

公益

2019—2020年度中国水利工程优质（大禹）奖获奖工程

南水北调东线一期工程穿黄河工程



[ 期刊基本参数 ] CN 11-4446/TV\*1980\*m\*A4\*84\*zh\*P\*¥20.00\*17000\*15\*2022-9

Vol.42 No.9 2022

ISSN 2097-0528

CN 11-4446/TV

《中国核心期刊(遴选)数据库》收录期刊  
《中文科技期刊数据库》收录期刊  
《中国学术期刊综合评价数据库》来源期刊  
《中国学术期刊网络出版总库》收录期刊  
《中国知识资源总库》收录期刊

2022 9 第42卷

# 水利建设与管理

WATER CONSERVANCY CONSTRUCTION AND MANAGEMENT

水利建设与管理

公益



南水北调东线一期工程穿黄河工程 岳湖闸及闸前疏挖段

二〇二二年 第四十二卷 第九期

ISSN 2097-0528



国内邮发代号: 2-781

定价: 20.00 元

中国水利工程协会主管  
Directed by China Water Engineering Association  
中国水利工程协会主办  
Sponsored by China Water Engineering Association



青龙管业  
QINGLONG PIPES

广告

股票代码：002457

宁夏青龙管业集团股份有限公司始建于1975年，由国家原水利电力部投资建设，曾隶属于宁夏水利厅，2010年在深交所挂牌上市。公司专注于高品质输水输气管道及相关产品的研发、设计、生产、安装，同时提供水利设计与工程咨询服务以及管道整体解决方案和智能节水灌溉整体解决方案。



银川都市圈西线供水工程实现大口径管道日产100节的目标

中国预应力钢筒混凝土管质量创新联盟首届理事长单位

全国优秀水利企业、全国守合同重信用单位

全国产品和服务质量诚信示范企业

中国轻工业塑料加工业（塑料管材）十强企业

# 青龙管道 品质卓越

## 四十多年专业精神 铸就青龙卓越品牌



官网：www.qlgd.com.cn

服务热线：400-600-1789

公司地址：宁夏·银川

广告



## 湖北水总水利水电建设股份有限公司

湖北水总水利水电建设股份有限公司是经湖北省人民政府批准，于2003年12月在原湖北省水利水电建设总公司等三家企业的基础上改制重组设立的。2014年11月，生态环境部直属中央企业——中国环境出版集团有限公司入股水总后，湖北水总成为中央企业（国有资金）控股及员工持股的混合所有制企业，依托中环集团优势平台，发展成为集施工、监理、勘察设计、工程检测、招投标代理、投资开发与运营为一体的现代化、多元化、全产业链综合施工运营企业。

公司连续多年荣获“全国守合同重信用企业”“全国优秀水利企业”“全国优秀施工企业”等各类荣誉称号，是中国建筑企业协会AAA级信用企业、中国施工企业管理协会AAA级信用企业、中国水利工程协会AAA级信用企业，所建工程多次荣获“中国建筑工程鲁班奖”“中国水利工程优质（大禹）奖”“湖北省水利工程优质奖（江汉杯）”等各类奖项。公司坚持科技创新引领发展，拥有稳定的科技创新团队，同时与各大院校、科研院所等开展技术合作。公司2017年被省发改委授予“湖北省省级企业技术中心”，2020年由省科技厅认定为“高新技术企业”。

公司始终秉承“团结、开拓、诚信、创新”的企业精神，实行“一流的工程、一流的质量、一流的管理、一流的服务”的经营理念，致力于打造精品工程。愿更多的朋友关注和融入湖北水总的发展，志存高远，我们愿与您共赢美好未来！



电话：027-84217896

地址：湖北省武汉市汉阳区蔷薇路华中智谷B3栋

# 水利建设与管理

SHUILI JIANSHE YU GUANLI

原刊名 水利管理技术 (1980 年创刊)

月刊

2022 年 第 42 卷 第 9 期

(总第 351 期)

2022 年 9 月 23 日 出版

主管单位 中国水利工程协会  
主办单位 中国水利工程协会  
编辑出版 《水利建设与管理》杂志社有限公司  
主 编 安中仁  
副 主 编 任京梅 吴香菊  
责任编辑 吴晓玉

地 址 北京市西城区南滨河路 27 号小区  
7 号楼 11 层 1116 号(贵都国际中心 B 座 1116 室 编 1105)  
邮 编 100055  
网 址 www.sljsygl.com  
在线投稿 www.sljsygl.com/home/login  
邮 箱 water6346@163.com  
联系电话 010-63305220 (发行)  
010-63305239 (投稿)  
010-63305258 (广告)

印刷单位 北京博海升彩色印刷有限公司  
发行范围 公开发行  
订 阅 全国各地邮局  
国内发行 中国邮政集团公司北京市报刊发行局  
本刊发行部  
国内邮发代号 2-781  
国外发行 中国国际图书贸易集团有限公司  
国外发行代号 MO3713  
广告发布登记 京西市监广登字 20170082 号  
中国标准连续出版物号 ISSN 2097-0528  
CN 11-4446/TV

定 价 20.00 元

## 目次

2022 年第 9 期

### 特别策划

- 1 加快建设数字孪生流域 提升国家水安全保障能力  
水利部党组书记、部长 李国英
- 3 智慧水利感知体系建设思路初探 郭 华 储梦溪 何 莉
- 8 南水北调数字孪生泵站工程建设思路探讨  
江如春 沈芳芳 张 歆
- 12 临淮岗数字孪生工程建设研究和探索 李君廷

