍转频;二是发生在水力驱气阶段,受水气运动影响,压力脉动频率在 20 Hz 以下。

压力幅值大小在虹吸形成过程中不发生显著变化的转频频率,是由动静干涉作用产生。高速旋转的水泵叶轮与静止的压水室周期性地做相对运动,叶轮作为激励源基频对压水室等无叶区的压力产生激励作用,引起水泵出口的流场发生同样的周期变化。表现为整个虹吸形成过程中,虹吸管各断面的压力脉动主频为转频频率,且幅值不随时间发生变化。对比不同断面的转频压力脉动幅值可知,沿水流方向幅值不断减小,在断面 5 幅值降低至 92 Pa。结合图 8 反映的振幅均方差规律,所有断面中,断面 1 最靠近模型泵机组,具有最大的幅值。

在水力驱气阶段,水气运动剧烈产生约 500 Pa 的振幅压力信号,而且幅值和频率均随时间逐渐升高,在 4 s 时压力脉动幅值达到最大,由水力驱气过程产生的频率也同时达到峰值,这部分的压力信号

会在后续时间里迅速降低。图 11(a) ~ (e) 为水力驱气阶段,图 11(f) 为水力挟气阶段。图 11(a) (b) 下降段自由液面变化显著,图 11(a) 液位向下凹陷,这是由于管内气囊受到涌入虹吸管水流压缩,压力上升,挤压下降段液面。到 $t=0.70\text{ s}$,受到压缩的气囊得到释放,管内压力恢复,自由液面上升,如图 11(b) 所示。水力驱气阶段,管内气囊受到水流作用一直重复进行上述压缩、释放过程(如图 11(c) (d)),并伴随压力快速变化,由此产生的压力脉动幅值和频率不断增加。对比图 11(e) ~ (f) 可知,水力挟气阶段流态显著转变,下降段及出水池内出现明显白色水气掺混现象,表明虹吸管排气形式由气囊直接释放转变为水气混掺排出。这一阶段由水气运动产生的压力脉动幅值和频率发生断崖式下降,说明驱气阶段的气囊压缩、释放过程是幅值和频率增长的根本原因。综上所述,虹吸过程中压力脉动的主要来源是水泵旋转和水气运动,其中水泵作用频率为水泵一倍转频,水气运动作用频率随水力驱

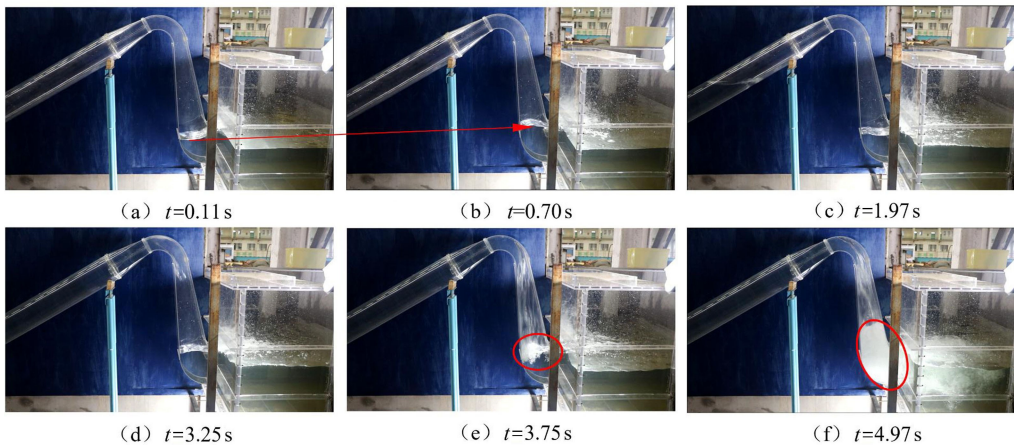


图 11 虹吸式出水管水气运动流态

气时间不断增长。

泵站系统的自振频率是系统本身的固有特性,由泵站系统的结构、弹性和材料决定。如果管内水流引起的压力脉动频率和泵站系统的自振频率一致将导致共振,可能造成结构破坏。研究表明^[31],泵站系统自振频率为中低频率,振动频率大于4 Hz。GB 50265—2010《泵站设计规范》提出,由水流脉动等引起的振动频率与系统自振频率错开20%以上可认为结构安全稳定,不易发生共振现象。由图10可知,水力驱气阶段会产生5 Hz左右的脉动频率,与泵站系统的自振频率相近,如果该阶段时间持续时间过长,将危害泵站的安全和效率。

4 讨论

模型试验取得的研究成果在映射到原型泵站虹吸式出水管水力特性时,必须遵循某种相似规律才能保证原型和模型内速度场及压力场相似。虹吸形成过程是水泵驱动的复杂水气两相流动,受重力、惯性力、黏滞力、表面张力、压力等的综合作用,表征这些作用力关系的无量纲数为欧拉数 Eu 、斯特劳哈数 St 、雷诺数 Re 、弗劳德数 Fr 、韦伯数 We 。要满足原型、模型的内部流动相似,2个流动系统的若干个无量纲数(也称相似准数)要对应相等,然而,模型试验几乎不可能同时满足上述几个准数相等。针对试验量测的压力脉动及其紧密相关的虹吸形成时间相似分析的相关成果^[19-20,32-33]较少,尤其是压力脉动的相似规律,由于压力脉动来源复杂,至今没有一个令众人满意的结论。参考现有类似的研究成果^[19-20,32-33],定性地给出已被学者认可的相似规律。

a. 压力脉动。原模型压力脉动幅值变化趋势基本一致,原模型压力脉动的主频基本一致。

b. 虹吸形成时间。模型在 λ^{-1} 大气压力的减压环境下运行,原模型相似规律则满足以下换算公式:

$$T_r = \lambda^{0.5} T_m \quad (2)$$

式中: λ 为原模型比尺; T_r 为原型虹吸形成时间; T_m 为模型虹吸形成时间。

5 结论

a. 当形成虹吸稳定流后,虹吸式出水管壁面时均压力沿程先减小后增大。在上升段和出口段,时均压力的周向分布规律受流量影响有限,下壁面时均压力始终大于上壁面。驼峰段受到水流方向改变和断面形状变化影响,随着流量增大,上壁面时均压力逐渐大于下壁面。侧壁面时均压力始终位于上、下壁面之间。

b. 受水气相互作用和能量转化影响,水力驱气

阶段脉动压力均方差最大。顺水流方向,各断面的脉动压力均方差逐渐降低。不考虑受模型泵影响最大的断面1,虹吸形成过程脉动压力的偏态系数和峰态系数随着时间先增大后减小。虹吸稳定流的偏态系数约为1,是正偏态分布,其峰态系数值约为0,为标准峰度。

c. 虹吸形成过程中,壁面压力脉动主要由水泵旋转和水气运动引起,频率集中在0~30 Hz之间,主频与水泵转频相近,幅值沿流程从1232 Pa逐渐降至92 Pa。水力驱气阶段,气囊的压缩和释放过程使得压力脉动频率及幅值上升,且与泵站系统自振频率相近,在工程设计和运行中需要采取措施减少水力驱气阶段的持续时间。

参考文献:

- [1] 冯建刚. 城市排水泵站虹吸式出水管水力特性研究[D]. 南京:河海大学,2010.
- [2] MINATO A, NAKAJIMA N, NAGAHARA T. Simulation des écoulements diphasiques dans les stations de pompage[J]. La Houille Blanche, 2006(1): 59-64.
- [3] 刘梅清,杨文容,徐叶琴. 带虹吸式出水管道轴流泵站启动水力过渡过程研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2003(1): 1-4. (LIU Meiqing, YANG Wenrong, XU Yeqin. Research on start-up hydraulic transient of axial-flow pumping stations with siphon outflow conduit[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2003(1): 1-4. (in Chinese))
- [4] ZHOU L, WANG H, KARNEY B, et al. Dynamic behavior of entrapped air pocket in a water filling pipeline[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 144(8): 04018045.
- [5] 王亚楠. 高扬程泵站压力管道振动特性研究[D]. 郑州:华北水利水电大学,2015.
- [6] 何兆洋,刘海潇,何利民,等. 管道内气液两相流流激力研究进展[J]. 工程科学学报, 2021, 43(1): 129-136. (HE Zhaoyang, LIU Haixiao, HE Limin, et al. Research progress of fluctuating force caused by internal gas-liquid flow[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(1): 129-136. (in Chinese))
- [7] GONÇALVES R C, TEIXEIRA P R F, DIDIER E, et al. Numerical analysis of the influence of air compressibility effects on an oscillating water column wave energy converter chamber[J]. Renewable Energy, 2020, 153: 1183-1193.
- [8] 杨帆,刘超,孙丹丹,等. 轴流泵装置虹吸式出水管道内流机理数值分析[J]. 农业机械学报, 2015, 46(6): 60-65. (YANG Fan, LIU Chao, SUN Dandan, et al. Numerical investigation of internal flow mechanisms of siphon outlet passage in pumping system[J]. Transactions of the

- Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(6): 60-65. (in Chinese))
- [9] 朱红耕,袁寿其,刘厚林,等.大型泵站虹吸式出水渠道三维紊流数值计算[J].扬州大学学报(自然科学版),2005(2):74-78.(ZHU Honggeng,YUAN Shouqi,LIU Houlin,et al.Numerical computation of the three-dimensional turbulent flow in siphon outlet conduit of large pumping stations [J].Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition),2005(2):74-78.(in Chinese))
- [10] 陆林广,杲东彦,祝婕.大型泵站虹吸式出水渠道优化水力设计[J].农业机械学报,2005(4):60-63.(LU Linguang,GAO Dongyan,ZHU Jie.Optimum hydraulic design of siphon outlet in large pumping stations [J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2005(4):60-63.(in Chinese))
- [11] LI Y,WANG J,CHEN X.Can a toilet promote virus transmission? From a fluid dynamics perspective [J].Physics of Fluids,2020,32(6):065107.
- [12] 仇宝云,黄季艳,袁寿其,等.轴流泵出水渠道水力损失试验研究[J].机械工程学报,2006(5):39-44.(QIU Baoyun,HUANG Jiyan,YUAN Shouqi,et al.Test investigation on hydraulic losses in discharge passage of axial-flow pump [J].Journal of Mechanical Engineering,2006(5):39-44.(in Chinese))
- [13] 陈松山,何钟宁,周正富,等.泵站出水渠道标准化设计与模型水力损失试验[J].水泵技术,2007(2):42-45.(CHEN Songshan,HE Zhongning,ZHOU Zhengfu,et al.Standardized design of outlet channel of pumping station and model test of hydraulic loss [J].Pump Technology,2007(2):42-45.(in Chinese))
- [14] 冯建刚,温陈碧,王晓升.泵站虹吸式出水管虹吸形成时间特性分析及其改善措施[J].水利水电科技进展,2018,38(3):88-94.(FENG Jiangang,WEN Chenbi,WANG Xiaosheng.Analysis on siphon formation time characteristics and improvements for siphon outlet conduit in a pump station [J].Advances in Science and Technology of Water Resources,2018,38(3):88-94.(in Chinese))
- [15] 于永海,徐辉,冯建刚,等.城市排污泵站虹吸式出水管水力瞬变过程现场试验分析[J].给水排水,2005,9(31):86-87.(YU Yonghai,XU Hui,FENG Jiangang,et al.Test analysis of transient process of siphon outlet pipe in urban sewage pumping station [J].Water & Wastewater Engineering,2005,9(31):86-87.(in Chinese))
- [16] 周大庆,刘跃飞.基于VOF模型的轴流泵机组启动过程数值模拟[J].排灌机械工程学报,2016,34(4):307-312.(ZHOU Daqing,LIU Yuefei.Numerical simulation of axial pump unit startup process using VOF model [J].Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2016,34(4):307-312.(in Chinese))
- [17] SEDLÁ M,PROCHÁZKA P,KOMÁREK M,et al.Experimental research and numerical analysis of flow phenomena in discharge object with siphon [J].Water,2020,12(12):23.
- [18] ZHENG J,GUO J,WANG J,et al.Calculation of the flow velocity of a siphon [J].Physics of Fluids,2021,33(1):017105.
- [19] 李百齐.虹吸管出水断流装置的流体力学相似分析 [C]//第十七届全国水动力学研讨会暨第六届全国水动力学学术会议文集.北京:海洋出版社,2003:955-963.
- [20] 冯建刚,成斌,王晓升.基于 π 定理的虹吸式出水管原型和模型虹吸形成时间的相似分析[J].清华大学学报(自然科学版),2011,51(4):503-507.(FENG Jiangang,CHENG Bin,WANG Xiaosheng.Similarity analysis of siphon formation time of siphon pipes between the prototype and model based on the π theorem [J].Journal of Tsinghua University (Science and Technology),2011,51(4):503-507.(in Chinese))
- [21] 王晓升,冯建刚,陈红勋,等.泵站虹吸式出水管虹吸形成过程气液两相流数值模拟[J].农业机械学报,2014,45(5):78-83.(WANG Xiaosheng,FENG Jiangang,CHEN Hongxun,et al.Numerical simulation for two-phase flow of siphon outlet in pumping station [J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(5):78-83.(in Chinese))
- [22] YU K,CHYENG Y,ZHANG X.Hydraulic characteristics of a siphon-shaped overflow tower in a long water conveyance system: CFD simulation and analysis [J].Journal of Hydrodynamics,2016,28(4):564-575.
- [23] 陈曜辉,徐辉,冯建刚,等.断面形状对虹吸式出水渠道水力特性的影响[J].水利水电科技进展,2022,42(1):47-52.(CHEN Yaohui,XU Hui,FENG Jiangang,et al.Effect of section forms on hydraulic characteristics of a siphon outlet passage [J].Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(1):47-52.(in Chinese))
- [24] ALEXANDER J M,LEE P J,DAVIDSON M,et al.Experimental investigation of the interaction of fluid transients with an in-line air pocket [J].Journal of Hydraulic Engineering,2019,146(3):04019067.
- [25] 李志祥,冯建刚,钱尚拓,等.排水泵站整流底坎参数优化[J].农业工程学报,2021,37(3):56-63.(LI Zhixiang,FENG Jiangang,QIAN Shangtuo,et al.Optimization of rectification bottom sill parameters in drainage pumping stations [J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2021,37(3):56-63.(in Chinese))
- [26] DAVIES E R.Formulation of an accurate discrete theory of median shifts [J].Signal Processing,2003,83(3):531-544.

(下转第80页)

基于声发射的蒸养混凝土受压损伤特性试验研究

刘伟琪^{1,2}, 陈波^{1,2}, 陈家林^{1,2}

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏南京 210098;

2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏南京 210098)

摘要:为研究矿物掺合料对蒸养混凝土抗压性能的影响,对不同养护制度和配合比混凝土进行了单轴压缩声发射试验,利用声发射信号参数和高斯混合模型探究混凝土的损伤演化特性。试验结果表明:蒸养混凝土抗压强度普遍低于标养混凝土,矿物掺合料的加入能够补偿蒸汽养护导致的强度损失,且复掺粉煤灰和矿粉的补偿效果更好;受压全程中张拉破坏始终占据主导,而剪切破坏占比随加载时间呈递增趋势;声发射参数中,累计振铃计数、 b 值变化幅度和剪切破坏形式占比均与抗压强度呈负相关关系,可作为评价混凝土抗压性能的重要参数。

关键词:蒸养混凝土;矿物掺合料;单轴压缩;声发射;损伤特性

中图分类号:TV431

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2023)01-0050-06

Experimental study on compressive damage characteristics of steam-cured concrete based on acoustic emission// LIU Weiqi^{1,2}, CHEN Bo^{1,2}, CHEN Jialin^{1,2} (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to study the effect of mineral admixtures on the compressive properties of steam-cured concrete, the acoustic emission test under uniaxial compression was carried out for concrete with different curing regimes and mix ratios, and the damage evolution characteristics of concrete were explored by using acoustic emission signal parameters and Gaussian mixture model. The research shows that the compressive strength of steam-cured concrete is generally lower than that of standard-cured concrete. The addition of mineral admixtures can compensate for the strength loss caused by steam curing, and the compensation effect of adding fly ash and mineral powder is the best. The tension failure always dominates the whole compression process, while the shear failure proportion increases with the loading time. Among the acoustic emission parameters, the accumulative ringing count, the change range of b value and the proportion of shear failure forms are all negatively correlated with the compressive strength value, which can be used as important parameters to evaluate the compressive performance of concretes.

Key words: steam-cured concrete; mineral admixtures; uniaxial compression; acoustic emission; damage characteristics

蒸汽养护是以蒸汽为热介质使混凝土加速硬化的养护方式,常用于混凝土预制构件的生产制造,能有效提高施工效率,缩短施工周期^[1]。该工艺所具有的高温、高湿条件能促进水泥的水化速度,显著提升混凝土早期强度,但也会造成材料内部孔径粗化、界面过渡区微裂缝增多等热损伤效应,不利于其长期服役性能^[2-3]。为了减少蒸汽养护所造成的热损伤效应,许多学者研究了矿物掺合料对蒸养混凝土的影响。如赵晶等^[4]探究了蒸汽养护对掺加不同矿物掺合料混凝土的抗压强度、抗氯离子渗透性和水化产物的影响。阎培渝等^[5]用粉煤灰和石英粉

作为活性和惰性矿物掺合料,研究了不同水胶比、不同养护温度下矿物掺合料对复合胶凝材料抗压强度发展特性的影响。

在外界荷载作用下,材料内部结构的变化导致了局域应力状态改变,释放出瞬态的弹性波,这种常见的物理现象称为声发射或应力波发射。不同于X射线、超声波等外加信号源的检测手段,现代声发射技术收集的是来自材料内部的应力波,其具备同步、动态、准确、可靠等特点,能够实时捕捉试件破坏全程发出的声发射信号;通过分析振铃计数、能量、幅值和峰值频率等特征参数的变化,揭示其与材料破

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52079049);国家自然科学基金重点项目(51739003)

作者简介:刘伟琪(1998—),男,硕士研究生,主要从事水工结构安全监控研究。E-mail:945988066@qq.com

通信作者:陈波(1986—),男,教授,博士,主要从事水工结构安全监控研究。E-mail:chenbo@hhu.edu.cn

坏过程的关系,进行对材料内部损伤演化的无损监测和损伤机理的评价^[6],并提出可靠合理的材料破坏前兆依据^[7],从而实现材料和工程安全的监测预报。混凝土材料受力破坏过程中微裂缝的萌生、扩展以及宏观裂缝的形成都伴随着大量的声发射事件。近年来声发射技术在混凝土结构健康监测和劣化评价等领域中得到了广泛应用,众多学者借助此技术深入探究了不同混凝土材料的破坏机理。例如:王立燕等^[8]利用声发射技术分析普通水泥混凝土和橡胶水泥混凝土的疲劳损伤过程,比较了其疲劳性能;段力群等^[9]借助声发射技术对不同密度泡沫混凝土在单轴压缩下的损伤演化进行研究,并定位识别了其破坏模式。然而,将声发射技术用于探究蒸养混凝土力学性能的研究较少。

本文选取标准养护和蒸汽养护制度下掺加和未掺矿物掺合料的 180 d 龄期混凝土作为试验对象,对其进行单轴压缩试验测得抗压强度值,同时利用声发射系统全面记录加载过程中声发射信号的变化。在此基础上选取声发射振铃计数、*b* 值等声发射特征参数分析了混凝土试件在破坏过程中的破坏规律,并基于高斯混合模型(Gaussian mixture model, GMM)探究了声发射值与裂纹形式之间的关系,对破坏过程中的两类裂纹进行聚类,分析了不同裂纹形式的变化过程。

1 试验方案

1.1 试验材料与配合比设计

试验选用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥,该水泥 3 d、28 d 抗压强度分别为 16 MPa 和 42.5 MPa,抗折强度分别为 3.5 MPa 和 6.5 MPa,初凝时间 45 min,终凝时间 600 min;粉煤灰为Ⅱ级低钙粉煤灰;矿粉为 S95 级矿渣粉;粗骨料为碎石骨料,粒径为 5~25 mm;细骨料为天然中河砂,细度模数为 2.5;减水剂为高效聚羧酸减水剂,减水率为 28%。试验配合比设计见表 1。

表 1 试验配合比设计 单位:kg/m³

试件编号	水泥	矿粉	粉煤灰
BS	483.0	0	0
ZS	483.0	0	0
ZK	241.5	241.5	0
ZF	241.5	96.6	144.9

注:BS 为标准养护试件,ZS、ZK 和 ZF 为蒸汽养护试件。4 个系列试件的减水剂均为 3.42 kg/m³,粗骨料均为 957 kg/m³,细骨料均为 815 kg/m³,水均为 145 kg/m³,水灰比均为 0.3。

混凝土试件采用边长 100 mm 的立方体,并在浇筑成型后分别进行标准养护和蒸汽养护。标养温度为 (20±2)℃,相对湿度大于 95%,试件成型 1 d 后拆模,养护至 28 d。蒸养试件在标准养护室静置 3 h

后放入蒸汽养护箱内进行养护,升温速率为 15~20℃/h,恒温时间为 12 h,养护温度为 60℃,降温速率为 15~20℃/h。蒸汽养护结束后脱模,放入标准养护室养护至 28 d 龄期。所有试件养护 28 d 结束后,从养护箱中取出并放置在室内自然条件下养护至 180 d。试件的制备流程如图 1 所示。

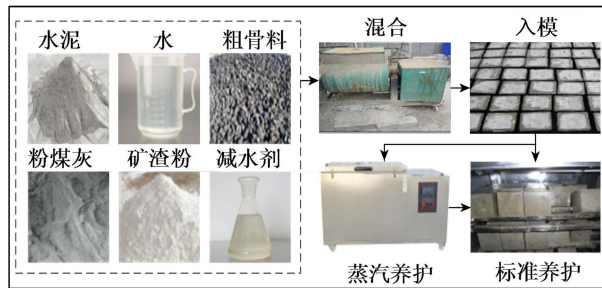
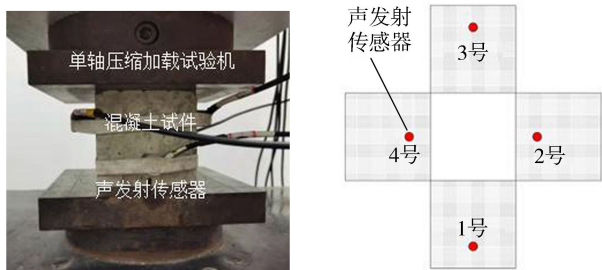


图 1 试件制备流程

1.2 试验方法

抗压强度试验参照 GB/T 50107—2010《混凝土强度检验评定标准》要求执行,由 WAW-1000 微机控制电液伺服万能试验机完成。每个系列试件均采用 3 个混凝土试件,并将同组试验结果取均值作为该类试件的抗压强度。试验过程采用荷载控制的加载方式,为适当控制试件压缩破坏时间,更详细准确地分析破坏过程中的声发射特征参数变化过程,经过前期试验比较,最终确定加载速率为 3 kN/s。

声发射试验采用 Sensor Highway III 全天候结构健康监测系统,与抗压强度试验同步完成。根据仪器调试结果与现场噪声水平的测试结果,将前置放大器的增益设置为 35 dB,阈值设置为 35 dB。为进一步减少干扰并保证信号质量,利用砂纸将传感器与试件之间的接触面进行抛光处理,同时涂抹凡士林作为耦合剂。试验过程中将 4 根传感器对称布置在蒸养混凝土四周,如图 2 所示。选择与组内平均抗压强度值最接近的试件进行后续声发射特征参数分析。



(a) 试验装置

(b) 声发射传感器布置示意图

图 2 单轴压缩-声发射试验加载装置

2 基于声发射特征参数的混凝土损伤过程分析

2.1 声发射振铃计数分析

声发射振铃计数和累计振铃计数能够代表声发

射的活跃程度,且与混凝土损伤程度之间具有较强的正相关关系^[10]。图3为各试件的单轴压缩声发射特征参数历程(图中对加载时间进行了归一化处理)。结合文献[7,9,11-12],将加载过程中的声发射参数演变大致分为初始压密(I)、稳定扩展(II)和失稳破坏(III)。

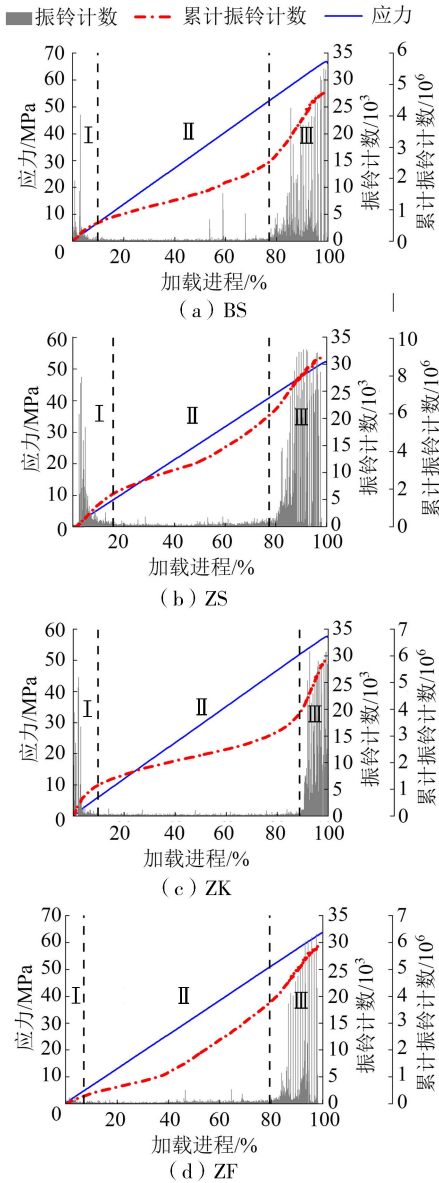


图3 单轴压缩声发射特征参数历程

比较应力曲线可知,标养试件BS的抗压强度较蒸养试件ZS、ZK和ZF分别超出27.9%、25.8%和4.9%,说明蒸汽养护降低了混凝土的长期抗压性能。同时发现,随着粉煤灰和矿粉的加入,2种蒸汽养护制度下的抗压强度差距逐渐缩小。相比强度最差的ZS试件,单掺矿粉的ZK试件和复掺粉煤灰及矿粉的ZF试件的抗压强度分别提高了10.3%和22.1%。由此说明矿物掺合料能有效修复蒸汽养护导致的强度缺陷,且复掺粉煤灰和矿粉使得混凝土具有更好的蒸养适应性^[2,13],对抗压强度的提升效

果优于单掺矿粉。

此外,声发射累计振铃计数与混凝土抗压强度呈负相关。抗压强度最高的BS试件,其累计振铃计数不足 5×10^6 次;而强度最低的ZS试件,其累计振铃计数超过 9×10^6 次,这是因为蒸汽养护使得混凝土内部产生了热损伤等缺陷,更容易导致微裂缝的产生和发展,声发射信号更加活跃。由于粉煤灰和矿粉对蒸养混凝土的强度补偿,ZK和ZF试件的声发射累计振铃计数均低于ZS试件,但仍高于BS试件,说明矿物掺合料的修复效果有限。

蒸养混凝土中,抗压性能最好的ZF试件损伤程度也最小,尤其在初始压密阶段,声发射活跃度很低且无大尺度能量跃迁,甚至优于标准养护混凝土BS。这说明复掺粉煤灰及矿粉对于混凝土蒸养适应性的改良效果明显,形成了更为致密的内部结构,有效限制并减少了材料内部初始微裂纹的形成与发展。

2.2 声发射 b 值分析

b 值是描述声发射相对震级分布的参数,也是混凝土裂缝扩展尺度分布的函数^[14]。混凝土加压破坏过程中,微裂缝的萌生伴随着大量小振幅事件的发生, b 值也相应上升;而宏观裂缝的产生会出现更多大振幅声发射活动,导致 b 值减小^[15]。传统的 b 值计算方法具有一定缺陷,故本文选用了改进的 b 值进行计算分析^[16]:

$$b = \frac{\lg N(\mu - \alpha_1 \sigma) - \lg N(\mu + \alpha_2 \sigma)}{(\alpha_1 + \alpha_2) \sigma} \quad (1)$$

式中: N 为最近声发射事件数,一般取50或100,本文取100; μ 为 N 次声发射事件中振幅的均值; σ 为 N 次声发射事件中振幅的标准方差; α_1 、 α_2 为常数,分别取为0和1。

由图4可知,在初始压密阶段,小振幅声发射事件占较大比例, b 值小范围增加,出现第一个峰值,随着试件不断被压密,试件内部空隙和微裂缝基本闭合,声发射活动加剧, b 值从峰值逐渐减小。

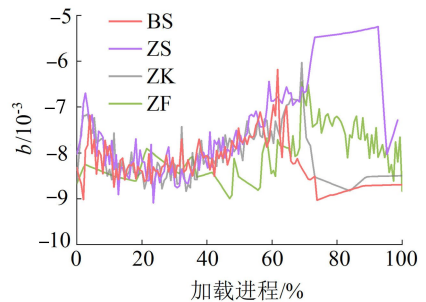


图4 不同试件的声发射 b 值

进入稳定扩展阶段, b 值首先出现较长时间的缓慢波动上升,说明该阶段内部裂纹稳定出现和发展,应变能平稳积聚,声发射活动绝大多数为小振幅

事件,大尺度裂缝较少出现。随后 b 值增速加快,并达到加载全程的最高点,表征试件内部微小裂缝的数量和发育程度达到了极值。

随着荷载越来越大,大尺度裂纹开始出现和发展,大振幅声发射事件短时间内集中产生,导致 b 值发生骤降,预示着混凝土损伤程度迅速加剧,即将发生失稳破坏。由此可见, b 值的变化具有明显规律性,直观反映了混凝土内部裂纹发展的过程,其突变能够作为重要前兆来预测混凝土的宏观破坏。

4 个系列试件的 b 值变化历程均符合上述规律,呈现出“缓慢递减—波动上升—骤然下降”的演变趋势,但在各阶段有较为明显的差异。现以 BS 试件 b 值变化曲线为参照,分析比较蒸汽养护混凝土系列通过 b 值表现出的损伤特性。其中,ZS 试件的 b 值变化幅度最为剧烈,具体表现为加压前期 b 值即从较高点发生了较大速率和幅度的下降;随后 b 值又以较快速率持续上升,增长幅度为全系列最大,最后发生失稳破坏用时亦为全系列最短,这表明蒸汽养护劣化了混凝土内部结构,同时没有矿物掺合料对结构损伤进行修复,因此其自然状态下分布有更多微裂纹,长期性能最差。ZK 试件的 b 值变化趋势与 BS 试件较为相似,且比 ZS 试件更为平缓,说明单掺矿粉对裂纹的发展起到了抑制作用。ZF 试件的 b 值变化趋势最为平缓,一方面,其加载前期 b 值浮动范围相对最小,说明该阶段声发射信号活跃度较低,内部微裂纹很少,这与上文所述初始压实阶段稀少的声发射振铃计数相呼应;另一方面,失稳破坏阶段 b 值的减少相对其他试件而言略显平缓,反映出 ZF 试件内部结构抵抗变形和裂纹发展的能力较好,由小尺度裂纹向大尺度宏观裂纹转变的过程较为缓慢。由此可见,粉煤灰和矿渣的复合掺加较大程度上提高了蒸养混凝土抗劣化的能力。

3 基于 GMM 的混凝土损伤模式识别

上述声发射特征参数能够有效对混凝土单轴压缩的破坏过程进行分析,评价其损伤尺度和演化历程,但不能区分混凝土受压过程的损伤模式。传统的混凝土损伤模式识别通常采用日本混凝土材料协会提出的 RA-AF 值关联分析法。该方法中的 2 个参数:RA 为上升时间与幅度的比值,AF 为振铃计数与持续时间的比值。基于 RA 和 AF,可将混凝土单轴受压的损伤模式分为张拉破坏和剪切破坏 2 种,其中张拉破坏对应较高的 AF 值和较低的 RA 值;剪切破坏反之^[17-18]。传统定性方法是研究者人为规定一条分界线,位于分界线之下的部分为剪切破坏,分界线之上的部分为张拉破坏,该方法难

以消除主观性,故本文尝试采用更为有效的确定性分类方法对裂缝形式进行划分。

GMM 是一种概率密度估计算法,通过多个高斯概率密度分布对样本进行精确量化,判断样本数据在哪种分布下的最大似然概率最大,从而实现对本样本的分类。声发射信号是大量非线性的随机数据^[19],利用声发射参数对 2 类裂纹的分类本质上是对参数的二维聚类,因此样本数据的建模复杂度较小,且对应的模型精度较高,故本文选择 GMM 进行混凝土损伤模式识别。GMM 参数由最大期望算法进行迭代计算,保证每一个声发射事件点在聚类结果中的分布概率最大。图 5 为不同混凝土声发射事件的 GMM 聚类分析结果,图 6 以三维云图的方式给出了其高斯概率分布。

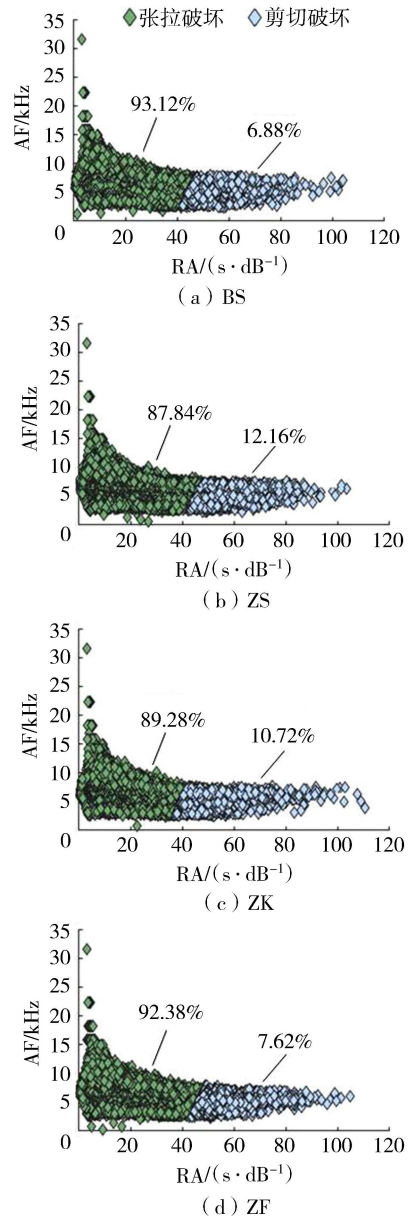


图 5 各试件 GMM 高斯混合模型聚类结果

由图 5 可知,各类试件的单轴压缩破坏过程都

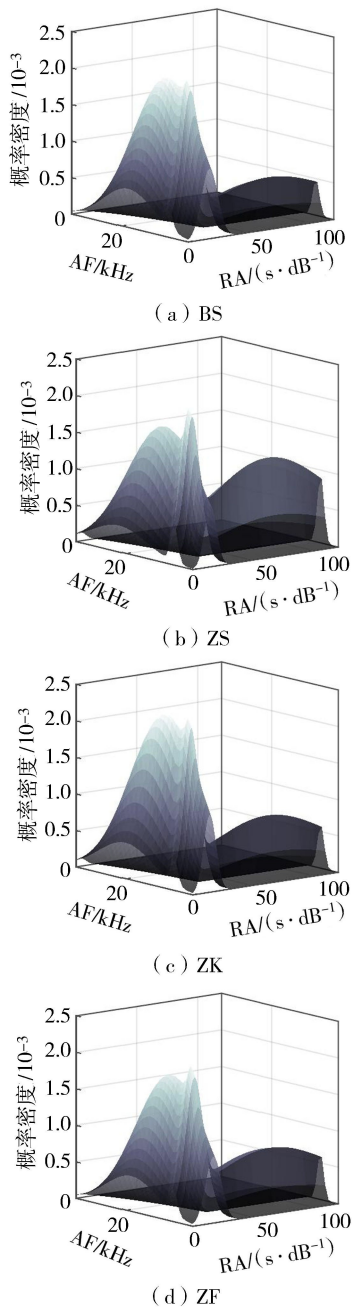


图6 各试件高斯概率密度分布

是张拉破坏与剪切破坏并存,但都以张拉破坏为主导,剪切破坏只占较小比例。这主要是由于试件无四周的横向约束,受压过程中产生大量微裂缝,横向膨胀产生的拉应力超过了抗拉强度而破坏。而剪切裂缝主要产生于微裂缝贯通后的滑移和摩擦中,其出现意味着试件内部结构产生了较大损伤,因此数量相对较少。在各试件破坏形式占比的对比中,标养混凝土 BS 试件张拉形式的破坏占比达到 93.12%,为全系列最高,而剪切破坏只占 6.88%;蒸养混凝土中,随着掺合料的加入,混凝土的结构和力学性能得到改善,张拉破坏占比依次提高,而剪切破坏占比依次减少。因此不同破坏形式的占比可视为表征混凝土力学性能的间接指标,也为建立声发

射参数与混凝土损伤之间的关系提供了新方向。

图7以ZF试件为例,给出了基于GMM算法得到的破坏形式变化过程。受压破坏全程中,张拉破坏占比始终占据90%以上的主导地位,且张拉裂纹的数量始终都超过剪切破坏一个数量级。但随着加载过程的推进,试件不断发生损伤,高RA值的声发射事件增多,试件剪切破坏的占比递增,在前中期增长速度不明显,进入后期之后,声发射b值持续下降,剪切裂纹所占比例快速上升,最终达到7.62%,表明试件内部剪切裂纹越来越多,大量微裂纹贯通形成宏观破坏面^[20]。因此,基于GMM的裂纹形式占比演化过程与声发射b值的变化具有内在联系,都能够反映混凝土试件的破坏过程。