### 工程检测

- 18 水下机器人在北京雨洪工程水下检测中的应用  
肖 俊 曹温博 郑鸿志

### 水力学

- 24 水电站调压阀水力学计算研究 洪振国 田 辉 刘俊华
- 29 闸坝下游局部冲刷计算方法的对比分析 高 翔
- 33 基于细观损伤力学的四级配混凝土立方体试件单轴破坏有限元分析  
糜凯华 邓水明

### 水文泥沙

- 40 近 36 年来渭河定西段蒸发量时空变化及演变趋势研究 张跃峰
- 46 加大流量对簸箕李引黄灌区泥沙输移影响分析 房本岩 魏守民
- 50 对郑州“7·20”洪水中水库作用的分析与思考 董永立

### 水环境与生态

- 55 2007—2020 年引江济太环境效益分析及工程优化调度研究  
殷 鹏 华 萍 胡晓雨
- 60 应用大口径管道截流老城区溢流污水方案研究  
马方凯 王雪健 高兆波
- 70 调水引流改善平原河网水质分析及优化调度方案研究  
何妙妙 司黎晶 王 姣

### 建设管理

- 77 金厂坪水库除险加固工程综合效益后评价  
肖 俊 郑 棚 汤 程

## 行业动态

• 2022年8月25日,南水北调中线穿黄工程通过水利部主持的设计单元完工验收。至此,南水北调东、中线一期工程全线155个设计单元工程全部通过水利部完工验收,其中东线一期工程68个,中线一期工程87个。这是南水北调东、中线一期工程继全线建成通水以来的又一个重大节点,标志着工程全线转入正式运行阶段,为完善工程建设程序,规范工程运行管理,顺利推进南水北调东、中线一期工程竣工验收及后续工程高质量发展奠定了基础。

(来源:水利部网站,网址:[http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202208/t20220826\\_1593565.html](http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202208/t20220826_1593565.html),日期:2022年8月25日)

• 8月26日,云南滇中引水二期主体工程开工。二期工程由骨干工程和配套工程两部分组成,主要建设内容包括滇中引水工程输水总干渠分水口门至水厂、灌区、湖泊等配水节点的输水渠道、提水泵站及调蓄工程等,总投资437亿元,总工期70个月。骨干工程涉及5个州(市),输水干线全长114公里,工程总投资107亿元;配套工程涉及6个州(市),布置各级干支线168条,其中干线31条,分干线91条,支线46条,线路全长1769公里,工程总投资330亿元。

(来源:水利部网站,网址:[http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202208/t20220826\\_1593579.html](http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202208/t20220826_1593579.html),日期:2022年8月26日)

• 8月31日,环北部湾广东水资源配置工程正式开工建设。水利部部长李国英以视频形式出席开工建设大会并讲话。水利部副部长刘伟平出席会议。李国英指出,环北部湾广东水资源配置工程是以习近平同志为核心的党中央部署推动的重大战略工程,是国家“十四五”规划纲要明确的国家水网骨干工程,是粤西人民热切期盼的民生工程。工程建成后,将进一步优化环北部湾城市群水资源配置格局,从根本上解决粤西地区特别是雷州半岛水资源短缺问题,提升区域供水安全保障能力,对支撑粤西地区经济社会发展具有十分重要的意义。

(来源:水利部网站,网址:[http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202208/t20220831\\_1594026.html](http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202208/t20220831_1594026.html),日期:2022年8月31日)

## 宣传与广告

封面 南水北调东线一期工程穿黄河工程 出湖闸及闸前疏挖段

封二 宁夏青龙管业集团股份有限公司

封三 湖北水总水利水电建设股份有限公司

封底 南水北调东线一期工程穿黄工程

## 《水利建设与管理》

### 编委会

主任:孙继昌

副主任:安中仁 任京梅

委员(按姓氏笔画排序)

王爱国 石小强 许文海 孙公新

李坤刚 张利新 陈明忠 宗敦峰

祖雷鸣 唐传利 董红元 蒲朝勇

#### 本刊声明:

1. 本刊为公开发行人物,作者投稿须遵守国家有关保密的法律法规,并对此负完全责任。
2. 本刊刊发的文字、图片等所有内容,本刊拥有网络电子版版权,未经许可不得转载。作者若有异议,请在来稿时声明。
3. 本刊已许可中国知网、万方数据、维普资讯、超星域出版和中邮阅读网,以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。该著作权使用费及相关稿酬,本刊均用于作者文章发表、出版、推广交流(含信息网络)以及赠送样刊,即不再另行向作者支付。
4. 凡作者向本刊提交文章发表之行为即视为同意上述声明。



中国水利工程协会  
公众号



《水利建设与管理》  
杂志社公众号

# WATER CONSERVANCY CONSTRUCTION AND MANAGEMENT

Vol. 42 No. 9 2022

## CONTENTS

### **Special Planning**

- 1 Accelerate the construction of digital twin river basins to enhance national water security  
Li Guoying, Secretary of the CPC committee of Ministry of  
Water Resources and Minister of Water Resources
- 3 First exploration on preception system construction concept of smart water conservancy  
GUO Hua, CHU Mengxi, HE Li
- 8 Discussion on construction idea of digital twin pump station of South-to-North Water Transfer Project  
JIANG Ruchun, SHEN Fangfang, ZHANG Xin
- 12 Research and exploration of Linhuaigang Digital Twin Project construction  
LI Junting

### **Engineering Inspection**

- 18 Application of underwater robot in underwater inspection of Beijing stormwater project  
XIAO Jun, CAO Wenbo, ZHENG Hongzhi