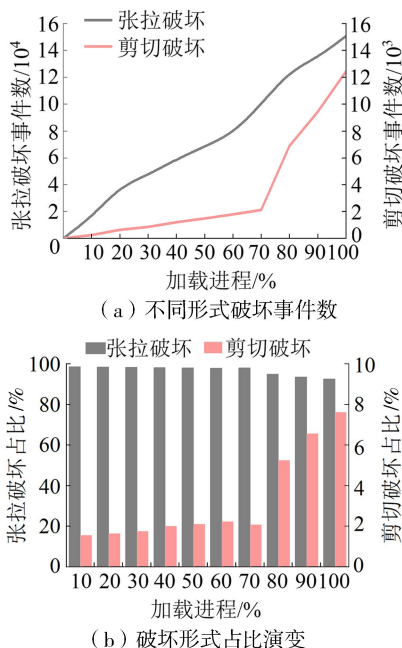


图7 ZF试件单轴压缩破坏形式变化过程

4 结论

a. 蒸汽养护明显劣化了混凝土的力学性能,在未掺加矿物掺合料的情况下,抗压强度下降了约21.9%。添加矿物掺合料能够有效改善蒸养混凝土的力学性能,且复掺粉煤灰和矿粉比单掺矿粉的强度补偿效果更好,抗压强度较不掺提升22.1%,但无法完全弥补强度损伤。

b. 声发射累计振铃计数与抗压强度呈负相关,可以表征混凝土的损伤程度。无掺合料蒸养混凝土的振铃计数变化过程最为剧烈,累计计数最多;随着掺合料的加入,各阶段振铃计数变化的剧烈程度都得以缓和,累计计数递减,该变化印证了混凝土抗压性能的差异。

c. b值的变化反映了混凝土内部裂纹尺度的变化过程,其突变能够作为重要前兆来预测混凝土的

宏观破坏。复掺粉煤灰和矿粉的 ZF 试件 b 值变化相对平缓,说明其内部结构更为致密,限制了小尺度和大尺度裂缝的产生和发展。

d. GMM 算法结果表明不同试件最终破坏时剪切裂纹的占比与抗压强度成反比。ZF 试件受压破坏过程中张拉裂缝占比始终超过 90%,而剪切裂缝占比随加载过程推进而上升,且增速在失稳破坏阶段最大,故剪切破坏占比的变化能够表征混凝土损伤劣化的程度。

参考文献:

[1] 贺炯煌,马昆林,龙广成,等. 蒸汽养护过程中混凝土力学性能的演变[J]. 硅酸盐学报,2018,46(11):1584-1592. (HE Jionghuang, MA Kunlin, LONG Guangcheng, et al. Mechanical properties evolution of concrete in steam-curing process [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2018, 46(11):1584-1592. (in Chinese))

[2] 谢友均,马昆林,刘运华,等. 蒸养超细粉煤灰高性能混凝土性能试验研究[J]. 深圳大学学报(理工版),2007,24(3):234-239. (XIE Youjun, MA Kunlin, LIU Yunhua, et al. Experimental studies on capabilities of steam curing ultra-fine fly ash high performance concrete [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2007, 24(3):234-239. (in Chinese))

[3] 马昆林,贺炯煌,龙广成,等. 蒸养温度效应及其对水泥基材料热损伤的影响[J]. 材料导报,2017,31(23):171-176. (MA Kunlin, HE Jionghuang, LONG Guangcheng, et al. Steam-curing temperature effect and its influence on heat damage of cement-based material [J]. Materials Reports, 2017, 31(23):171-176. (in Chinese))

[4] 赵磊,于一鸣,苟武举,等. 蒸养制度对混凝土抗压强度及抗渗性能影响的研究[J]. 低温建筑技术,2020,42(7):36-39. (ZHAO Jing, YU Yiming, XUN Wuju, et al. Effect of steam curing system on compressive strength and impermeability of concrete [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2020, 42(7):36-39. (in Chinese))

[5] 阎培渝,张庆欢. 含粉煤灰或石英粉复合胶凝材料的抗压强度发展规律[J]. 硅酸盐学报,2007,35(3):263-267. (YAN Peiyu, ZHANG Qinghuan. Compressive strength development of complex binder containing fly ash or quartz powder [J]. Journal of the Chinese Silicate Society, 2007, 35(3):263-267. (in Chinese))

[6] 张茹,谢和平,刘建锋,等. 单轴多级加载岩石破坏声发射特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(12):2584-2588. (ZHANG Ru, XIE Heping, LIU Jianfeng, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics of rock failure under uniaxial multilevel loadings [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12):2584-2588. (in Chinese))

[7] 李庶林,尹贤刚,王泳嘉,等. 单轴受压岩石破坏全过程声发射特征研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(15):2499-2503. (LI Shulin, YI Xiangang, WANG Yongjia, et al. Studies on acoustic emission characteristics of uniaxial compressive rock failure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15):2499-2503. (in Chinese))

[8] 王立燕,王超,张亚梅,等. 运用声发射技术研究橡胶混凝土疲劳损伤过程[J]. 东南大学学报(自然科学版),2009,39(3):574-579. (WANG Liyan, WANG Chao, ZHANG Yamei, et al. Study on fatigue damage process of rubberized cement concrete by acoustic emission technique [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2009, 39(3):574-579. (in Chinese))

[9] 段力群,董璐,马林建,等. 泡沫混凝土单轴压缩下声发射特征试验研究[J]. 中国矿业大学学报,2018,47(4):742-747. (DUAN Liqun, DONG Lu, MA Linjian, et al. Experimental study of acoustic emission characteristics of foamed concrete under uniaxial compression [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(4):742-747. (in Chinese))

[10] 纪洪广,张天森,蔡美峰,等. 混凝土材料损伤的声发射动态检测试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2000,19(2):165-168. (JI Hongguang, ZHANG Tiansen, CAI Meifeng, et al. Experimental research on acoustic emission dynamic detection of concrete material damage [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(2):165-168. (in Chinese))

[11] 王桂林,王润秋,孙帆,等. 单轴压缩下溶隙灰岩声发射 RA-AF 特征及破裂模式研究[J]. 中国公路学报,2022,35(8):118-128. (WANG Guilin, WANG Runqiu, SUN Fan, et al. RA-AF characteristics of acoustic emission and failure mode of karst-fissure limestone under uniaxial compression [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(8):118-128. (in Chinese))

[12] 杨永杰,王德超,郭明福,等. 基于三轴压缩声发射试验的岩石损伤特征研究[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(1):98-104. (YANG Yongjie, WANG Dechao, GUO Mingfu, et al. Study of rock damage characteristics based on acoustic emission tests under triaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(1):98-104. (in Chinese))

[13] 谢友均,刘宝举,周士琼,等. 超细粉煤灰混凝土蒸养适应性研究[C]//吴中伟院士从事科教工作六十年学术讨论会论文集. 北京:中国建材工业出版社,2004:150-153.

[14] 曾正文,马瑾,刘力强,等. 岩石破裂扩展过程中的声发射 b 值动态特征及意义[J]. 地震地质,1995,17(1):7-12. (ZENG Zhengwen, MA Jin, LIU Liqiang, et al. AE b -value dynamic features durine rockmass fracturing and their significances [J]. Seismology and Geology, 1995, 17(1):7-12. (in Chinese))

(下转第 62 页)

空气射流动力学特征与冲沙作用试验研究

沈南北^{1,2}, 缴健², 龚政¹, 罗小峰²

(1. 河海大学江苏省海岸海洋资源开发与环境安全重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 南京水利科学研究院港口航道泥沙工程交通行业重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 针对空气射流冲沙方法目前相关理论研究还不够深入现状, 利用水下排气冲击细颗粒床沙, 对空气射流的动力学特征与冲沙作用进行水槽试验。在空气射流清水试验中, 总结归纳了羽流发展的4个阶段, 通过正交试验信噪比分析发现气压是羽流下切长度的主要影响因素, 局部紊动强度随空气射流压强的增大而增大, 且沿横向迅速衰减。在气动冲沙浑水试验中, 总结归纳了冲沙坑的3个发展阶段, 通过正交试验信噪比分析确定了影响冲沙效果的显著因素, 并利用方差分析建立冲沙效果回归方程, 预测值与实测值对比结果表明该方程预测效果较好。

关键词: 空气射流; 气动冲沙; 羽流; 紊动; 局部清淤

中图分类号: TV149.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2023)01-0056-07

Experimental study on dynamic characteristics and sand flushing of aerated jet//SHEN Nanbei^{1,2}, JIAO Jian², GONG Zheng¹, LUO Xiaofeng² (1. *Jiangsu Key Laboratory of Coast Ocean Resources Development and Environment Security, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *Key Laboratory of Port, Waterway and Sedimentation Engineering of MOT, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*)

Abstract: Aiming at the status that the relevant theoretical research of aerated jet flushing to solve the problem of local sediment deposition is not deep enough, the dynamic characteristics and sand flushing effect of aerated jet were studied by flume experiment. In the gas water clear water test, four stages of plume development are proposed. Through the signal-to-noise ratio analysis of orthogonal test, it is found that the air pressure is the main factor affecting the undercut length of the plume, and the local turbulence intensity increases with the increase of air jet pressure, and decays rapidly along the transverse direction. In the pneumatic sand flushing muddy water test, three development stages of sand flushing pit are proposed. Through the signal-to-noise ratio analysis of orthogonal test, the main effect affecting the sand flushing effect is determined. The regression equation of sand flushing effect is established by variance analysis, and the comparison between predicted and measured values shows good prediction results of the regression equation.

Key words: aerated jet; pneumatic sand flushing; plume; turbulence; local dredging

河口、水库、水闸、湖泊、河道主槽泥沙局部淤积问题普遍存在^[1-5], 给生产生活带来了巨大的不利影响。针对泥沙局部淤积问题, 国内外学者做过广泛研究, 但传统机械清淤措施的成本较高, 挡潮闸下^[6]与水库回水末端^[7]等局部位置的淤积采用常规疏浚技术难以实施, 且常规的泄水冲沙措施效率较低。

水流的挟沙力依靠水流紊动, 其强度取决于主流流速分布的不均匀程度。因此, 传统的天然水流挟沙输沙的能效不高, 国内外学者提出可以通过水射流增强水流局部紊动来缓解局部淤积问题^[8-10], 通过大规模的室内试验, 以最大冲深、冲坑半径为特征参数, 建立了水下湍流射流运动冲刷剖面的预测

方程^[11]。相比水射流, 空气射流同样可以起带并挟带底沙, 然而, 由于气泡上升速度大于粗沙沉降速度^[12], 水体能够挟带的沙量更多, 因此, 罗勇等^[12]提出了气动冲沙方法。基于气动辅助装置的黄河原型沙起带与输运水槽试验研究, 证明了气动冲沙减淤效果明显^[13]。此外, 通过射流冲淤的数值模拟研究发现, 在相同条件下气动冲沙的效率优于水射流冲沙^[14]。总体而言, 目前在气体射流冲沙的研究中, 对羽流发展规律及其形状特征、紊动水流结构, 以及其对冲沙规律、挟沙能力等方面的认识还不够深入。因此, 本文分别开展气体射流清水试验与气动冲沙浑水试验, 利用水下排气冲击细颗粒床沙, 对

气体射流的动力学特征与冲沙作用进行水槽试验研究,为气动冲沙技术的工程应用提供参考。

1 试验设计

1.1 试验装置

图1(a)所示为试验水槽,总长15.0 m,宽0.7 m,深1.5 m。空气射流发生装置由空气压缩机、排气设备组成,空气压缩机出口处依次连接有控制阀、调压阀、气压计和流量计,可调节空气压缩机排气压力。槽内喷嘴水平和垂向均位于冲沙区域正中,垂向通过调节螺栓上下移动管身,以改变喷嘴至槽底高度。如图1(b)所示,排气设备由连接结构、压重、滑槽、管身和喷嘴组成,喷嘴处可拆卸,以调整排气角度与更换喷嘴孔径。空气压缩机排气压力为0.8 MPa,容积流量为1.1 m³/min。

试验选用原型沙,铺设厚度约为30 cm,其中值粒径为0.041 mm,泥沙级配曲线见图2。为确保每次试验铺沙密实程度相同,每次试验测量结束后将冲淤区域内的剩余泥沙重新搅动,并铺上提前浸泡过的原型沙,再进行相同的压实工作。

1.2 量测方法

使用声学多普勒流速仪(acoustic doppler velocity, ADV)测定水体紊动强度,试验中ADV采样频率设置为25 Hz,单点测量时间约为45 s。为分析断面测点单点流速,对所采集时间序列数据做计算处理,分别得到水平向时均流速 \bar{u}_x 、垂向时均流速 \bar{u}_y ,以及相应的脉动流速 \bar{u}'_x 、 \bar{u}'_y 。用脉动流速的均方根 $\sqrt{\bar{u}'^2_x}$ 来表示紊动强度,用水体密度与脉动流速二阶相关矩乘积的负值 $-\rho\bar{u}'_x\bar{u}'_y$ 表示紊动切应力。模型设计中动力相似考虑为重力相似,考虑到模型与原型水流所受的重力加速度差异很小,且认为压强比尺等于长度比尺,得到时间比尺为压强比尺的平方根的结论。气动冲沙现场试验采用的气压往往比水槽试验更大,为保证现场冲沙效率,现场试验中冲沙时间可结合水槽试验中冲沙坑尺寸稳定时间与上述

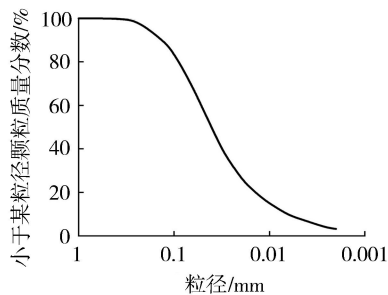


图2 泥沙级配曲线

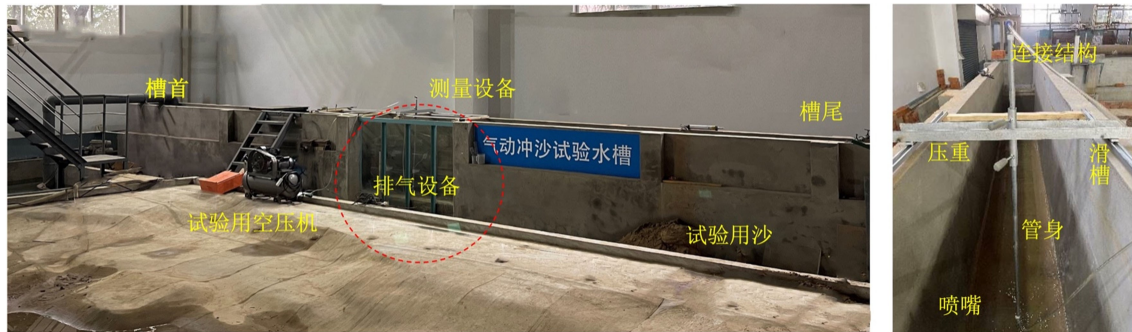
比尺公式换算。

利用测量装置量测冲刷后的地形,测量设备主要由连接结构、滑槽、调节结构和测针四部分组成。连接结构架立于水槽之上,布置时注意保证装置整体与地面垂直;滑槽由上下两部分组成,下滑槽安装在连接结构之上,上滑槽安装在下滑槽之上,可沿上下游方向滑动,安装有滑块及手旋拧紧结构;调节结构安装于上滑槽之上,可垂直上下游滑动;连接读数尺和测针,可手动调节测针高度;测针连接在调节结构上,长约1.0 m,可测量冲刷坑地形,精确度在 ± 3.0 mm以内。利用测针测量冲刷坑最大深度,并逐断面测量冲刷深度,利用Surfer软件生成冲刷地形图,计算冲刷坑体积,对气动冲沙效果进行评估。

1.3 试验方案

采用正交试验法,根据正交性挑选出部分有代表性的因素和水平进行组合试验,具备“均匀分散,齐整可比”的特点^[15]。在空气射流清水试验中,重点考察喷嘴至槽底距离(即喷嘴高程与床沙表面高程之差,当喷嘴伸入床沙中,喷嘴至槽底距离为负值。以下简称距离)、排气气压、水深、喷嘴孔径及排气角度等5个因素对羽流下切长度的影响,前4个因素包含4个水平,排气角度因素包含2个水平。混合正交试验设计及试验结果如表1所示。

在气动冲沙浑水试验中,研究了以上5个因素对冲刷坑最大深度与体积的影响,前4个因素包含4个水平,排气角度因素包含2个水平,混合正交试验设计及试验结果如表2所示。



(a) 试验水槽

(b) 排气设备

图1 试验装置

表1 清水排气正交试验组合和试验结果

方案编号	距离/m	排气气压/kPa	水深/m	喷嘴孔径/mm	排气角度/(°)	羽流下切长度/cm
1	0.30	100	0.7	1	45	6
2	0.30	200	0.8	2	45	12
3	0.30	300	0.9	3	90	20
4	0.30	400	1.0	5	90	25
5	0.35	100	0.8	3	90	15
6	0.35	200	0.7	5	90	18
7	0.35	300	1.0	1	45	15
8	0.35	400	0.9	2	45	19
9	0.40	100	0.9	5	45	10
10	0.40	200	1.0	3	45	15
11	0.40	300	0.7	2	90	20
12	0.40	400	0.8	1	90	23
13	0.45	100	1.0	2	90	11
14	0.45	200	0.9	1	90	14
15	0.45	300	0.8	5	45	16
16	0.45	400	0.7	3	45	20

表2 气动冲沙正交试验组合和试验结果

方案编号	距离/cm	排气气压/kPa	水深/m	喷嘴孔径/mm	排气角度/(°)	冲刷坑最大深度/cm	冲刷坑体积/cm ³
1	-0.5	100	0.4	1	45	9.67	3489
2	-0.5	200	0.5	2	45	11.55	4363
3	-0.5	300	0.6	3	90	15.60	6590
4	-0.5	400	0.7	5	90	17.88	7850
5	0.5	100	0.5	3	90	8.98	4298
6	0.5	200	0.4	5	90	10.87	4703
7	0.5	300	0.7	1	45	15.00	4085
8	0.5	400	0.6	2	45	17.01	4580
9	3.5	100	0.6	5	45	7.05	3943
10	3.5	200	0.7	3	45	9.90	4102
11	3.5	300	0.4	2	90	10.33	5607
12	3.5	400	0.5	1	90	13.76	3901
13	5.0	100	0.7	2	90	6.31	3274
14	5.0	200	0.6	1	90	8.11	3821
15	5.0	300	0.5	5	45	9.56	6089
16	5.0	400	0.4	3	45	12.23	5532

2 空气射流清水试验结果与分析

为探究空气射流喷嘴处局部水体紊动特性,开展了无泥沙条件下的静水水槽试验,研究水下排气过程中气泡运动过程、羽流形态特征及局部紊动水体水流结构。

2.1 羽流发展阶段

喷嘴垂直向下排气时,羽流在水体中的运动过程见图3,包括如下4个阶段:①形成阶段。气体排出,羽流开始下切,气泡密集且细小。②发展阶段。在初始动量的作用下,羽流不断向下延伸,下切长度和径向尺寸逐渐增大,将周围的水体不断卷吸进来,此时附近水体的紊动加强。③上浮阶段。当离开喷

口的气体动量消耗完后,羽流下切长度达到最大,轴向上不再下切,气体在浮力的作用下开始向上运动,环境压力随羽流上升而逐渐降低,羽流体积逐渐增大。④扩散阶段。当气泡羽流上升至水面附近时,羽流转向水平方向流动,形成具有垂向速度梯度的表面流区;气体上浮至水面时,气体与表层水相互作用,气泡疏散且以溢出口为中心向四周拓展,形成倒立的锥形羽流结构。

喷嘴45°斜向下排气时,气体在水体中的运动过程也同样经历了形成、发展、上浮和扩散阶段。与90°排气不同的是,45°排气时气体的上升在羽流发展阶段已经出现,并且在羽流充分发展后,45°排气的羽流体积远大于90°排气,见图4。

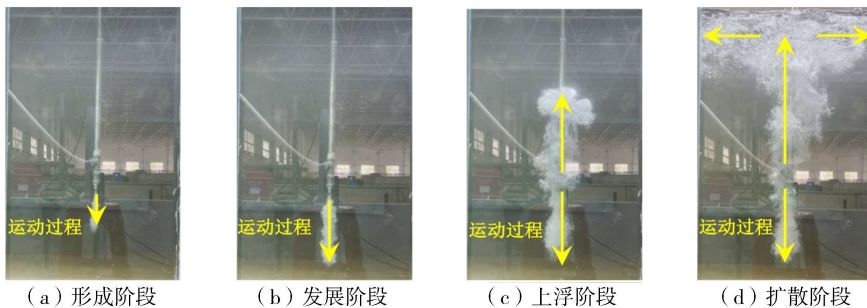


图3 喷嘴垂直向下排气时羽流运动过程

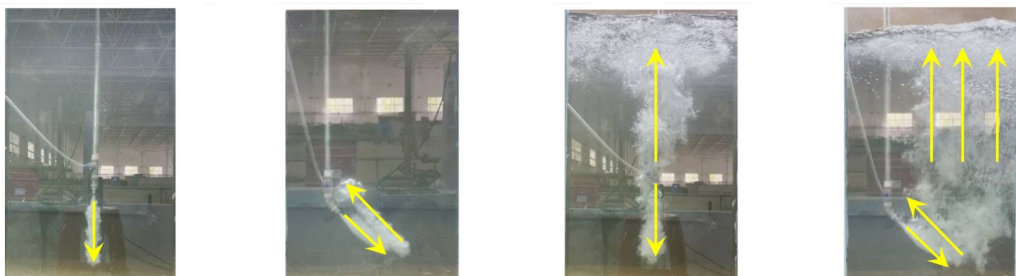


图4 不同角度排气时羽流运动过程对比

2.2 羽流下切长度影响因素

采用信噪比分析法判定下切长度的主要影响因素。信噪比分析是处理正交试验结果的常用方法,采用信噪比度量试验过程的稳健性,通过优化无法控制的因素(如噪声)降低试验误差^[16]。计算得出下切长度信噪比响应如表3所示。Delta值等于该因素水平的最高平均响应值减去最低响应值,按照Delta值从高到低排序,将Delta值最高的因素分配排秩为1,依此类推。

表3 各因素下切长度信噪比响应

序号	信噪比响应				
	距离	排气气压	水深	喷嘴孔径	排气角度
1	22.78	19.98	23.18	22.31	22.48
2	23.13	23.28	24.11	22.50	24.95
3	23.19	24.91	23.63	22.77	
4	23.43	26.70	23.96	22.39	

通过信噪比分析可以得到影响下切长度5个因素(距离、排气气压、水深、喷嘴孔径、排气角度)的Delta值分别为0.65、6.72、0.93、0.46和2.47,可以看到,排气气压信噪比的Delta值最大,排秩为1,是影响下切长度最显著的因素;排气角度信噪比的Delta值次之,排秩为2,是影响下切长度次显著的因素;距离、水深和喷嘴孔径这3个因素对下切长度的影响不显著。

利用多项式回归,拟合出下切长度 L 的回归方程:

$$L = -0.83214 - 2.5A + 0.03675B + 0.75C + 0.70714D + 0.09167E \quad (1)$$

式中: A 为距离; B 为排气气压; C 为水深; D 为喷嘴孔径; E 为排气角度。该方程的相关系数 R^2 为0.95,表明回归效果较好。可以看到,距离因素的系数为负,表明随着距离的增大,下切长度降低;其他因素的系数为正。

2.3 喷嘴处局部水体的紊动强度特征

静水中射入垂直向下的空气射流,会对静水水体产生强烈的局部扰动。 x 为自喷嘴轴线的水平向距离,取20~60cm; y 为自喷嘴的垂向距离,向下为正,取3~5cm; h 为喷嘴至槽底距离,取3~5cm。根据量纲统一原理构建无量纲数 x/h 与 y/h 。喷嘴垂直向下时3种不同排气气压下的空气射流卷吸、裹挟周围水体产生的局部紊动强度(水平向和垂向计算合成值)见图5。结果表明,断面局部紊动强度随空气射流压强 p 的增大而增大,致紊效果较为显著,但在远离喷嘴处水体紊动强度较弱,即射流引起的水流紊动沿横向迅速衰减,表现出空气射流对提高水流输沙能力仅具有局部效应;另一方面,射流冲

■ $p=0.10$ MPa ○ $p=0.15$ MPa ▲ $p=0.20$ MPa

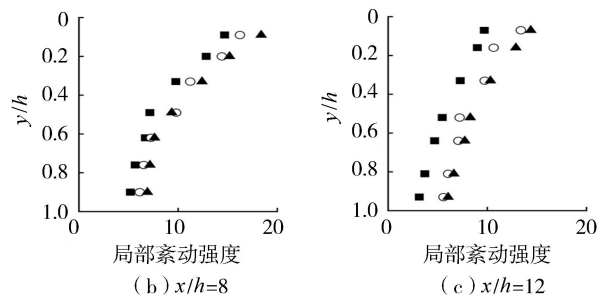
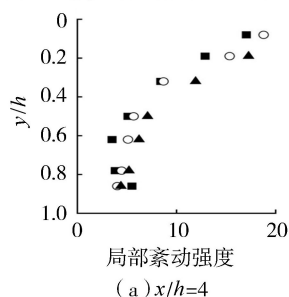


图5 射流局部紊动强度变化

击槽底形成近底部较强的水流紊动,若槽底为床沙,可以卷吸起大量底沙。

图6为相同试验条件排气过程中射流底部水体紊动切应力。紊动切应力反映了剪切流场中紊动引起的主导作用,在紊流核心区内,紊动剪应力 $\bar{\tau}_{xy}$ 起主导作用,故仅对此进行分析。由图6可见,底部紊动切应力在自喷嘴轴线的水平向距离约为10cm时达到最大,随后迅速衰减,这是下切羽流冲击槽底的反射作用造成的。

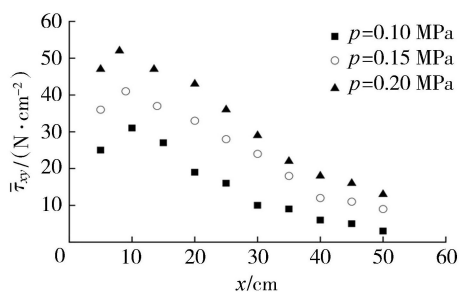


图6 射流底部紊动切应力

图7为相同试验条件下射流局部紊动能随压强和水平距离的变化,图中 k_m 为水平断面平均紊动能, k_{max} 为断面最大紊动能。平均紊动能 k 为表征某

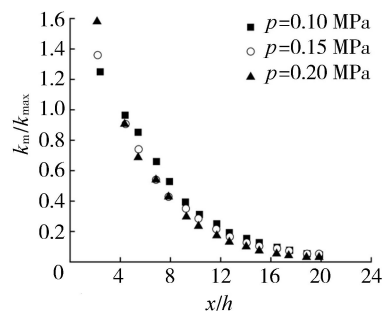


图7 水平断面平均紊动能的衰减

点紊动强弱的物理量,定义如下:

$$k = \frac{\bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2}{2} \quad (2)$$

式中 \bar{u} 、 \bar{v} 、 \bar{w} 分别为纵向、横向和垂向的时均流速。

动能测量结果同样表明,空气射流引起的紊动随距离迅速衰减,但当自喷嘴轴线的水平向距离与喷嘴至槽底距离之比较大时 ($x/h > 4$),超出了下切羽流冲击槽底反射作用范围,并没有表现出如图 6 所示的先上升后下降的趋势,因此空气射流只能对水体造成局部紊动。

3 气动冲沙浑水试验结果与分析

为探究空气射流的冲沙能力,开展了有床沙条件下的静水水槽试验,研究各水-气参数对冲沙效果的影响,得出冲刷坑最大冲刷深度和冲刷坑体积与各因素之间的预测方程,并通过对方程进行优化,得出了最大冲沙效果时各因素的水平。

3.1 冲刷坑发展过程

在水深为 75 cm、喷嘴孔径为 2 mm、排气压为 0.3 MPa、距离为 1 cm、排气角度为 90°的水气参数条件下,分别进行排气 0.5 min、2 min、4 min、8 min 和 12 min 这 5 组试验。不同排气时间下的冲刷坑最大深度与体积见图 8。

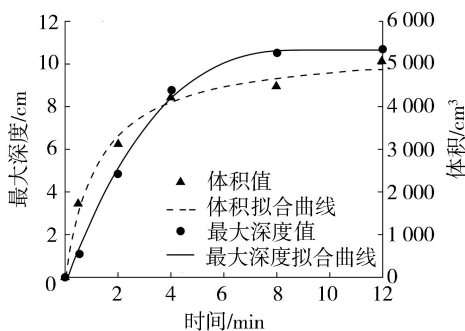


图 8 冲刷坑最大深度与体积随排气时间变化曲线

冲刷试验结果表明,冲刷坑的最大深度在 2 min 之前大幅增加,冲刷坑纵向拓展迅速,在 2 ~ 4 min 时增幅减缓,4 ~ 8 min 后最大深度变化开始趋于稳定,在 8 min 后基本稳定在 10 cm 左右,达到了该工况下冲刷的最大深度。同时可以看出冲刷坑的体积在 4 min 之前有大幅增加,结合冲刷坑深度随时间变化曲线可以看出在 2 ~ 4 min 时冲刷坑主要是横向拓展。根据清水排气试验时所得的结论,此时接近喷嘴处的气体压力较大,气泡小且密集,可能是气体掺混水体对泥沙产生了直接作用;当气泡发展后,气体的压力减小,羽流的径向和轴向开始发展,将周围的水体卷吸进来,加强了附近水体的紊动,水体挟沙的能力得到了大幅提高,冲刷能力相对前一阶段也得到了增强,因此体积增大的幅度在不断加大。

在接近 4 min 时,冲刷坑体积已经显著扩大,水体作用到冲刷坑表面的紊动强度大幅削弱,冲刷效果开始减弱,体积增大的趋势开始减缓。在 8 min 后冲刷坑的体积趋于稳定,基本达到了紊动水体的最大影响范围。可以认为,当其他因素变幅不大时,排气的前 8 min 是冲刷的有效时段。

因此,气动冲沙的冲刷坑发展过程可概括为以下 3 个阶段:①形成阶段。在开始排气的瞬间,床沙表面变为不连续的水沙混合,随气泡向上输运,此阶段的冲刷坑体积与深度急剧增大。②发展阶段。随着冲刷坑深度与体积的增加,下切羽流的动量急剧衰减,此阶段起动底沙的主要驱动是空气射流卷吸附近水体产生局部的强烈紊动,多数扬起的泥沙冲至冲刷坑外,此阶段的冲刷坑深度与体积增长趋势仍较为显著。③稳定状态。随着排气时间的增加,冲刷坑的深度与体积基本稳定,坑内基本无泥沙扬起和下落。这是由于下切羽流引起的紊动随着自喷嘴距离的增大迅速衰减,当紊动水体边界处流速小于泥沙起动流速时,该处床沙不会起动。在实际的清淤工程中,当冲沙坑达到该工况下的稳定状态时,继续排气不会增强清淤效果。

3.2 冲刷坑影响因素

采用方差分析法^[17]对表 2 中试验数据进行分析。一般来说,由于不同组之间试验条件的差异,导致组间差异远大于组内差异,将两者比值与显著性检验水平 F 值进行判断比较,如果 F 值远大于 1,则说明试验条件的影响显著,同时,若再加以检验水平 P 值进行判断,若 P 值小于 0.05,则更能说明因素显著情况。冲刷坑最大深度和体积的方差分析结果分别如表 4 和表 5 所示。

表 4 冲刷坑最大深度方差分析结果

因素	自由度	调整平方和	调整均方	F	P
距离	3	57.617	19.2055	188.09	0.005
排气压	3	117.078	39.0259	382.21	0.003
水深	3	6.426	2.1420	20.98	0.046
喷嘴孔径	3	0.459	0.1530	1.50	0.424
排气角度	1	0.001	0.0011	0.01	0.928

注:表中自由度为数据统计时可自由变化的变量个数;调整平方和是对模型的不同因素变异的度量;调整均方是描述模型中某项变量大小的度量。

表 5 冲刷坑体积方差分析结果

因素	自由度	调整平方和	调整均方	F	P
距离	3	17937751	5979250	2.02	0.032
排气压	3	29516366	9838789	5.40	0.020
水深	3	854639	284880	0.04	0.433
喷嘴孔径	3	348355	116118	4.13	0.078
排气角度	1	34133	34133	1.53	0.717

通过冲刷坑最大深度方差分析可以得出标准差

为 0.3195, 相关系数为 99.89%, 调整后的相关系数(用于比较不同数量预测变量的符合程度)为 99.16%, 预测的相关系数(用于描述预测结果的符合程度)为 92.81%。从表 4 可知, 排气气压和距离的 F 值分别为 382.21 和 188.09, 均远大于 1, 同时 P 值远小于 0.05, 表明这 2 个因素为显著效应因素; 而水深的 P 值接近 0.05, 其影响程度要小得多, 但喷嘴孔径和排气角度的 P 值均大于 0.05, 属于影响不显著的因素。可以看出, 在小水深条件下, 影响冲刷坑最大深度的显著因素分别为排气气压与距离, 而水深、喷嘴孔径、排气角度这 3 个因素对冲坑深度的影响较弱。

通过冲刷坑体积方差分析可以得出标准差为 443.356, 相关系数为 99.20%, 调整后的相关系数为 93.99%, 预测的相关系数为 98.74%。从表 5 可知, 在小水深条件下, 气压和距离同样是影响冲刷坑体积的显著因素。

3.3 气动冲沙公式拟合与预测

方差分析法还可以得出冲刷坑最大深度和体积与各因素之间的预测方程。定义冲刷坑最大深度为 H_{max} 、冲刷坑体积为 V , 利用多项式回归, 通过方差分析得到了冲刷坑最大深度和体积的回归方程:

$$H_{max} = 4.404 - 0.8549A + 0.024167B + 5.473C - 0.0459D - 0.00036E \quad (3)$$

$$V = 1395 - 117.8A + 6.49B + 56C + 452D + 10.72E \quad (4)$$

从上述方差分析可知, 整个模型的相关系数、调整后的相关系数和预测的相关系数均高于 90%, 表明模型分析结果可靠。利用式(3)(4)预测了冲刷坑最大深度和体积, 并与冲沙正交设计不同水-气参数条件下的试验实测值作对比, 如表 6 和表 7 所示。由此可知, 通过方差分析得出的回归方程不仅可以

表 6 冲刷坑最大深度预测值与试验值偏差分析

距离/ cm	气压/ kPa	水深/ m	喷嘴 孔径/ mm	排气角度/ (°)	最大深度		
					预测值/ cm ³	实测值/ cm ³	相对 偏差/%
-0.5	200	0.6	2	90	12.8	16.2	20.9
0.5	400	0.7	3	45	17.3	15.5	-11.6
3.5	100	0.4	5	90	5.8	4.3	-34.8
5.0	300	0.5	1	45	10.1	9.6	-5.2

表 7 冲刷坑体积预测值与试验值偏差分析

距离/ cm	气压/ kPa	水深/ m	喷嘴 孔径/ mm	排气 角度/ (°)	体积		
					预测值/ cm ³	实测值/ cm ³	相对 偏差/%
-0.5	200	0.6	2	90	4654.3	5896.2	21.1
0.5	400	0.7	3	45	5809.7	4722.4	-23.0
3.5	100	0.4	5	90	4878.9	4263.3	-14.4
5	300	0.5	1	45	3715.4	3928.1	5.4

较好地拟合正交设计中冲刷坑的最大深度与体积, 并且可以用来预测不同水-气参数条件下冲刷坑的最大深度与体积, 对比预测值与实测值, 结果令人满意。

4 结 语

本文利用水槽试验分别进行了空气射流清水试验与气动冲沙浑水试验。在清水试验中, 总结并归纳出羽流发展的 4 个阶段; 通过正交试验信噪比分析发现气压是决定羽流下切长度的最显著因素, 拟合出羽流下切长度的回归方程; 在对排气喷嘴处局部水体的紊动特性研究中, 得出了断面紊动强度随空气射流压强的增大而增大, 射流冲击槽底形成近底部较强的水流紊动, 底部紊动切应力随距离增加而迅速衰减的结论。在浑水试验中, 总结出冲刷坑发展的 3 个阶段, 并发现排气的前 8 min 是冲刷的高效时段; 通过正交试验方差分析发现排气气压和喷嘴至床面距离是决定冲沙效果的显著因素; 利用多项式回归, 拟合出冲刷坑最大深度与体积的预测公式, 预测值与实测值较为吻合。

参考文献:

- [1] 罗优, 简鸿福, 罗琳, 等. 多沙河流河口泥沙淤积自生性过程试验研究[J]. 水科学进展, 2018, 29(3): 348-356. (LUO You, JIAN Hongfu, LUO Lin, et al. An experimental study of autogenic processes in river deltas with a high sediment load-water ratio[J]. Advances in Water Science, 2018, 29(3): 348-356. (in Chinese))
- [2] 孙东坡, 吴默溪. 黄河小浪底水库运用以来的泥沙淤积特征分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018, 39(2): 74-79. (SUN Dongpo, WU Moxi. Analysis of characteristics of sediment in Xiaolangdi Reservoir in the Yellow River[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2018, 39(2): 74-79. (in Chinese))
- [3] 吴腾, 申孙平, 李涛, 等. 三盛公水库运用对下游河道输沙的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(5): 401-405. (WU Teng, SHEN Sunping, LI Tao, et al. Influence of operation of Sanshengong Reservoir on sediment transport in the downstream river[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(5): 401-405. (in Chinese))
- [4] 常留红, 覃瓶山, 郑景琦, 等. 水沙条件对大湖口河冲淤特性的影响[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(4): 15-20. (CHANG Liuhong, QIN Pingshan, ZHENG Jingqi, et al. Influence of water and sediment conditions on scouring and silting characteristics of Dahukou River[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42