### **Hydraulics**

- 24 Study on hydraulic calculation of pressure regulating valve in hydropower station  
HONG Zhenguo, TIAN Hui, LIU Junhua
- 29 Comparative analysis on calculation methods for local scour at downstream part of gate dam  
GAO Xiang
- 33 Finite element analysis on uniaxial damage of level 4 concrete cube specimen based on mesoscopic damage mechanics  
MI Kaihua, DENG Shuiming

### **Hydrology and Sediment**

- 40 Study on temporal and spatial variation and evolution trend of evaporation in Dingxi section of Weihe River in recent 36 years  
ZHANG Yuefeng
- 46 Analysis on the influence of increased flow on sediment transportation in Bojili Yellow River Irrigation Area  
FANG Benyan, WEI Shoumin
- 50 Analysis and consideration on the role of reservoir in Zhengzhou “July 20” Flood  
DONG Yongli

### **Water Environment and Ecology**

- 55 Environmental benefit analysis and study on project optimal dispatching of Yangtze River to Taihu Lake Diversion Project from 2007 to 2020  
YIN Peng, HUA Ping, HU Xiaoyu
- 60 Study on intercepting overflowing sewage in old city by using large diameter pipelines  
MA Fangkai, WANG Xuejian, GAO Zhaobo

- 70 Analysis of water quality improvement of plain river network by water diversion and optimal operation scheme  
HE Miaomiao, SI Lijing, WANG Jiao

## Construction Management

- 77 Comprehensive benefit post-evaluation of Jinchangping Reservoir risk removal and reinforcement project  
XIAO Jun, ZHENG Peng, TANG Cheng

### “十四五”数字孪生流域建设总体方案通过水利部审查

8月12日,水利部在北京对《“十四五”数字孪生流域建设总体方案》(以下简称《总体方案》)进行审查,刘伟平副部长主持会议并讲话,仲志余总工程师、吴文庆总规划师出席指导,有关司局、单位代表参加。

会议成立专家组,水利部原总工程师汪洪任组长,原总规划师张志彤和中国工程院院士胡春宏任副组长,成员包括国家测绘地理信息局、长江水利委员会、黄河勘测规划设计研究院、河海大学、中国水利水电科学研究院、浙江省水文管理中心等特邀专家。专家组听取了汇报,进行了质询讨论,认为编制工作思路清晰、需求分析深入、技术论证充分,编制的《总体方案》定位准确、目标明确、具有可操作性,与智慧水利和数字孪生流域建设系列文件衔接一致,可作为“十四五”期间数字孪生流域建设的依据,同意《总体方案》通过审查。

刘伟平充分肯定了《总体方案》编制工作,他指出,水利部高度重视智慧水利和数字孪生流域建设,把推进智慧水利建设作为推动新阶段水利高质量发展的重要路径,印发了系列文件明确推进数字孪生流域建设的路线图、时间表、任务书、责任单和技术规范。考虑到数字孪生流域建设没有可供参考和借鉴案例,为此,水利部安排部署了先行先试和数字孪生流域建设方案编制工作。其中,水利部于5月底对56家单位的94个数字孪生流域和数字孪生水利工程先行先试实施方案完成了审核。之后又完成了“十四五”七大江河数字孪生流域建设方案审查和数字孪生流域建设总体方案编制工作,今天“十四五”数字孪生流域建设总体方案顺利通过审查,这标志着数字孪生流域建设进入了全面实施阶段。

刘伟平强调,数字孪生流域建设是一项创新性很强的复杂系统工程,在建设实施过程中,要牢牢把握“需求牵引、应用至上,数字赋能、提升能力,急用先行、示范引领,整体谋划、分步实施,统一标准、互联互通,风险可控、安全可靠”等六方面原则,按照先行先试、加快见效,强化履责,共建共享,做好评估、迭代完善等要求,以数字孪生流域建设驱动新阶段水利高质量发展。

(来源:水利部网站,网址:[http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202208/t20220815\\_1591206.html](http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202208/t20220815_1591206.html),日期:2022年8月25日)

## 编者按

智慧水利是新阶段水利高质量发展的最显著标志，数字孪生流域是智慧水利的核心与关键，数字孪生水利工程是数字孪生流域建设的重要任务。

2021年6月28日，水利部部长李国英在“三对标、一规划”专项行动总结大会上提出新阶段水利高质量发展的实施路径包括推进智慧水利建设；12月23日，水利部召开推进数字孪生流域建设工作会议；2021年底，水利部印发智慧水利建设指导意见和实施方案，提出以数字孪生流域为核心；2022年2月25日，水利部对数字孪生流域建设技术大纲、导则、要求等文件进行审查；4月20日，水利部副部长刘伟平召开会议研究部署加快推进数字孪生流域建设工作；5月18日，水利部组织开展数字孪生流域建设先行先试实施方案和数字孪生流域水利工程建设方案审核；6月17日，水利部启动七大江河“十四五”数字孪生流域建设方案审查；8月12日，《“十四五”数字孪生流域建设总体方案》通过水利部审查，数字孪生流域建设进入全面实施阶段。本刊对此项工作高度重视，一直对工作动态进行追踪报道。

本期再次针对数字孪生主题进行策划，转载李国英部长《加快建设孪生流域提升国家水安全保障能力》的文章，首发郭华等的《智慧水利感知体系建设思路初探》、江如春等的《南水北调数字孪生泵站工程建设思路探讨》、李君廷的《临淮岗数字孪生工程建设研究与探索》3篇原创文章。李部长的文章站在全局高度对数字孪生流域建设的重大意义、准确内涵做出阐述，为这项工作开展指明方向。郭华等的文章针对数字孪生的基础——智能感知体系，探讨了解决思路。江如春和李君廷的文章则侧重数字孪生水利工程建设，分别结合南水北调江都水利枢纽工程、临淮岗工程，探讨数字孪生工程建设方案。希望这些文章能为读者提供有益参考。

# 加快建设数字孪生流域 提升国家水安全保障能力

水利部党组书记、部长 李国英

习近平总书记对加快建设科技强国，实现高水平科技自立自强作出了一系列重大决策部署，强调科技创新是核心，抓住了科技创新就抓住了牵动我国发展全局的牛鼻子，并提出了提升流域设施数字化、网络化、智能化水平的明确要求。当前，新一轮科技革命和产业变革加速演进，新兴科技快速发展，各种新技术新应用不断涌现。对表对标习近平总书记重要讲话

指示批示精神，必须锚定全面提升国家水安全保障能力目标，把握世界科技发展新形势、新趋势，加强数字孪生、大数据、人工智能等新一代信息技术与水利业务的深度融合，加快数字孪生流域建设，大力提升流域治理管理的数字化、网络化、智能化水平，赋能推动新阶段水利高质量发展的先进引领力和强劲驱动力。

建设数字孪生流域，即以物理流域为单元、时空数据为底座、数学模型为核心、水利知识为驱动，对物理流域全要素和水利治理管理全过程进行数字化映射、智能化模拟，实现与物理流域同步仿真运行、虚实交互、迭代优化。水利部坚持把建设数字孪生流域作为推动新阶段水利高质量发展的重要路径，推动数字孪生流域建设在水利行业全面展开，数字孪生流域建设技术大纲、技术导则、共建共享管理办法和水利业务“四预”（预报预警预演预案）基本技术要求等系列技术规范全面建立，全国七大江河数字孪生流域建设方案编制完成，94项数字孪生流域和数字孪生水利工程先行先试工作启动实施。

在向第二个百年奋斗目标进军的新征程中，水利部门将深入贯彻落实习近平总书记重要讲话指示批示精神，按照需求牵引、应用至上、数字赋能、提升能力的要求，以数字化、网络化、智能化为主线，以算据、算法、算力建设为支撑，以数字化场景、智能化模拟、精准化决策为路径，加快建设、持续完善具有强大“四预”功能的数字孪生流域。

构建数字化场景。以自然地理、干支流水系、河道流场、水利工程、经济社会信息等为主要内容，对物理流域进行全要素数字化映射。构建天、空、地一体化水利感知网，优化地面监测，加强遥感监测，推进物理流域监测系统科学建设和高频乃至在线运行，实现物理流域与数字流域之间的动态、实时信息交互和深度融合，保持交互的精准性、同步性、及时性。构建全国统一、及时更新的数据底板，对物理流域产生的不同类型、不同形态、不同来源的数据进行有序组织，为水利治理管理提供详实的基础底图。

开展智能化模拟。在数字化场景的基础上，通过

集成耦合多维多时空尺度的水利专业模型、智能分析模型、仿真可视化模型，构建支撑水利业务全要素“四预”功能的数字孪生流域模拟仿真平台。深入研究流域自然规律，融合流域多源信息，升级改造流域产汇流、土壤侵蚀、水沙输移、水资源调配、工程调度等模型，统筹运用好基于机理揭示和规律把握的数学模型，以及基于数理统计和数据挖掘技术的数学模型，确保数字孪生流域模拟过程和流域物理过程实现高保真。建设水利业务智能仿真模型，构建水利业务遥感和视频人工智能识别模型，实现水利工程运行和安全监测、应急突发水事件等自动化精准识别。

支撑精准化决策。坚持大系统设计、分系统建设、模块化链接，构建标准统一、互为融通、共享共用的水利智能业务应用系统，全面覆盖流域防洪抗旱、水资源管理调配等流域治理管理各项业务应用，实现风险提前发现、预警提前发布、方案提前制定、措施提前实施，确保水利决策迅速果断精准有效。一方面，根据预报预警结果，“正向”预演出风险形势和影响，以在未萌之时、成灾之前发现问题、提出对策；另一方面，根据调度目标，“逆向”推演出水利工程安全运行限制条件，制定和优化调度方案，实现预报与调度的动态耦合模拟，进一步提高预案的科学性、实用性和可操作性，为科学高效有序应对江河洪水、山洪灾害、渍涝灾害、冰凌灾害、工程灾害、干旱灾害、水资源危机、水生态损害等各类水灾害事件提供强大科技支撑，进一步提升国家水安全保障能力。

（来源：水利部网站，网址：[http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202208/t20220810\\_1590469.html](http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202208/t20220810_1590469.html)，日期：2022年7月22日）

# 智慧水利感知体系建设思路初探

郭 华<sup>1</sup> 储梦溪<sup>2</sup> 何 莉<sup>2</sup>

(1. 深圳市东深电子股份有限公司, 广东 深圳 518057;

2. 深圳大学机电与控制工程学院, 广东 深圳 518060)

**【摘要】** 智慧水利建设是认真落实国家“十四五”规划纲要的重要工作,旨在推进水利工程智能化改造,建成七大江河数字孪生流域。智能感知是智慧水利数字孪生系统构建的重要基础和数据支撑。本文从智慧水利内涵与需求出发,探讨了智慧水利建设的解决思路,进一步提出“空-天-地-水”一体化感知体系建设思路,最后围绕智慧水利建设中感知网建设作了有益思考,可为智慧水利建设目标和任务提供科学参考。