- (4):15-20. (in Chinese))
- [5] 申冠卿, 张晓华, 李勇, 等. 1986 年以来黄河下游水沙变化及河道演变分析[J]. 人民黄河, 2000, 52(9):10-11. (SHEN Guanqin, ZHAN Xiaohua, LI Yong, et al. Analysis of runoff and sediment variation and channel evolution in the lower Yellow River since 1986[J]. Yellow River, 2000, 52(9):10-11. (in Chinese))
- [6] 黄建维, 张金善. 我国河口挡潮闸下淤积综合治理技术[J]. 泥沙研究, 2004, 49(3):46-53. (HUANG Jianwei, ZHANG Jinshan. Regulation techniques of sediment siltation downstream tidal barriers in China[J]. Journal of Sediment Research, 2004, 49(3):46-53. (in Chinese))
- [7] 田海涛, 张振克, 李彦明, 等. 中国内地水库淤积的差异性分析[J]. 水利水电科技进展, 2006, 26(6):28-33. (TIAN Haitao, ZHANG Zhenke, LI Yanming, et al. Differences in reservoir sedimentation in Inland China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2006, 26(6):28-33. (in Chinese))
- [8] 齐梅兰, 陈稚聪, 府仁寿. 射流冲沙研究[J]. 水利学报, 2003, 48(12):71-75. (QI Meilan, CHEN Zhicong, FU Renshou. Experimental study on sediment transportation by impinging jet [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 48(12):71-75. (in Chinese))
- [9] 陈稚聪, 府仁寿, 齐梅兰. 有压输水系统中用射流冲沙的系列模型试验研究[J]. 水利学报, 2002, 47(5):55-58. (CHEN Zhicong, FU Renshou, QI Meilan. Model study on forced erosion using impinging jet in pressured water transportation system [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 47(5):55-58. (in Chinese))
- [10] 齐梅兰, 府仁寿, 陈稚聪. 射流冲刷平衡深度研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2005, 22(3):368-372. (QI Meilan, FU Renshou, CHEN Zhicong. Study on equilibrium scour depth of impinging jet [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2005, 22(3):368-372. (in Chinese))
- [11] YEH Pohung, CHANG Kuangan, JOHN Henriksen, et al. Large-scale laboratory experiment on erosion of sand beds by moving circular vertical jets [J]. Ocean Engineering, 2009, 36(3):248-255.
- [12] 罗勇, 窦希萍, 罗肇森. 气动冲淤法治理黄河泥沙的一点思考[J]. 水利学报, 2007, 52(增刊1):276-282. (LUO Yong, DOU Xiping, LUO Zhaosen. A few thinking for the Yellow River sediment regulation with "air-uplift" [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 52(Sup1):276-282. (in Chinese))
- [13] 丁磊, 罗勇, 窦希萍, 等. 气动冲沙法辅助小浪底水库调沙的设想[J]. 人民黄河, 2019, 41(7):66-71. (DING Lei, LUO Yong, DOU Xiping, et al. Assumption of assisting sediment regulation in Xiaolangdi Reservoir by pneumatic sluicing [J]. Yellow River, 2019, 41(7):66-71. (in Chinese))
- [14] 徐进超, 丁磊, 罗勇. 气动冲沙数值仿真模型研究[J]. 人民黄河, 2019, 41(6):29-33. (XU Jinchao, DING Lei, LUO Yong. Numerical simulation of air uplift and control sediment [J]. Yellow River, 2019, 41(6):29-33. (in Chinese))
- [15] 沈邦兴. 实验设计及工程应用[M]. 北京:中国计量出版社, 2005.
- [16] 陈立周. 稳健设计[M]. 北京:机械工业出版社, 2000.
- [17] 何为, 唐斌, 薛卫东. 优化试验设计方法及数据分析[M]. 北京:化学工业出版社, 2012.
- (收稿日期:2022-03-06 编辑:骆超)

(上接第 55 页)

- [15] 李元辉, 刘建坡, 赵兴东, 等. 岩石破裂过程中的声发射 b 值及分形特征研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(9):2559-2563. (LI Yuanhui, LIU Jianpo, ZHAO Xingdong, et al. Study on b -value and fractal dimension of acoustic emission during rock failure process [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(9):2559-2563. (in Chinese))
- [16] 余乐兴. 不同粒径充填体单轴压缩条件下力学性能及声发射特性研究[D]. 赣州市:江西理工大学, 2015.
- [17] 周逸飞, 朱星, 刘文德. 基于声发射和高斯混合模型的灰岩破裂特征识别研究[J]. 水利水电技术, 2019, 50(11):131-140. (ZHOU Yifei, ZHU Xing, LIU Wende. Identification of cracking characteristics of limestone under uniaxial compression condition using acoustic emission and GMM [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(11):131-140. (in Chinese))
- [18] 李漾, 刘洋, 丁翠, 等. 不同层理煤破坏过程声发射 RA-AF 特征研究[J]. 煤矿安全, 2022, 53(1):37-43. (LI Yang, LIU Yang, DING Cui, et al. RA-AF characteristics of acoustic emission in uniaxial compression failure of different bedded coal [J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(1):37-43. (in Chinese))
- [19] 陈忠购. 基于声发射技术的钢筋混凝土损伤识别与劣化评价[D]. 杭州:浙江大学, 2018.
- [20] 葛振龙, 孙强, 王苗苗, 等. 基于 RA/AF 的高温后砂岩破裂特征识别研究[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(2):176-183. (GE Zhenlong, SUN Qiang, WANG Miaomiao, et al. Fracture feature recognition of sandstone after high temperature based on RA/AF [J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(2):176-183. (in Chinese))
- (收稿日期:2022-02-23 编辑:刘晓艳)

南水北调中线工程冬季输水冰情风险研究

练继建^{1,2}, 杨德明^{1,2}, 赵新^{1,2}

(1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300350)

摘要: 针对南水北调中线工程冬季输水冰情的安全运行问题, 以南水北调中线工程河北段为研究对象, 以热平衡理论为出发点推导出目标单元渠段的整体总热量变化公式; 采用单因素局部分析法选出风险评价指标, 基于概率论构建了风险评价指标之间的联合概率密度函数, 将气象事件发生概率、热量变化率与冰情风险等级一一对应, 从而对渠道冰情进行风险评估。对2021年1月6—8日南水北调中线工程河北段输水渠道冰情风险分析结果表明: 在整个热交换过程中, 短波辐射、蒸发和对流热交换是影响热量变化的主要因素, 且夜间渠道的热量散失明显大于白天, 加大了夜间发生冰情的风险; 沙河节制闸—渠末段虽然与其他渠段风险等级一样, 但其单位面积热量损失明显高于其他渠段, 接近于极高风险, 应加强对该渠段的实时监测并做好冰情防护。

关键词: 冬季输水; 冰情风险; 热平衡理论; 概率分析; 联合概率密度函数; 南水北调中线工程
中图分类号: TV698 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2023)01-0063-08

Study on risk of sudden ice conditions in winter for Middle Route of South-to-North Water Diversion Project// LIAN Jijian^{1,2}, YANG Deming^{1,2}, ZHAO Xin^{1,2} (1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: Aiming at the problem of ice conditions in winter for the Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project, taking the Hebei section of the project as the research object, the formula of overall total heat variation of canal sections of the target unit was derived through the theory of heat balance. The single factor local analysis method was used to select the evaluation index. Then, based on the idea of probability theory, the joint density function between evaluation indexes was built, and the probability of meteorological events, change rate of total heat change, the risk level of ice conditions was correlated, so as to carry out the risk assessment of ice conditions in channels. The risk analysis results of ice conditions in Hebei section of the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project from January 6th to 8th in 2021 show that, in the whole process of heat exchange, the short-wave radiation, evaporation and convection are the main factors, and the heat loss in the channel at nights is significantly greater than that in the daytime, which increases the risk of sudden ice conditions at nights. In addition, although the risk level of Shahe gate-terminal section is the same as that of other sections, its heat loss per unit area is obviously higher than that of other sections, and it is close to extremely high risk. In practice, real-time monitoring should be strengthened and relevant protection measures should be taken for this section.

Key words: water conveyance in winter; risk of ice conditions; theory of heat balance; probability analysis; joint probability density function; Middle Route of South-to-North Water Diversion Project

南水北调中线工程受冬季寒冷天气的影响, 渠道经常会发生不同程度的冰情^[1-4], 从而改变渠道的水力条件, 造成水工建筑物等设施损坏, 不仅严重威胁工程冬季输水的运行安全, 还会造成巨大的经济损失。冰情分为多个阶段, 其中初期是冰情演变的基础, 尤为重要。本文研究的冰情风险指渠道刚开始的产冰阶段(即冰期初期阶段, 不是冰塞冰坝等

冰害形成阶段)的冰情风险, 该阶段由于受外界气象条件的影响, 具有较强的随机性和不确定性, 为渠道冰情的风险评估带来了极大挑战。《全国气象发展“十四五”规划》中提出“建立健全以气象灾害预警信息为先导的全社会快速响应和高效联动机制”的方针, 因此, 通过气象数据对输水渠道进行冰情风险研究具有重要意义。

基金项目: 国家自然科学基金(51909186, U20A20316)

作者简介: 练继建(1965—), 男, 教授, 博士, 主要从事水利水电工程安全与优化应用研究。E-mail: jilian@tju.edu.cn

通信作者: 赵新(1984—), 男, 讲师, 博士, 主要从事水动力学研究。E-mail: jolson@tju.edu.cn

对冰情的演变过程已有大量研究。例如:Shen^[5]提出了双层冰输运数学模型对表面冰和浮冰进行数值模拟;Wang等^[6]基于二次成核和絮凝等多个过程,开发了水的过冷过程演变模型和水中冰演变模型;宗全利等^[7]根据热平衡理论,综合考虑水力、热力、气候等条件,推导得到渠道不冻长度的计算公式;唐伟^[8]通过地下水抽灌的地热能利用方式,结合热平衡理论对输水渠道无冰盖输水的可行性进行了分析;穆祥鹏等^[1]根据传热学理论,对铺设保温盖板的输水渠道水体进行了数学模拟。由上述研究可以看出,热平衡过程直接影响着冰的形成和演变。

对输水工程冬季输水潜在风险的研究主要在风险因素识别^[9-12]和风险评价方法^[11-16]两个方面开展。姜蓓蕾等^[17-18]利用层次分析法构建评价指标体系,并采用模糊综合评价法对南水北调东线工程和中线工程某段进行了风险评价。胡丹等^[19]构建了直觉模糊集理论评价模型,采用TOPSIS法对输水渠道进行综合评价并计算了相应的风险等级。刘勇等^[20]针对长距离输水工程的特点,考虑风险的预测、可控和转移等,构建了多维功效函数对工程单元进行风险识别。现有的输水风险评价关注点主要集中在输水建筑物上,缺乏输水渠道冰情过程的风险评价,也忽视了采用概率理论对风险因素进行宏观分析。概率分析可以较为直接地描述风险因素之间的内在联系,已得到广泛应用^[21-24]。刘强等^[25]针对寒区公路的风吹雪灾害问题,利用概率论思想,构建联合密度函数进行脆弱性评估,并在此基础上建立风险评估体系进行风险分析。吴柳萍等^[26]基于信息扩散理论,建立了福建省森林病虫害风险概率模型,对森林病虫害发生的风险范围进行了评估。王磊等^[24]构建了暴雨-潮位联合分布模型分析深圳市风险概率,从而定量揭示了极端降水与潮位遭遇风险的内在规律。

本文以渠道热平衡理论为基础,对评价指标进行概率分析,从多角度对冬季输水冰情进行风险评估,以为输水工程安全运行和防灾减灾工作提供参考。

1 研究方法与研究数据

1.1 研究方法

针对输水工程冬季输水冰情风险,以热平衡理论为出发点,计算出整个冰情的形成与演变过程中各部分热交换量,推导出目标单元渠段的整体总热量变化计算公式,并从中找出宏观风险性评价指标;基于冰情风险评价指标与风险发生结果相对应的原则,通过总热量变化率(每米渠道单位水面面积的

总热量变化)和风险评价指标的联合概率函数求出冰情的风险等级;根据风险等级对南水北调中线工程(河北段)进行风险评估,分析该渠段的热量变化规律和风险等级分布。

1.2 研究数据

以南水北调中线工程河北段为研究区域,将其分为安阳节制闸—铭河节制闸、铭河节制闸—午河节制闸、午河节制闸—沙河节制闸和沙河节制闸—渠末4段,工程位置如图1所示。气象数据采用2000—2018年邯郸、保定、邢台、石家庄4个城市的气温、风速和太阳总辐射数据,来源于国家气象科学数据和国家青藏高原科学数据中心。地图矢量数据和栅格数据来源于地理空间数据云和国家地理信息系统网。

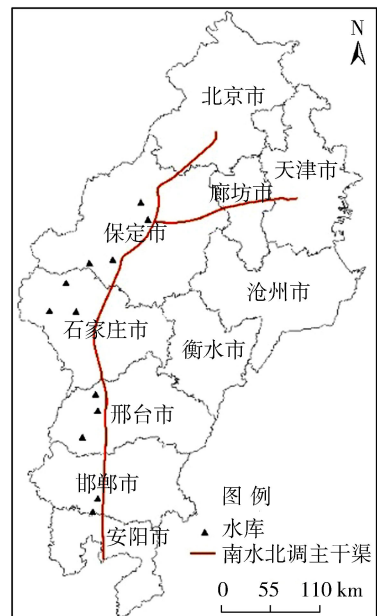


图1 南水北调中线工程河北段工程位置示意图

2 热平衡理论计算

对于没有封冻的输水渠道,不考虑水体与渠壁和渠床的交换以及外界特殊天气变化(降雨、下雪等),只考虑水面的热交换和水流的动力增热,其中水面的热交换包括短波辐射、净长波辐射、蒸发散热和对流散热。根据热平衡理论,单元渠段的总热量变化可表示为

$$W_{\text{总}} = W_{\text{水}} + W_{\text{热交换}} + W_{\text{动力}} = W_{\text{水}} + W_{\text{短波}} - W_{\text{长波}} - W_{\text{蒸发}} - W_{\text{对流}} + W_{\text{动力}} \quad (1)$$

式中: $W_{\text{总}}$ 为水体总的热量变化,kJ; $W_{\text{水}}$ 为水体因水温而产生的自身热量,kJ; $W_{\text{热交换}}$ 为水面的总热交换,kJ; $W_{\text{动力}}$ 为水流的动力增热,kJ; $W_{\text{短波}}$ 、 $W_{\text{长波}}$ 、 $W_{\text{蒸发}}$ 、 $W_{\text{对流}}$ 分别为水体的短波辐射热量、净长波辐射热量、蒸发散热和对流散热,kJ。

当输水渠道在冬季运行时,假设整个渠道恒定运行且初始沿程水温近似为 0°C ,即认为 $W_{\text{水}}=0\text{ kJ}$,同时可以忽视水力因素(较小的流量、水位变化等)对水体热量变化的影响,则式(1)可表达为

$$W_{\text{总}} = W_{\text{短波}} - W_{\text{长波}} - W_{\text{蒸发}} - W_{\text{对流}} + W_{\text{动力}} = DL\sigma_{\text{总}} = DL(\sigma_{\text{短波}} - \sigma_{\text{长波}} - \sigma_{\text{蒸发}} - \sigma_{\text{对流}} + \sigma_{\text{动力}}) \quad (2)$$

其中 $\sigma_{\text{短波}} = (1 - \varphi)(1 - 0.65 C^2) R_s$
 $\sigma_{\text{长波}} = 0.97\alpha[\varepsilon_a(273 + T_a)^4 - (273 + T_w)^4]$

$$\sigma_{\text{动力}} = \frac{Hm\rho v}{j}$$

$$\sigma_{\text{蒸发}} = f(v_w)(e_s - e_a)$$

$$\sigma_{\text{对流}} = 0.47f(v_w)(T_w - T_a)$$

式中: D 为单元渠段宽度,m; L 为单元渠段长度,m; $\sigma_{\text{总}}$ 为总热量变化率, kJ/m^2 ; $\sigma_{\text{短波}}$ 、 $\sigma_{\text{长波}}$ 、 $\sigma_{\text{蒸发}}$ 、 $\sigma_{\text{对流}}$ 、 $\sigma_{\text{动力}}$ 分别为短波辐射、净长波辐射、蒸发散热、对流散热和水流的动力增热各自引起的热量变化率, kJ/m^2 ; φ 为水面反射率; C 为云层覆盖率; R_s 为太阳总辐射, kJ/m^2 ; α 为 Stefan-Boltzman 常数,取为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; ε_a 为大气的发射率; T_a 为气温, $^{\circ}\text{C}$; T_w 为水面温度, $^{\circ}\text{C}$; H 为渠道水深,m; m 为渠道纵坡; ρ 为水的密度, kg/m^3 ; v 为渠道流速, m/s ; j 为热功当量,取为 $102 \text{ kg} \cdot \text{m}/\text{kJ}$; $f(v_w)$ 为风函数, v_w 为风速, m/s ,当垂向混合且热负荷较小时, $f(v_w) = 9.2 + 0.46 v_w^2$; e_s 、 e_a 为饱和水汽压与空气中实际水汽压,Pa, ($e_s - e_a$)为饱和蒸汽压力差。

此外,一个长距离输水渠道一般由多个单元输水渠段组成,则整个输水渠道的总热交换量可由各单元输水渠段的总热交换量求和得出。当各单元输水渠段总热量变化为正值时,则整个单元渠道基本不会产生水内冰和流冰,从而保证整个输水渠道安全运行。

3 风险评估

3.1 评价指标选取

输水渠道出现冰情是多方面原因造成的,既与渠道自身的工程特性和水流的运行状态等因素密切相关,同时也受到外界天气环境的影响。而当渠道在某一恒定流工况无冰运行时,其水力条件基本没有发生改变,而外界环境变化是造成渠道出现大量水内冰和流冰而产生冰情的主要原因。结合式(2)及实际工程运行资料,可知气温 T_a 、风速 v_w 、太阳总辐射 R_s 3个气象参数是影响热量变化的关键评价指标,也是渠道冰情风险主要致灾因子。

本文采用单因素局部分析法^[27-28],依据式(3)

分析判断气温、风速、太阳总辐射3个参数在热量变化计算公式中的敏感性,结果如表1所示。

$$S_r = \left| \frac{(\sigma_2 - \sigma_1)/\sigma_1}{(P_2 - P_1)/P_1} \right| \quad (3)$$

式中: S_r 为参数的敏感性指标; P_1 、 P_2 分别为参数变化前后的取值; σ_1 、 σ_2 分别为采用 P_1 、 P_2 计算得到的热量变化率。其中 S_r 绝对值越小,敏感程度越小,代表着该参数对计算结果的影响程度越小。

表1 3个参数的敏感性分析结果

参数	S_r			
	$\delta = -25\%$	$\delta = +25\%$	$\delta = +50\%$	$\delta = +100\%$
气温	6.03	6.05	6.05	6.04
风速	2.85	2.68	2.29	1.87
太阳总辐射	0.77	0.77	0.77	0.77

注: δ 为以 $R_s = 566.4 \text{ kJ}/\text{m}^2$ 、 $T_a = -10.6^{\circ}\text{C}$ 、 $v_w = 2.4 \text{ m}/\text{s}$ 为初值的参数变化幅度。

从表1可以看出,3个参数的敏感性按照从大到小顺序排列为气温、风速、太阳总辐射,由此得出太阳总辐射对渠道热量变化影响最小。同时还发现太阳总辐射的 S_r 不会随太阳总辐射值变化而改变,这是因为太阳总辐射与热量变化呈线性关系;而气温的 S_r 变化较小,风速的 S_r 会随着风速的增大而减小,说明风速变化越大,对热量变化的影响越小。

3.2 概率风险分析

通过概率分析初步计算致灾因子同时发生的事件概率,再利用式(2)求出总热量变化率从而进一步判断渠道冰情风险等级。考虑到气象数据在时间和空间上的有效性和连续性,选取2000—2018年每年的11月到次年2月的日数据作为总体样本,然后根据样本数据绘制出风险评价指标的经验分布曲线和相应的概率密度直方图,通过二者相互匹配拟合出风险评价指标的概率密度函数。南水北调中线工程河北段主要途经邯郸、邢台、石家庄、保定4个城市,分别对其气温、风速和太阳总辐射数据的概率密度曲线进行拟合。以邢台为例,其气温、风速和太阳总辐射经验分布曲线和概率密度直方图如图2和图3所示,利用Spss数学分析软件对经验分布曲线和概率密度直方图进行拟合,方差检验结果表明,气温和风速的概率密度曲线呈一阶指数形式,因此采用Gauss函数作为拟合曲线的表达形式,4个城市的拟合表达式及其拟合度如表2所示。

由于季节影响,12月太阳总辐射值小于11月和1月的辐射值,通过预处理和方差分析发现其概率密度曲线呈多峰形态,由多个一阶指数组成。以邢台为例,其概率密度曲线由两个Gauss一阶指数函数叠加组成,如式(4)所示;其余3个城市叠加函数过多,不在此赘述。

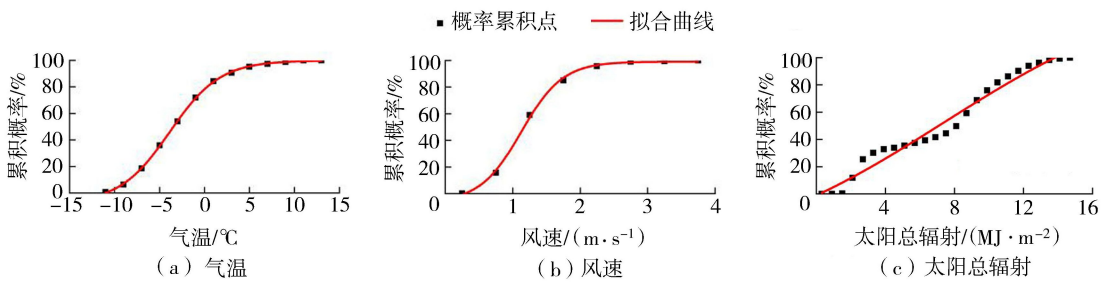


图2 邢台市气温、风速和太阳总辐射经验分布曲线

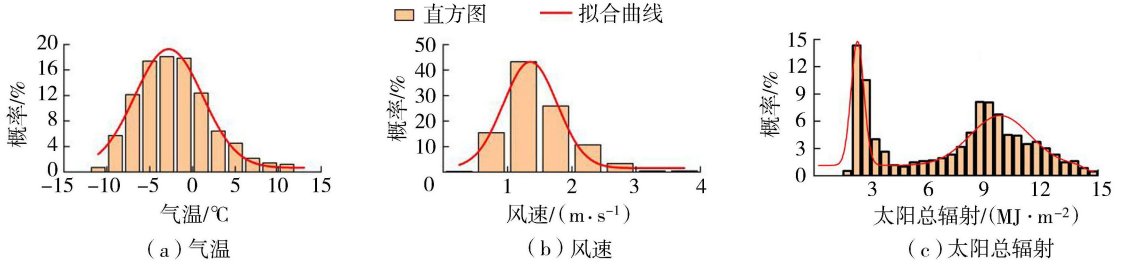


图3 邢台市气温、风速和太阳总辐射概率密度直方图

表2 4个城市气温和风速的概率密度函数及其拟合度

城市	气温概率密度函数	气温拟合度	风速概率密度函数	风速拟合度
邯郸	$F(T_a) = 0.49 + 16.2e^{-2\left(\frac{T_a + 35.63}{91.62}\right)^2}$	0.97	$F(v_w) = 0.74 + 26.48e^{-2\left(\frac{v_w - 15.65}{13.76}\right)^2}$	0.96
邢台	$F(T_a) = 0.66 + 18.64e^{-2\left(\frac{T_a + 27.82}{79.08}\right)^2}$	0.98	$F(v_w) = 1.45 + 29e^{-2\left(\frac{v_w - 16.56}{91.62}\right)^2}$	0.94
石家庄	$F(T_a) = 0.69 + 19.19e^{-2\left(\frac{T_a + 34.35}{75.31}\right)^2}$	0.98	$F(v_w) = 1.71 + 41.32e^{-2\left(\frac{v_w - 12}{8.54}\right)^2}$	0.97
保定	$F(T_a) = -0.34 + 14.1e^{-2\left(\frac{T_a + 61.05}{120.85}\right)^2}$	0.94	$F(v_w) = 1.58 + 41.72e^{-2\left(\frac{v_w - 13.54}{8.36}\right)^2}$	0.97

注： $F(T_a)$ 、 $F(v_w)$ 为气温和风速的概率密度函数。

$$F(R_s) = F(R_s)_1 + F(R_s)_2 = 2.29 + 13.65e^{-2\left(\frac{R_s - 2290.86}{678.95}\right)^2} + 5.48e^{-2\left(\frac{R_s - 9823.34}{3164.47}\right)^2} \quad (4)$$

式中： $F(R_s)$ 为太阳总辐射的总概率密度函数； $F(R_s)_1$ 、 $F(R_s)_2$ 为太阳总辐射的子概率密度函数。

在求得气温、风速、太阳总辐射3个评价指标的概率密度函数后，基于指标之间的相关性，利用其复相关系数构造联合概率密度函数^[29-30]，并利用积事件的发生概率来代表3个评价指标在不同强度下同时发生的可能性：

$$F(T_a, v_w, R_s) = \frac{F(T_a)F(v_w)F(R_s)}{\sqrt{1 - r^2}} \quad (5)$$

式中： $F(T_a, v_w, R_s)$ 为气温、风速、太阳总辐射3个评价指标不同强度下同时发生的联合概率密度函数； r 为风速、太阳总辐射对气温的复相关系数。通过数据的线性回归计算，得出邯郸、邢台、石家庄、保定4个城市风速、太阳总辐射对气温的复相关系数分别为0.388、0.429、0.475和0.243，同时相对应的ANOVA方差分析回归系数分别为0、0、0和0.028，均小于显著性水平0.05，表明分析的线性模型是成

立的。

对于渠道冰情风险，总热量变化率与冰情的风险等级呈负相关关系，一般情况下总热量变化率越小，代表着其冰情的风险等级越高，风险性越大。图4为4个城市气温、风速、太阳总辐射3个评价指标共9638个工况组合计算得到的总热量变化率概率曲线。依据GB/T 27921—2011《风险管理 风险评估技术》，按照等级划分标准将总热量变化率划分为5个等级： $>7750 \text{ kJ/m}^2$ 为极低风险， $>2000 \sim 7750 \text{ kJ/m}^2$ 为低风险， $>-1000 \sim 2000 \text{ kJ/m}^2$ 为较高风险， $>-10500 \sim -1000 \text{ kJ/m}^2$ 为高风险， $\leq -10500 \text{ kJ/m}^2$ 为极高风险，与冰情风险等级相对应。

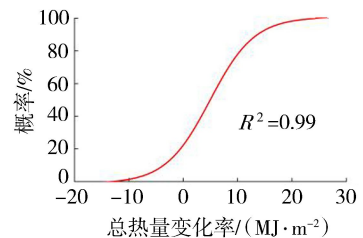


图4 输水渠道总热量变化率概率曲线

为了更好地将气象事件发生的可能性与风险性

相关联,根据 9 638 个工况组合绘制出不同渠段的总热量变化率-概率散点图,并对散点进行了曲线拟合,如图 5 所示。通过对该拟合曲线进行积分,可以求出不同渠段不同风险等级发生的概率,如表 3 所示。从表 3 可以看出风险等级为极高和高的发生概率很小,以风险等级为低和较高的发生概率为主。

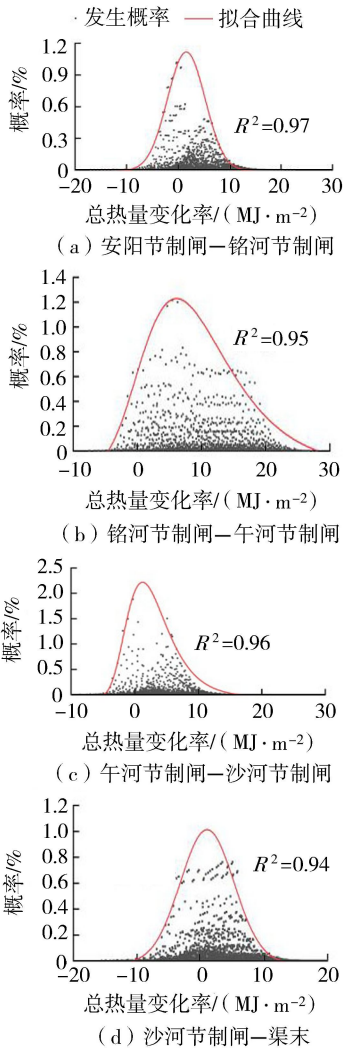


图 5 4 个渠段总热量变化率-概率散点图及其拟合曲线

表 3 4 个渠段不同冰情风险等级发生概率

渠段	不同冰情风险等级发生概率/%				
	极低	低	较高	高	极高
安阳节制闸—铭河节制闸	4.7	51.7	35.5	7.9	0.3
铭河节制闸—午河节制闸	50.3	38.4	10.0	1.3	0.0
午河节制闸—沙河节制闸	10.2	54.5	33.2	2.1	0.0
沙河节制闸—渠末	5.6	45.1	35.7	13.1	0.6

考虑气温、风速和太阳总辐射 3 个评价指标发生概率与冰情风险的内在联系,将 3 个评价指标也按照工程标准进行风险等级划分(表 4),并分析 4 个渠段处在极高和高风险冰情情况下,气温、风速和太阳总辐射 3 个评价指标所属的风险等级,结果如表 5 所示。从表 5 可以看出当渠道处在极高和高风险冰情时,气温和太阳总辐射都处在高风险以上,而风速

则处在较高风险以上。结合表 1 的敏感性分析结果,可能是因为风速变化越大,对热量变化的影响越小,而气温对于渠道冰情演变一直具有较大影响。

表 4 3 个评价指标的风险等级划分

风险等级	气温/℃	风速/(m·s ⁻¹)	太阳总辐射/(MJ·m ⁻²)
极低	>11.2	≤0.56	>12.50
低	>4.9 ~ 11.2	>0.56 ~ 1.96	>10.05 ~ 12.50
较高	>-1.4 ~ 4.9	>1.96 ~ 3.08	>9.45 ~ 10.05
高	>-6.3 ~ -1.4	>3.08 ~ 4.06	>8.10 ~ 9.45
极高	≤-6.3	>4.06	≤8.10

表 5 4 个渠段在极高和高风险冰情下 3 个评价指标的风险等级

渠段	评价指标风险等级		
	气温	风速	太阳总辐射
安阳节制闸—铭河节制闸	极高、高	较高及以上	极高
铭河节制闸—午河节制闸	极高、高	较高及以上	极高
午河节制闸—沙河节制闸	极高、高	极高、高	极高、高
沙河节制闸—渠末	极高	较高及以上	极高、高

4 实例分析

以 2021 年 1 月 6—8 日气象条件为基础,对南水北调中线工程河北段的冬季输水进行初步的风险分析。

4.1 整体风险分析

表 6 为 4 个渠段热量变化率及冰情风险等级计算结果。从表 6 可以看出,3 天中 4 个渠段的总热量变化率都是负值,说明渠段水体一直在散失热量,有发生冰情的潜在风险。沙河节制闸—渠末段的热量变化率最大,远大于其他 3 个渠段,说明该渠段的冰情风险最大。在整个热交换过程中,动力增热和净长波辐射占比很小,几乎可以忽略不计,而短波辐射、蒸发散热和对流散热明显占据主导地位,是影响热量变化的主要因素。

根据实际监测结果,1 月 6 日前渠道无流冰现象,自 7 日开始渠道出现表面流冰层,产生冰情,这可能是由于渠道受“拉尼娜”寒流影响发生强降温,渠道水体热量散失严重所致。从表 6 可以看出,6、7 日 4 个渠段的冰情风险等级基本都为高风险,而到了 8 日随着天气回暖,冰情风险等级也随之变小。但是,6 日和 8 日沙河节制闸—渠末段的总热量变化率明显高于其他渠段,以致风险等级为极高和高,其风险性高于其他渠段,因此应加强对该段的实时监测,采取相关冰情防护措施。

根据式(5)计算得出这 3 天的气象条件联合发生概率很小,这既体现了极端天气发生的可能性较小,又间接验证了表 3 中极高和高风险发生概率所占比例最小这一结论。结合表 5,可得出各评价指

表6 4个渠段热量变化率和风险分析结果

单位:kJ/m²

日期	渠段	$\sigma_{\text{短波}}$	$\sigma_{\text{长波}}$	$\sigma_{\text{动力}}$	$\sigma_{\text{蒸发}}$	$\sigma_{\text{对流}}$	$\sigma_{\text{总}}$	风险等级
01-06	安阳节制闸—铭河节制闸	+1227.13	-9.33	+126.68	-1218.26	-5418.00	-5291.80	高
	铭河节制闸—午河节制闸	+1766.49	-9.37	+90.89	-1521.35	-6842.82	-6516.16	高
	午河节制闸—沙河节制闸	+1430.01	-9.52	+93.95	-1330.63	-6253.96	-6070.14	高
	沙河节制闸—渠末	+1374.16	-10.82	+58.55	-1626.69	-10440.58	-10645.38	极高
01-07	安阳节制闸—铭河节制闸	+1265.53	-9.33	+126.68	-1008.69	-4485.96	-4111.78	高
	铭河节制闸—午河节制闸	+1822.55	-9.64	+90.89	-989.10	-4798.74	-3884.04	高
	午河节制闸—沙河节制闸	+1458.28	-8.80	+93.95	-1166.52	-4362.53	-3985.62	高
	沙河节制闸—渠末	+1430.01	-9.94	+58.55	-918.13	-4825.63	-4265.14	高
01-08	安阳节制闸—铭河节制闸	+1288.14	-7.32	+126.68	-989.10	-1749.54	-1331.13	高
	铭河节制闸—午河节制闸	+1878.60	-7.16	+90.89	-1029.02	-1612.13	-678.82	较高
	午河节制闸—沙河节制闸	+1514.13	-7.16	+93.95	-952.14	-1491.68	-842.90	较高
	沙河节制闸—渠末	+1401.75	-8.91	+58.55	-989.10	-3848.99	-3386.70	高

注:“+”代表吸收热量,“-”代表散失热量。

标风险等级与冰情风险等级的对应关系如表7所示。从表7可以看出7日各渠段气温和风速的风险等级基本属于较高风险以上,而太阳总辐射都属于极高风险。在太阳总辐射风险等级不变的情况下,虽然风速风险等级波动较大,但是各渠段的冰情风险等级都属于高风险,这也证明了气温影响冰情风险程度远超其他两个评价指标,与表1和表7结果一致。

表7 评价指标和冰情风险等级的对应关系

日期	渠段	气温风险等级	风速风险等级	辐射风险等级	冰情风险等级
01-06	安阳节制闸—铭河节制闸	极高	高	极高	高
	铭河节制闸—午河节制闸	极高	极高	极高	高
	午河节制闸—沙河节制闸	极高	高	极高	高
	沙河节制闸—渠末	极高	极高	极高	极高
01-07	安阳节制闸—铭河节制闸	极高	较高	极高	高
	铭河节制闸—午河节制闸	极高	极高	极高	高
	午河节制闸—沙河节制闸	极高	高	极高	高
	沙河节制闸—渠末	极高	较高	极高	高
01-08	安阳节制闸—铭河节制闸	高	较高	极高	高
	铭河节制闸—午河节制闸	高	较高	极高	较高
	午河节制闸—沙河节制闸	高	较高	极高	较高
	沙河节制闸—渠末	极高	较高	极高	高

由此可见,冬季平均气温越低、风速越大、太阳总辐射越小,则渠道水体散失热量也就越多,而冰情的风险等级也就越来越高,对渠道运行造成的危害也就越大。此外,通过对渠道风险分析可知,即使气温、风速和太阳总辐射3个评价指标中某个指标处于低风险等级,但渠道仍有发生高风险冰情的可能性,因此在实际管理中应时刻密切关注气象条件的动态变化。

4.2 热交换的时程变化分析

图6为4个渠段热交换量的时程变化曲线。从图6(a)可以看出冬季辐射热交换量基本在白天,光照时间在9~10h之间,在1:00左右达到热交换量最大值。由于这3天的气温和辐射变化幅度不大,因此短波辐射和净长波辐射的热交换量近似周期性

变化,如图6(a)(b)所示。从图6(c)可以看出蒸发散热变化趋势与风速日过程变化曲线相似,这是因为蒸发热交换量为风速函数。同时,从图6(c)(d)还可以发现夜间蒸发和对流热交换量较大,且没有辐射热交换,因此夜间渠道热量散失严重,极易出现流冰。为了进一步了解热交换量过程变化,绘制出各渠道总热交换量时程变化曲线和累积总热交换量时程变化曲线,如图7所示。

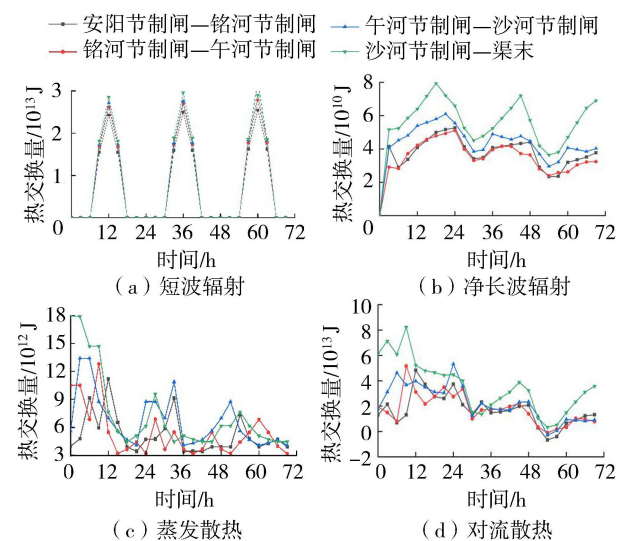


图6 4个渠段热交换量的时程变化曲线

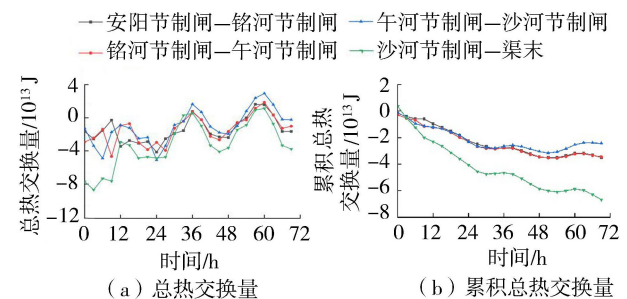


图7 4个渠段总热交换量和累积总热交换量时程变化曲线

从图7(a)可以看出,由于这3天天气条件逐渐变好,因此各渠段总热交换量时程变化趋势是波动向上的。同时可以看出中午和夜间是曲线的峰值,

热交换量达到极值。由图 7(b)可见,各渠段的累积总热交换量是逐渐变大的,这是因为在这 3 天总热交换量基本是负值,安阳节制闸—铭河节制闸、铭河节制闸—午河节制闸和午河节制闸—沙河节制闸这 3 段的累积总热交换量差别不大。对比图 7(a)(b),随着 8 日天气条件相对变好,热交换量由散失变为吸收,因此图 7 曲线的末端出现短暂的上升趋势。可见,在这 3 天中各渠段的冰情风险持续增大,必要时需采取相应的措施进行防护。

综上所述,气象条件是造成输水渠道冰情风险的主要因素,直接影响冰情风险等级。当冷空气来临时,各渠段冰情风险的可能性比平时要高;而沙河节制闸—渠末段发生冰情的敏感性和风险性比其他渠段要高,因此在正常防护过程中,应加大对沙河节制闸—渠末段的监测,并加强该渠段的防冰措施,以有效降低冰情风险。

5 结 语

通过对南水北调中线工程河北段冬季输水的冰情风险研究,发现短波辐射、蒸发散热和对流散热是影响热量变化的主要因素。在对冰情风险进行概率分析和风险评价时,不仅可以判断当下气象事件发生的可能性,而且还可以迅速识别出冰情的风险等级,并分析出气象事件发生概率与冰情风险等级的内在联系,从而为今后工程的冰情防治提供科学的决策依据。同时,针对实际输水工程,冰情风险评估是一个相对动态的过程,会随着运行工况和气象情况变化而变化。因此,面对动态化的风险评估,如何能够更迅速准确量化和测评冰情风险是今后需要深入研究的课题。

参考文献:

[1] 穆祥鹏,陈文学,郭晓晨,等. 高纬度地区渠道无冰盖输水的冰情控制研究[J]. 水利学报,2013,44(9):1071-1079. (MU Xiangpeng, CHEN Wenxue, GUO Xiaochen, et al. Study on long-distance water transfer channel with thermal insulation cover in winter[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2013,44(9):1071-1079. (in Chinese))

[2] 刘孟凯,邢领航,黄明海,等. 长距离渠系融冰期自动化控制模式研究[J]. 水利学报,2013,44(9):1080-1086. (LIU Mengkai, XING Linghang, HUANG Minghai, et al. An automatic operation mode for the long distance canal system in ice melting period [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2013,44(9):1080-1086. (in Chinese))

[3] 耿雷华,姜蓓蕾,付开文,等. 南水北调东线工程输水系统运行风险研究[J]. 人民黄河,2012,34(1):92-95. (GENG Leihua, JIANG Beilei, FU Kaiwen, et al. Risk analysis and assessment of the water conveyance system

operation in the East Route of South-to-North Water Transfer Project [J]. Yellow River, 2012, 34 (1) : 92-95. (in Chinese))

[4] 樊霖,茅泽育,齐文彪,等. 伊丹河输水河道封冻期冰情演变数值模拟[J]. 水利水电科技进展,2017,37(6):14-18. (FAN Lin, MAO Zeyu, QI Wenbiao, et al. Numerical simulation of river-ice processes in a water-transfer river of Yidan River during freezing period [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37 (6) : 14-18. (in Chinese))

[5] SHEN H T. Mathematical modeling of river ice processes [J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, 62 (1) : 3-13.