**【关键词】** 智慧水利;数字孪生;智能感知;“空-天-地-水”感知体系

中图分类号: TV213.9

文献标志码: B

文章编号: 2097-0528(2022)09-003-05

## First exploration on preception system construction concept of smart water conservancy

GUO Hua<sup>1</sup>, CHU Mengxi<sup>2</sup>, HE Li<sup>2</sup>

(1. Shenzhen Dongshen Electronics Co., Ltd., Shenzhen 518057, China;

2. Shenzhen University College of Mechatronics and Control Engineering, Shenzhen 518060, China)

**Abstract:** The construction of smart water conservancy is important for implementing the outline of the national 14th five year plan carefully, which aims to promote the intelligent reconstruction of water conservancy projects and finally build the digital twin basins for seven major rivers in China. Intelligent perception is an important foundation and data support for constructing the digital twin system of the smart water conservancy. The paper starts with connotation and demand of smart water conservancy. The solution of smart water conservancy construction is discussed, thereby further putting forward the framework of “space-sky-ground-water” integrated perception system, and finally making beneficial thoughts on the construction of perception network in smart water conservancy construction, and providing scientific reference for smart water conservancy construction objectives and tasks.

**Keywords:** smart water conservancy; digital twin; intelligent perception; “space-sky-ground-water” perception system

我国有庞大的七大水系,分别为松花江、辽河、海河、黄河、淮河、长江和珠江。水作为国家的自然资源和经济资源,对生态环境起到了至关重要的作用,是基础性和战略性的资源<sup>[1]</sup>。近年来,洪水和干旱频发并

重,水资源衰减,水生态退化和水环境恶化,加快了国家推进智慧水利建设的决定<sup>[2]</sup>。水利部2021年11月制定了《“十四五”期间推进智慧水利建设实施方案》<sup>[3]</sup>,方案指出,推进智慧水利建设是推动新阶段水

收稿日期: 2022-07-04

作者简介: 郭华(1968—),男,硕士,高级工程师,主要从事水利自动化管理工作。

利高质量发展的六条实施路径之一,以数字化、网络化、智能化为主线,加快构建具有预报、预警、预演、预案功能的智慧水利体系。通过建设数字孪生流域体系、“2+N”水利智能业务应用体系、水利网络安全防护体系、智慧水利保障体系,推进水利工程智能化改造,建成七大江河数字孪生流域,建成智慧水利体系1.0版。

智能感知是智慧水利数字孪生系统构建的重要基础和支撑,但在智慧水利中的建设及应用水平还远远不够。智能感知已得到广泛应用<sup>[4-5]</sup>,无人驾驶利用智能感知技术进行目标识别与跟踪<sup>[6]</sup>,结合人造卫星、无人机、现场传感器等“天-空-地”技术,在环境监测、森林防火预警、矿产资源开发等领域得到应用<sup>[7-8]</sup>。智慧水利方面,智能感知被应用于监测江河湖泊水系的水环境、水利工程设施运行状态,以及水利管理活动的信息化建设等<sup>[9-10]</sup>。现代智慧水利项目工程系统技术要点在于找准数据精度及传感装置相互间的平衡点。王亚权等在智能感知基础上设计并构建了复杂多源的信息采集、融合挖掘、智能决策及可视化展示体系,为珠江三角洲水资源配置工程提供决策辅助<sup>[11]</sup>;耿磊等利用建设的基于空天地感知监测手段的流域智慧指挥平台,开展了有效的流域水事管理,强化了水资源管理、河湖监管、水旱灾害防御等方面的业务管理能力<sup>[12]</sup>。

当前,智能感知设备在水利行业的应用广度和深度方面仍明显不足,对水利监督管理的支撑力度远远不够,距离解决水资源、水生态、水环境、水灾害四大水问题实现透彻感知的要求相差甚远。因此,亟须建设好面向智慧水利的水资源智慧感知体系。本文从智慧水利深层内涵及面临的问题出发,针对智能感知基础建设落后的现状,主要从感知体系建设、多源异构数据解译、智能感知建设途径三个方面,提出建设“空-天-地-水”一体化体系,以期通过信息化技术的支撑,建立完善的智慧水利管理与服务系统,为水利部门、公众提供良好的智慧服务。

## 1 智慧水利的概念和内涵

水利数字化是利用自动化设备、仪器或装备,测量

感知水利相关空间要素、流域水情、设施设备运行状态、气候气象以及时空变化信息,进行数字化建模、关联分析、优化调度以及可视化等,为水利设施正常运行提供服务,实现智慧水利的智能运行、精准管控和可靠运维<sup>[13]</sup>。

智慧水利的本质是将设施设备及其状态数据都进行数字化,再加载模型和算法进行处理和分析,为流域管理、水库调度、城市水务、农田灌溉等提供支撑。传统以数理统计、计算机技术、信号分析等为基础发展形成的径流分析、水电站优化运行模型及方法等,奠定了数字化水利的基础。同时,随着人工智能、大数据等新技术的发展,结合环境、气象等先验知识的学习训练,与测量感知数据进行融合,可以考虑更大地理范围、更多类型数据和更小尺度数据来分析建模。近些年,十年、百年一遇的灾害天气,特大洪水并不少见,水利行业预报、预警、预演、预案等功能显得尤为重要。对于水库、隧洞、泵站、闸门、阀门等设备的运行和控制异常、安全事故,以及水库水质等诊断预警,可利用视频识别、遥感反演、红外热像、多维数据综合分析等多种手段,监测监视流域上下游、左右岸、地上地下的涉水过程,构建针对流域特性的深度学习算法模型,主动预测、发现和跟踪流域问题,实现对江河湖泊、水利工程、管理活动的重要事件、行为和现象的动态感知能力<sup>[2,14]</sup>。