[6] WANG Shuangming, DOERING J C. Numerical simulation of supercooling process and frazil ice evolution [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 131 (10) : 889-897.

[7] 宗全利,郑铁刚,吴素杰,等. 高寒区引水渠道抽水融冰不冻长度计算模型及应用[J]. 农业工程学报,2018,34(10):99-106. (ZONG Quanli, ZHENG Tiegang, WU Sujie, et al. Calculated model and application of ice-free length of diversion channel for pumping well water to melt ice at high altitude and cold regions [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34 (10) : 99-106. (in Chinese))

[8] 唐伟. 循环利用地热能冰期输水技术研究 [D]. 济南: 济南大学, 2019.

[9] 蒋水华,黄中发,甘小艳,等. 堤防工程设计—施工—运营全过程风险评估与管理框架[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40 (2) : 42-49. (JIANG Shuihua, HUANG Zhongfa, GAN Xiaoyan, et al. Risk assessment and management framework for dike engineering during whole process of design-construction-operation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40 (2) : 42-49. (in Chinese))

[10] 梁圣辰,张健,贺蔚,等. 长距离输水系统串联多阻抗调压室的水锤防护效果[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49 (2) : 170-175. (LIANG Shengchen, ZHANG Jian, HE Wei, et al. Water hammer protection effect of series throttled surge chambers in long-distance water conveyance system [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49 (2) : 170-175. (in Chinese))

[11] 张贵金,罗舸旋子,朱博渊,等. 极端条件下堆石坝溃坝风险及应急预案[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41 (2) : 28-35. (ZHANG Guijin, LUO Gexuanzi, ZHU Boyuan, et al. Dam-break risk and emergency plan of a rockfill dam under extreme conditions [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41 (2) : 28-35. (in Chinese))

[12] 张社荣,尚超,王超. 基于 IAHP 扩展 TOPSIS 法引水隧洞实时风险识别[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41 (4) : 15-20. (ZHANG Sherong, SHANG Chao, WANG Chao. Real-time safety risk identification of water diversion

- tunnel based on IAHP and extended TOPSIS methods[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2021, 41(4):15-20. (in Chinese)
- [13] 郭金,顾冲时,何菁. 基于组合赋权二维云模型的堤防工程风险评价[J]. *水利水电科技进展*, 2022, 42(6):117-122. (GUO Jin, GU Chongshi, HE Jing. Risk assessment for levee engineering based on a two-dimensional cloud model with combination weighting[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2022, 42(6):117-122. (in Chinese))
- [14] 吉莉. 基于 FMEA 的南水北调中线输水干渠运行风险预警研究[D]. 郑州:华北水利水电大学, 2021.
- [15] 吴岚. 基于突变理论的凌汛灾害风险评价与灾情评估[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2019.
- [16] 练继建,郑杨,司春棣. 输水建筑物安全运行的模糊综合评价[J]. *水利水电技术*, 2007, 38(3):62-64. (LIAN Jijian, ZHENG Yang, SI Chundi. Fuzzy comprehensive evaluation on safe operation of water conveyance structures [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2007, 38(3):62-64. (in Chinese))
- [17] 姜蓓蕾,刘恒,耿雷华,等. 层次分解法在南水北调东线工程风险因子识别中的运用[J]. *水利水电技术*, 2009, 40(3):65-67. (JIANG Beilei, LIU Heng, GENG Leihua, et al. Application of hierarchic decomposition approach to identification of risk factors for East Route of South-to-North Water Transfer Project [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2009, 40(3):65-67. (in Chinese))
- [18] LIU Mengkai, DONG Xiaoxia, GUO Hui. Risk assessment of ice dams for water diversion projects based on fuzzy fault trees[J]. *Applied Water Science*, 2021, 11(2):11-23.
- [19] 胡丹,郑良,李硕,等. 南水北调中线明渠工程运行风险评价方法研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2013, 11(6):98-101. (HU Dan, ZHENG Liang, LI Shuo, et al. Study on the risk evaluation method for the open channel operation in the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2013, 11(6):98-101. (in Chinese))
- [20] 刘勇,刘建民,张建设. 长距离输水工程风险分析研究[J]. *水利水电技术*, 2005, 36(4):114-116. (LIU Yong, LIU Jianmin, ZHANG Jianshe. Risk analysis on long-distance water diversion project[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2005, 36(4):114-116. (in Chinese))
- [21] 白涛,李磊,黄强,等. 西江流域压咸风险调度及其时空传递规律研究[J]. *水力发电学报*, 2021, 40(10):71-80. (BAI Tao, LI Lei, HUANG Qiang, et al. Risk operation of inhibiting salt tide invasion and its space-time transmission in Xijiang Watershed [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2021, 40(10):71-80. (in Chinese))
- [22] 陈艳秋,袁子鹏,盛永,等. 基于概率分析的暴雨事件快速评估模型[J]. *气象与环境学报*, 2006, 22(5):62-65. (CHEN Yanqiu, YUAN Zipeng, SHENG Yong, et al. A rapid assessment model of torrential rain event based on probability analysis [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2006, 22(5):62-65. (in Chinese))
- [23] JAMSHIDI A, YAZDANI-CHAMZINI A, YAKHCHALI S H, et al. Developing a new fuzzy inference system for pipeline risk assessment[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2013, 26(1):197-208.
- [24] 王磊之,崔婷婷,李笑天,等. 降水变化条件下沿海地区暴雨-潮位遭遇联合风险[J]. *水资源保护*, 2022, 38(4):110-116. (WANG Leizhi, CUI Tingting, LI Xiaotian, et al. Joint risks of rainstorm and tidal level under varying precipitation conditions in coastal areas [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(4):110-116. (in Chinese))
- [25] 刘强,汤爱平. 基于概率分析的公路系统灾害风险研究[J]. *西南交通大学学报*, 2021, 56(6):1268-1274. (LIU Qiang, TANG Aiping. Highway system disaster risk based on probability analysis [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2021, 56(6):1268-1274. (in Chinese))
- [26] 吴柳萍,纪志荣,连素兰,等. 福建省森林病虫害发生风险的概率分析[J]. *森林与环境学报*, 2017, 37(1):95-101. (WU Liuping, JI Zhirong, LIAN Sulan, et al. Probability analysis of forest pests occurring risk in Fujian Province [J]. *Journal of Forest and Environment*, 2017, 37(1):95-101. (in Chinese))
- [27] 陈伏龙,张鑫厚,冯平,等. 基于非一致融雪洪水的水库漫坝模糊风险分析[J]. *水力发电学报*, 2018, 37(12):22-32. (CHEN Fulong, ZHANG Xinhou, FENG Ping, et al. Fuzzy risk analysis of dam overtopping under inconsistent snowmelt floods [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2018, 37(12):22-32. (in Chinese))
- [28] LI Huimin, JI Li, LI Feng, et al. Operational safety risk assessment for the water channels of the South-to-North Water Diversion Project based on TODIM-FMEA [J]. *Complexity*, 2020, 3:6691764.
- [29] 吴延徽,吴毅,侯再红,等. 合肥地区大气风速风向联合概率密度函数研究[J]. *大气与环境光学学报*, 2012, 7(5):327-332. (WU Yanhui, WU Yi, HOU Zaihong, et al. Joint probability density function varying with wind speed and direction in Hefei area [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2012, 7(5):327-332. (in Chinese))
- [30] 蔺文慧,宋松柏. 基于混合 Copula 函数的洪水联合概率计算方法[J]. *水力发电学报*, 2021, 40(12):40-51. (LIN Wenhui, SONG Songbai. Calculation method of joint probability for flood based on mixed Copula function [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2021, 40(12):40-51. (in Chinese))

(收稿日期:2022-05-07 编辑:熊水斌)

四川省水电开发基地水电开发程度评估

罗涵^{1,2}, 巨莉³, 罗茂盛³, 唐云逸⁴, 黄艳艳^{1,2}, 赵曦琳⁵, 卢喜平³

(1. 成都信息工程大学软件工程学院, 四川 成都 610225;

2. 四川省信息化应用支撑软件工程技术研究中心, 四川 成都 610225; 3. 四川省水利科学研究院, 四川 成都 610072;
4. 四川省水土保持生态环境监测总站, 四川 成都 610041; 5. 成都理工大学生态环境学院, 四川 成都 610059)

摘要:以四川省雅砻江流域和大渡河流域两个重要水电开发基地为例,采用水利水电统计数据,在流域分割的基础上,结合上下游空间关系和流域水电开发指标总体水平,利用空间自相关分析方法,构建了水电开发程度综合评估体系;基于流域水电开发规划情况、土壤侵蚀、地质灾害、水质监测和鱼类资源等数据,分析评估了不同水电开发程度对流域生态环境的影响。结果表明:水电开发密度、水电开发强度等指标具有明显的空间异质性和局部聚集性,其中水电开发强度、流域装机容量与流域库区的土地利用类型变化呈现显著的相关性;不同水电开发程度等级的水电开发指标呈现显著的差异性,证明了该水电开发程度综合评估体系的合理性。

关键词:水电开发程度;评估体系;生态环境;流域管理;雅砻江流域;大渡河流域

中图分类号:TV213.4

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2023)01-0071-10

Hydropower development degree evaluation of Sichuan hydropower development base//LUO Han^{1,2}, JU Li³, LUO Maosheng³, TANG Yunyi⁴, HUANG Yanyan^{1,2}, ZHAO Xilin⁵, LU Xiping³ (1. School of Software Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Sichuan Province Informatization Application Support Software Engineering Technology Research Center, Chengdu 610225, China; 3. Sichuan Research Institute of Water Conservancy, Chengdu 610072, China; 4. Soil and Water Conservation Monitoring Station of Sichuan Province, Chengdu 610041, China; 5. College of Ecology and Environment, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The two important hydropower development bases in Sichuan, the Yalong River Basin and Dadu River Basin, were taken as examples to construct a comprehensive evaluation system for the degree of hydropower development, in which the spatial cluster analysis method was adopted using the statistical data of water resources and hydropower. The spatial relations between upstream and downstream and the overall level of watershed hydropower development indicators were combined based on watershed segmentation. The impacts of different hydropower development degree on ecological environment were analyzed considering the data of development plans, soil erosion, geological hazards, water quality monitoring and fishery resources. The results show that the spatial heterogeneity and local agglomeration of indicators, such as hydropower development density and hydropower development intensity, are obvious. The hydropower development intensity and the total installed capacity of the basin show a significant correlation with the change of the land use type in the reservoir area. The hydropower development indicators of different grades also show significant differences, indicating the rationality of comprehensive evaluation system for hydropower development.

Key words: hydropower development degree; evaluation system; ecological environment; watershed management; Yalong River Basin; Dadu River Basin

水电开发是实现节能减排战略、保障能源安全的重要举措之一^[1]。水电工程的建设和运行会改变河流和陆地生态系统的结构和功能,从而引发各种生态环境效应^[2]。目前围绕水电开发生态环境效应与保护问题已经开展了大量且深入的研究,但

随着水电开发向河流上游,尤其是向西南山区等生态脆弱区发展,新的挑战不断出现;已建水电工程随着运行时间增长,生态环境累积效应和前期未知生态环境问题逐步凸显^[3]。在此背景下,利用易获取的数据定量评估水电开发程度是很有必要的。

基金项目:四川省科技计划项目(2020YFS0032);成都水生态文明建设研究重点基地资助项目(SST2019-2020-17);成都信息工程大学科研基金(KYTZ202162);四川省信息化应用支撑软件工程技术研究中心开放课题(2021RJGC-Y02,2021RJGC-Y03)

作者简介:罗涵(1988—),女,讲师,博士,主要从事生态环境遥感监测和空间数据挖掘研究。E-mail:luohan@cuit.edu.cn

通信作者:巨莉(1985—),女,高级工程师,博士,主要从事水土保持与生态环境研究。E-mail:juli_scsllkx@126.com

装机容量、年发电量以及库容等指标常被用于不同空间尺度(区域、流域、库区等)的水电开发特点分析^[4]、水能资源评估^[1,5]、水电开发潜力估算^[6-8]以及水电产业发展水平评价^[9-10]等研究。但水电开发产生的生态环境效应评估鲜少采用这些指标,更多采用流域径流量^[11-12]、生境格局^[13-15]、生源物质^[3]、植被指数^[16-17]、水生生物种群结构^[15,18-19]等生境、生物相关指数。近年来,部分研究开始从生态系统服务角度^[20-21]评估水电开发对河流和陆地生态系统的影响。这些指标通常难以剔除气候变化、农业活动或城镇化等因素的影响^[12]。此外,径流量、水生生物种群结构、流域水质等指标通常为点状采样数据,难以体现空间异质性且相对较难获取,增加了对区域尺度下水电开发对生态环境影响进行定量建模的难度。此外,量化表述上下游的相互影响关系以及梯级水库建设运行对生态系统的累积影响也是评估水电开发对生态环境影响的关键^[3,22-23]。目前大多数研究^[24-26]从生境、生物相关指数的时空分布、变化与演替等角度,探讨上游水电开发对下游生态环境的影响和梯级水库的累积生态效应。因此,利用易获取的水利统计数据 and 自然环境数据,基于流域尺度,构建水电开发程度指标,对水电开发程度进行综合的定量评估,有助于水利工程对生态环境影响的模型构建、生态环境调控措施优化等相关研究的开展。

四川省水能资源丰富,全省水能资源理论蕴藏量1.43亿kW,仅次于西藏,技术可开发量1.03亿kW,经济可开发量7611.2万kW,均居全国首位^[27]。其中,位于四川省境内的雅砻江和大渡河流域(以下简称两江流域)水能资源约占全省的二分之一,属于我国十三大水电开发基地之一。经历了20多年的规划和建设,两江流域的水电工程为西部大开发和西电东送能源战略作出了巨大贡献^[28],但流域内还有许多电站处于未建和规划状态,并且多集中在生态脆弱的流域上游。已有研究发现,两江流域的水电工程开发对鱼类种群^[29]、水质^[30-31]等产生了重要影响。因此,综合评估两江流域水电开发程度,对管理水电工程的建设、降低水电开发对生态环境的影响具有重大意义。

本文收集了四川省两江流域的水利水电相关统计数据,考虑上游和下游、支流和干流的空间关系,选取易操作且合理的综合性水电开发程度指标,并利用差异性和相关性分析验证指标的合理性,结合流域地质灾害、水土流失等生态环境问题,分析未来的水电工程建设和运行中,水电开发对流域生态环境的潜在影响,以期对流域的生态环境保护措施制

定提供辅助信息和决策依据。

1 研究区概况

两江流域位于长江上游,介于东经97°21'~105°21'、北纬26°01'~34°08'之间,总面积约20万km²(图1)。流域地形复杂,海拔高差明显,包含川西北高原、横断山脉、四川盆地等多个地理单元。

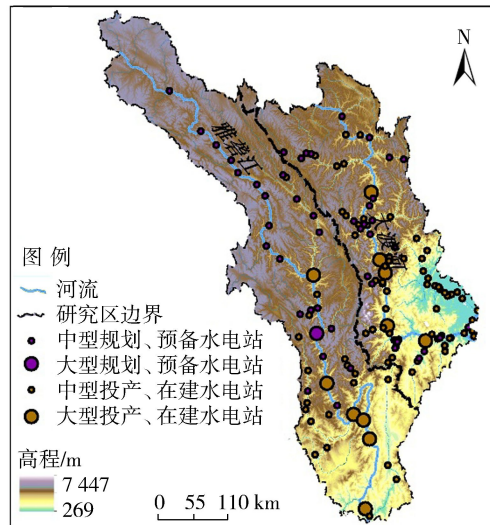


图1 研究区域概况

两江流域内支流密布,雅砻江较大的支流有鲜水河、理塘河、安宁河等,大渡河较大的支流有绰斯甲河、梭磨河、小金川、尼日河、青衣江等,两江均流经甘孜、凉山两州,最终雅砻江于攀枝花市东区注入金沙江,大渡河在乐山市汇入岷江。两江流域鱼类资源丰富,据调查统计,雅砻江共有鱼类75种^[32-33],大渡河共有鱼类116种,隶属8目19科77属^[34]。其中,大渡河流域分布有国家Ⅱ级保护鱼类2种,省级保护鱼类11种,长江上游特有鱼类38种,经济鱼类63种^[35]。

雅砻江和大渡河流域均是重要的水电开发基地,已建大型水电站均集中在两江流域下游(图1)。雅砻江干流和一级支流已建、在建和规划中型以上电站共计48座,其中,规划23座梯级水电站,装机容量2560万kW。大渡河干流和一级支流已建、在建和规划中型以上电站共计89座,其中,规划28座梯级水电站,装机容量2170万kW。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

以两江流域的干流和一级支流的水电站为对象,基于全球大坝地理数据库^[36],结合流域内各类规划报告等资料,收集整理研究区内已建、在建、规划、预备的大中型(装机容量大于5万kW)水电站的经纬度信息、隶属流域、工程状态、装机容量、年发

电量和正常蓄水位等信息。

数字高程数据采用 30 m 空间分辨率的 ASTER GDEM, 本文选用的是 ASTER GDEM V2 版, 数据下载于国家科学数据服务平台 (<http://datamirror.csdb.cn/>)。土壤侵蚀强度数据是基于 2019 年基础地理数据并参照《水土保持监测技术规程》计算获得。土地利用/覆盖情况采用 2020 年和 2005 年数据, 空间分辨率为 1km; 地质灾害点空间分布数据为 2019 年数据, 均下载自中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>)。流域水环境相关数据通过整理近期相关文献和报告中水质监测指标和鱼类资源数据, 最终获得 2020 年 9 月采样的大渡河干流 20 个水质监测断面的 7 个水质监测指标(包括氨氮、氟化物、化学需氧量、总磷、粪大肠菌群、高锰酸钾指数和五日生化需氧量)^[31]和 2004—2019 年间 19 个水电站鱼类资源分布的数据^[34-35, 37], 采用 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》和《地表水环境质量评价办法》进行评价。

2.2 研究方法

2.2.1 子流域划分

在 ArcGIS 中的水文模块中, 在尽可能保证两江干流和主要子流域的完整性的基础上, 基于上一级子流域结果, 结合单元内人类活动和自然生态条件对水文过程的截断影响, 将一级子流域单元再划分为二级子流域。最终共计 73 个子流域(图 2), 其中面积最大为 7057 km², 面积最小为 910 km²。

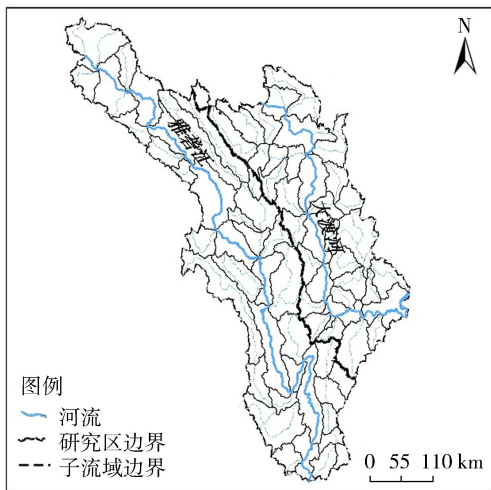


图 2 研究区子流域划分

2.2.2 水电开发指标

水电开发程度主要基于装机容量和年发电量计算^[3]。依据装机容量计算水电开发程度具有简便易行的优点, 但很难准确反映水电开发实际情况^[38]。依据年发电量计算水电开发程度能较科学地反映水能的实际利用率, 但年发电量数据具有不易获取、易受河流水量变化影响的特点^[39]。本文参

考文献[4, 40], 引入水电开发密度、水电开发强度指标, 用于综合量化流域的水电开发程度。流域水电开发密度表示单位长度(100 km)河段的水电站个数, 流域水电开发强度表示单位面积内的水电装机容量。

2.2.3 统计分析方法

为了揭示水电开发指标的空间聚集特性, 基于流域干流和支流、上游和下游的关系, 采用 R 软件和 ArcGIS 软件构建空间权重矩阵以及空间自相关理论, 对水电开发程度进行集聚性分析:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \right) \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (1)$$

$$I_i = \frac{(X_i - \bar{X})(n-1)}{\sum_{j=1, j \neq i}^n (X_j - \bar{X})^2} \sum_{j=1}^n w_{ij} (X_i - \bar{X}) \quad (2)$$

$$Z_{I_i} = \frac{I_i - E(I_i)}{\sqrt{V(I_i)}} \quad (3)$$

式中: I 为全局莫兰指数, 取值范围为 $[-1, 1]$, 当 $I > 0$, 即空间相关性为正向, 且越接近 1, 空间差异越显著, 当 $I < 0$, 则与之相反, 当 $I = 0$, 无空间相关性; n 为子流域个数; w_{ij} 为各流域之间的空间权重, 表示研究区子流域间的空间关系, 采用 Queen 权重定义, 即流域有公共边或者公共点, 则判断两个流域间存在空间联系; X_i 为第 i 个流域的属性值; X_j 为第 j 个流域的属性值; \bar{X} 为 n 个二级子流域水电开发程度指标的平均值; I_i 为局部莫兰指数; Z_{I_i} 为统计数据量; $E(I_i)$ 为 I_i 的均值; $V(I_i)$ 为 I_i 的方差。采用随机化计算 p 值, 当 $p < 0.05$ 且 $Z_{I_i} > 1.96$ 时, 表示存在局部正相关; 当 $p < 0.05$ 且 $Z_{I_i} < -1.96$ 时, 存在局部负相关, 结合 I_i , 判断流域单元为高值聚集区(HH)、低值聚集区(LL)、高低值区(HL)、低高值区(LH)和非显著区域^[41]。

采用皮尔逊相关系数检验水电开发单个指标与水库土地类型变化比例的相关性, 验证单一水电开发指标在评估水电开发生态环境影响的效果; 利用 Kruskal-Wallis H 检验(对秩次的单因素方差分析)和综合评估结果的效果检验不同水电开发程度子流域的水电开发指标是否存在差异。

3 结果与分析

3.1 水电开发指标空间分异性

研究区内已建和在建中型和大型水电站共计 88 座, 分布在 43 个子流域。大渡河流域的水电站数量、装机容量、水电开发密度和开发强度都大于雅

砦江。

各子流域的已建和在建的水电站数量和装机容量见表1和图3(a)(b)。已建和在建水电站主要分布在大渡河下游,包括下游干流(16座)和支流青衣江(16座)、南桠河(3座)、金汤河(3座)、革斯扎河(3座)、田湾沟(3座);雅砦江的已建水电站主要分布在支流九龙河(4座)和木里河(3座)。大型水电站主要集中在雅砦江的下游干流和大渡河的中下游干流。

表1 研究区水电开发指标统计

流域	干支流	小流域数量/个	水电站数量/座	装机容量/万kW	开发密度/座	开发强度/(kW·km ⁻²)
大渡河	干流	7	22	1747	0.61	1108
	支流	27	41	550	0.96	110
雅砦江	干流	11	9	1881	0.26	869
	支流	28	16	197	0.19	33

流域水电开发密度和开发强度见表1和图3(c)(d)。开发密度、水电开发强度空间分布基本与水电站数量、装机容量一致,但水电开发密度和开发强度的空间异质性大于水电站数量和装机容量,尤其是在两江流域的中上游。大渡河流域支流(0.88座)的水电开发密度高于干流(0.62座),且分布较零散,主要分布在中下游支流,金汤河、青衣江、革斯扎河、瓦斯沟和官庙河;雅砦江干流和支流的水电开发密度差异不大,分布较集中,主要集中在木里河、九龙河、卧罗河以及干流的中下游。开发强度较大的区域主要集中在雅砦江和大渡河的中下游干流(干流开发强度分别为869kW/km²和1108kW/km²)以及雅砦江的支流木里河和大渡河的支流南桠河。

3.2 水电开发指标空间集聚性

为探索各开发程度指标的空间集聚效应,基于流域上下游和干流支流的邻接关系,利用R软件建立空间关系矩阵和空间权重,通过全局和局部空间自相关分析揭示水电开发程度指标的空间分布集聚

性特征。由全局空间自相关分析结果(表2)可知,全局莫兰指数均大于0,水电开发程度指标均存在正向空间集聚性。其中水电站数量和开发密度均呈现显著的正向空间集聚性,即如果某一个子流域的水电开发程度较高,则该子流域相邻的上下游流域通常也具有较高的水电开发程度。

表2 全局空间自相关分析结果

指标	Z	p	全局莫兰指数
水电站数量	5.16	0.00	0.35
装机容量	1.29	0.10	0.08
开发密度	2.95	0.00	0.20
开发强度	0.18	0.43	0.00

为探讨各指标的空间相关性类型及分布状态,进行局部空间自相关分析,获得显著性水平图(图4)。从局部相关性的角度分析,水电站数量高值集聚区集中在大渡河下游干流和支流青衣江、尼日河和官渡河,低高值区集中在大渡河中游支流;水电开发密度的空间集聚性与水电站数量的空间分布基本一致;装机容量的高值集聚区主要分布在雅砦江中下游干流(锦屏水电站段)和支流九龙河,低高值区分布在两江流域中下游的各支流(卧罗河、安宁河、安顺河、田螺沟、流沙河和青衣江);水电开发强度的高值集聚区位于雅砦江中游干流(卧罗河以上)、雅砦江支流霍曲和大渡河支流青衣江流域;4个指标的低值集聚区均分布在雅砦江上游。

3.3 水电开发程度划分

通过上述分析,可以看出水电站数量、装机容量、开发密度和开发强度空间分布基本一致,但局部存在差异。基于单一指标的水电开发程度评估容易忽视个别子流域的水电开发综合情况,结合4个指标及其空间集聚性特征建立水电开发程度综合评估体系(详见表3):以流域内是否有在建或已建水电站作为水电工程开发区和水电工程影响区的分类因子;基于空间自相关分析结果,将高值集聚区和高低值区作为开发影响程度重要因子,将低高值区作为

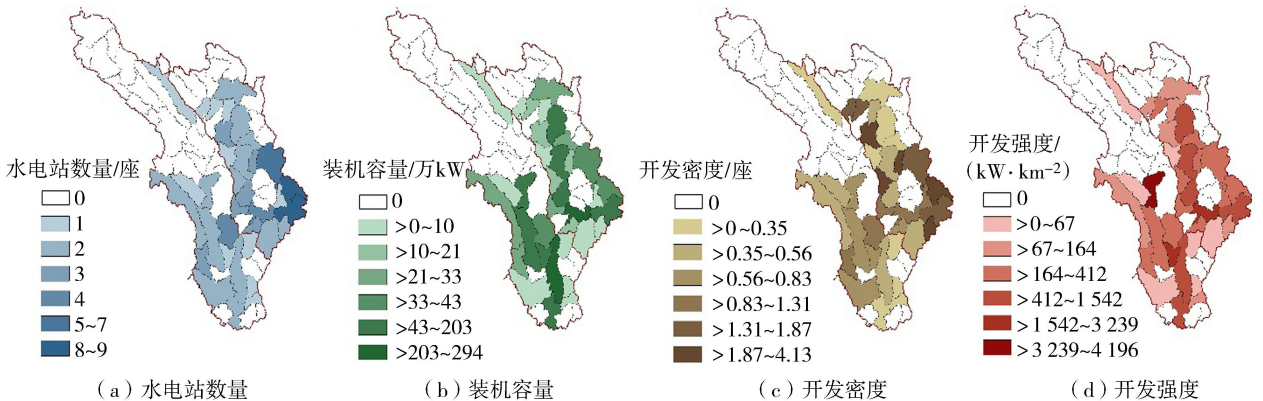


图3 研究区子流域水电开发指标空间分布

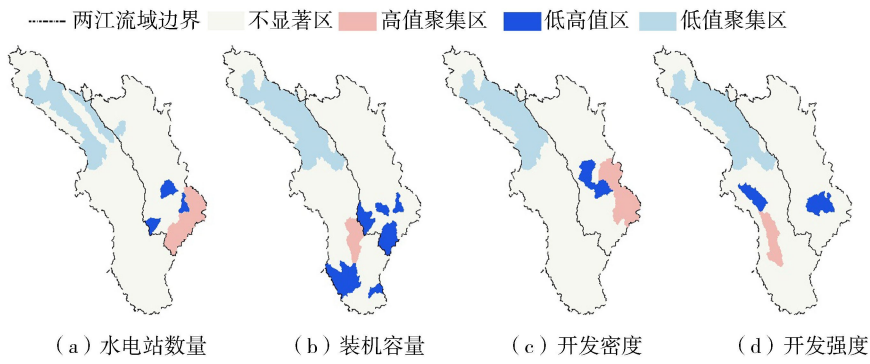


图4 研究区水电开发指标局部自相关显著性分析

表3 水电开发程度划分体系

划分标准	开发区				影响区	
	极高	高	中	低	高	低
有已建或在建水电站	是	是	是	是	是	否
包含高值聚集区或高低值区	是	否	否	否	否	否
包含低高值区		是	否	是	是	
水电开发指标高于中位数	是	是	是	否	否	否
水电开发指标高于三四分位数	是	是	否	否	否	否

次要影响因子;为防止个别流域的单一开发指标过高被忽略,将水电开发指标高于三四分位数和中位数的指标也作为开发影响程度因子,即样本中数值由小到大排列后第75%和50%的数。最终获得两江流域综合水电开发程度空间分布图(图5)和统计表(表4)。

水电工程开发区分为极高、高、中、低4个程度,水电工程影响区分为高和低两个程度,共计6个程度。其中,水电工程开发区按照流域水电站装机容量

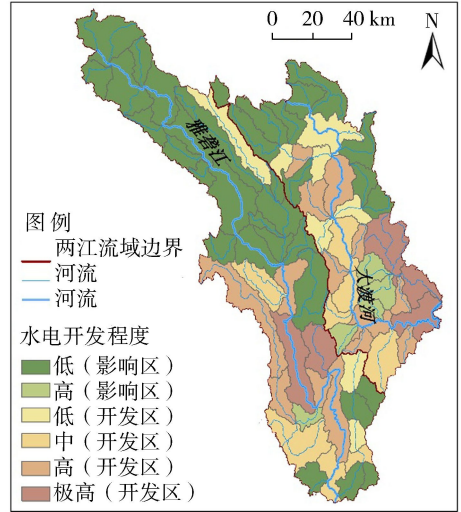


图5 研究区水电开发程度空间分布

量、水电站数量、水电开发密度、水电开发强度以及聚集性等指标从高到低排列;水电工程高程度影响区定义为无已建和在建水电工程,位于水电开发高

表4 研究区不同水电开发程度相关指标统计

流域	干支流	开发程度	开发密度/座	开发强度/ (kW · km ⁻²)	装机容量/万 kW	水电站数量/座	小流域数量/个
大渡河	干流	低(影响区)	0	0	0	0	1
		低(开发区)	0.28	142	60	2	1
		中(开发区)	0.41	994	518	5	2
		高(开发区)	0.70	2319	818	6	2
		极高(开发区)	1.76	987	351	9	1
大渡河	支流	低(影响区)	0	0	0	0	8
		高(影响区)	0	0	0	0	4
		低(开发区)	0.61	107	68	5	4
		中(开发区)	0.76	159	57	5	2
		高(开发区)	2.33	248	242	15	7
大渡河	支流	极高(开发区)	2.78	247	184	16	2
		低(影响区)	0	0	0	0	6
		中(开发区)	0.26	1542	390	2	1
		高(开发区)	0.60	2552	1187	5	3
		极高(开发区)	0.74	365	210	2	1
雅砻江	干流	低(影响区)	0	0	0	0	18
		高(影响区)	0	0	0	0	1
		低(开发区)	0.29	34	21	3	3
		中(开发区)	0.53	68	49	4	3
		高(开发区)	0.86	172	127	5	2
雅砻江	支流	极高(开发区)	1.08	261	94	4	1

值聚集区上下游的流域,属于受到其他流域水电开发影响的区域。

雅砻江流域的水电开发程度在上下游呈现较显著的差异性和局部的聚集性。雅砻江流域上游(庆达河和鲜水河汇入口以上)流域基本属于低程度影响区,除鲜水河上游有少量已建水电站,属于低程度开发区;雅砻江中下游开发程度明显强于上游,其中极高和高程度开发区主要集中在两河口以下的干流和支流木里河、九龙河;中程度开发区主要为支流霍曲、卧罗河、安宁河部分区域,以及下游干流。

相较于雅砻江流域,大渡河流域水电开发程度的空间差异性更明显。大渡河流域极高程度开发区集中在干流下游和支流青衣江的干流区域;高程度开发区分布在极高程度开发区域的上游以及支流金汤河、瓦斯沟、革斯扎河、绰斯甲河等区域;中程度开发区主要分布在支流尼日河和田湾沟,以及东谷河以下田湾沟以上的干流区域。相较于雅砻江流域,大渡河流域的低程度影响区较少,主要分布在上游的各支流。

4 讨论

4.1 水电开发程度综合评估体系适用性验证

4.1.1 单一指标的验证

土地利用类型的时空变化能够直接反映水电开发的生态环境影响^[15]。两江流域的水电工程于2005年左右开始动工,调查发现,从2005年到2020年,水库面积从900 km²(占总面积的8%)上升到1150 km²(占总面积的10%)。结合2005年和2020年土地利用转移矩阵的结果,发现有24%的水库区域由耕地转化而来,其次为林地(19%)、草地(16%)和城镇居民用地(1%)。

两江流域内73个子流域水库面积变化的比例与开发强度的相关系数为0.39,呈极显著相关性($p < 0.01$),与装机容量的相关系数为0.41($p < 0.01$),与开发密度的相关系数为0.03($p = 0.8$),与水电站数量的相关系数为0.1($p = 0.42$)。通常,水电站库容、装机容量越大,受影响的土地面积越大。分析发现水电开发强度、装机容量与大型水电站建设和影响范围显著相关,证明流域装机容量和开发强度能较好地反映大型水电站对陆地生态系统的影响。

水电开发密度和水电站数量能辅助反映水电站对河流生态系统的影响。Yun等^[42]通过VIC水文模型发现水电站数量与流域径流有显著相关性。陈求稳等^[3]发现水电工程通过拦截改变河流自然水文情势,影响关键生源要素循环、河流底栖动物群落结构及分布以及鱼类的洄游。过密的水电工程开发

必然会对水生态环境造成影响。此外,水电开发密度和水电数量、水电开发强度和装机容量具有空间一致性,也存在局部的空间差异性。因此,融合4个指标构建水电开发程度综合评估体系能有效凸显水电工程开发的各类生态环境影响。

4.1.2 水电开发程度结果的差异性检验

为了进一步说明该综合评估体系的合理性,通过Kruskal-Wallis H检验,发现装机容量、水电站数量、水电开发密度和水电开发强度在开发区的4个水电开发程度中呈现显著的差异性($p < 0.05$),证明在水电开发区,各项指标的差异性明显。

通过单一的水电开发指标,无法对水电开发影响区进行程度划分。采用空间聚集性的统计分析结果进行划分,能有效地考虑水电开发过程中流域之间的累积生态环境影响。

4.2 基于不同水电开发程度的流域管理建议

4.2.1 流域水电开发建设管理

根据统计的已建、在建、规划和预备的水电工程情况,分析两江流域的水电开发规划建设情况(表5)。大渡河的已建、在建水电工程规模占比略高于雅砻江,其中干流已建、在建规模占比明显高于支流,下一步两江流域的水电工程建设将由大渡河转移到雅砻江,由流域的下游向中上游转移,尤其是雅砻江的中上游干流。

表5 两江流域水电开发规划情况

流域	干支流	规划装机容量/万kW	已建、在建规模占比/%	开发密度变化/座	开发强度变化/(kW·km ⁻²)
大渡河	干流	2170	81	0.29	254
	支流	717	77	0.36	35
雅砻江	干流	2560	73	0.64	174
	支流	396	50	0.10	9

结合现阶段的水电开发程度划分结果,分析未来水电工程建设和规划情况(表6)。雅砻江干流的极高程度开发区和低程度影响区都是下一步水电开发的重点区域,水电开发强度和水电开发密度均明显增加。雅砻江干流的高程度开发区和大渡河流域干流的高程度开发区,水电开发强度增长幅度较大。大渡河支流的高程度开发区、低程度开发区和中程度开发区,开发密度提升明显。以上区域都属于未来的重点工程开发区,接下来的水利工程建设中,都应考虑结合已建水电工程的情况,注意降低工程对生态环境的影响。

在水电工程建设过程中,地表扰动会造成水土流失,不同水电开发程度的水土流失面积比例见表6。两江流域的水土流失面积比例最高的为大渡河干流的极高程度开发区和雅砻江干流的中程度开发区,其次为大渡河支流中程度开发区、高程度影响

表6 两江流域干流与支流不同水电开发程度的情况统计

流域干支流	开发程度	水土流失面积比例/%	地质灾害点数量/个	开发密度/度/座	开发强度/(kW·km ⁻²)		
大渡河	干流	低(影响区)	2.20	0	0	0	
		低(开发区)	2.27	43	0.28	190	
		中(开发区)	28.03	170	0.10	72	
		高(开发区)	19.45	626	0.51	713	
	极高(开发区)	38.02	205	0.39	79		
	支流	低(影响区)	7.06	360	0.27	13	
		高(影响区)	35.18	639	0	0	
		低(开发区)	9.86	280	0.45	114	
		中(开发区)	34.43	169	0.28	14	
		高(开发区)	24.39	338	0.83	61	
		极高(开发区)	22.89	1219	0	0	
		雅砻江	干流	低(影响区)	7.77	178	0.71
中(开发区)				37.89	126	0	0
高(开发区)	25.33			247	0.12	462	
极高(开发区)	25.66			43	1.11	593	
支流	低(影响区)		15.92	621	0.08	6	
	高(影响区)		14.93	41	0	0	
	低(开发区)		17.11	131	0.06	5	
	中(开发区)		19.93	193	0.28	16	
	高(开发区)		19.32	37	0.12	17	
	极高(开发区)		31.85	56	0.27	45	

区、雅砻江支流的极高程度开发区和大渡河干流的中程度开发区。在以上区域接下来的水电开发工作需要更加注意水电开发过程中的水土保持措施,尽可能减小水电工程对陆地和河流生态系统的扰动。此外,大渡河支流中程度开发区属于规划的水电工程建设重点区域,在该区域中的工程建设更应注意水土保持措施的落实。

4.2.2 流域水电工程运行管理

a. 水生态环境监测与保护。水电工程运行使天然河流从急流型向静水型转变,流速减缓,水域面积增加,水体更新周期和污染物在库区停留时间变长。由于数据获取的局限性,基于文献中收集整理的丰水期大渡河20个水质监测断面数据,其中低程度开发区1个,中程度开发区3个,高程度开发区4个,极高程度开发区12个,基本呈现从上游向下游开发程度从低到极高依次分布,所有断面水质类别均达到Ⅲ类以上,其中Ⅱ类水质基本分布在低开发区(足木足河断面)、中开发区(猴子岩和大岗山)、高开发区(瀑布沟)和极高开发区(龚嘴坝)。在21个指标中,水质指标的超标主要集中在极高开发区(深溪沟、枕头坝、沙坪、龚嘴坝和铜街子)和中开发区(猴子岩)的粪大肠菌群以及五日生化需氧量。大渡河干流总体水质状况为优,但在下游的极高水电开发区需加强对水质的监测。水电工程运行会造成上下游间的物理和生物隔断;水电工程蓄水会改变河流原始流态,改变河流水动力特征和水温条件,

引发水生态环境变化,进而影响鱼类的生存、发展、演化。以大渡河干流为例(图6),大渡河干流上游、中游、下游分布的国家级省级重点保护鱼类种类稳定,但是长江上游特有鱼类数量分布呈现出从上游到中游逐步增加趋势,下游区域由于龚嘴坝的建设,造成鱼类洄游通道受阻,使得下游区域鱼类种数低于中游区域。并且,相较于上下游龚嘴坝区的水质指标也出现较明显的超标。因此,在水电开发运行过程中,大渡河干流下游的极高程度开发区需要加强对鱼类保护的工程措施有效性的监测。

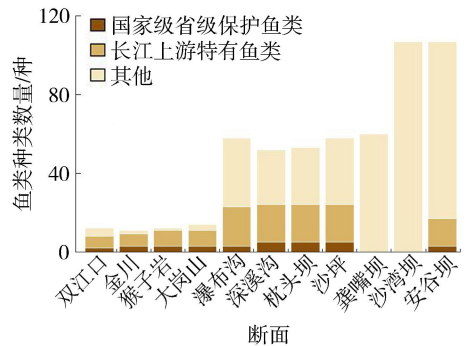


图6 大渡河干流不同水电开发程度鱼类资源分布情况

b. 地质灾害防范。四川是全国地质灾害最为严重的省份之一,两江地区位于川西北高原,属于典型的山区,地质灾害频发,泥石流夹带大量的泥砂石进入河流和库区,对流域水环境带来巨大的不利影响。表6列举了不同水电开发程度的地质灾害点的数量。大渡河支流的高影响区和雅砻江支流的低影响区虽然没有水电工程,但是该区域上下游的水电工程较多,并且属于地质灾害严重和水土流失严重的区域。因此,在该区域上下游的水电工程建设过程中,更需要关注水电工程对陆地和河流生态系统的累积影响。大渡河干流的高程度开发区,地质灾害较为严重,同时也是规划中水电开发重点区域,在水电工程运行和建设过程中需要注意生态环境的影响,还需多考虑地质灾害的影响。

5 结论

a. 两江流域水电站数量、装机容量、水电开发密度、水电开发强度4个指标具有明显的空间分异性。大渡河的4个指标值都大于雅砻江,且集中在大渡河流域的中下游。

b. 两江流域水电站数量和开发密度全局莫兰指数的Z值大于1.96,呈现显著的正向空间聚集性(p<0.05)。其中,高值聚集区、高低值区、低高值区主要位于两江流域的中下游,低值聚集区位于流域的上游。

c. 两江流域的装机容量和水电开发强度与流域 2005—2020 年期间土地利用类型中的水库面积增长比例呈显著正相关关系,说明装机容量和水电开发强度指标能表征大型水电站的建设对陆地生态系统的影响。

d. 利用水电站装机容量、水电站数量、水电开发密度、水电开发强度 4 个指标,结合流域上下游间的空间关系,构建流域水电开发程度综合评估体系,将区域划分为开发区(极高、高、中、低)和影响区(高、低)。通过 Kruskal-Wallis H 检验,对比不同开发程度的子流域各项水电开发指标的差异性,发现 4 个水电开发指标呈现显著的差异性($p < 0.05$),说明基于 4 个指标的水电开发程度综合评估体系在两江流域中应用是合理的。

e. 结合划分结果,发现两江流域未来的水电开发重点区域将集中在雅砻江干流的极高程度开发区、高程度开发区、低程度影响区,大渡河支流的高程度开发区、低程度开发区和中程度开发区,大渡河干流的高程度开发区和中程度开发区。其中大渡河支流中程度开发区和高程度开发区,在开发建设过程中需注意水土保持措施的实施。

f. 以大渡河干流流域为例,流域水质综合为优,且有稳定的国家省级保护鱼类和长江上游特有鱼类,但在龚嘴等极高程度开发区,存在粪大肠菌群和五日生化需氧量水质指标相对 II 类水质标准超标的情况,以及长江特有鱼类突然减少的现象。因此,在大渡河干流极高程度开发区水电运行过程中,需注意对水生态环境和鱼类资源的监测保护。

参考文献:

[1] 徐志,马静,贾金生,等. 水能资源开发利用程度国际比较[J]. 水利水电科技进展,2018,38(1):63-67. (XU Zhi, MA Jing, JIA Jinsheng, et al. International comparison of hydropower resources development [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(1):63-67. (in Chinese))

[2] 宋鑫,贝耀平,袁丙青,等. 水上光伏电站对淮南采煤沉陷积水区水生态环境的影响[J]. 水资源保护,2022,38(5):204-211. (SONG Xin, BEI Yaoping, YUAN Bingqing, et al. Influence of floating photovoltaic power plants on water ecological environment in coal mining subsidence water area of Huainan City [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(5):204-211. (in Chinese))

[3] 陈求稳,张建云,莫康乐,等. 水电工程水生态环境效应评价方法与调控措施[J]. 水科学进展,2020,31(5):793-810. (CHEN Qiwen, ZHANG Jianyun, MO Kangle, et al. Effects of hydropower development on aquatic eco-

environment and adaptive managements [J]. Advances in Water Science, 2020, 31(5):793-810. (in Chinese))

[4] 李明,傅斌,王玉宽,等. 岷江上游水电开发特点及其空间格局分析[J]. 长江流域资源与环境,2015,24(1):74-80. (LI Ming, FU Bin, WANG Yukuan, et al. Characteristics and spatial patterns of hydropower development in the upper Minjiang River Basin [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(1):74-80. (in Chinese))

[5] 钱玉杰. 我国水电的地理分布及开发利用研究[D]. 兰州:兰州大学,2013.

[6] PALOMINO CUYA D G, BRANDIMARTE L, POPESCU I, et al. A GIS-based assessment of maximum potential hydropower production in La Plata Basin under global changes [J]. Renewable Energy, 2013, 50:103-114.

[7] 杨子儒,李诚康,周兴波. 2021 年全球水电发展现状与开发潜力分析[J]. 水利水电科技进展,2022,42(3):39-44. (YANG Zirui, LI Chengkang, ZHOU Xingbo. Global hydropower development status and potential analysis in 2021 [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(3):39-44. (in Chinese))

[8] 周兴波,杜效鹄. 2018 年全球水电发展现状与开发潜力分析[J]. 水利水电科技进展,2019,39(3):18-23. (ZHOU Xingbo, DU Xiaohu. Development status and potential analysis of global hydropower in 2018 [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(3):18-23. (in Chinese))

[9] QIAO Haijuan, HUANG Zhou, CHEN Weiyi, et al. Development of small hydropower in China 1990-2015: province-domain patterns of temporal-spatial evolution [J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2019, 11(5):055903.

[10] 乔海娟,黄洲,张丛林,等. 中国省域农村水电发展水平评价及空间格局演变研究[J]. 中国农村水利水电,2019(8):204-210. (QIAO Haijuan, HUANG Zhou, ZHANG Conglin, et al. Research on the development level evaluation and spatial pattern evolution of rural hydropower of Chinese provinces [J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(8):204-210. (in Chinese))

[11] 吉小盼,谭平,刘园,等. 长江流域上游梯级电站生态调度研究现状[J]. 水利水电科技进展,2022,42(5):8-14. (JI Xiaopan, TAN Ping, LIU Yuan, et al. Research status of ecological operation of cascade hydropower stations in the upper Yangtze River Basin [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(5):8-14. (in Chinese))

[12] WU Yuyang, FANG Hongwei, HUANG Lei, et al. Changing runoff due to temperature and precipitation variations in the dammed Jinsha River [J]. Journal of Hydrology, 2020, 582:124500.

[13] WU Yuyang, HUANG Lei, ZHAO Chenwei, et al. Integrating hydrological, landscape ecological, and

- economic assessment during hydropower exploitation in the upper Yangtze River [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 767: 145496.
- [14] ZHANG Qian, CHEN Chenglong, WANG Jinzhu, et al. The spatial granularity effect, changing landscape patterns, and suitable landscape metrics in the Three Gorges Reservoir Area, 1995-2015 [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 114: 106259.
- [15] DORBER M, ARVESEN A, GERNAAT D, et al. Controlling biodiversity impacts of future global hydropower reservoirs by strategic site selection [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 21777.
- [16] 龚围, 李丽, 柳钦火, 等. “一带一路”区域水电站工程生态环境影响遥感监测[J]. *地球信息科学学报*, 2020, 22(7): 1424-1436. (GONG Wei, LI Li, LIU Qinhuo, et al. Monitoring and analyzing ecosystem impact on hydropower projects by remote sensing in the Belt and Road region [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2020, 22(7): 1424-1436. (in Chinese))
- [17] OUYANG Wei, WAN Xinyue, XU Yi, et al. Vertical difference of climate change impacts on vegetation at temporal-spatial scales in the upper stream of the Mekong River Basin [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 701: 134782.
- [18] MAO Xufeng, WEI Xiaoyan, ENGEL B, et al. Biological response to 5 years of operations of cascade rubber dams in a plateau urban river, China [J]. *River Research and Applications*, 2021, 37(8): 1201-1211.
- [19] 杨志, 唐会元, 朱迪, 等. 三峡水库 175m 试验性蓄水期库区及其上游江段鱼类群落结构时空分布格局[J]. *生态学报*, 2015, 35(15): 5064-5075. (YANG Zhi, TANG Huiyuan, ZHU Di, et al. Spatiotemporal patterns of fish community structures in the Three Gorges Reservoir and its upstream during the 175-m-deep impoundment [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(15): 5064-5075. (in Chinese))
- [20] 贾建辉, 陈建耀, 龙晓君, 等. 水电开发对河流生态系统服务的效应评估与时空变化特征分析: 以武江干流为例[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(9): 2163-2176. (JIA Jianhui, CHEN Jianyao, LONG Xiaojun, et al. Evaluating the cumulative impacts of the hydropower development on the river ecosystem services in terms of spatial and temporal aspects: a case study in the mainstream of the Wujiang River [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(9): 2163-2176. (in Chinese))
- [21] 廖文婷, 邓红兵, 李若男, 等. 长江流域生态系统水文调节服务空间特征及影响因素: 基于子流域尺度分析[J]. *生态学报*, 2018, 38(2): 412-420. (LIAO Wenting, DENG Hongbing, LI Ruonan, et al. Spatial patterns of ecosystem hydrological regulation services and factors affecting them in the Yangtze River Basin: sub-watershed scale analysis [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(2): 412-420.)
- [22] 纪道斌, 龙良红, 徐慧, 等. 梯级水库建设对水环境的累积影响研究进展[J]. *水利水电科技进展*, 2017, 37(3): 7-14. (JI Daobin, LONG Lianghong, XU Hui, et al. Advances in study on cumulative effects of construction of cascaded reservoirs on water environment [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2017, 37(3): 7-14. (in Chinese))
- [23] 李哲, 陈永柏, 李翀, 等. 河流梯级开发生态环境效应与适应性管理进展[J]. *地球科学进展*, 2018, 33(7): 675-686. (LI Zhe, CHEN Yongbai, LI Chong, et al. Advances of eco-environmental effects and adaptive management in river cascading development [J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(7): 675-686. (in Chinese))
- [24] PAL S, SARDA R. Damming effects on the degree of hydrological alteration and stability of wetland in lower Atreyee River basin [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 116: 106542.
- [25] TRANMER A W, WEIGEL D, MARTI C L, et al. Coupled reservoir-river systems: lessons from an integrated aquatic ecosystem assessment [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 260: 110107.
- [26] 魏念, 张燕, 吴凡, 等. 三峡库区鱼类群落结构现状及变化[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(8): 1858-1869. (WEI Nian, ZHANG Yan, WU Fan, et al. Current status and changes in fish assemblages in the Three Gorges Reservoir [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(8): 1858-1869. (in Chinese))
- [27] 四川省人民政府. 《四川省人民政府关于印发四川省“十三五”能源发展规划的通知》解读二 [EB/OL]. (2017-03-07). <https://www.sc.gov.cn/10462/10464/13298/13301/2017/3/7/10416483.shtml>.
- [28] 邹执寰. 四川省重点流域水电开发的区域经济发展综合影响分析 [D]. 成都: 四川省社会科学院, 2015.
- [29] 李婷, 唐磊, 王丽, 等. 水电开发对鱼类种群分布及生态类型变化的影响: 以溪洛渡至向家坝河段为例 [J]. *生态学报*, 2020, 40(4): 1473-1485. (LI Ting, TANG Lei, WANG Li, et al. Distribution characteristics and ecological types changes in fish communities under hydropower development from Xiluodu to Xiangjiaba reach [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(4): 1473-1485. (in Chinese))
- [30] 李卫明, 艾志强, 刘德富, 等. 基于水电梯级开发的河流生态健康研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(6): 957-964. (LI Weiming, AI Zhiqiang, LIU Defu, et al. Research on river eco-health based on hydropower cascade development [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(6): 957-964. (in Chinese))
- [31] 高建, 姚福明, 雷晓辉, 等. 水电梯级开发背景下大渡河干流水质评价及水质分布特征研究 [J]. *水利水电技术 (中英文)*, 2021, 52(10): 133-145. (GAO Jian, YAO Fuming, LEI Xiaohui, et al. Study on water quality evaluation and water quality distribution characteristics of

- main stream of Daduhe River under background of cascade hydropower development [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2021, 52 (10): 133-145. (in Chinese)
- [32] 刘猛,张逸譔,刘园,等. 雅砻江锦屏大河湾鱼类多样性及群落结构的年际变化[J]. *淡水渔业*, 2022, 52 (2): 22-33. (LIU Meng, ZHANG Yixuan, LIU Yuan, et al. Temporal variation of fish diversity and community structure in the Jinping Bend of the Yalong River [J]. *Freshwater Fisheries*, 2022, 52 (2): 22-33. (in Chinese))
- [33] 邓嘉俊,王小东,同琳钿,等. 雅砻江中游支流力丘河鱼类资源现状[J]. *四川动物*, 2022, 41 (4): 444-453. (DENG Jiajun, WANG Xiaodong, TONG Lintian, et al. Fish diversity and spatial pattern in the Liqiu River, a tributary of the middle Yalong River [J]. *Sichuan Journal of Zoology*, 2022, 41 (4): 444-453. (in Chinese))
- [34] 陈帮富,王东胜,张迪,等. 流域水电开发生态及鱼类保护实践:以大渡河流域为例[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2022, 53 (增刊1): 347-357. (CHEN Bangfu, WANG Dongsheng, ZHANG Di, et al. Conservation of aquatic ecosystems and fish species during hydropower development in the river basin: case study for the Dadu River Basin [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2022, 53 (Sup1): 347-357. (in Chinese))
- [35] 曹娜,毛战坡. 大渡河干流水电开发中鱼类保护对策及建议[J]. *水利水电技术*, 2017, 48 (1): 116-121. (CAO Na, MAO Zhanpo. Countermeasures and suggestions on fish protection during hydropower development of mainstream of Daduhe River [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2017, 48 (1): 116-121. (in Chinese))
- [36] MULLIGAN M, VAN SOESBERGEN A, SÁENZ L. GOODD, a global dataset of more than 38, 000 georeferenced dams [J]. *Scientific Data*, 2020, 7 (1): 31.
- [37] 何斌,颜涛,黄颖颖,等. 大渡河上游鱼类资源现状[J]. *淡水渔业*, 2021, 51 (1): 38-45. (HE Bin, YAN Tao, HUANG Yingying, et al. Analysis of fish resources status in the upper reaches of the Dadu River [J]. *Freshwater Fisheries*, 2021, 51 (1): 38-45. (in Chinese))
- [38] 水博. 应该如何表述我国的水电开发程度? [J]. *中国三峡*, 2009 (3): 5-10. (SHUI Bo. How should we express the degree of hydropower development in our country? [J]. *China Three Gorges*, 2009 (3): 5-10. (in Chinese))
- [39] 纪国强,张先平,黄建和. 水能资源健康可开发利用率初探[J]. *人民长江*, 2007, 38 (11): 113-114. (JI Guoqiang, ZHANG Xianping, HUANG Jianhe. Preliminary study on healthy developable ratio of water energy [J]. *Yangtze River*, 2007, 38 (11): 113-114. (in Chinese))
- [40] 仇欣,肖晋宇,吴佳玮,等. 全球水能资源评估模型与方法研究[J]. *水力发电*, 2021, 47 (5): 106-111. (QIU Xin, XIAO Jinyu, WU Jiawei, et al. Research on evaluation model and methodology of global hydropower resources [J]. *Water Power*, 2021, 47 (5): 106-111. (in Chinese))
- [41] ANSELIN L. Local indicators of spatial association—LISA [J]. *Geographical Analysis*, 1995, 27 (2): 93-115.
- [42] YUN Xiaobo, TANG QiuHong, WANG Jie, et al. Impacts of climate change and reservoir operation on streamflow and flood characteristics in the Lancang-Mekong River Basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 590: 125472.

(收稿日期:2022-03-20 编辑:俞云利)

(上接第 49 页)

- [27] 朱洪涛,高学平,刘殷竹. 进/出水口出流扩散脉动流速规律试验研究[J]. *水力发电学报*, 2022, 41 (7): 129-139. (ZHU Hongtao, GAO Xueping, LIU YinZhu. Experimental study of velocity fluctuations in inlet/outlet under outflow diffusion [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2022, 41 (7): 129-139. (in Chinese))
- [28] 叶长亮,王福军,李怀成,等. 双进口两级双吸离心泵过渡流道压力脉动特性研究[J]. *农业机械学报*, 2017, 48 (2): 126-134. (YE Changliang, WANG Fujun, LI Huaicheng, et al. Experimental investigation of pressure fluctuation and vibration characteristics of a double suction centrifugal pumping system [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48 (2): 126-134. (in Chinese))
- [29] 陈会向. 贯流式水轮机甩负荷过渡过程水力特性数值模拟与试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2019.
- [30] SALEHI S, NILSSON H, LILLBERG E, et al. An in-depth numerical analysis of transient flow field in a Francis turbine during shutdown [J]. *Renewable Energy*, 2021, 179: 2322-2347.
- [31] 李航,沈振中,马保泰,等. 某泵站厂房振源识别与振动成因[J]. *南水北调与水利科技*, 2020, 18 (5): 151-156. (LI Hang, SHEN Zhenzhong, MA Baotai, et al. Identification of vibration source and causes of vibration in a pumping station building [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2020, 18 (5): 151-156. (in Chinese))
- [32] 徐用良,覃大清,赵越,等. 混流式水轮机尾水管压力脉动换算初探[J]. *水力发电学报*, 2016, 35 (1): 87-94. (XU Yongliang, QIN Daqing, ZHAO Yue, et al. Exploratory analysis on pressure fluctuation conversion in Francis turbine draft tubes [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2016, 35 (1): 87-94. (in Chinese))
- [33] 唐拥军. 混流式水轮机原模型压力脉动相似分析[J]. *大电机技术*, 2015 (4): 47-51. (TANG Yongjun. Similarity analysis of water pressure pulsation of francis turbine between prototype and model [J]. *Large Electric Machine and Hydraulic Turbine*, 2015 (4): 47-51. (in Chinese))

(收稿日期:2022-01-25 编辑:刘晓艳)

基于改进 Deeplab V3+网络的水工混凝土 裂缝语义分割方法

黄思文¹,包腾飞^{1,2,3},李扬涛¹,牛慧余¹

(1.河海大学水利水电学院,江苏南京 210098;

2.河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏南京 210098;

3.三峡大学水利与环境学院,湖北宜昌 443002)

摘要:为实现水工混凝土裂缝快速而准确的检测,提出了一种基于改进 Deeplab V3+网络的水工混凝土裂缝语义分割方法。该方法采用 Mobilenetv2 网络替换原主干网络,将空洞卷积金字塔池化模块(ASPP)的空洞卷积替换为空洞深度可分离卷积,以提升运算速度,降低深层特征下采样倍数以减少语义信息丢失。实例验证结果表明:本文方法帧率达到 51.11 帧/s,较原网络提高了 23.33 帧/s,推理速度大幅提升;平均交并比和平均像素精度分别达到 89.45 和 95.19,分割精度高;针对典型混凝土裂缝的分割效果也优于比较方法,泛化能力较强。

关键词:Deeplab V3+;水工混凝土;裂缝识别;语义分割;深度学习

中图分类号:TV698.1

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2023)01-0081-06

Semantic segmentation method of hydraulic concrete cracks based on improved Deeplab V3+ network//HUANG Siwen¹, BAO Tengfei^{1,2,3}, LI Yangtao¹, NIU Huiyu¹(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: In order to realize the rapid and accurate detection of hydraulic concrete cracks, a semantic segmentation method based on improved Deeplab V3+ network is proposed. In this method, the Mobilenetv2 network is used to replace the original backbone network, and the hole convolution of the hole convolution pyramid pooling module (ASPP) is replaced by the hole depth separable convolution, so as to improve the operation speed, reduce the sampling multiple of deep features and decrease the loss of semantic information. The experimental results show that the frame rate can reach 51.11 frame/s, which is 23.33 frame/s higher than that of the original network, and the reasoning speed is greatly improved. The mean intersection over union and mean pixel accuracy are 89.45 and 95.19, respectively, with high segmentation accuracy. The segmentation effect of typical concrete cracks is also better than the comparison method, indicating a strong generalization ability.

Key words: Deeplab V3+; hydraulic concrete; crack identification; semantic segmentation; deep learning

水工混凝土建筑物工作条件复杂^[1],在太阳辐射、干湿循环、冻融循环等作用易产生裂缝^[2]。裂缝的存在和发展,轻则引发渗漏、溶蚀破坏,重则引发大坝失事,危及下游人民生命财产安全。因此,及时发现裂缝并采取相应除险加固措施对保障大坝安全十分重要。目前国内外大坝裂缝检测方法主要采用传统的人工巡视^[3],该方法不仅费时费力,且水下区域通常无法到达。近年来,出现了利用无人

机和水下机器人拍摄大量影像资料,然后通过人工解读影像识别大坝裂缝的方式,该方式虽然减轻了野外工作的强度,但人工解读影像工作量巨大,效率低下。

采用图像处理方法可以替代人工解读工作,一定程度实现图片中裂缝的自动化识别。徐欢等^[4]提出了一种基于 Canny 算子的路面裂缝检测方法,引入形态学滤波进行改进,使用 Ostu 算法实现双阈

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC1508603)

作者简介:黄思文(1997—),男,硕士研究生,主要从事水工结构安全监测研究。E-mail:swhuang@hhu.edu.cn

通信作者:包腾飞(1974—),男,教授,博士,主要从事水工结构及岩土工程安全监控理论与方法研究。E-mail:baotf@hhu.edu.cn

值的自适应获取。王丽^[5]提出了基于樽海鞘群优化的大坝裂缝图像分割算法,并建立了混凝土坝病害监测 GUI 系统。张小伟等^[6]基于自适应区域生长和局部 K-Means 聚类,提出了一种针对混凝土坝面裂缝检测的图像处理算法。王一兵等^[7]提出基于 LabVIEW+VDM 的混凝土坝裂缝分析方法,利用 VDM 视觉开发包独立完成混凝土坝裂缝的检测。陶健等^[8]基于 Retinex 算法和百分比阈值法,提出了一种沥青路面裂缝检测方法。虽然上述方法取得了一定的裂缝识别效果,但这些图像处理方法都存在处理速度慢的问题,针对海量的图片数据,处理效率不高,且自动化程度较低。

使用深度学习方法可以有效提高图像识别的自动化程度,近年来,众多研究人员将深度学习方法应用到裂缝识别中。刘承飞^[9]构建了双卷积神经网络(CNN-Segnet),提出了一种混凝土桥梁裂缝识别方法,但以目前相机传感器的分辨率水平,在保证识别精度的前提下,其推理速度较慢。任松等^[10]基于 R-FCN 网络,提出了一种公路隧道裂缝检测方法,冯春成^[11]提出了一种基于深度学习的溢流坝表面裂缝检测方法,二者推理速度均较快,但识别精度较低、泛化能力较弱。李良福等^[12]基于 PSPNet 网络,引入自注意力机制,提出了一种针对桥梁裂缝的语义分割方法,其测试平均交并比(mean intersection over union, MIoU)为 84.31,一定程度提升了分割精度,但分割仍不够精确。张鹏^[13]提出了一种基于 Deeplab V3+网络^[14]的混凝土裂缝识别方法,其识别精度较高,但主干网络使用 Xception 网络,推理速度存在明显不足。祝一帆等^[15]提出了一种基于 U-Net 网络的路面裂缝检测方法,采用密集连接结构,在以往结构的基础上提高了网络各层特征信息利用率,该方法增强了网络的泛化能力,但其推理速度较慢。

为实现对水工混凝土裂缝快速而准确地检测,本文将 Deeplab V3+网络应用于水工混凝土裂缝检测中,提出了基于改进 Deeplab V3+网络的水工混凝土裂缝语义分割方法(以下简称“本文方法”)。本文方法采用 Mobilenetv2 网络替换原主干网络,将空洞卷积金字塔池化模块(ASPP)的空洞卷积替换为空洞深度可分离卷积,以提升运算速度,降低深层特征下采样倍数以减少语义信息丢失。并结合实际工程数据集,对本文方法可靠性进行了验证。

1 水工混凝土裂缝语义分割方法

1.1 主干特征提取网络

目前,Deeplab V3+网络使用的主干特征提取网络(以下简称主干网络)主要为 Xception 网络,对于

识别目标种类多,且训练集数据大的情况,具有很好的识别效果。但实际应用中,数据集通常很难满足此要求,其识别效果往往不够理想,而且因其参数多、结构复杂,网络推理速度较慢。而 Mobilenetv2 网络^[16]是轻量级卷积神经网络,参数少、结构相对简单,推理速度快,且在数据集数据较少时仍能实现较高的分割精度。因此,本文采用 Mobilenetv2 网络替换原主干网络(Xception 网络)。

Mobilenetv2 网络引入了倒残差结构和线性瓶颈结构。Mobilenetv2 网络获取输入信息后,先利用 1×1 卷积将输入升维并使用非线性激活函数 ReLU6 激活,再利用 3×3 深度可分离卷积进行特征提取,之后进行 1×1 卷积降维并使用线性激活函数激活,最后将其与输入进行叠加。所谓倒残差结构,即在 3×3 卷积前后各有一个 1×1 卷积分别进行升维和降维,此结构可增强梯度的传播,显著减少推理期间所需的内存占用。而线性瓶颈结构则是指进行 1×1 卷积降维时不再使用非线性激活函数 ReLU6,而采用线性激活函数,以保留更多特征信息。

1.2 改进 Deeplab V3+网络结构

Deeplab V3+网络对深层特征的下采样倍数为 16~32,下采样倍数越高则语义信息的压缩程度越高,过高的下采样倍数会丢失目标特征信息,影响识别效果。本文将深层特征下采样倍数更改为 8,以保留裂缝更多的特征信息,进而提升网络识别精度。原网络的空洞卷积金字塔池化模块(ASPP)采用 3×3 空洞卷积,本文将其替换为 3×3 空洞深度可分离卷积,以降低参数量,进而提升网络推理速度。

改进 Deeplab V3+网络结构如图 1 所示,其结构可以分为 3 个部分:主干特征提取网络、ASPP 模块和上采样模块。利用主干网络 Mobilenetv2 提取输入图片的浅层特征和深层特征。主干网络对深层特征进行 8 倍下采样后传入 ASPP 模块,ASPP 模块采用 5 种方式对深层特征进行并行处理,分别为: 1×1 卷积进行特征提取,3 个空洞率分别为 6、12、18 的 3×3 空洞深度可分离卷积进行跨像素点特征提取,以及全局图像池化。5 种处理方式得到对应的 5 个特征层,将其堆叠并利用 1×1 卷积进行通道数调整后得到一个深层特征层。对其进行上采样操作后,与经过 1×1 卷积调整通道数的浅层特征层融合,得到一个包含输入图片浅层特征和深层特征的特征层,之后利用 3×3 卷积进行特征提取,最后利用上采样将结果调整为与输入图片同等大小后输出。

1.3 损失函数

训练过程采用交叉熵损失函数计算预测误差,进行反向传递,调整网络参数,损失函数计算公式为

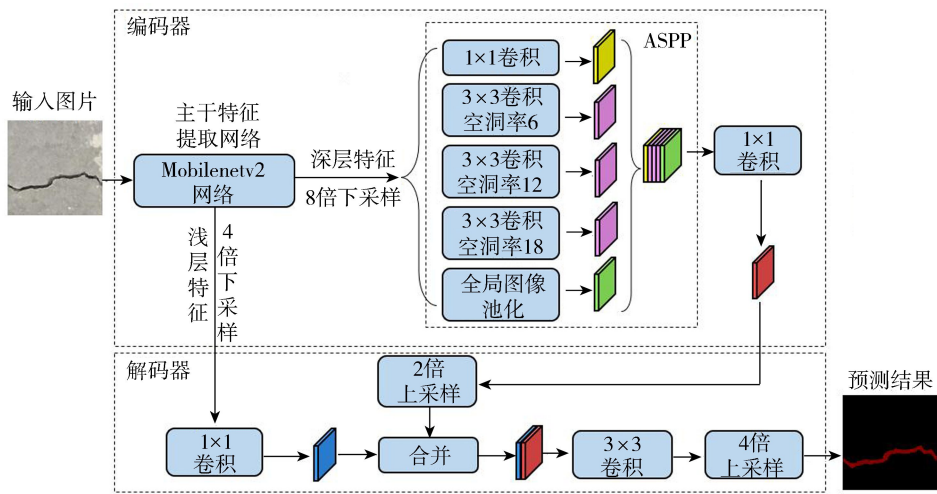


图1 改进 Deeplab V3+网络结构

$$L = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{c=1}^K w_c \ln(p_c(z_i)) \quad (1)$$

式中： N 为像素总数； c 为某一语义分割类别； K 为语义分割类别总数（包括背景），本文为2； w_c 为类别 c 的损失权重； $p_c(z_i)$ 为像素 z_i 属于真实类别 c 的概率。

裂缝损失权重设置为0.8，背景损失权重设置为0.2，以解决类别不平衡问题。

2 实例验证

2.1 验证数据集与评价指标

为评估本文方法对水工混凝土裂缝的语义分割性能，结合实际工程数据集验证该网络的可靠性。

2.1.1 数据集制作

验证试验采用自制水工混凝土裂缝数据集，原始数据来源于中国西北地区某水利枢纽工程，所拍摄裂缝位于坝顶路面、闸墩、溢流堰边墙、引水渠边墙等部位。使用相机Nikon D300s拍摄，图片分辨率为 3216×2136 像素，为了便于网络训练，将拍摄图片裁剪至 224×224 像素，裁剪后得到裂缝图片共1200张。

数据集制作过程如图2所示。首先对图片裂缝进行人工精细标注，再利用标注文件生成PNG标签文件。同时，使用数据增强方法以扩充数据集，增强方法为顺时针旋转 90° 、水平翻转和局部放大。经过增强后，数据集为4800张裂缝图片及对应标签文件，按比例7:2:1划分，即训练集3360张，验证集960张，测试集480张。

2.1.2 试验平台

试验所用计算机操作系统为Windows 10，运行内存16GB，CPU为Intel Core i5-10400F，GPU为NVIDIA 1660S，GPU加速为CUDA 11.0，深度学习框架为Pytorch 1.7.1。

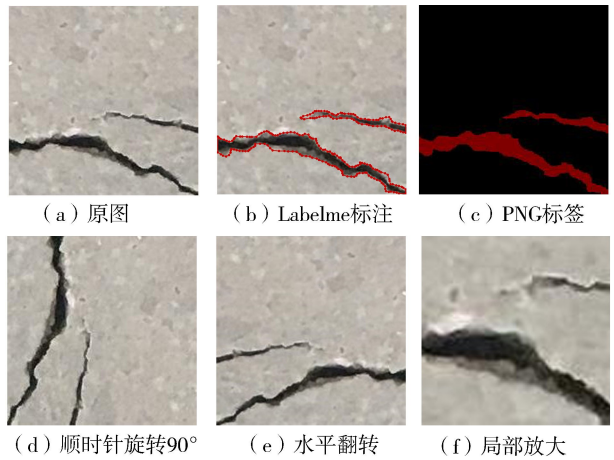


图2 数据集标注与增强

2.1.3 试验流程

先收集实际工程中水工混凝土裂缝图片，将收集的图片制成数据集，用训练集训练改进Deeplab V3+网络，并采用验证集进行调参。

训练使用VOC数据集训练得到的权重作为预训练权重，训练优化器使用Adam。网络共训练100轮，先进行50轮冻结训练，再进行50轮解冻训练。在冻结阶段，网络的主干部分被冻结，仅调整网络其余部分的参数。在解冻阶段，主干部分被解冻，网络所有参数都会调整。冻结阶段批尺寸设为8，学习率设为 5×10^{-4} ；解冻阶段批尺寸设为4，学习率设为 5×10^{-5} 。

训练结束后，将得到的权值文件载入网络并在测试集上测试，并进行消融试验分析。同时引入对比方法，计算各方法评估指标，并选取典型混凝土裂缝图片以测试分割效果，最后对网络进行光照强度影响评估。

2.1.4 评估指标选取

采用MIoU和平均像素精度(MPA)评价本方法对混凝土裂缝的语义分割精度。MIoU为各类别预测值与真实值集合交集与并集比值的平均值，MPA

为各类别预测正确的像素数量与总像素数量的比值的平均值^[17-19]。

除了分割精度,评价语义分割网络性能的另一重要指标是推理速度,即网络每秒钟能处理的图片数量,试验采用帧率(FPS)评估网络推理速度。

2.2 结果与分析

2.2.1 训练过程评估

训练损失函数与验证损失函数均随着训练轮次的增加而降低,第1轮训练时训练损失函数为0.139,验证损失函数为0.080;第100轮训练时训练损失函数为0.030,验证损失函数为0.046(图3)。损失函数在前几轮训练快速降低,之后缓慢降低并趋于稳定,曲线变化趋势良好,且在训练结束时训练与验证损失函数均小于0.05。说明改进 Deeplab V3+网络在混凝土裂缝数据集上收敛效果较好。

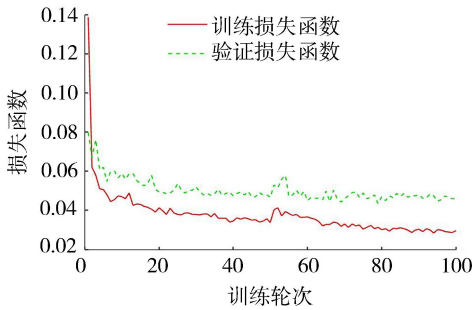


图3 损失函数随训练轮次变化

2.2.2 消融试验分析

本文对 Deeplab V3+网络做了3处改进:采用 Mobilenetv2 网络替换原主干网络 Xception,将深层特征下采样倍数降低为8,将 ASPP 模块的空洞卷积