人工智能等新技术依赖大量先验数据和样本,通过深度学习网络建立模型,大量样本数据需要数据量足够大,且数据类型多和关系复杂,这对于智慧水利建设而言,要求的是建立完善的智能感知体系。

## 2 面临的问题及解决途径

水利信息化经过多年建设,初步建成了水利基础设施云。水利感知网也初步形成从传感器到二次采集、网络通信、中央监控等设备的完整产业链。但是,智慧水利的建设与智慧社会的需求仍存在较大差距。各种感知设备、处理方法、数据应用都停留在具体范围、简单模型分析上,与水利管理的动态变化相互作用的事实不符。同时,智慧水利具体需要哪些数据,如何获取这些数据都存疑问。因此,智慧水利感知体系建设需要厘清这些基本问题,进而开展关键技术、方法和

设备研究。这些问题包括感知体系建设、数据管理与解译以及智能感知建设途径。

## 2.1 感知体系建设

智慧水利涉及对象有河流水系、湖泊、水利工程等,从功能、监测指标,以及从不同角度和用途需求出发,其数据需求的类型和要求不同,所需技术、精度、频次也不同。而且,智慧水利建设应用目标趋于多元,所需信息复杂、多样<sup>[2,15,16]</sup>。因此,感知体系与实际需求密切相关,为实现真正的全面感知,建立良好的感知体系以满足不同对象、不同场景和不同应用的需求是智慧水利建设的首要问题。

良好的基础数据是智慧水利建设的基础,感知体系应确保获取完备的数据。感知体系以智慧水利分析体系为输入,智慧水利分析体系输出的是指标体系,指标体系要从感知端获得的良好数据作为计算评价依据。

当前,“空-天-地”一体化体系正在逐步构建,对于水利管控单个设施设备对象,如大坝、闸门、出水口等,要求其健康状态数据在时间和空间上具有连续性,如时间上连续的在线监测数据,空间上连续的周期性检测数据,这些数据往往数据量大,数据精度高,处理结果反映某个节点局部现象,此类技术相对成熟,也得到了推广应用。目前,感知全面性还有待提高,如水库安全监测,几乎所有小型水库都没有实时安全监测设施,大部分小型水库甚至没有水情监测报讯设备,要全面、系统、准确地收集水利信息,需要扩大感知及监测范围,充实水文、水质、地下水位、水环境监测站网,以及江河湖泊水系的监测范围,提升水利工程安全及运行监测设施,扩大监测范围。

随着感知技术的提升,水面及水下监测都逐渐被重视。水利工程则要求大范围的安全数据,如工程地理范围的大范围变形监测、环境变化检测,这类技术发展快,部分已经得到实际应用,如 GNSS 边坡变形监测、INSAR 技术的大范围变形监测等,但技术本身的可靠性、稳定性和环境适应性还需要完善;对于流域,由于其地理范围广、地理环境复杂、设施设备繁多,除了监测流域水资源的水位、流速、水质等通常参数,还需要监测沿线气候、环境等相关因素,如上游暴雨会导致

一段时间后下游的灾情,流经山体水土保持水平下降加快汇水速度导致隐患等。常用参数监测技术方法成熟,但是对于环境监测困难较大。

面向智慧水利建设的新使命,需要扩大感知及监测范围,提供全覆盖、高精度、高时效、长时间序列的感知功能,获取有效数据以保障流域智能运行、精准管控和安全运转。利用遥感影像数据、数字高程模型及物理对象 3DMAX 模型进行融合处理,构建工程区域数据底板,通过加载基础数据与场景实时监测数据,集成到构建级模型单元,打造与物理工程孪生的数字化场景,构建水利对象的数字化映射,形成对水利对象的时空变化态势的整体性认识。建立基于云计算的智慧水库信息系统模型,并采用相适应虚拟机动态调度技术,集合数字孪生水利工程计算存储需求,采用私有云、行业云、政务云、独立服务器等形式,构建数字孪生基础服务支撑体系,实现信息高效存储与管理。

智慧水利感知体系建设需要综合考虑设施设备感知、工程环境感知、地理环境感知等方面,从空间和时间维度出发,综合考虑感知技术、指标体系、网络传输,并结合智慧水利指标体系系统建设“空-天-地-水”的感知体系,形成时间和空间维度上的连续观测。从而为人工智能分析、建模、预测预警提供足够多和高质量的学习数据,实现以数据为保障、知识为引导、算法为核心的智能计算模式,从而实现水利感知、认知和决策。

## 2.2 数据管理与解译

智慧水利感知涉及多种感知传感器,数据有可见光图像、红外图像、卫星影像、数字信号、模拟信号等多种形态,多源、异构、多尺度数据是智慧水利感知数据的自然结果。这些数据中,对于典型静态图像数据大部分时间没有变化,长久保持或实时传输意义不大;对于具有动态特性的如大坝、边坡等变形数据,则具有非常强的动态时效,需要及时计算并实时上传。边缘计算是近年兴起的技术,智慧水利感知设备中,对于时效要求低的静态数据可以采用边缘计算处理,回传有意义的数据以降低网络需求,同时具有较好的时间响应。对于具有动态时效的数据,也可以利用边缘计算提高时间响应,在网络允许的情况下回传数据。边缘站点