替换为空洞深度可分离卷积。为评估各项改进对网络性能的提升效果,进行了消融试验测试各种改进组合的精度及推理速度指标,结果见表1。

表1 消融试验评价指标统计

编号	主干网络	下采样倍数	卷积类型	MIoU	MPA	FPS/(帧·s ⁻¹)
1				88.72	93.27	27.78
2	√			88.81	94.12	54.10
3		√		89.34	94.37	17.32
4			√	88.69	93.28	33.58
5	√	√		89.46	95.14	45.03
6	√		√	88.85	94.13	55.95
7		√	√	89.33	94.30	26.26
8	√	√	√	89.45	95.19	51.11

注:√表示对该项做了改进,原 Deeplab V3+网络下采样倍数为16~32,改进前的下采样倍数取16。

由表1可知,替换主干网络可以大幅提升网络推理速度,并一定程度提升精度;降低深层特征下采样倍数会使推理速度有所降低,但精度有明显提升;改变 ASPP 模块的空洞卷积类型能一定程度提升推理速度,对精度影响很小。做3项改进的网络(第8组)MPA最高,MIoU比最高的第5组仅低0.01,而MPA和FPS均高于第5组,FPS比最高的第6组低4.84帧/s。综合来看,做3项改进的网络综合性能最优,在大幅提升推理速度的同时,精度也有明显提升。

2.2.3 分割效果评估

从测试集中选取4张典型混凝土裂缝图片,包含单条裂缝、多条裂缝以及交叉裂缝,测试本文方法对典型裂缝图片的分割效果。并将其与 Deeplab V3+网络、U-Net网络、基于2种主干网络的 PSPNet网络^[20]、Canny 边缘检测算法^[21]作比较,结果如图4所示。

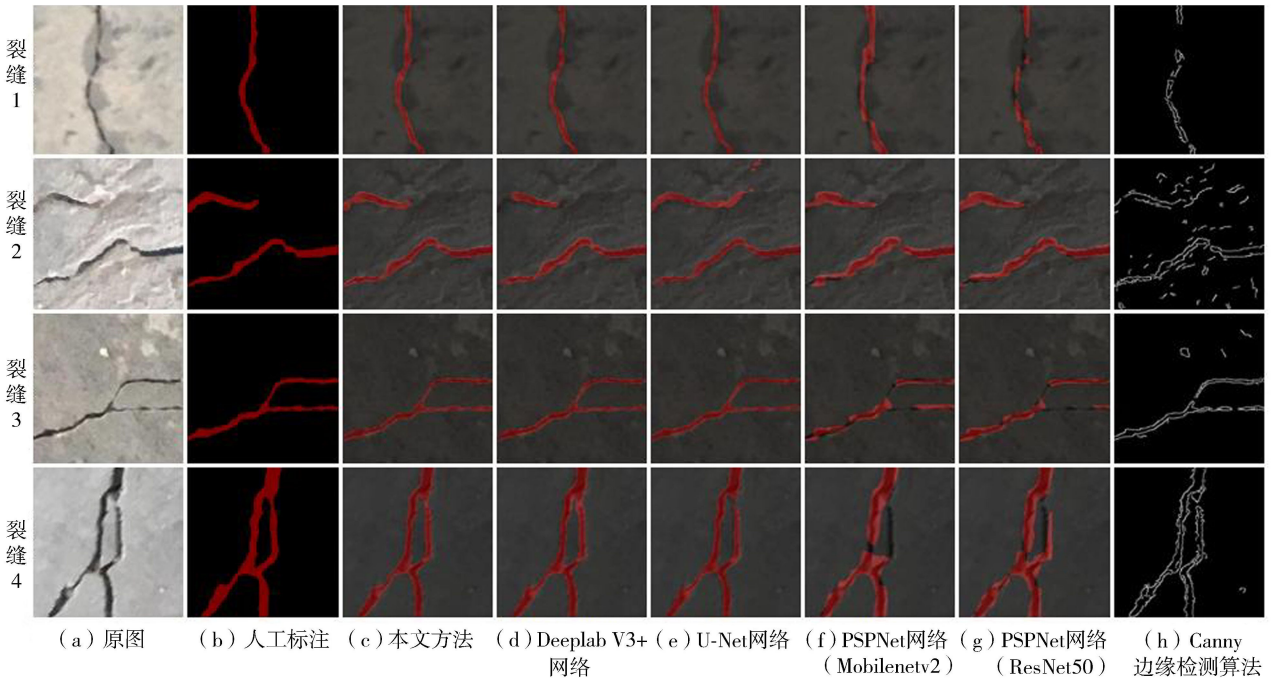


图4 典型裂缝分割效果对比

Canny 边缘检测算法提取的裂缝存在多处间断,且提取了很多非裂缝部分的边缘,检测效果受噪声影响较大。PSPNet 网络将很多裂缝像素点识别为背景,将背景识别为裂缝,尤其在识别交叉裂缝时存在多处间断,可见 PSPNet 网络对于混凝土裂缝识别能力较弱。U-Net 网络对裂缝 2 识别效果较差,该图混凝土表面不平整,网络将部分凹陷识别成裂缝,抗噪性较差,且对裂缝 4 识别存在间断。

Deeplab V3+网络对裂缝 1 分割存在间断,对表面不平整的裂缝 2 的分割也存在问题,其中较短裂缝两端均有局部被识别为背景。而本文方法对这些部位分割更精确,尤其对 Deeplab V3+网络和 U-Net 网络分割效果不佳的裂缝 2,其分割效果明显更优,体现出网络更强的泛化能力。经过改进,网络的分割精度和泛化能力都有一定提升,其混凝土裂缝分割效果优于所有比较方法。

2.2.4 分割精度评估

经测试集测试,不同分割方法的精度见表 2。本文方法的 MIoU 达到了 89.45,MPA 达到了 95.19,两项精度指标均高于所有比较方法,相较于 Deeplab V3+网络,分别提高了 0.73 和 1.92。

表 2 不同裂缝分割方法的分割精度

方法	MIoU	MPA
本文方法	89.45	95.19
Deeplab V3+网络	88.72	93.27
U-Net 网络	88.69	93.96
PSPNet 网络(Mobilenetv2)	81.45	90.64
PSPNet 网络(ResNet50)	83.94	92.68

2.2.5 推理速度评估

本文方法、Deeplab V3+网络、U-Net 网络、PSPNet(Mobilenetv2)网络、PSPNet(ResNet50)网络、Canny 边缘检测算法的 FPS 分别为 51.11 帧/s、27.78 帧/s、27.22 帧/s、64.23 帧/s、39.89 帧/s、13.64 帧/s。本文方法的 FPS 相较 Deeplab V3+网络提升了 23.33 帧/s,即网络平均每秒钟能多处理 23.33 张图片。几种比较方法中,仅基于 Mobilenetv2 的 PSPNet 网络推理速度略高于本文方法,但由前文可知,其分割精度显著低于本文方法。因此,本文方法裂缝分割精度最高、推理速度快,综合性能最优。

2.2.6 光照强度影响评估

为评估拍摄照片时的光照强度对识别效果的影响,使用不同亮度的图片对本文方法进行测试,测试结果见图 5。光照强度升高加强了裂缝内部混凝土的反光,对于较窄裂缝,识别结果可能会出现间断;当光照强度很低时,混凝土表面以及裂缝均较暗,导致裂缝边缘识别不够精确。光照强度对网络识别效

果有一定影响,但网络仍能较准确地识别裂缝。

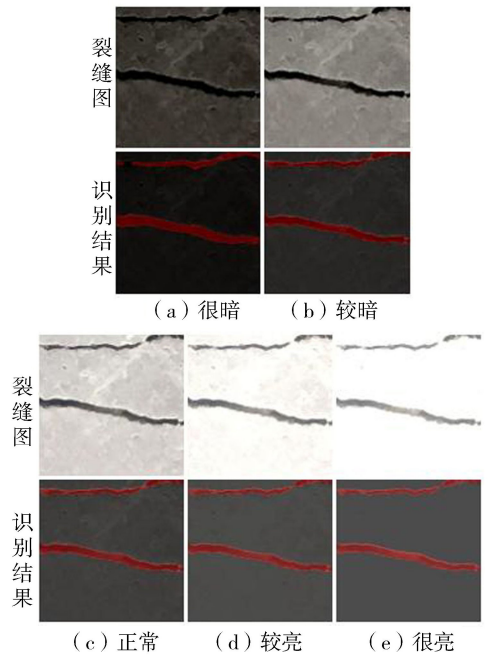


图 5 不同亮度图片的分割效果

3 结 语

为实现水工混凝土裂缝快速而准确的检测,提出了一种基于改进 Deeplab V3+网络的水工混凝土裂缝语义分割方法。实例验证结果表明本文方法能实现推理速度大幅提升的同时,分割精度也能有一定幅度的提升。本文方法具有以下优点:①具有一定的混凝土裂缝快速检测能力。其 FPS 达到 51.11 帧/s,即平均每秒可以处理 51.11 张大小为 224×224 像素的图片,推理速度快。②可以实现混凝土裂缝的高精度分割。其 MIoU 和 MPA 分别达到 89.45 和 95.19,均高于比较方法,分割精度高。③可以有效分割多种类型的混凝土裂缝。对于含有单条裂缝、多条裂缝以及交叉裂缝的典型裂缝图片,其分割效果优于比较方法,尤其对于多条裂缝图像,分割效果明显更优,网络泛化能力更强。且在光照强度高和过低时仍能较好地实现裂缝分割。

验证数据集裂缝图片噪声较少,未考虑裂缝表面存在较多覆盖的情况。后续将针对裂缝图片存在较多噪声的情况开展更深入的裂缝检测研究。裂缝检测工作是基于离线数据进行的,后续可将检测网络与图像采集系统融合,实现对混凝土裂缝的实时检测。

参考文献:

[1] 沈长松,刘晓青,王润英,等. 水工建筑物[M]. 第二版,北京:中国水利水电出版社,2016.
[2] 甘磊,吴健,戴寿晔,等. 含施工裂缝隧道穿越段堤防渗流和稳定分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),

- 2022,50(1):85-90. (GAN Lei, WU Jian, DAI Shouye, et al. Seepage and stability analysis of embankment with construction cracks in tunnel crossing section[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(1):85-90. (in Chinese))
- [3] 任秋兵,李明超,沈扬,等. 水工混凝土裂缝像素级形态分割与特征量化方法[J]. 水力发电学报, 2021, 40(2):234-246. (REN Qiubing, LI Mingchao, SHEN Yang, et al. Pixel-level shape segmentation and feature quantification of hydraulic concrete cracks based on digital images[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(2):234-246. (in Chinese))
- [4] 徐欢,李振璧,姜媛媛,等. 基于 OpenCV 和改进 Canny 算子的路面裂缝检测[J]. 计算机工程与设计, 2014, 35(12):4254-4258. (XU Huan, LI Zhenbi, JIANG Yuanyuan, et al. Pavement crack detection based on OpenCV and improved Canny operator [J]. Computer Engineering and Design, 2014, 35(12):4254-4258. (in Chinese))
- [5] 王丽. 混凝土坝裂缝识别的数字图像处理算法研究[D]. 大连:大连理工大学, 2019.
- [6] 张小伟,包腾飞,高兴和. 基于计算机视觉的混凝土坝裂缝检测方法[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(5):83-88. (ZHANG Xiaowei, BAO Tengfei, GAO Xinghe. Crack detection method of concrete dams based on computer vision[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(5):83-88. (in Chinese))
- [7] 王一兵,包腾飞,高治鑫. 基于 LabVIEW+VDM 的混凝土坝裂缝检测方法[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(5):76-82. (WANG Yibing, BAO Tengfei, GAO Zhixin. Crack detection method of concrete dams based on Lab VIEW+VDM[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(5):76-82. (in Chinese))
- [8] 陶健,田霖,张德津,等. 基于局部纹理特征的沥青路面裂缝检测方法[J]. 计算机工程与设计, 2022, 43(2):517-524. (TAO Jian, TIAN Lin, ZHANG Dejin, et al. Asphalt pavement crack detection method based on local texture features [J]. Computer Engineering and Design, 2022, 43(2):517-524. (in Chinese))
- [9] 刘承飞. 基于双卷积神经网络的桥梁裂纹实时检测技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2020.
- [10] 任松,朱倩雯,涂歆玥,等. 基于深度学习的公路隧道衬砌病害识别方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2022, 56(1):92-99. (REN Song, ZHU Qianwen, TU Xinyue, et al. Lining disease identification of highway tunnel based on deep learning [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2022, 56(1):92-99. (in Chinese))
- [11] 冯春成. 基于深度学习的水电站溢流坝表观裂缝检测方法研究[D]. 绵阳:西南科技大学, 2021.
- [12] 李良福,王楠,武彪,等. 基于改进 PSPNet 的桥梁裂缝图像分割算法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(22):101-109. (LI Liangfu, WANG Nan, WU Biao, et al. Segmentation algorithm of bridge crack image based on modified PSPNet[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2021, 58(22):101-109. (in Chinese))
- [13] 张鹏. 深度学习算法在混凝土材料组分及构件表面裂缝识别中的应用[D]. 合肥:合肥工业大学, 2021.
- [14] CHEN L, ZHU Y, PAPANDREOU G, et al. Encoder-Decoder with Atrous Separable Convolution for Semantic Image Segmentation[C]//FERRARI V. Computer Vision-ECCV 2018. Cham: Springer International Publishing, 2018:833-851.
- [15] 祝一帆,王海涛,李可,等. 一种高精度路面裂缝检测网络结构:Crack U-Net[J]. 计算机科学, 2022, 49(1):204-211. (ZHU Yifan, WANG Haitao, LI Ke, et al. Crack U-Net: towards high quality pavement crack detection [J]. Computer Science, 2022, 49(1):204-211. (in Chinese))
- [16] SANDLER M, HOWARD A, ZHU M, et al. MobileNetV2: Inverted residuals and linear bottlenecks [C]//IEEE. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. New York: IEEE, 2018:4510-4520.
- [17] 戴雨舒,仲晓春,孙成明,等. 基于图像处理和 Deeplabv3+模型的小麦赤霉病识别[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(9):209-215. (DAI Yushu, ZHONG Xiaochun, SUN Chengming, et al. Identification of fusarium head blight in wheat-based on image processing and Deeplabv3+ model [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(9):209-215. (in Chinese))
- [18] 李怡静,程浩东,李火坤,等. 基于改进 U²-Net 与迁移学习的无人机影像堤防裂缝检测[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(6):52-59. (LI Yijing, CHENG Haodong, LI Huokun, et al. Crack detection of embankment in UAV images based on improved U²-Net and transfer learning [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(6):52-59. (in Chinese))
- [19] 马建业,郑东健,孙建伟. 基于生物启发神经网络的水下坝面表观裂缝检测路径规划算法[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(6):60-65. (MA Jianye, ZHENG Dongjian, SUN Jianwei. Path planning algorithm for underwater dam surface apparent cracks detection based on bio-inspired neural network [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(6):60-65. (in Chinese))
- [20] ZHAO H, SHI J, QI X, et al. Pyramid scene parsing network [C]//IEEE. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. New York: IEEE, 2017:6230-6239.
- [21] CANNY J. A computational approach to edge detection. [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8(6):679-698.

(收稿日期:2022-01-25 编辑:刘晓艳)

基于改进 Mask R-CNN 的混凝土坝 裂缝像素级检测方法

牛慧余¹, 包腾飞^{1,2,3}, 李扬涛¹, 黄思文¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

3. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要:为解决传统人工巡检混凝土坝裂缝效率低下的问题,将人工智能和计算机视觉技术相结合,提出了复杂背景下混凝土坝裂缝像素级精细化自动识别分割方法。为克服复杂环境背景因素干扰,基于多种数字图像处理手段对混凝土坝裂缝图像进行预处理,有效去除环境噪声。在 Mask R-CNN 基础上,对模型主干网络进行改进以提升裂缝特征提取能力。采集 500 幅包含单裂缝、多裂缝、交叉裂缝、龟裂等多种裂缝形态的混凝土坝裂缝图像用于模型训练与验证,并采用定性分析和定量评估相结合的手段多维度评估模型泛化能力和鲁棒性。结果表明:改进 Mask R-CNN 对含有多种裂缝特征及噪声背景的裂缝图像识别效果良好,模型在测试集上的目标检测和分割掩码平均精确度分别达 76.3 和 61.9,满足高精度裂缝精细分割要求;与 Cascade-Mask R-CNN、Yolact++ 等基准模型相比,改进 Mask R-CNN 在目标检测、分割掩码精确度及模型推理速度多方面均有一定的优势。

关键词:混凝土坝;裂缝检测;实例分割;改进 Mask R-CNN;人工智能

中图分类号:TV698.1

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2023)01-0087-06

Pixel-level crack detection method of concrete dam based on improved Mask R-CNN//NIU Huiyu¹, BAO Tengfei^{1,2,3}, LI Yangtao¹, HUANG Siwen¹(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: In order to solve the problem of low efficiency of traditional manual inspection, artificial intelligence and computer vision technology was combined to propose a pixel-level refined automatic identification and segmentation method for concrete dam cracks under complex backgrounds. To overcome the interference of complex environmental background factors, the concrete dam crack image is preprocessed based on various digital image processing methods to effectively remove environmental noise. Based on the Mask R-CNN instance segmentation model, the model backbone network is optimized to improve the crack feature extraction ability. In the experiment, 500 images of concrete dam cracks, including single crack, multiple cracks, cross cracks, map cracks and other crack forms, were collected for model training and verification. A combination of qualitative analysis and quantitative evaluation was used to evaluate the generalization ability and robustness of the model in multiple dimensions. The test results show that the improved Mask R-CNN model in this paper has a good effect on crack image recognition with various crack features and noise backgrounds. The average accuracy values of the model's target detection and mask segmentation on the test set are 76.3 and 61.9, respectively, which can meet the requirements of high-precision fine segmentation for cracks. Compared with benchmark models such as Cascade-Mask R-CNN and Yolact++, the improved Mask R-CNN method has certain advantages in object detection, mask segmentation accuracy and model inference speed.

Key words: concrete dam; crack detection; instance segmentation; improved Mask R-CNN; artificial intelligence

混凝土坝是最常见的水工建筑物,由于其长期暴露于大气与水环境中,因此在流水冲刷、化学腐

蚀、冻融破坏等外界作用下,表面容易出现裂缝^[1-2],严重危害了混凝土坝的整体结构安全。工程中,识

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC1508603)

作者简介:牛慧余(1998—),男,硕士研究生,主要从事水工结构安全检测研究。E-mail:nhy@hhu.edu.cn

通信作者:包腾飞(1974—),男,教授,博士,主要从事水工结构及岩土工程安全监控理论与方法研究。E-mail:baotf@hhu.edu.cn

别混凝土坝裂缝,并对其进行及时修补,对保障大坝在全生命周期内安全运行具有重要意义。

传统的混凝土坝裂缝检测主要依赖管理人员的定期巡检,人工巡检耗时长、效率低。通过拍摄设备采集裂缝图像,利用图像处理算法进行自动化识别可提升裂缝检测效率。目前混凝土结构裂缝图像处理算法主要有图像分割算法(阈值分割^[3-6]、边缘检测^[7-8]与数学形态学^[9-10]等)和机器学习算法,多应用于道路、桥梁等传统建筑领域;刘晓瑞等^[11]基于不同的阈值分割算法,给出了隧道表面裂缝快速检测技术;徐港等^[12]提出了一种基于多种连通域特征的工程结构表面裂缝提取方法;Katakam^[13]对路面图像进行分块,并进行阈值分割,成功提取出路面裂缝,但是该算法对图像质量要求比较高,且未对背景复杂的情况进行验证;Nishikawa等^[14]提出了一种强鲁棒性的针对混凝土建筑物表面裂缝检测的方法;Chun等^[15]提出一种基于两步轻度梯度提升机的混凝土表面裂缝自动检测方法,并以一座运行多年的混凝土桥作为实例验证模型有效性。针对水工建筑物的裂缝检测问题,王一兵等^[16]提出了基于LabVIEW+VDM的混凝土坝裂缝检测方法;张小伟等^[17]提出一种基于自适应区生长和局部K-Means聚类的坝面裂缝检测算法;Rezaiee-Pajand等^[18]提出了一种基于遗传算法的混凝土溢流重力坝裂缝检测方法,提取二维裂缝特征进行非线性分析,最终确定裂缝的位置和大小。但图像处理算法多针对某一特定场景设计,检测过程需要对每一张图像人工调参,并手动构建裂缝特征,很依赖工程师的调参经验,具有很大的局限性。此外,数字图像处理方法对海量图像数据处理效率较低,难以满足裂缝图像快速识别的要求。

随着计算机技术的发展,基于深度学习的卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)在目标检测领域具有良好的效果,可以自主地从图像数据集中学习特征,避免了传统图像处理算法存在的局限性。目前CNN卷积神经网络已在混凝土结构裂缝检测领域得到应用^[19-20],虽然其可以进行混凝土裂缝图像识别,但无法精细化分割裂缝的形态、获取裂缝特征。针对这一问题,He等^[21]通过改进Faster R-CNN^[22]网络,于2017年提出了Mask R-CNN,解决了精细化像素级的实例分割问题。

混凝土坝裂缝图像语义信息较为丰富,裂缝呈现单裂缝、多裂缝、交叉裂缝、龟裂等多形态特征,对深度学习模型的特征提取能力要求较高,且背景区域可能含有噪声、光照阴影等不利因素,严重影响模型的裂缝识别效果。为克服复杂环境背景因素干

扰,提升模型的图像特征提取能力,本文基于多种数字图像处理手段对混凝土坝裂缝图像进行预处理,并在Mask R-CNN的基础上,将ResNet101+FPN网络作为主干网络进行结构改进,提升模型的特征提取能力,对复杂背景下的混凝土大坝裂缝图像进行精细分割,获取裂缝的几何形态特征,并对改进Mask R-CNN(以下简称本文模型)进行验证。

1 混凝土坝裂缝实例分割方法

1.1 复杂条件下混凝土坝的裂缝图像预处理

混凝土坝服役环境恶劣,设备采集的裂缝图像普遍存在光照不均、噪声干扰多的问题。此外,无人机等移动设备在图像获取过程中,易出现运动模糊,这些不利因素严重影响视觉检测模型的裂缝识别效果。基于此,本文提出一套组合图像预处理方法,可有效克服混凝土坝裂缝图像光照不均、噪声干扰和运动模糊的问题,提升后续裂缝分割与提取效果。

a. 直方图均衡化。直方图均衡化是一种有效处理图像光照不均的图像增强技术。直方图统计了图像中灰度值出现的概率分布情况,低照度图像的直方图分量集中于低灰度级区域,而灰度鲜明、对比度强的图像则集中于高灰度级区域。因此,可通过改变图像的直方图分布,使图像像素的每级灰度都分布均匀,以增强对比度,突出裂缝信息表达。直方图均衡计算公式为

$$s_k = (l - 1) \sum_{i=0}^k p(r_i) \quad (1)$$

式中: k 为归一化前的灰度级; s_k 为均衡化后各像素的灰度级; l 为灰度级数量; r_i 为灰度; $p(r_i)$ 为相应的直方图灰度概率值。

b. 双边滤波。双边滤波是一种消除图像背景噪声,增强重要特征信息的图像处理方法,能够保留边缘特征,使边缘不易被柔化处理。混凝土坝图像中裂缝边缘特征属于高频细节信息,因此采用非线性滤波处理能够有效地保留裂缝细节信息。双边滤波是常用的非线性滤波器,根据邻域像素加权组合输出滤波后的像素值。双边滤波计算公式为

$$f_{j,h} = \frac{\sum_{m,n} I_{m,n} w_{j,h,m,n}}{\sum_{m,n} w_{j,h,m,n}} \quad (2)$$

式中: $f_{j,h}$ 为中心点坐标滤波后的值; $I_{m,n}$ 为领域(m, n)内的图像像素; $w_{j,h,m,n}$ 表示像素(j, h)对应领域(m, n)的权重。

c. 维纳滤波。维纳滤波是一种自适应最小均方误差滤波方法,在图像复原领域有着良好的效果。它能根据图像的局部方差调整滤波器的输出,局部

方差越大,对图像的平滑作用越强,最终目的是使复原图像与原始图像的均方误差最小。

1.2 Mask R-CNN 基本原理

实例分割是一种兼具目标分类、目标检测和像素级分割的图像识别任务,在目标检测的基础上进行图像掩码的分割以达到实例分割的效果,可以看作语义分割与目标检测的结合。Mask R-CNN 是一种通用实例分割模型,在 Faster R-CNN 网络的基础上引入了掩码预测分支,并以 ROI Align 层替换 Faster R-CNN 网络中的 ROI Pooling 层,避免了 RPN 网络输出的特征图不是按照像素对齐影响掩码预测分支精度的问题。

Mask R-CNN 网络结构如图 1 所示,基本流程为:①将原始图像传入主干网络中获取特征图,对特征图中的每一点设定 ROI,获得多个 ROI 候选框,将 ROI 候选框输入区域生成网络(RPN)进行前景或后景的二值分类候选框回归,以获得目标的候选框。②获得特征图和候选框后,传入 ROI Align 层将特征图与目标的候选框进行匹配,并池化为固定大小,借助全连接层将特征图输入目标检测网络,利用分类分支对每个 ROI 区域输出对应的最大置信度标签。③检测分支预测并获得每个 ROI 区域的边界框。④掩码预测分支预测每个 ROI 最大置信度的分割掩码,将各分支输出进行汇总,得到包含目标类别、分类框和分割掩码的图像,完成像素级实例分割。

1.3 Mask R-CNN 的改进

神经网络的深度是影响模型训练效果的重要因素,网络层数增加,意味着提取到的目标特征更丰富。但训练很深的神经网络是一件比较难的事情。随着神经网络层数的增加,网络学习的效果反而比层数较少的神经网络更差^[23],这不仅是模型过拟合的原因,梯度爆炸或梯度消失成为训练更深的神经网络的阻碍,导致训练无法收敛。

He 等^[23]提出了深度残差网络(deep residual networks, ResNet),在不增加网络计算复杂度的前提

下,解决了训练深层神经网络梯度弥散而导致无法收敛的问题。笔者通过多次训练对比发现,对于混凝土坝裂缝的目标特征,Mask R-CNN 骨干网络选取 ResNet101 时的识别效果比 ResNet50 更好(图 2)。因为混凝土大坝裂缝属于精细的图像特征,更深层次的神经网络有利于进行精细识别,提高网络的特征抽象能力。但直接使用 ResNet101 的最后一层全连接层作为特征输出,对微小裂缝的特征检测效果较差。这是因为对于目标检测网络,浅层次网络提取的特征语义信息较少但目标位置准确;深层次网络提取特征的语义信息丰富,但目标位置不够精准。特征金字塔网络(feature pyramid networks, FPN)^[24]设计了上采样与侧向连接结合的结构,上采样可以获得更丰富语义信息,侧向连接可以获得更准确的目标位置信息。特征金字塔网络结构兼顾了底层特征和语义信息,不同尺度提取的特征都具有丰富的语义信息。因此,本文选取 ResNet101 + FPN 作为 Mask R-CNN 的骨干网络对混凝土坝裂缝图像进行特征提取。

1.4 评价指标

为了更直观地评价 Mask R-CNN 对混凝土大坝裂缝图像的分割效果,选取损失函数、准确率、平均精确度(AP)定量地评估裂缝分割效果。

损失函数描述了模型预测值与真实值间的差距大小,其在训练过程中指导模型朝着收敛的方向前进。Mask R-CNN 实例分割任务中,损失函数 $L = L_{cls} + L_{box} + L_{mask}$ ^[21],其中 L_{cls} 、 L_{box} 、 L_{mask} 分别为分类误差、检测误差和分割误差。损失函数越小,检测效果越好。

准确率 A 指在目标检测任务中,使用模型对数据集进行分类,分类正确的样本数占总样本数数的比例:

$$A = \frac{T_p + T_N}{T_p + T_N + F_p + F_N} \quad (3)$$

式中: T_p 为实际为正例且被分类器划分为正例的样本数; T_N 为实际为正例且被分类器划分为负例的样本数; F_p 为实际为负例但被分类器划分为正例的样

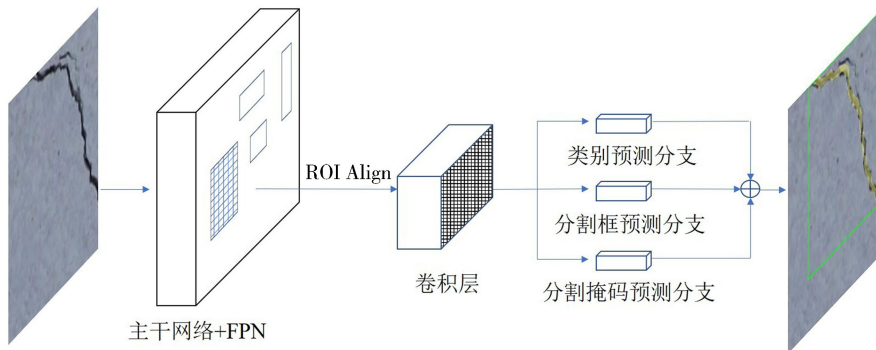


图 1 Mask R-CNN 网络结构

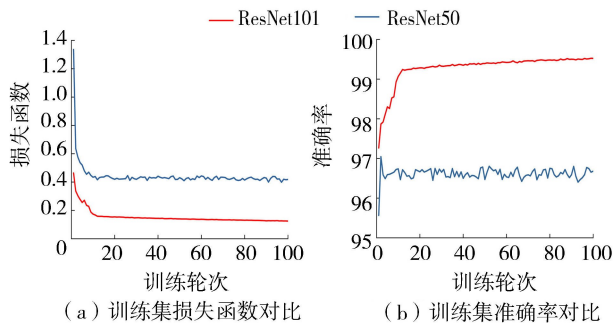


图2 不同层数 ResNet 网络下 Mask R-CNN 的训练过程对比

本数; F_N 为实际为负例且被分类器划分为负例的样本数。 A 越大, 表示检测结果越准确。

平均精确度是使用 coco 数据集实现目标检测任务和实例分割任务的通用评价指标^[21]。本文 AP_{50} 、 AP_{75} 、 AP_S 、 AP_M 、 AP_L 分别为交并比阈值为 0.50、0.75 及目标尺寸为小、中、大 3 个级别的平均精确度。

2 实例验证

2.1 图像的采集与预处理

数据采集于中国西北地区某混凝土大坝, 为了方便训练、提高训练速度, 将 5616×3744 的原图分割后缩放为 200×200 的裂缝图像, 并根据第 1.1 节的图像增强方法对裂缝图像进行预处理, 以降低裂缝图像不利因素干扰。

考虑到混凝土坝裂缝形态特征多样、噪声干扰多、语义信息丰富的特点, 选取 500 张包含单裂缝、多裂缝、交叉裂缝、龟裂等多种裂缝形态特征以及背景含有噪声干扰的裂缝图像, 按照训练集、验证集测试集为 3 : 1 : 1 的比例划分数据集图像, 即训练集 300 张、验证集 100 张、测试集 100 张, 其中训练集用于模型训练, 验证集用于模型验证及参数调整, 测试集用于测试模型泛化能力。

Mask R-CNN 属于有监督学习模型, 需要对裂缝图像进行标注构建训练集。标注时沿着裂缝轮廓取点进行多边形的标注(图 3), 得到含有目标裂缝的轮廓掩码信息的 json 文件, 最终 json 文件转化为 coco 数据集输入神经网络进行训练。



图3 裂缝图像标注过程

2.2 试验平台

本文采用的深度学习模型是商汤和香港中文大学联合开源的 Mmdetection 架构下的 Mask R-CNN 开源代码 (<https://github.com/open-mmlab/mmdetection>), 骨干网络使用 ResNet101+FPN, 在 PC 试验平台进行训练, 试验平台配置: 操作系统为 Windows 10, CPU 为 AMD Ryzen 5 3600, GPU 为 GeForce GTX 1660 SUPER, GPU 加速为 CUDA 10.1+cuDNN7.6.5, 深度学习框架为 Pytorch1.6。

根据试验训练数据集和平台配置要求, 模型训练配置参数设置如下: 目标类别数为 1, 检测类别为“crack”; 批次处理大小为 2, 线程加载数为 1; 训练轮次为 100, 初始学习率为 0.02, 并使用 SGD 优化器进行梯度下降优化, 并采取在学习轮次为 8 和 12 后, 学习率乘以 0.1 的学习策略。

2.3 结果分析

为验证本文模型对混凝土大坝裂缝图像分割的效果, 按照第 1.3 节提出的改进方法进行模型训练, 对训练过程进行损失函数和准确率的可视化输出。利用训练得到的权重文件, 测试 100 张测试集图像的裂缝分割效果, 并引入多种对比模型评估本文模型在测试集上的裂缝识别精确度和推理速度。

由图 4 可知, 随着训练轮次的增加, 损失函数不断降低, 最终收敛在 0.125 附近, 说明模型训练充分, 收敛良好; 准确率随着训练轮次的增加不断升高最终逼近 100%, 说明随着模型的不训练, 裂缝图像的分割效果越来越好, 证明本文模型对于混凝土大坝裂缝图像分割有着很强的可行性。

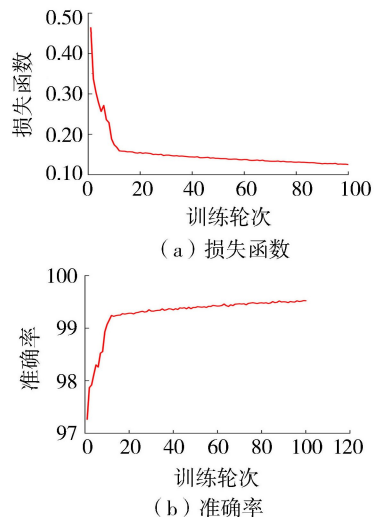


图4 Mask R-CNN 训练过程可视化结果

如图 5 所示, 面对多裂缝形态特征的图像, 模型对每个裂缝单体进行了分割, 掩码识别结果与预先标注掩码高度吻合, 证明模型分割效果良好, 实现了对裂缝图像的实例分割任务。

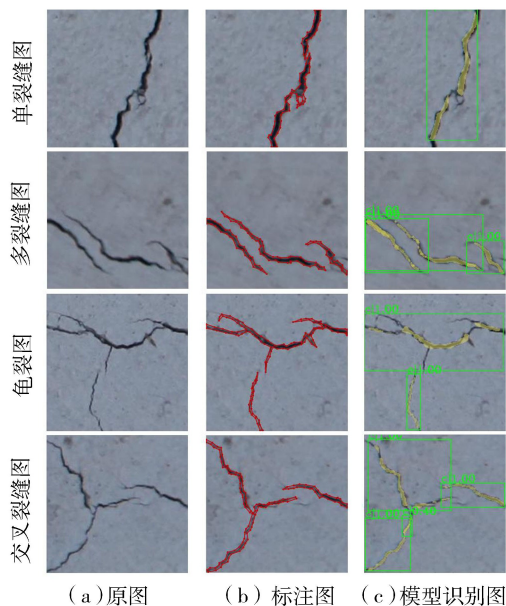


图5 测试集裂缝图像识别结果

为验证算法去噪效果,选取3张包含光照不均、噪声干扰和运动模糊干扰的裂缝图像进行图像预处理,结果如图6所示。经预处理,光照不均图像对比度明显增强,裂缝细节更加清晰;噪声干扰图像裂缝周围背景像素变得更加平滑柔和,凸显了裂缝特征;运动模糊图像裂缝明显清晰,证明本文采用的图像增强方法效果良好。模型基于处理后的裂缝图像实现裂缝识别和分割,说明改进 Mask R-CNN 模型能有效检测复杂条件下混凝土大坝裂缝图像。

通过与 Mask R-CNN-R50、Cascade-Mask R-CNN、Yolact++对比,在相同的数据集上训练并在测试集对训练成果进行评估,验证本文模型的优越性。Cascade-Mask R-CNN、Yolact++是目标检测领域近些年较新提出的实例分割模型,在目标检测领域有着良好的效果。不同模型在测试集上评估结果对比

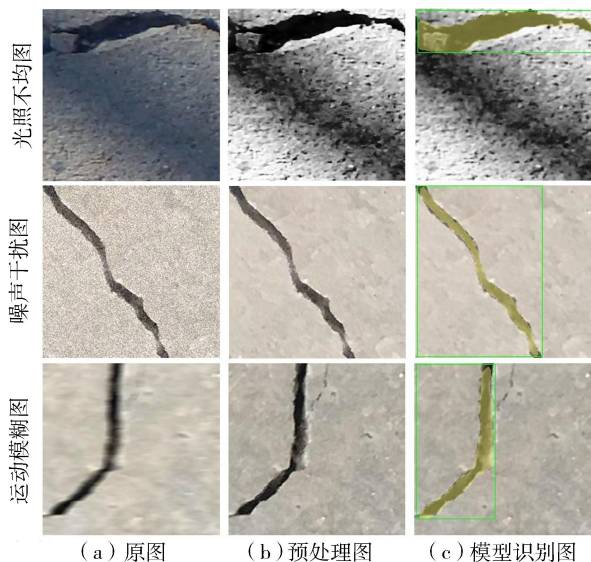


图6 复杂条件下裂缝图像预处理及识别结果

如表1~3所示。

由表1~3可知,改进 Mask R-CNN 模型比 Mask R-CNN 在目标检测和掩码分割两方面的平均精确度分别提升了40.7%和16.2%,图像识别精确度显著提升;与 Cascade-Mask R-CNN、Yolact++这2种较新模型相比,改进 Mask R-CNN 模型在掩码分割精确度方面也有一定的优势;图像评估速度方面,Yolact++是一种检测速度非常快的实例分割模型,在 coco 数据集上最高可达33.5帧/s^[25]。本文模型的评估速度优于其他对比模型,仅次于 Yolact++模型,但由于 GPU 的限制,速度差距不是很明显。

3 结语

改进 Mask R-CNN 对混凝土坝裂缝图像识别效果较好,可以实现裂缝图像实例分割,目标检测和分割掩码的平均精确度值达76.3和61.9;与

表1 目标检测平均精确度

单位:%

模型	骨干网络	AP	AP ₅₀	AP ₇₅	AP _s	AP _M	AP _L
改进 Mask R-CNN	ResNet101-FPN	51.9	76.3	53.5	21.9	43.7	78.7
Mask R-CNN	ResNet50-FPN	11.2	30.9	5.9	2.5	7.2	28.1
Cascade-Mask R-CNN	ResNet50-FPN	41.5	69.3	43.9	21.2	43.5	64.8
Yolact++	ResNet50	25.6	60.8	18.1	12.9	29.6	36.3

表2 掩码分割平均精确度

单位:%

模型	骨干网络	AP	AP ₅₀	AP ₇₅	AP _s	AP _M	AP _L
改进 Mask R-CNN	ResNet101-FPN	19.9	61.9	6.6	7.9	17.4	29.4
Mask R-CNN	ResNet50-FPN	3.7	16.9	0.1	1.9	4.5	4.9
Cascade-Mask R-CNN	ResNet50-FPN	15.5	56.7	2.1	9.5	17.6	18.3
Yolact++	ResNet50	5.2	26.1	0.1	0.6	4.9	11.4

表3 模型推理速度

模型	推理速度/(帧·s ⁻¹)	时间/s	模型	推理速度/(帧·s ⁻¹)	时间/s
改进 Mask R-CNN	13.5	9	Cascade-Mask R-CNN	10.4	12
Mask R-CNN	12	10	Yolact++	15.3	8

ResNet50 结构相比,检测和分割平均精确度分别提升了 40.7% 和 16.2%;与 Cascade-Mask R-CNN、Yolact++模型相比,分割精确度方面也有一定的优势;模型推理速度方面,本文模型较 Cascade-Mask R-CNN 更有优势,仅次于推理速度较快的 Yolact++模型,检测速度约为 13.5 帧/s。

现有研究内容下,模型对于混凝土大坝裂缝图像检测的性能尚有很大的提升空间,如水下检测时,考虑混凝土结构表面附着泥沙或水生动植物等噪声干扰,增加剥落、孔洞等多种大坝损伤特征和基于无人机搭载高清摄像头的大坝实时损伤识别等。

参考文献:

[1] 顾嘉丰,任青文. 水工混凝土弥散型裂缝数值模型中开裂判据的研究[J]. 工程力学,2015,32(6):84-91. (GU Jiafeng, REN Qingwen. Study on hydraulic concrete cracking criterion in smeared crack numerical model[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(6):84-91. (in Chinese))

[2] 陈波,刘庭赫,初文婷,等. 水工混凝土裂缝的压电智能骨料感知试验与模拟[J]. 水利水电科技进展,2021,41(6):1-6. (CHEN Bo, LIU Tinghe, CHU Wenting, et al. Sensing experiment and simulation for cracks in hydraulic concrete based on piezoelectric smart aggregates [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021,41(6):1-6. (in Chinese))

[3] 秦武,杜成斌,孙立国. 基于数字图像技术的混凝土微观力学建模[J]. 水利学报,2011,42(4):431-439. (QIN Wu, DU Chengbin, SUN Ligu. Meso-level analysis model for concrete based on digital image processing[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011,42(4):431-439. (in Chinese))

[4] 王宇,李晓,阙介民,等. 基于 CT 图像灰度水平的孔隙率计算及应用[J]. 水利学报,2015,46(3):357-365. (WANG Yu, LI Xiao, QUE Jiemin, et al. A porosity calculation method based on CT images and its application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(3):357-365. (in Chinese))

[5] 任文渊,杨贞军,黄宇劼. 基于 X 射线计算断层扫描图像的混凝土细观断裂模拟[J]. 水利学报,2015,46(4):452-459. (REN Wenyan, YANG Zhenjun, HUANG Yujie. Meso-scale fracture modelling of concrete based on X-ray computed tomography images [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(4):452-459. (in Chinese))

[6] 覃茜,徐千军. 基于 CT 图像的混凝土初始缺陷分布规律研究[J]. 水利学报,2016,47(7):959-966. (QIN Xi, XU Qianjun. Statistics of the initial defects within concrete based on CT image[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016,47(7):959-966. (in Chinese))

[7] 马建业,郑东健,孙建伟. 基于生物启发神经网络的水下坝面表观裂缝检测路径规划算法[J]. 水利水电科技

进展,2022,42(6):60-65. (MA Jianye, ZHENG Dongjian, SUN Jianwei. Path planning algorithm for underwater dam surface apparent cracks detection based on bio-inspired neural network [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022,42(6):60-65. (in Chinese))

[8] 张大伟,许梦钊,马莉,等. 水下大坝裂缝图像分割方法研究[J]. 软件导刊,2016,15(9):170-172. (ZHANG Dawei, XU Mengzhao, MA Li, et al. Research on underwater dam crack image segmentation method [J]. Software Guide, 2016,15(9):170-172. (in Chinese))

[9] 甘磊,吴健,戴寿晔,等. 含施工裂缝隧道穿越段堤防渗流和稳定分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(1):85-90. (GAN Lei, WU Jian, DAI Shouye, et al. Seepage and stability analysis of embankment with construction cracks in tunnel crossing section [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022,50(1):85-90. (in Chinese))

[10] 蒋小燕,张松,何松原. 基于格子波尔兹曼模型大坝裂缝检测[J]. 科技视界,2018(11):96-97. (JIANG Xiaoyan, ZHANG Song, HE Songyuan. Dam crack detection based on Lattice Boltzmann model [J]. Science & Technology Vision, 2018(11):96-97. (in Chinese))

[11] 刘晓瑞,谢雄耀. 基于图像处理的隧道表面裂缝快速检测技术研究[J]. 地下空间与工程学报,2009,5(增刊2):1624-1628. (LIU Xiaorui, XIE Xiongyao. Rapid crack inspection of tunnel surface based on image processing [J]. Chinese Journal of Underground Space And Engineering, 2009,5(Sup2):1624-1628. (in Chinese))

[12] 徐港,赵恬悦,蒋赏,等. 基于多种连通域特征的结构表面裂缝提取方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2019,47(10):52-55. (XU Gang, ZHAO Tianyue, JIANG Shang, et al. Extraction method of structural surface cracks based on multiple connected domain features [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2019,47(10):52-55. (in Chinese))

[13] KATAKAM N. Pavement crack detection system through localized thresholding [D]. Toledo : University of Toledo, 2009.

[14] NISHIKAWA T, YOSHIDA J, SUGIYAMA T, et al. Concrete crack detection by multiple sequential image filtering [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2012,27(1):29-47.

[15] CHUN P J, IZUMI S, YAMANE T. Automatic detection method of cracks from concrete surface imagery using two-step light gradient boosting machine [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2021,36(1):61-72.

[16] 王一兵,包腾飞,高治鑫. 基于 LabVIEW+VDM 的混凝土坝裂缝检测方法[J]. 水利水电科技进展,2021,41(5):76-82. (WANG Yibing, BAO Tengfei, GAO Zhixin. Crack detection method of concrete dams based on LabVIEW+VDM [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021,41(5):76-82. (in Chinese))

(下转第 98 页)

基于 CEEMDAN 和 SVM 的混凝土破坏状态声发射信号识别

宿辉^{1,2}, 栾亚伟^{1,2}, 胡宝文^{1,2}, 白延杰¹

(1. 河北工程大学水利水电学院, 河北 邯郸 056038; 2. 河北省智慧水利重点实验室, 河北 邯郸 056038)

摘要: 针对混凝土破坏状态复杂多变、声发射(AE)信号难以从背景噪声中分离的问题, 将自适应噪声完备集合经验模态分解(CEEMDAN)方法与支持向量机(SVM)方法耦合, 对混凝土破坏状态声发射信号进行识别与预测。利用 CEEMDAN 方法对采集的声发射信号进行分解, 获取一定数量的自适应特征模态(IMF)分量, 并计算各分量与原声发射信号之间的相关系数, 优选出包含原声发射信号主要频域信息的 IMF 分量。计算各分量的特征参数能量系数和波形系数, 并将其分别输入 SVM 中对混凝土不同破坏状态进行分类识别, 结果表明能量系数作为特征参数的预测率为 92.39%, 波形系数作为特征参数的预测率为 91.30%。

关键词: 混凝土破坏; 自适应噪声完备集合经验模态分解; 支持向量机; 能量系数; 波形系数; 声发射中图分类号: TV331 文献标志码: A 文章编号: 1006-7647(2023)01-0093-06

Acoustic emission signal recognition of concrete failure state based on CEEMDAN and SVM//SU Hui^{1,2}, LUAN Yawei^{1,2}, HU Baowen^{1,2}, BAI Yanjie¹ (1. College of Water Resources and Hydropower, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. Key Laboratory of Smart Water Conservancy of Hebei Province, Handan 056038, China)

Abstract: Aiming at the problem that the failure state of concrete is complex and changeable, and the acoustic emission (AE) signal is difficult to be separated from the background noise, the function of complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise (CEEMDAN) method was coupled with the support vector machine (SVM) method to identify and predict the concrete destructive AE signal. Firstly, the CEEMDAN method is used to decompose the acquired AE signal, obtaining a certain number of adaptive characteristic modal components (IMF). The correlation coefficient between each component and the original AE signal is calculated, and the IMF component containing more information about the original AE signal is preferred. Secondly, the energy coefficient and waveform coefficient of each component eigenvalue are calculated and inputted into the SVM respectively to classify and identify different failure states of concrete. The results show that the prediction rate of energy coefficient as eigenvalue is 92.39%, and the prediction rate of waveform coefficient as eigenvalue is 91.30%.

Key words: concrete failure; CEEMDAN; SVM; energy coefficient; waveform coefficient; acoustic emission

随着我国水利建设不断发展,越来越多的混凝土材料被应用于水利工程中。混凝土状态直接决定了水利工程的安全性。因此,混凝土材料早期破坏状态的识别诊断对水利工程的安全运行至关重要^[1-2]。声发射技术是目前一种较成熟的无损监测技术,近年来被逐渐用于探寻混凝土破坏状态监测方面的问题^[3]。通常对包含混凝土内部损伤信息的声发射信号进行滤波处理,可以精准地提取混凝土破坏过程中的相关参数,进而获得混凝土的损伤

信息^[4]。例如:袁明等^[5]采用快速傅里叶谱变换和小波包分解方法,分析了混凝土裂缝扩展过程中声发射信号,发现混凝土宏观裂纹波形相对于微观裂纹波形更为复杂;赵奎等^[6]应用集合经验模态分解(EEMD)及单通道盲源分离(SCBSS)方法对岩石声发射信号进行了滤波处理,发现该方法可以有效保护滤波后声发射信号的频域信息,但该算法添加的高斯白噪声会影响声发射信号的分解。由于傅里叶变换和小波分解法^[7]并不能对非平稳的声发射信

基金项目:河北省自然科学基金(E2019402256, E2020402087)

作者简介:宿辉(1972—),男,教授,博士,主要从事水工结构工程和岩土工程研究。E-mail:suh-26@163.com

通信作者:胡宝文(1984—),男,副教授,博士,主要从事岩土力学研究。E-mail:hubaowen1984@gmail.com

号进行完全的去噪处理, Torres 等^[8]提出了自适应噪声完备集合经验模态分解 (complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise, CEEMDAN) 方法, 其通过对各阶残余量添加自适应白噪声, 可有效获取一定数量不同频率的自适应特征模态 (IMF) 分量, 且重构误差趋于 0, 因此, 其对非线性时间序列的分解效果更好。

与传统的神经网络^[9]和随机森林^[10]等机器学习方法相比, 支持向量机 (support vector machine, SVM) 方法^[11-12]的优势在于: 适用于小数量样本学习, 简化了通常的分类问题, 具有很好的鲁棒性。因此, SVM 可以有效解决复杂非线性问题中的预测难题。例如: 吴鑫等^[13]将声发射信号的能量、幅值等特征参数输入神经网络模型中, 减小了岩石声发射事件源定位误差; 吴贤国等^[14]把混凝土材料用量作为参数输入到 RF-SVM 模型中做回归预测, 得到的预测结果精度接近实测值。

本文将 CEEMDAN 方法与 SVM 方法耦合使用, 提出了一种混凝土破坏状态声发射信号耦合识别模型, 探究其对混凝土破坏阶段特征提取的可行性和预测混凝土破坏阶段的准确性。

1 试验方案

1.1 试验材料与方法

为了保证试验的准确性, 本次试验混凝土试块规格为 100 mm×100 mm×200 mm, 水泥为太行山牌 P·O42.5 普通硅酸盐水泥, 粗骨料为 5~15 mm 连续级配的碎石, 细骨料为当地河砂筛选出, 粉煤灰选自当地电厂生产的 II 级粉煤灰, 减水剂采用聚羧酸高性能减水剂。

在 YH-60B 型混凝土标准养护箱养护, 养护湿度在 95% 以上, 温度设定为 (20±1) °C, 养护龄期分别为 1 d、3 d、7 d 和 28 d, 强度等级为 C30, 1 m³ 混凝土配合比参数包括: 水胶比 0.42, 水 198 kg, 水泥 424 kg, 粉煤灰 47 kg, 碎石 1 186 kg, 砂 582 kg, 减水剂 1.2 kg。试件共计 4 组, 每组 3 个试件作为平行试验, 共计 12 个试件, 分别对其进行声发射单轴压缩试验, 计算各组试件的平均值, 当一个试件抗压强度与平均值超过 15% 时, 重新做试验。最后从中选取养护龄期为 28 d 的工况进行研究。

1.2 试验仪器

加载系统为 TAW-2000 微机伺服三轴试验机, 此次加载方式为位移控, 加载速率为 0.1 mm/min。声发射系统采用 PCI-2 型多通道高速采集声发射试验仪, 传感器采用 R6-a 型, 频率带宽范围为 10~110 kHz, 声发射阈值 38 dB, 峰值定义时间 50 μs,

采样率设定 1 MSPS, 撞击定义时间 100 μs, 闭锁时间 300 μs。

2 声发射信号分析

2.1 混凝土损伤信号预处理

在声发射监测过程中将得到能量、幅值等特征参数, 其中前者可以很好地反映混凝土在破坏过程中的状态^[15]。图 1 为混凝土在单轴压缩过程中声发射信号能量-时间和荷载-时间变化曲线。值得注意的是声发射能量可以有效评估混凝土裂纹的变化情况, 即裂缝越剧烈, 能量越大。

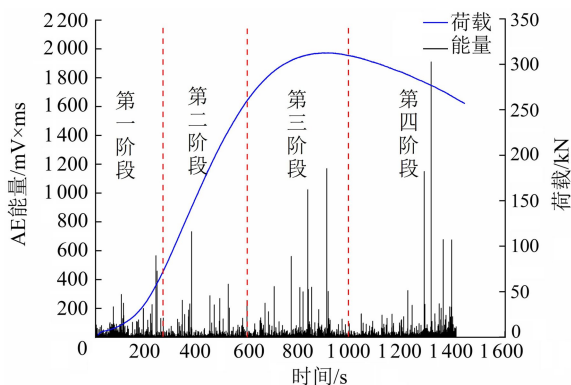


图 1 能量-荷载-时间曲线

图 1 表明, 在混凝土破坏过程中, 混凝土内部的能量在大多数时间处于均衡释放状态, 整体呈现“聚集-释放-再聚集-再释放”的演进过程, 但在 230 s、370 s、915 s、1310 s 附近能量曲线存在局部峰值现象, 这归因于混凝土将前一时段内聚集的能量集中释放, 其突变点意味着混凝土裂纹发展到最剧烈时刻; 在加载初期, 混凝土中原始存在的微孔隙在荷载的作用下逐渐闭合, 产生一定的声发射信号。随着荷载的增大, 混凝土中逐渐有裂纹萌生, 荷载继续增大, 原始的裂纹进一步发展至试件表面, 进入最后一阶段, 荷载减小, 混凝土材料损伤达到极限状态, 根据荷载-时间曲线结合峰值出现的位置和裂纹在破坏过程中的变化过程, 可以将整个混凝土破坏过程分为微孔隙闭合、裂纹萌生、裂纹发展、裂纹贯通 4 个阶段, 其相关参数见表 1。

表 1 不同破坏阶段的数据集

破坏阶段	现象	时间/s	样本数量/个	类别标签
第一阶段	微孔隙闭合	0~270	50	1
第二阶段	裂纹萌生	270~580	55	2
第三阶段	裂纹发展	580~990	60	3
第四阶段	裂纹贯通	990~1409	65	4

图 2 为混凝土破坏过程中声发射幅度分布规律 4 个阶段中选取的典型信号波形图。通过对不同阶段去噪分解前声发射信号波形的对比发现, 随着裂

纹的不断发展,声发射信号的幅值逐渐变大、波形复杂程度增大,且在0.01V处存在双波、三波以及难以分辨波形个数的多波。

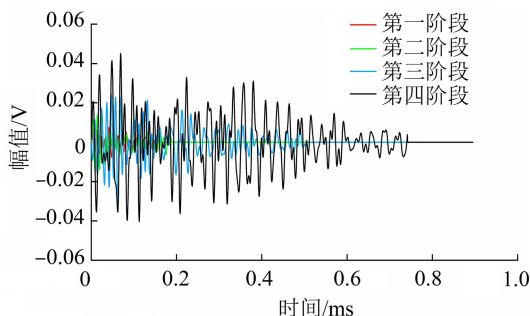


图2 不同破坏阶段典型波形

综合分析表1和图2可知,4个阶段的持续时间依次增加,同时考虑数据的处理量以及SVM方法适用于小数量样本学习,在借鉴王岩等^[9]处理声发射信号选取样本的研究成果的基础上,本文确定在第一阶段随机选取50个样本,第二、三、四阶段依次随机选取55个、60个和65个样本。

2.2 基于CEEMDAN的声发射信号分析

基于MATLAB平台,对混凝土不同破坏阶段的声发射信号进行CEEMDAN分解,各个声发射信号均可以分解为10~12个IMF分量和一个残差。

图3为第一阶段中一个原始信号,使用CEEMDAN法对原始信号进行分解,利用分解出的每个IMF分量与原声发射信号的相关系数,可以确定每个IMF分量包含原声发射信号频域信息的程度。IMF1~IMF11分量与原声发射信号的相关系数分别为0.5394、0.6021、0.8837、0.6801、0.4324、0.2209、0.0199、0.0053、0.0015、0.0233、0.0284。如果求出的一阶IMF与原信号的相关系数较之前几阶明显小很多,可判定这一阶是假的,应该去掉,计算亦随之停止。从IMF7开始相关程度较之前急剧下降,基本为0,因此IMF1~IMF6包含了原声发射信号中主要频域信息。图4和图5分别为第一阶段原始信号的CEEMDAN的IMF1~IMF6分量及其信号频谱图。

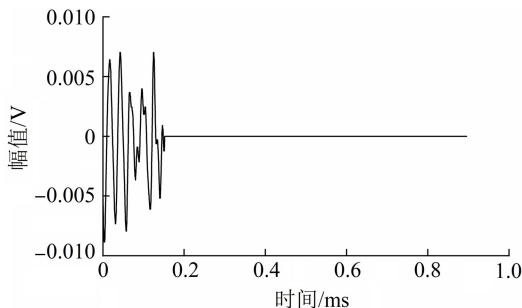


图3 第一阶段原始信号波形

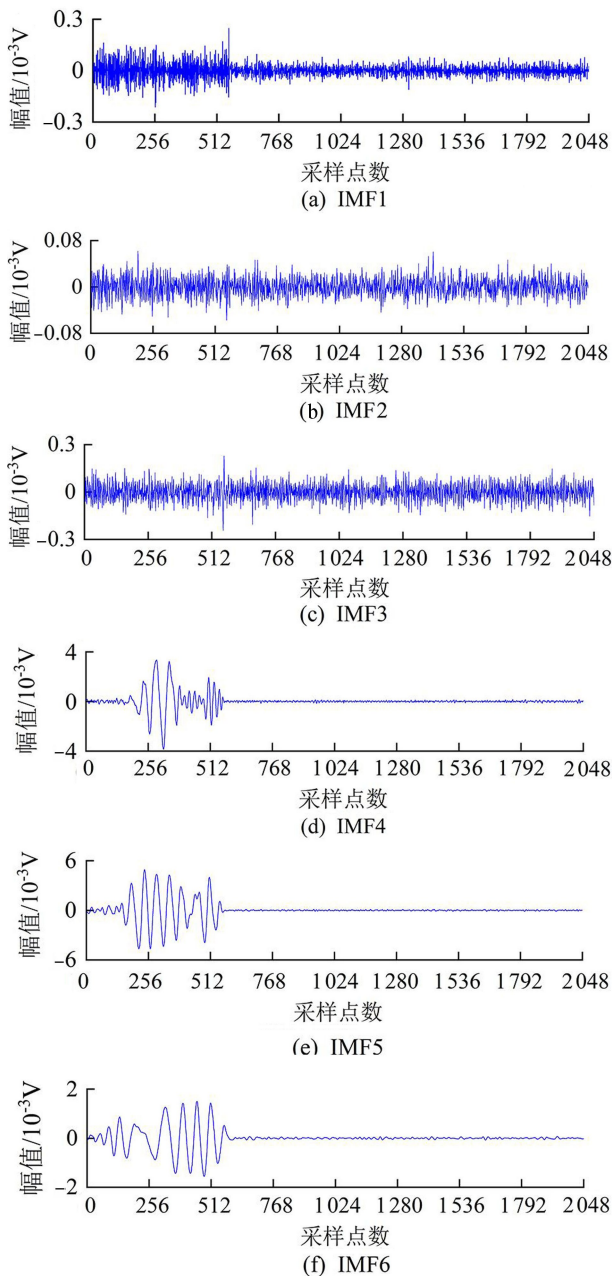


图4 第一阶段原始信号的CEEMDAN分解IMF分量

2.3 混凝土破坏声发射信号特征提取结果

利用CEEMDAN分解得到的IMF1~IMF6分量特征参数能量系数 P_e 和波形系数 C_s 可以较好地揭示不同破坏阶段特征,其计算公式为

$$P_{e_j} = \frac{\sum_{i=1}^N \chi_{ij}^2}{\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \chi_{ij}^2} \quad (1)$$

$$C_{s_j} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \chi_{ij}^2}}{\frac{i}{N} \sum_{i=1}^N |\chi_{ij}|} \quad (2)$$

式中: χ_{ij} 为第j个IMF分量的第i个数据值;N为信号总数数据数;M为IMF分量总数; $|\chi_{ij}|$ 表示第i个数

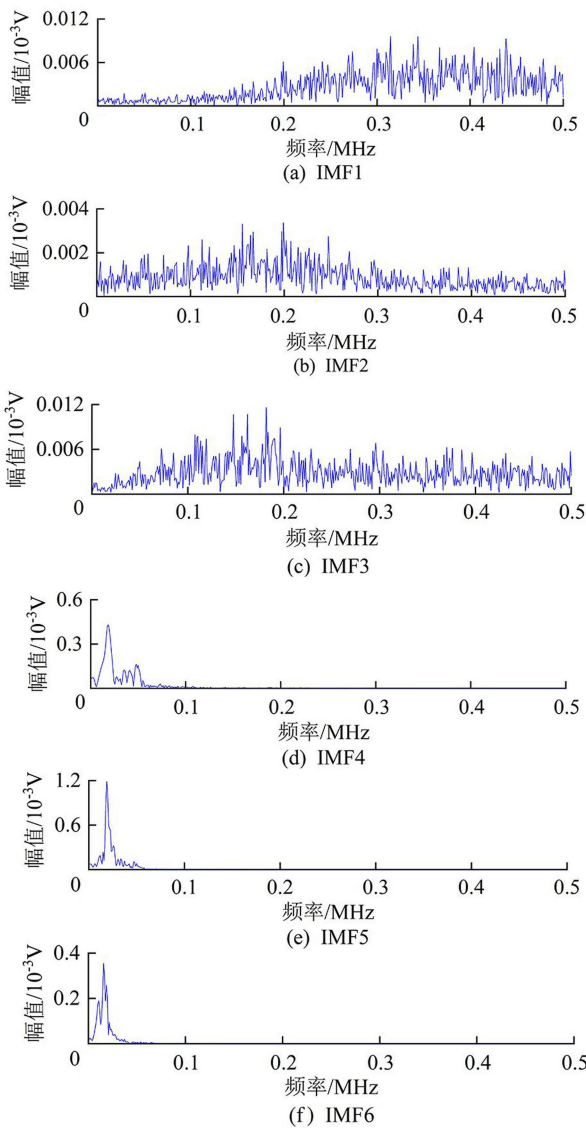


图5 第一阶段原始信号的 CEEMDAN 分解 IMF 分量信号频谱

据点的绝对值。

值得指出的是能量系数是每个 IMF 分量占全部 IMF 分量能量的比值,在不同阶段,其值差异显著;波形系数是波形有效值与波形平均幅值的比值,不同阶段的声发射波形系数也存在差异。混凝土破坏声发射信号特征参数值如表 2 和表 3 所示。

2.4 基于 SVM 的破坏状态监测

2.4.1 数据预处理

数据量纲不统一以及数据偏态分布都会降低 SVM 的求解速度和模型精度。因此,利用 Python 软件中的 StandardScaler 对混凝土破坏声发射信号原始数据进行归一化和标准化处理,并将其输入到 SVM 中,其计算公式为

$$\frac{X - \mu}{\sigma} \sim N(0, 1) \quad (3)$$

式中: X 为原始数据; μ 为均值; σ 为标准差。

表 2 SVM 输入特征能量系数

破坏阶段	样本序号	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	IMF6
第一阶段	1	0.0006	0.0001	0.1147	0.3726	0.3072	0.1890
	2	0.0005	0.0001	0.0016	0.1010	0.4884	0.3991
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	49	0.0076	0.0004	0.3581	0.2027	0.3666	0.0592
	50	0.0004	0.0001	0.0278	0.3320	0.3705	0.2511
第二阶段	1	0.0013	0.0002	0.0352	0.2948	0.5957	0.0549
	2	0.0004	0.0001	0.0136	0.2505	0.4953	0.2213
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	54	0.0049	0.0006	0.2977	0.1427	0.5182	0.0178
	55	0.0019	0.0003	0.0675	0.5757	0.2403	0.0337
第三阶段	1	0.0011	0.0001	0.0233	0.1503	0.6830	0.0782
	2	0.0009	0.0001	0.0014	0.1398	0.7793	0.0509
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	59	0.0011	0.0002	0.0172	0.1844	0.6993	0.0934
	60	0.0011	0.0001	0.0043	0.1169	0.7494	0.0619
第四阶段	1	0.0007	0.0001	0.0013	0.0164	0.8597	0.1094
	2	0.0006	0.0001	0.0012	0.0188	0.9207	0.0479
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	64	0.0004	0.0001	0.0011	0.0029	0.9154	0.0658
	65	0.0014	0.0002	0.0023	0.0808	0.8301	0.0133

表 3 SVM 输入特征波形系数

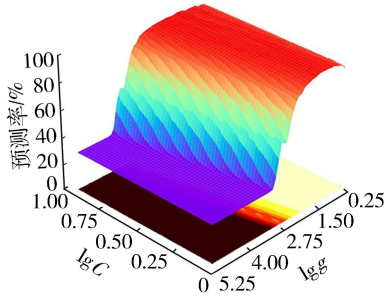
破坏阶段	样本序号	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	IMF6
第一阶段	1	1.3426	1.2743	1.2753	1.9844	1.9755	1.8416
	2	1.2587	1.2537	1.2594	1.8128	1.7360	1.4644
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	49	1.2556	1.2465	1.3812	1.9685	1.7074	1.2836
	50	1.2412	1.2478	1.4234	1.7542	1.6019	1.2688
第二阶段	1	2.5378	2.9695	2.9306	2.2993	2.5612	2.1985
	2	1.6221	1.6431	2.4293	2.0754	2.0880	2.3538
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	54	3.9642	2.3343	2.7108	2.2154	2.2677	1.8817
	55	2.2000	1.9060	3.0892	2.3275	2.5313	2.2158
第三阶段	1	3.8407	3.4568	3.3761	2.2862	2.1057	2.1684
	2	4.3043	3.9698	3.2960	2.2226	2.3030	1.9141
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	59	3.2105	2.3785	2.8030	2.3321	2.3066	1.8781
	60	3.7851	3.3024	3.3075	2.0423	1.9562	1.8196
第四阶段	1	3.3666	3.9099	3.6886	2.8031	2.8399	2.2705
	2	2.9854	3.5176	3.7090	2.5106	2.5645	2.0006
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	64	4.4455	4.3041	3.5295	2.4511	2.2849	2.1616
	65	3.5202	3.5284	3.4465	2.3797	2.4691	1.9543

2.4.2 网格搜索和交叉验证的参数优化

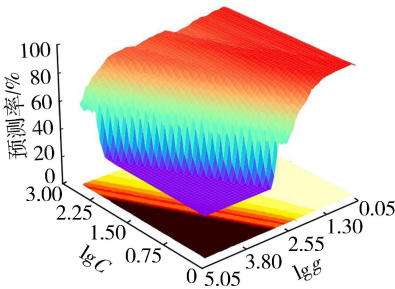
由于混凝土破坏声发射数据具有高度非线性特征,在 SVM 训练测试过程中,核函数选择径向基核 (RBF),并利用网格搜索法寻找出最优参数惩罚因子 C 和 g 。此外,考虑到训练数据对参数的影响较大,且前一阶段的最优参数将会随之改变。因此,采用 K-CV 交叉验证与网格搜索相结合的方式对每组 (C, g) 参数进行优选,即将训练数据分为 4 组,其中 3 组作为训练集,剩余 1 组作为预测集,最终优选得到 4 个模型,并将其分类准确率的平均值视为交叉

验证的评估指标。

图6为能量系数和波形系数寻优三维等高线图。SVM方法利用少量样本就可以完成训练学习,为了降低预测样本数量不足易于造成的结果偶然性,故本文选择每个阶段的前60%作为训练样本,其余作为预测样本,且把各信号分量IMF1~MF6的能量系数和波形系数作为SVM的输入特征参数。SVM的输出分为4类,分别为第一阶段、第二阶段、第三阶段和第四阶段。



(a) 能量系数



(b) 波形系数

图6 能量系数和波形系数寻优三维等高线

表4为混凝土破坏状态预测结果(能量系数和波形系数分类结果)。由表4可知,将能量系数作为特征参数时,经过网格搜索和交叉验证最终确定参数 C 的取值为8.3,参数 g 的取值为0.09,其准确率高达92.39%;将波形系数作为特征参数时,经过网格搜索和交叉验证最终确定参数 C 的取值为1.02,参数 g 的取值为1.88,其准确率高达91.30%。

表4 能量系数和波形系数分类结果

特征参数	样本总数	训练样本数	预测样本数	错分样本数	准确率/%
能量系数	230	138	92	7	92.39
波形系数	230	138	92	8	91.30

3 结论

a. 基于CEEMDAN和SVM方法对混凝土破坏状态识别是可行的,且利用IMF分量和原信号的相关性可有效剔除虚假分量。

b. 利用网格寻优和交叉验证方法优化SVM参数,可以提高诊断精度。

c. 有效IMF分量的能量系数和波形系数作为特征参数时,其预测率分别为92.39%和91.30%,两者均可以较优地揭示混凝土破坏的损伤特征。

d. 提出的CEEMDAN与SVM耦合方法可有效进行混凝土破坏状态的识别,研究成果可为评估混凝土结构安全状态提供可靠的理论依据。

参考文献:

[1] 海鲁,李杰.考虑微裂纹演化时间效应的混凝土动力损伤本构模型[J].同济大学学报(自然科学版),2021,49(10):1383-1389. (HAI Lu, LI Jie. A dynamic constitutive damage model considering rate-dependence of micro-cracks evolution for concrete[J]. Journal of Tongji University (Natural Science),2021,49(10):1383-1389. (in Chinese))

[2] 郑丹,蔡昊男,李鑫鑫.考虑损伤的混凝土非线性徐变模型[J].水利水电科技进展,2021,41(4):75-80. (ZHENG Dan, CAI Haonan, LI Xinxin. Nonlinear creep model for concrete considering damage[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(4):75-80. (in Chinese))

[3] 张长江,徐佰顺,赵志蒙,等.基于声发射技术的早期期扰动对混凝土力学性能影响分析[J].硅酸盐通报,2021,40(12):3964-3975. (ZHANG Changjiang, XU Baishun, ZHAO Zhimeng, et al. Influence of early age disturbance on mechanical properties of concrete based on acoustic emission technology[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(12):3964-3975. (in Chinese))

[4] 王宁,石丹丹.不同缝高比混凝土梁试件三点弯曲断裂声发射特性研究[J].混凝土与水泥制品,2021(11):6-11. (WANG Ning, SHI Dandan. Acoustic emission characteristics of three-point bending fracture of concrete beam specimen with different notch-to-depth ratio[J]. China Concrete and Cement Products, 2021(11):6-11. (in Chinese))

[5] 袁明,程晓东,黄练,等.混凝土桥梁裂缝扩展过程声发射信号的分形与小波包综合分析[J].长安大学学报(自然科学版),2021,41(2):34-45. (YUAN Ming, CHENG Xiaodong, HUANG Lian, et al. Comprehensive analysis of fractal and wavelet packet of acoustic emission signal in process of concrete bridge crack propagation[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition),2021,41(2):34-45. (in Chinese))

[6] 赵奎,杨道学,曾鹏,等.基于EEMD-SCBSS的岩石声发射信号去噪方法[J].振动与冲击,2021,40(5):179-185. (ZHAO Kui, YANG Daoxue, ZENG Peng, et al. Denoising method of rock acoustic emission signal based on EEMD-SCBSS[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021,40(5):179-185. (in Chinese))

- [7] MING Pan, LU Jun, HU Shaowei, et al. Determination of the optimal decomposition layer of wavelet de-noising based on signal band feature [J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2019, 55 (1) : 39-47.
- [8] TORRES M E, COLOMINAS M A, SCHLOTTHAUER G, et al. A complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise [C] // 2011 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Prague: IEEE, 2011 : 4144-4147.
- [9] 王岩, 张友桃, 胡鸿翔, 等. 基于声发射和人工神经网络的混凝土损伤程度识别 [J]. 建筑材料学报, 2014, 17 (4) : 672-676. (WANG Yan, ZHANG Youtao, HU Hongxiang, et al. Identification of damage degree of concrete by acoustic emission and artificial neural network [J]. Journal of Building Materials, 2014, 17 (4) : 672-676. (in Chinese))
- [10] 易正元, 苏怀智, 杨立夫. 混凝土坝变形监控模型的随机森林与旗鱼优化组合建模方法 [J]. 水电能源科学, 2021, 39 (10) : 106-109. (YI Zhengyuan, SU Huaizhi, YANG Lifu. Deformation monitoring model of concrete dam based on random forest algorithm optimized by sailfish optimization [J]. Water Resources and Power, 2021, 39 (10) : 106-109. (in Chinese))
- [11] 阮永芬, 高春钦, 刘克文, 等. 基于粒子群算法优化小波支持向量机的岩土力学参数反演 [J]. 岩土力学, 2019, 40 (9) : 3662-3669. (RUAN Yongfen, GAO Chunqin, LIU Kewen, et al. Inversion of rock and soil mechanics parameters based on particle swarm optimization wavelet support vector machine [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40 (9) : 3662-3669. (in Chinese))
- [12] 潘志刚, 林祥峰, 张继生. 基于支持向量机的桥墩局部冲刷深度预测模型 [J]. 水利水电科技进展, 2021, 41 (6) : 78-81. (PAN Zhiqiang, LIN Xiangfeng, ZHANG Jisheng. Prediction model for bridge pier local scour depth based on support vector machine [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41 (6) : 78-81. (in Chinese))
- [13] 吴鑫, 赵红霞, 罗筱毓, 等. 基于 BP 神经网络的岩石损伤声发射事件源定位研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17 (8) : 36-42. (WU Xin, ZHAO Hongxia, LUO Xiaoyu, et al. Study on acoustic emission event source location of rock damage based on BP neural network [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17 (8) : 36-42. (in Chinese))
- [14] 吴贤国, 杨赛, 陈虹宇, 等. 基于随机森林的支持向量机混凝土早期抗裂性预测研究 [J]. 工业建筑, 2020, 50 (9) : 99-105. (WU Xianguo, YANG Sai, CHEN Hongyu, et al. Prediction of early crack resistance of concrete by support vector machine based on random forest [J]. Industrial Construction, 2020, 50 (9) : 99-105. (in Chinese))
- [15] 赵康, 何志伟, 宁富金, 等. 不同灰砂配比胶结材料组合体声发射特性 [J]. 硅酸盐学报, 2021, 49 (11) : 2462-2469. (ZHAO Kang, HE Zhiwei, NING Fujin, et al. Acoustic emission characteristics of cementitious material with different cement-tailing ratio [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2021, 49 (11) : 2462-2469. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-12-02 编辑: 俞云利)

(上接第 92 页)

- [17] 张小伟, 包腾飞, 高兴和. 基于计算机视觉的混凝土坝裂缝检测方法 [J]. 水利水电科技进展, 2021, 41 (5) : 83-88. (ZHANG Xiaowei, BAO Tengfei, GAO Xinghe. Crack detection method of concrete dams based on computer vision [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41 (5) : 83-88. (in Chinese))
- [18] REZAIEE-PAJAND M, TAVAKOLI F H. Crack detection in concrete gravity dams using a genetic algorithm [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings, 2015, 168 (3) : 192-209.
- [19] LI S, GU X, XU X, et al. Detection of concealed cracks from ground penetrating radar images based on deep learning algorithm [J]. Construction and Building Materials, 2021, 273 : 121949.
- [20] KIM B H, CHO S. Image-based concrete crack assessment using mask and region-based convolutional neural network [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2019, 26 (8) : e2381.
- [21] HE K, GKIOXARI G, DOLLAR P, et al. Mask R-CNN [C] // Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. Piscataway: IEEE Press, 2017 : 2961-2969.
- [22] REN S, HE K, GIRSHICK R, et al. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks [J]. Advances in neural information processing systems, 2015, 28 : 91-99.
- [23] HE K, ZHANG X, REN S, et al. Deep residual learning for image recognition [C] // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. Piscataway: IEEE Press, 2016 : 770-778.
- [24] LIN T Y, DOLLAR P, GIRSHICK R, et al. Feature pyramid networks for object detection [C] // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, Piscataway: IEEE Press, 2017 : 2117-2125.
- [25] BOLYA D, ZHOU C, XIAO F, et al. Yolact: Real-time instance segmentation [C] // Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2019 : 9157-9166.