实行统一管理,无须值守。河道沿线、水库无网无电场景组网,支持点对多点灵活组网,解决无网场景可靠传输问题,能适用于低照度和极端天气条件,且满足无光弱光场景的视频需要,使得水利感知系统变得更加高效、智慧,且更易于以紧凑、可靠的形式实施。利用边缘计算、NB-IoT、3G/4G/5G、AI 视频智能识别、倾斜摄影等新一代通信技术,在云边端一体化理念指导下,建设水联网<sup>[17]</sup>、物联网、视联网平台,实现对流域范围内河流水系、水利工程和水利管理活动等水管理对象的全域全时空立体感知监管监控、智能预报预警。

智慧水利在不同的管理层级所需要的数据并不一致,也就是说,有些数据对于具体某个管理需求是特定的,如大坝安全监测,对于大坝安全管理非常重要,需要有长时间序列的安全监测数据,并进行安全预测预警,但对于水资源调度,需要更多关系水库库容情况、大坝间关系等宏观数据。因此,需要建立感知数据的分层管理机制。各种云资源、分布式数据管理和微服务结构为这种应用提供了良好的解决方案,这使得相关人员可以专注于具体需求的具体数据。

### 2.3 智能感知建设途径

传统各自为政的点式离散感知难以支撑智慧水利建设,智能感知体现在传感器的智能、感知方式的智能、感知数据解译的智能等方面。

从感知传感器角度,要求对各种需求有较好的适应性,支持加载多种传感器,实现多维数据采集、良好的扩展性。新的感知需求要求新的技术,需要从原理、材料、技术和设备方面展开研发;同时,水利管理对象点多面广,且高度分散,尤其郊区和偏远地区,无电场景多,无光纤,无通信信号,导致取电取网成本高、人力巡检效率低、维护难、智能化水平低、维护成本高甚至监管空白等问题,这要求传感器要做到远程可维护或免维护,具体体现在机房模块化设计,降低运维成本,通过远程、宽环境、快速部署,实现精准化定位和智能化、高可靠、免维护;支持加载多种传感器、多维数据采集和良好扩展性等方面。

从感知方式角度,要形成“空-天-地-水”综合感知,如图1所示。利用北斗卫星通信和定位、5G、IPv6 等技术<sup>[18-19]</sup>,进行大范围感知,提供宏观的环境变化、

气候变化、基本地理数据获取等能力,开展水文监测、河湖监管、大坝位移监测及闸泵站等水利工程远程控制、防洪排涝等业务应用;对于流域河湖存在的分布隐蔽、地形复杂等问题,利用无人机低空遥感技术具有的分辨率高、数据质量好以及快速机动等优势,可进行无人机高效、连续的智能巡河,提高监管效率;对于需要长期观测的项目,如水质分析,利用卫星遥感视点高、视域广的优势,开展不同时期同区域遥感数据监测成果的对比分析,实现水质遥感分析;利用无人船等装备获取水面上下及水下地形等数据,从而形成多层次多方位的感知。

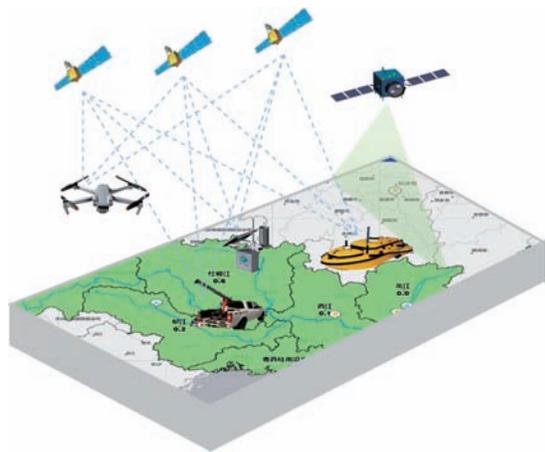


图1 “空-天-地-水”一体化感知体系

从感知数据解译角度,智慧水利感知数据多源异构,同时存在多尺度问题,其关键问题是如何进行良好的数据融合处理,而可靠的时空基准是前提,GNSS 提供了好的解决方案,对于部分受限场景,结合视觉、惯性、里程等传感器也能提供好的技术路线,基于 GNSS 时间基准方法,在输配电网、水利、能源等领域得到了良好应用,对于更高频率的需求,可以 GNSS 结合晶振等方式进行时间对齐,从而建立良好的时空基准,为智慧水利多源数据解译提供基础。水利设施以及流域地理范围广,环境复杂,传感网络数据来源多,类型复杂,通信标准不一,为实现互连互通和不同数据格式之间的相互转换,应建立统一的数据接入与汇集机制以及数据转换关系,制定传感网络信息标准及传输标准,如通过 HTTP 协议访问各关联数据,并建立数据之间的相互关系,对数据实现分类管理,为感知网络智能服务奠定基础<sup>[20]</sup>。

### 3 智能感知网建设的思考

我国地势总体上西高东低,呈阶梯状分布,这意味着我国河流走向大都由西向东。从我国经济发展来看,东部地区经济明显好于西部地区,西部有着更多的水源和地理覆盖面积,经济一般,东部有着优越的经济条件,用水需求大。事实上,大部分水利信息化都在东部发达地区实施,对于流域相关的智慧化水利而言明显不合理。

考虑到水利建设的公益属性,智慧水利智能感知建设需要国家统筹考虑并兼顾地区差异。因此,智能化感知需要重点研究推进智慧水利建设的机制,包括研究相关的政策法规、创新机制、标准规范等,为实现智慧水利建设提供宏观指导。鼓励高科技企业进行相关的新技术、新装备研发和跨领域跨学科技术转化,并从系统考虑角度开展示范,进行推广应用,初步形成规模和可行模式。