(收稿日期: 2022-01-14 编辑: 刘晓艳)

DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2023.01.015

黄河淤泥固化改性材料力学性能与微观结构试验研究

祝 珺¹, 李长明^{2,3,4}, 狄龙飞⁵, 柴泉雄², 贾东洋², 陈恒杰², 秦宋林⁵, 尹冰涛³

(1. 河南省信阳市鲇鱼山水库管理局, 河南 信阳 465350;

2. 华北水利水电大学土木与交通学院, 河南 郑州 450045; 3. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003;

4. 河南省黄河流域环境保护与修复重点实验室, 河南 郑州 450003; 5. 中国水利水电第十一工程局有限公司, 河南 郑州 450001)

摘要:通过力学强度测试、矿物成分分析、红外光谱测试(FTIR)和电子扫描电镜(SEM)分析等,研究了改性剂模数、改性剂掺量及养护龄期对黄河流域河库底淤泥固化改性土的力学性能、矿物组成、微观结构和水化产物成分的影响。结果表明:改性剂模数、改性剂掺量和养护龄期对固化淤泥试块的力学性能影响显著,试件抗压强度随改性剂掺量和养护龄期的增加而增长,抗压强度最高达7.13 MPa;改性后淤泥中黏土矿物与改性剂反应生成絮状地聚物凝胶,材料结构更加致密均匀。

关键词:淤泥固化改性;抗压强度;资源化利用;黄河流域

中图分类号:TV145; TV697.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)01-0099-05

Experimental study on mechanical properties and microstructures of modified Yellow River sludge materials//ZHU

Jun¹, LI Changming^{2,3,4}, DI Longfei⁵, CHAI Xiaoxiong², JIA Dongyang², CHEN Hengjie², QIN Songlin⁵, YIN Bingtao³

(1. Nianyushan Reservoir Administration Bureau of Xinyang City in Henan Province, Xinyang 465350, China; 2. School of

Civil Engineering and Communication, North China University of Water Resource and Electric Power, Zhengzhou 450045,

China; 3. Yellow River Institute of Hydraulic Research, YRCC, Zhengzhou 450003, China; 4. Henan Key Laboratory of

Ecological Environment Protection and Restoration of Yellow River Basin, Zhengzhou 450003, China; 5. Sinohydro Bureau

11 Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The influence of the modulus, dosage of the modifier and curing age on mechanical properties, mineral component, microstructures and hydration products of modified sludge from reservoirs in the Yellow River Basin were investigated using mechanical strength test, XRD, FTIR and SEM technique. The results show that the modulus, dosage and curing age of the modifier have significant impacts on the mechanical properties of the solidified sludge. The compressive strength of the specimen increases with the modifier dosage and curing age, and the maximum value of compressive strength is 7.13 MPa. The results of XRD, FTIR and SEM show that flocculent geopolymer gel can be formed by the reaction of clay minerals and the modifier, and the material structure became more compact and uniform.

Key words: sludge solidification enhancement; compressive strength; resource utilization; Yellow River Basin

水少沙多、水沙关系不协调是黄河问题的关键所在,随着“黄河流域生态保护和高质量发展”国家战略的提出,黄河泥沙问题再次成为研究热点。黄河流域内的河流、湖泊、水库淤泥淤积日益加剧,导致防洪排涝能力下降。此外,黄河沿线城市工业废水的排放,导致城市周边河流和湖泊水体底泥淤积严重,这些淤泥会对水体生态系统产生影响^[1-3],为此,每年淤泥的疏浚及处理需投入大量物力财力^[4]。目前,淤泥处置的主要手段有直接填埋、焚

烧或作为堆肥使用^[5],其中直接填埋因操作管理方便,成本低而被较多地采用^[6]。但淤泥含水率高、有机物含量高^[7-8]、力学性能差,直接抛填不仅会形成软弱地基,占用大量土地,还易对环境造成污染^[9-10],不符合可持续发展战略要求,因此,如何科学合理地处理黄河流域的河库疏浚淤泥是一个亟待解决的重要课题。

河库淤泥的资源化利用具有重要现实意义^[11],把淤泥研制成土工填方材料、建筑材料等^[12],既可

基金项目:国家自然科学基金(51708216,51809109);河南省黄河流域生态环境保护与修复重点实验室开放基金(LYBEP202104);黄河水利科学研究院基本科研业务费专项(HKY-JBYW-2020-20)

作者简介:祝珺(1983—),男,高级工程师,硕士,主要从事水利工程研究。E-mail:70621522@qq.com

通信作者:李长明(1985—),男,副教授,博士,主要从事水工材料研究。E-mail:lichangming@ncwu.edu.cn

解决疏浚淤泥的存放问题,避免对环境的再次污染,同时还可产生经济效益^[10]。河库淤泥是一种性质比较复杂的软土,形成条件和所处环境不同,其成分性质存在较大差异^[11-12]。国内很多专家学者对疏浚污泥固化处理进行了研究,王东星等^[13]研究表明淤泥的水稳性能可以通过掺加高活性 MgO 进行改善。焦健^[14]探讨了水泥掺量和初始含水率对淤泥固化土强度特性的影响,发现随水泥掺量增大,水泥淤泥固化土无侧限抗压强度逐渐增大,不受初始含水率的影响。朱伟等^[15-16]通过现场抗压试验研究不同水泥掺量和养护龄期对固化淤泥无侧限抗压强度的影响,确认了水泥作固化剂的合理性,水泥固化淤泥能够满足一般性土工填方材料要求,而且还可以作为填充物材料用于填海工程。赵笛等^[17]证明了淤泥有机质成分中影响固化效果的主要成分是富里酸。程福周等^[18]研究了水泥和水玻璃对武汉东湖淤泥的固化作用,结果表明掺入水泥和水玻璃后,固化淤泥试块的无侧限抗压强度有所提升。夏艳波等^[19]认为水泥、石灰、细砂土以及生物酶均可降低淤泥质土的含水率、液限及塑性指数,并都能提升固化淤泥的无侧限抗压强度,而其中水泥与生物酶对淤泥的无侧限抗压强度增强最为明显。

目前,对于如何更高效、经济地提高淤泥固化土的强度,让其成为可靠的土工填方材料与建筑材料,依然是淤泥处理与资源化利用研究的热点。然而,国内外对于淤泥固化剂的研究,大多都集中在有机化合物类固化剂和无机化合物类固化剂。现阶段对水泥固化剂的应用最为普及,而石灰固化剂和硅粉固化剂的效果并未达到理想状态,且容易受到使用环境、原料成分等不确定因素的影响,尚处于初始研究阶段^[20-22]。

本文通过配制一种复合改性剂,探讨改性剂掺量、模数等对黄河流域河库淤泥的固化增强改性效果的影响,分析改性淤泥材料强度发展规律与反应产物类型,探明复配的改性剂对淤泥的固化增强机理,旨在为黄河流域河库淤泥的绿色资源化利用提供参考。

1 试验设计

1.1 试验材料

试验用淤泥取自黄河郑州段河床,含水率为 71.20%,密度为 2.59 g/cm³,有机质质量分数为 5.10%,液限为 63.60%,塑限为 26.40%,液性指数为 1.14,塑性指数为 37.20。淤泥烘干前后形貌见图 1。试验采用的硅酸钠为河北力天化工建材有限公司生产,其原始模数为 3.25,20℃下密度为 1.38 g/cm³,氢氧化钠为天津科密欧公司生产的片状试剂。

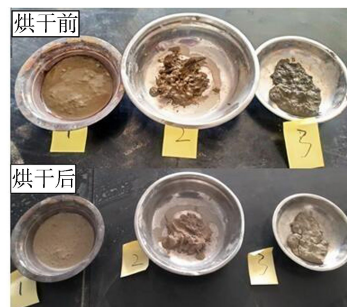


图 1 淤泥烘干前后形貌

1.1.1 淤泥颗粒组成

将烘干后的淤泥(以下简称淤泥)块体进行破碎处理,取部分淤泥分别经 600℃ 和 700℃ 高温煅烧处理 1 h。使用 Malvern Zeta Sizer Nano Zs90 分子/粒度分析仪测试淤泥和煅烧淤泥的粒径分布,结果如图 2 所示。

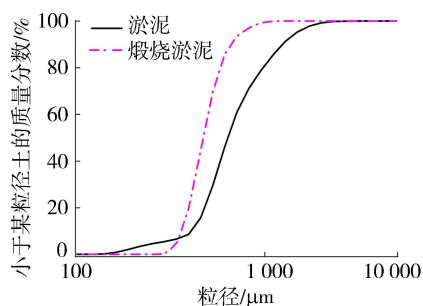


图 2 淤泥的颗粒级配曲线

1.1.2 淤泥矿物与化学组成

使用美国布鲁克公司生产的 D8 Advance X 射线粉末衍射仪(XRD),对淤泥及煅烧淤泥的矿物成分进行分析(扫描范围从 5° 到 70° (2θ),步长为 0.02°)。使用德国布鲁克(German Bruker)公司生产的型号为 SRS 3400,发射靶为 Cu Kα 的 X 射线荧光发射谱分析仪(XRF),对淤泥的氧化物成分进行了分析,发现淤泥中 SiO₂、Al₂O₃、MgO、CaO、Fe₂O₃、K₂O、Na₂O、TiO₂的质量分数分别为 64.2%、13.3%、2.1%、4.1%、2.6%、1.3%、0.9%,其他氧化物占 9.8%。淤泥及煅烧淤泥形貌如图 3 所示,淤泥及煅烧淤泥的 XRD 图谱见图 4。由图 3 可以看出,淤泥经高温煅烧处理后,颜色由浅灰绿色变为浅黄色,这



(a) 煅烧淤泥 (b) 烘干淤泥

图 3 烘干淤泥及煅烧淤泥形貌

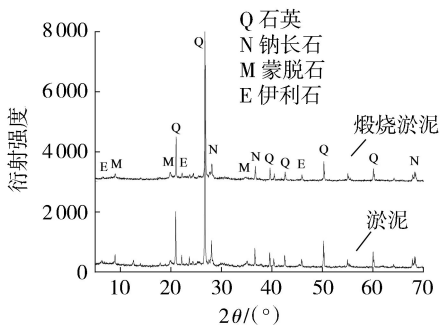


图4 淤泥及煅烧淤泥 XRD 图谱

主要是因为淤泥中 Fe 元素由低价态 (Fe^{2+}) 被氧化成高价态 (Fe^{3+})。

1.2 试件制作与测试

试件配比设计见表 1, 将备好的淤泥倒入净浆搅拌机, 然后将改性剂溶液倒入搅拌 10 min, 再将拌好的混合料移入 30 mm×30 mm×30 mm 的钢模, 浇筑完成后将试模放在烘箱内 (80℃) 养护 24 h 后拆模。拆模后的试块放在实验室桌面上继续养护 (养护温度为 (20 ± 5) ℃) 至预定龄期后进行力学强度测试、矿物成分分析、红外光谱和电子扫描显微镜 (SEM) 分析等测试, 试件形貌见图 5。使用美国 Thermo Scientific Nicolet is5 型号的傅里叶变换红外光谱仪 (FTIR, 扫描范围: $400 \sim 4000 \text{ cm}^{-1}$) 分析淤泥固化改性前后的分子结构, 使用日本电子株式会社

表 1 淤泥试块混合料配制方案

试件编号	淤泥份数	硅酸钠份数	硅酸钠模数	水份数	液固比	测试龄期/d
Y1-1	100	15	2.5	25	0.4	7, 14, 28, 90
Y1-2	100	15	2.0	25	0.4	28
Y1-3	100	15	1.5	25	0.4	7, 14, 28, 90
Y2-1	100	15	2.5	25	0.4	28
Y2-2	100	15	2.0	25	0.4	28
Y2-3	100	15	1.5	25	0.4	7, 14, 28, 90
Y3-1	100	15	2.5	25	0.4	28
Y3-2	100	15	2.0	25	0.4	28
Y3-3	100	15	1.5	25	0.4	7, 14, 28, 90
Y1-4	100	5	1.5	35	0.4	7, 14, 28, 90
Y1-5	100	10	1.5	30	0.4	28
Y1-6	100	20	1.5	20	0.4	7, 14, 28, 90
Y2-4	100	5	1.5	35	0.4	28
Y2-5	100	10	1.5	30	0.4	28
Y2-6	100	20	1.5	20	0.4	28

注: Y1 为淤泥; Y2 为 600℃ 煅烧淤泥; Y3 为 700℃ 煅烧淤泥。

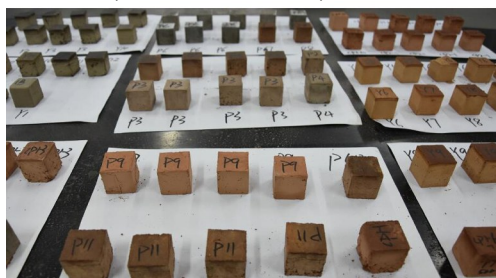


图 5 淤泥试件形貌

生产的 JSM-6460LV 型 SEM 观察样品形貌 (加速电压 20 kV)。

2 结果与分析

2.1 力学强度

由图 6 可知, 不同类型淤泥改性试件的强度变化相似, 经 80℃ 高温预养护 24 h 后, 试件强度迅速增长, 但随着养护龄期的增长, 强度增长的幅度不大, 7 d 养护龄期的试件强度与 90 d 的相差不大, 7 d 养护龄期试件的强度已达到最大强度 (90 d) 的 80% 以上。这是因为 80℃ 高温预养护 24 h 可以加速淤泥中活性矿物与碱性固化改性剂之间的反应, 产生大量胶凝物质, 从而促使试件强度迅速增长。高温预养护后试件放在室温条件下自然养护, 试件内活性矿物与固化改性剂之间的反应进行较慢, 对强度的发展贡献不大, 试件强度缓慢增长, 在 90 d 龄期时达到最大值 7.13 MPa。

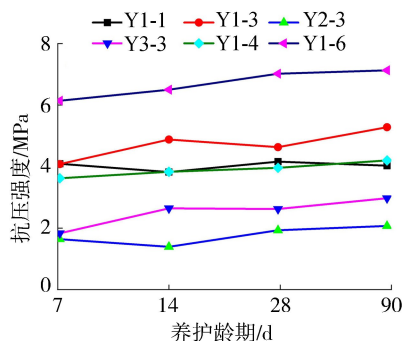


图 6 淤泥改性试件的抗压强度与养护龄期关系

由图 7 可见, 改性剂模数 M 对试件抗压强度影响较大。除 Y2 系列试件, 其余 2 种淤泥试件抗压强度均随改性剂模数的减小而增大, 改性剂模数从 2.5 降低到 1.5 时, Y1 和 Y3 试件的抗压强度分别从 4.16 MPa、1.93 MPa 增长到了 4.63 MPa 和 3.0 MPa。对 Y2 试件, 改性剂模数从 2.5 减小到 2.0 和 1.5 时, 其抗压强度从 2.57 MPa 增长到 3.27 MPa, 后又下降到 1.93 MPa, 引起强度下降的原因是由试件成型时未填筑密实, 带有孔洞引起。淤泥试件 (Y1) 的抗压强度均高于煅烧淤泥试件 (Y2 和 Y3)。在本文选取

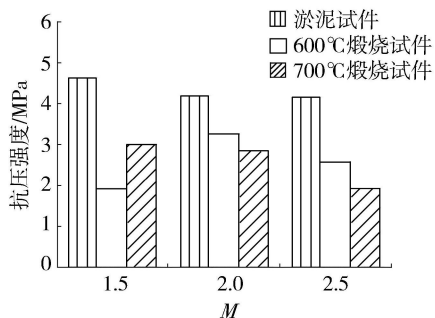


图 7 改性剂模数与 28 d 养护龄期试件抗压强度关系

的煅烧模式下(600℃和700℃),对淤泥进行煅烧处理并未提高淤泥的矿物活性从而提升淤泥试块的强度,这说明淤泥的煅烧需在适宜的煅烧温度范围内,才能提高淤泥的矿物活性。

由图8可知,改性剂掺量对试件强度具有显著影响,对28d龄期试件,试件抗压强度随改性剂掺量增加而增长明显。这是因为,随着改性剂掺量增加,影响反应环境碱性的OH⁻浓度逐渐增大,水化反应的程度也越高,反应产物则愈多,因此,无论是淤泥试件(Y1)还是煅烧淤泥试件(Y2),其抗压强度均呈现随改性剂掺量增加而增长的变化趋势,并在改性剂用量为20%时达到最大(7.02MPa)。

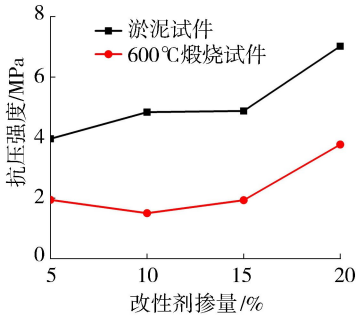


图8 改性剂掺量与28d养护龄期试件抗压强度关系

2.2 XRD 结果

由图9和图10可知,同类型淤泥改性试件的XRD结果差别不大。淤泥的矿物组成主要有两类:一类是很难参与反应的晶相矿物,主要是石英和钠长石;二是黏土类矿物,主要是伊利石和蒙脱石,能够与

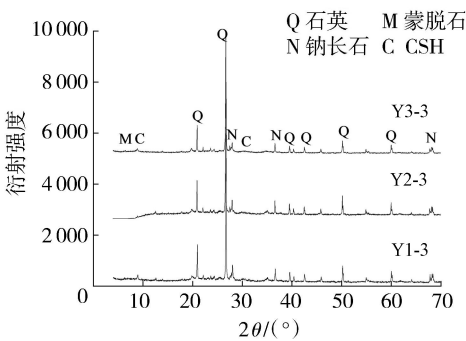


图9 不同类型淤泥改性试件 XRD 图谱

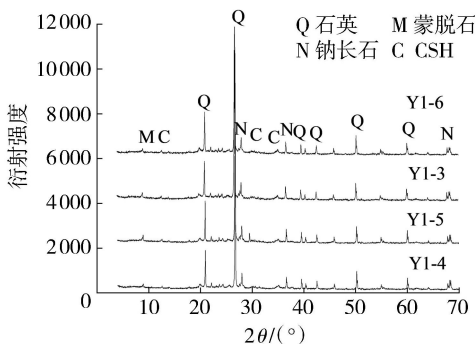


图10 不同改性剂掺量淤泥改性试件 XRD 图谱

固化改性剂反应产生提供强度的胶凝物质的主要为黏土类矿物。改性试件的主要物相组成为石英、钠长石、蒙脱石和地聚物凝胶类物质(C-S-H)。对淤泥改性试件来说,在8.5°~9°(2θ)有个明显的衍射峰,这个峰是蒙脱石(Ca_{0.2}(Al,Mg)₂Si₄O₁₀(OH)₂·4H₂O)的衍射峰,而试件中矿物石英(SiO₂)的衍射峰主峰在26.6°(2θ)附近,在27.9°和28°(2θ)的尖锐衍射峰,主要是钠长石(NaAlSi₃O₈)的衍射峰。

高温处理对淤泥中的晶相矿物的影响不大,石英和钠长石的衍射峰位置及强度基本没有变化。黏土矿物经高温后变化较大,高温处理后蒙脱石和伊利石的衍射峰基本消失,黏土矿物结构遭到了破坏,而这一破坏将有助于黏土矿物更好地与固化改性剂进行反应,产生凝胶物质。

2.3 FTIR 结果

由图11和图12可知,改性试件的吸收峰位置主要在470 cm⁻¹、694 cm⁻¹、778 cm⁻¹、1032 cm⁻¹、1630 cm⁻¹、3440 cm⁻¹和3620 cm⁻¹。位于3620 cm⁻¹、3440 cm⁻¹和1630 cm⁻¹处的吸收峰分别对应的是自由水分子(或者是黏土矿物硅氧四面体表面与水分子之间由氢键或氢氧键组成的弱连接),水-水分子之间的氢键连接和水原子的弯曲振动。在470 cm⁻¹处的强吸收峰是Si-O-Si的弯曲振动,在1032 cm⁻¹处的吸收峰是SiO₂中Si-O的不对称弯曲振动。而778 cm⁻¹、694 cm⁻¹和580 cm⁻¹处的吸收峰属于Al-Al-OH, Al-Mg-OH的弯曲振动。改性试件,在3620 cm⁻¹处的吸收峰变得尖锐,而且吸收峰的强度有所增强。

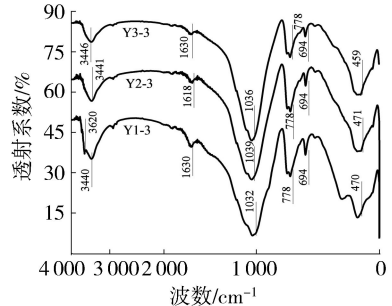


图11 不同类型淤泥改性试件 FTIR 图谱

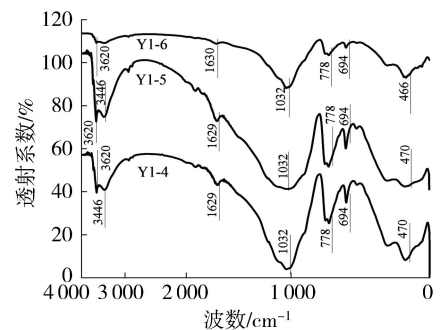


图12 不同改性剂掺量淤泥改性试件 FTIR 图谱

1630 cm^{-1} 和 3420 cm^{-1} 处吸收峰的变化说明黏土矿物层间自由水(或者是黏土矿物硅氧四面体表面由氢键或氢氧键连接的水分子)的减少或消失,3620 cm^{-1} 处的吸收峰峰强的增强,说明有包裹在凝胶产物(地聚物凝胶)的结构水的形成。

2.4 SEM 结果

使用 SEM 观察淤泥改性后的微观结构及水化产物的形貌,淤泥改性试件不同观测尺寸的 SEM 结果见图 13~15。淤泥改性试件的微观形貌主要呈现片状,絮状物结构,结构酥松,孔隙较大。煅烧淤泥改性试件中颗粒状物体增多,说明煅烧处理后,淤泥中的黏土矿物被烧结,丧失部分活性,这也是煅烧淤泥试件相较未煅烧淤泥试件强度下降的原因之一。

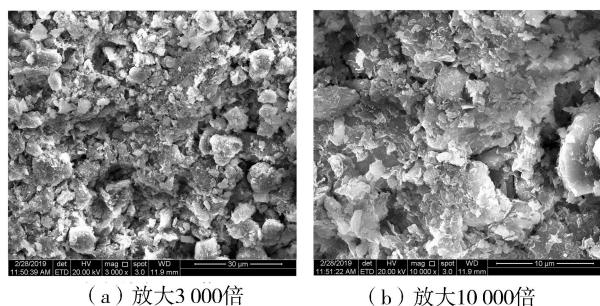


图 13 淤泥试件 SEM 图

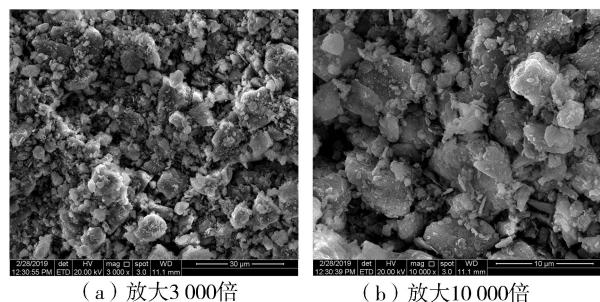


图 14 600℃煅烧淤泥试件 SEM 图

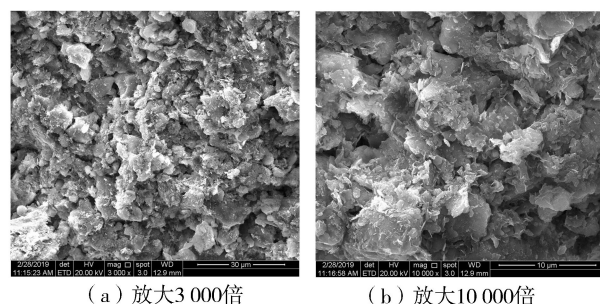


图 15 700℃煅烧淤泥试件 SEM 图

改性剂掺量对淤泥的微观结构有较大影响,对掺改性剂较多的淤泥改性试件,从其 SEM 图可以看到有板状块状生成物,这些生成物中有大量致密均质的凝胶和块状结晶产物。这些凝胶类及块状晶状物质与未反应的颗粒混合在一起组成致密的均质基质,使材料结构密实紧凑,强度较高,这是改性剂掺量

越多,凝胶类反应产物越多,而试件强度越高的原因。

3 结论

a. 强度测试结果表明,改性试件的最大抗压强度为 7.13 MPa,其中养护龄期与改性剂掺量对改性试件的力学性质影响最为显著;淤泥改性试件的抗压强度随龄期的增长而提高。改性剂掺量对改性试件的力学性质影响明显,改性剂掺量越高,试件抗压强度越高。改性剂模数对改性淤泥的力学性质也有影响,最佳掺量随改性剂模数降低而减小。

b. XRD 结果表明,高温处理淤泥后其中的黏土矿物相较于晶相矿物变化较大,高温处理后蒙脱石和伊利石的衍射峰基本消失,黏土矿物结构遭到了破坏,进而更好地与固化改性剂进行反应,产生凝胶物质。

c. FTIR 结果表明,黏土矿物层间自由水(或者是黏土矿物硅氧四面体表面由氢键或氢氧键连接的水分子)的减少,而结构水增加,说明淤泥材料经过改性后有胶凝产物出现,使得改性后试块强度提高。

d. SEM 结果表明,淤泥原料改性试件的微观形貌主要呈现片状,絮状物结构,结构酥松,孔隙较大。煅烧处理后,淤泥中的黏土矿物被烧结,丧失部分活性使得改性后强度有所下降。而掺入改性剂之后,生成大量致密均质的凝胶和块状结晶产物,与未反应的颗粒混合在一起组成致密的均质基质,使材料结构密实紧凑,强度较高,改性剂掺量越多,凝胶类反应产物越多,因而试件强度越高。

参考文献:

- [1] 张金良. 黄河流域河湖生态环境复苏研究[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 141-146. (ZHANG Jinliang. Eco-environment recovery of rivers and lakes in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1):141-146. (in Chinese))
- [2] 史燕南, 占川, 张超杰, 等. 污染淤泥固化稳定化处理及种植性能试验[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(2): 89-94. (SHI Yannan, ZHAN Chuan, ZHANG Chaojie, et al. Experiments on stabilizing treatment of polluted silt solidification and planting performance [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(2):89-94. (in Chinese))
- [3] 杨洋, 陈人瑗, 邱珍锋, 等. 基于真空联合水平电渗法的水力冲挖淤泥脱水量计算方法[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(3):34-40. (YANG Yang, CHEN Renyuan, QIU Zhenfeng, et al. Dehydration quantity calculation method of hydraulic dredged silt based on joint vacuum and horizontal electroosmosis method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41

- (3);34-40. (in Chinese))
- [4] 金艳,宋繁永,朱南文,等.不同固化剂对城市污水处理厂污泥固化效果的研究[J].环境污染与防治,2011,33(2):74-78. (JIN Yan, SONG Fanyong, ZHU Nanwen, et al. Experiments on solidification of sewage sludge with different solidifying agents[J]. Environmental Pollution & Control, 2011, 33(2):74-78. (in Chinese))
- [5] 赵由才,张华,黄仁华,等.不同改性剂改善污泥土工性质的比较研究[J].环境污染与防治,2010,32(1):35-39. (ZHAO Youcai, ZHANG Hua, HUANG Renhua, et al. Modification of sewage sludge geotechnical properties by using various solid modifiers[J]. Environmental Pollution & Control, 2010, 32(1):35-39. (in Chinese))
- [6] TANG Yixin, MIYAZAKIY, TSUCHIDA T. Practices of reused dredgings by cement treatment [J]. Soils and Foundations, 2001, 41(5):129-143.
- [7] 陈华,朱石清,张善发.上海城市污水处理厂污泥资源化利用及其市场需求浅析[J].城市公共事业,2006,20(1):25-29. (CHEN Hua, ZHU Shiqing, ZHANG Shanfa. Shanghai municipal sewage treatment plant sludge resource utilization and market demand analysis [J]. CHENGSHI GEIPAISHUI, 2006, 20(1):25-29. (in Chinese))
- [8] 范昭平,朱伟,张春雷.有机质含量对淤泥固化效果影响的试验研究[J].岩土力学,2005,26(8):1327-1330. (FAN Zhaoping, ZHU Wei, ZHANG Chunlei. Experimental study on influence of organic matter content on solidified dredging [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(8):1327-1330. (in Chinese))
- [9] 陈玮琳,季晓檬.疏浚淤泥资源化利用技术综述[J].中国建材科技,2013(1):50-53. (CHEN Weilin, JI Xiaomeng. Overview on the resource utilization techniques of dredged mud [J]. China Building Materials Science & Technology, 2013(1):50-53. (in Chinese))
- [10] 苗永红,杨森.基于连云港海相软土的新型土工材料强度试验研究[J].信阳师范学院学报(自然科学版),2016,29(1):143-147. (MIAO Yonghong, YANG Miao. Experimental research of a new soil material based on lianyungang port's marine soft soil [J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2016, 29(1):143-147. (in Chinese))
- [11] 李晓玲,高慧民,周洁.沿海沙性淤泥土工程地质特性试验研究[J].华北水利水电学院学报,1999,20(3):35-36. (LI Xiaoling, GAO Huimin, ZHOU Jie. Experimental study on engineering geological characteristics of coastal sandy silt soil [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power, 1999, 20(3):35-36. (in Chinese))
- [12] 朱伟,曾科林,张春雷.淤泥固化处理中有机物成分的影响[J].岩石力学,2008,29(1):33-36. (ZHU Wei, ZENG Kelin, ZHANG Chunlei. Influence of organic matter component on solidification of dredged sediment [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(1):33-36. (in Chinese))
- [13] 王东星,王宏伟,肖杰.活性MgO固化淤泥水稳特性试验研究[J].浙江大学学报(工学版).2018,52(4):719-726. (WANG Dongxing, WANG Hongwei, XIAO Jie. Experimental study on water stability property of dredged sludge solidified with reactive MgO [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2018, 52(4):719-726. (in Chinese))
- [14] 焦健.水泥固化淤泥无侧限抗压强度试验研究[J].东北水利水电,2017(2):53-54. (JIAO Jian. Experimental study on unconfined compressive strength of cement-solidified silt [J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2017(2):53-54. (in Chinese))
- [15] 朱伟,张春雷,高玉峰,等.海洋疏浚泥固化处理土基本力学性质研究[J].浙江大学学报(工学版),2005,39(10):1561-1565. (ZHU Wei, ZHANG Chunlei, GAO Yufeng, et al. Fundamental mechanical properties of solidified dredged marine sediment [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2005, 39(10):1561-1565. (in Chinese))
- [16] 朱伟,冯志超,张春雷,等.疏浚泥固化处理进行填海工程的现场试验研究[J].中国港湾建设,2005(5):27-30. (ZHU Wei, FENG Zhichao, ZHANG Chunlei, et al. Field experiment of dredged spoil solidified with cement for marine reclamation works [J]. China Harbour Engineering, 2005(5):27-30. (in Chinese))
- [17] 赵笛,朱先杰,侯志强,等.疏浚淤泥有机质含量及其对固化淤泥强度的影响[J].河南科学,2019(10):15. (ZHAO Di, ZHU Xianjie, HOU Zhiqiang, et al. The contents of organic matter in dredged silt and its effect on the strength of solidified silt [J]. Henan Science, 2019(10):15. (in Chinese))
- [18] 程福周,雷学文,孟庆山,等.水泥-水玻璃固化东湖淤泥的室内试验研究[J].人民长江,2013,44(24):45-48. (CHENG Fuzhou, LEI Xuewen, MENG Qingshan, et al. Laboratory test study on solidifying east Lake silt with cement and sodium silicate [J]. Yangtze River, 2013, 44(24):45-48. (in Chinese))
- [19] 夏艳波,任皖遐,何振华,等.不同固化剂改良淤泥土的试验研究[J].价值工程,2020,21(1):278-279. (XIA Yanbo, REN Huanxia, HE Zhenhua, et al. Experimental study on improvement of silt soil with different curing agents [J]. Value Engineering, 2020, 21(1):278-279. (in Chinese))
- [20] 王琳,彭倩云,徐冬英.淤泥固化剂发展历程研究[J].绍兴文理学院,2017(2):9-10. (WANG Lin, PENG Qianyun, XU Dongying. Study on the development history of silt curing agent [J]. Journal of Shaoxing University, 2017(2):9-10. (in Chinese))
- [21] 曹亚莉.高温处理砒砂岩物化性质及改性材料性能研究[D].郑州:华北水利水电大学,2020.
- [22] 刘晓东.再生骨料透水混凝土的力学性能及透水性试验研究[D].郑州:华北水利水电大学,2018.

(收稿日期:2022-04-08 编辑:刘晓艳)

编者致谢

在广大审稿专家的支持和帮助下，本刊圆满完成了2022年度的编辑出版任务。谨向为本刊审稿付出辛勤劳动的专家学者表示真诚的敬意和衷心的感谢！

2022年1月1日至2022年12月31日完成审稿的专家名单如下：

包红军 包腾飞 蔡坤 曹国 曹永强 岑威钧 柴宏祥 柴军瑞 常晓林 陈波 陈诚
陈改新 陈建耀 陈界仁 陈驹 陈珺 陈宁生 陈善雄 陈述 陈维 陈徐东 陈旭东
陈毓陵 成立 程恒 程井 程琳 程青 程香菊 程雄 迟世春 崔博 崔东文
戴文鸿 戴自航 党发宁 邓军 丁红岩 丁志宏 窦希萍 杜春艳 樊恒辉 范伟军 范向前
范子武 方宏远 方火浪 方艺辉 费良军 冯民权 傅宗甫 甘磊 高本虎 高小建 高学平
高忠信 郜会彩 戈雪良 耿雷华 龚壁卫 贡力 缙文娟 谷艳昌 顾昊 顾凯 顾莉
顾圣平 管新建 芮润华 郭成超 郭家力 郭巧玲 郭维东 韩书成 韩宇平 贺山峰 贺智敏
侯庆志 侯勇严 胡江 胡凯 胡少华 胡少伟 胡铁松 胡卸文 槐文信 黄彬彬 黄翀
黄国如 黄强 黄显峰 黄晓明 黄耀英 黄逸群 纪昌明 纪道斌 冀鸿兰 贾本有 贾永红
姜翠玲 姜文来 蒋成义 蒋林华 蒋水华 蒋亚清 焦卫国 缴锡云 介玉新 金菊良 金立兵
金伟良 巨能攀 康飞 柯敏勇 孔纪名 孔令伟 匡翠萍 赖成光 雷进生 雷晓辉 冷先伦
冷元宝 李长冬 李传奇 李发文 李贵宝 李国栋 李火坤 李军华 李克锋 李琳 李明超
李庆斌 李然 李瑞杰 李若华 李世森 李顺群 李馨馨 李炎隆 李扬波 李永 李昱
李志军 李志伟 李卓 郦能惠 梁斌 梁禹 林斌良 林鹏 凌华 刘丙军 刘东海
刘芳 刘昉 刘国东 刘国华 刘红岩 刘厚林 刘焕芳 刘加才 刘甲春 刘健 刘杰
刘俊 刘俊新 刘梅清 刘攀 刘斯宏 刘卫林 刘先珊 刘晓 刘小艳 刘小勇 刘新阳
刘毅 刘勇 刘永志 刘昭伟 龙建辉 龙新平 娄厦 陆晓敏 罗平平 罗小峰 罗玉龙
吕升奇 马斌 马超 马飞 马福恒 马吉明 马昆林 马强 毛劲乔 孟丽红 莫崇勋
穆祥鹏 倪福生 聂如松 牛景太 潘毅 彭刚 彭虹 彭亮 彭瑞东 彭文启 彭勇
彭友文 秦鸿根 仇宝云 任炳昱 任杰 阮波 单鸣雷 尚毅梓 沈振中 施卫东 拾兵
史云 舒彩文 束一鸣 宋春雷 宋松 宋娃丽 宋文武 宋志飞 宋志尧 苏国韶 苏凯
苏瑶 孙怀卫 孙双科 孙昭华 谭俊哲 谭卓英 汤方平 汤雷 唐德善 唐克旺 唐立模
唐世斌 唐晓武 万德成 万航 万荣荣 汪顺生 汪正兴 王宝民 王保田 王常明 王超
王大国 王东星 王富强 王国玉 王昊 王鸿翔 王慧亮 王加夏 王进廷 王俊岭 王凌云
王乾峰 王润英 王少丽 王少伟 王卫光 王新建 王新平 王学滨 王义刚 王玉杰 王远坤
王卓甫 韦新东 魏博文 魏凯 吴邦彬 吴炳方 吴丹 吴福生 吴海民 吴建华 吴普特
吴时强 武科 武亮 肖桂荣 肖衡林 肖杰 谢定松 谢新民 解建仓 辛小康 邢爱国
徐波 徐长节 徐冬梅 徐洪钟 徐慧 徐磊 徐力群 徐玲玲 徐文杰 徐向阳 徐小蓉
徐玉霞 徐子恺 许栋 许红师 许颖 薛米安 闫静 延永东 严根华 严忠明 晏鄂川
杨帆 杨建东 杨杰 杨开林 杨培岭 杨肖丽 杨晓梅 杨哲 杨中华 姚海林 雍斌
于静洁 于丽 余明辉 余湘娟 俞双恩 俞晓东 袁飞 袁赛瑜 苑希民 岳建平 曾诚
曾国红 曾铃 曾思栋 张常光 张发明 张法星 张防修 张贵金 张国新 张瀚 张红武
张华 张继勋 张家其 张健 张健飞 张建民 张金凤 张锦华 张俊云 张路 张鹏
张浦阳 张庆华 张庆松 张社荣 张涛 张婷 张伟 张卫华 张文慧 张先伟 张翔
张新周 张信贵 张行南 张志强 张子明 张宗堂 章荣军 赵二峰 赵广举 赵兰浩 赵明华
赵西增 赵雪花 郑东健 郑圣义 郑源 钟启明 周赤 周家文 周兰庭 周岭 周星德
周兴波 周玉良 朱安龙 朱建荣 朱俊高 朱晟 祝彦知 庄建琦 左其亭

(排名不分先后，以姓名的汉语拼音为序)



一滴清水 一片绿地 一个地球



ISSN 1006-7647