加强信息系统基础设施建设,为智慧水利的发展保驾护航;加快水利云平台建设,采用分布式部署,使用标准统一的接口通信,降低模块间耦合度,定期维护及评估感知设备,减少维护成本。综合应用新型技术,提出可落地、可推广、可迭代的技术应用手段和解决方案。持续升级感知系统软、硬件性能,加快建设“空-天-地-水”一体化的立体感知体系,为智慧水利的感知、数据服务提供支持。

### 4 结 语

智慧水利建设是认真落实国家“十四五”规划纲要的重要工作,是实现水资源和水工程科学利用、高效管理和有效保护的基础和前提。当前和今后一段时期的工作重点是要完善智能感知网环境,提升智慧水利网络安全态势感知和应急处置能力。本文从传感器的智能、感知方式的智能、感知数据解译的智能等角度出发,提出了“空-天-地-水”一体化的立体感知体系建设思路,以期为智慧水利数字孪生平台的构建提供支撑,为智慧水利的建设提供科学参考。◆

#### 参考文献

[1] 黄雅屏,金昊. 中国流域治理问题探析及《长江保护法》初探[J]. 湖北农业科学,2021,60(18):161-165.

- [2] 张建云,刘九夫,金君良. 关于智慧水利的认识与思考[J]. 水利水运工程学报,2019(6):1-7.
- [3] 水利部印发关于推进智慧水利建设的指导意见和实施方案[J]. 水利建设与管理,2022,42(1):5.
- [4] 蒋云钟,冶运涛,赵红莉,等. 智慧水利解析[J]. 水利学报,2021,52(11):1655-1368.
- [5] REVATHI P, MRUNALINI T, NIRANJANA M, et al. Smart Water Management towards quality and improvement using IoT [J]. IOP conference series: materials science and engineering, 2021:1055.
- [6] 张新钰,高洪波,赵建辉,等. 基于深度学习的自动驾驶技术综述[J]. 清华大学学报(自然科学版),2018,58(4):438-444.
- [7] 胡鸿,许延丽,鞠洪波,等. 基于遥感影像的福建省长汀县级植被覆盖变化监测及分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2019,43(3):92-98.
- [8] 李哲全,张贵,谭三清,等. 基于卫星遥感的森林火灾风险预警研究[J]. 中南林业科技大学学报,2021,41(7):26-33.
- [9] 尤林奇,王楠,陶玉波,等. 基于 BIM + GIS 的水利水电工程多源数据融合方法及应用[J]. 水电能源科学. 2021,39(8):169-173.
- [10] 朱德军,李浩博,王晓明. GNSS 遥感技术在智慧水利建设中的应用展望[J/OL]. 水利水电技术(中英文)(2022-04-06) [2022-04-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1746.TV.20220402.1627.002.html>.
- [11] 王亚权,吴思琦,杜灿阳,等. 珠江三角洲水资源配置工程智慧化管理体系研究[J]. 广东水利水电,2022(2):84-89.
- [12] 耿磊,徐嫣,雷佳明. 基于空天地感知的流域智慧指挥平台研究与实现:以西江流域为例[J]. 人民长江,2021,52(52):289-292.
- [13] 张绿原,胡露露,沈启航,等. 水利工程数字孪生技术研究与探索[J]. 中国农村水利水电,2021(11):58-62.
- [14] 蒋云钟,冶运涛,赵红莉,等. 智慧水利解析[J]. 水利学报,2021,52(11):1355-1368.
- [15] YANDJA L, MOHAMED F, CHAARI F L, et al. Communication technologies for Smart Water Grid applications: Overview, opportunities, and research directions[J]. Computer networks. 2021(8):1-23.
- [16] 杨俊峰,王红军,冯昊天,等. 基于数字孪生模型的设备故障诊断技术[J]. 设备管理与维修,2021(9):128-130.
- [17] 王忠静,王光谦,王建华,等. 基于水联网及智慧水利提高水资源效能[J]. 水利水电技术,2013,44(1):1-6.
- [18] 桂鹏鹏,蒋鑫,宋欣,等. 5G 通信技术在智慧水利中的应用前景分析[J]. 人民长江,2021,52(S2):283-288.
- [19] 冶运涛,蒋云钟,梁翠丽,等. 智慧水利大数据理论与方法[M]. 北京:科学出版社出版,2020.
- [20] 赵洪丽,马吉刚,郭江. 智慧水利泵闸站标准化建设规程研究[J]. 水利水电技术,2020,51(S1):221-226.

# 南水北调数字孪生泵站工程建设思路探讨

江如春<sup>1</sup> 沈芳芳<sup>2</sup> 张 歆<sup>1</sup>

- (1. 江苏省江都水利工程管理处, 江苏 扬州 225200;
2. 江苏省水利科教中心, 江苏 南京 210029)

**【摘要】** 为推进智慧水利建设,实现南水北调泵站工程高质量发展,需要运用新一代信息技术在虚拟数字世界中创建一个与真实世界物理实体相互映射、协同交互的数字孪生体,实现泵站运行时泵体状态预测、故障诊断预警、特殊工况预演和动态优化预案四预功能。本文分析了现阶段数字孪生泵站的发展需要,探索数据建设、模型建设、应用建设等关键技术,提出数字孪生泵站技术建设方案,为高质量开展南水北调后续工程数字孪生建设提供参考。  
**【关键词】** 南水北调;泵站工程;数字孪生;智慧水利

中图分类号: TV675

文献标志码: B

文章编号: 2097-0528(2022)09-008-04

## Discussion on construction idea of digital twin pump station of South-to-North Water Transfer project

JIANG Ruchun<sup>1</sup>, SHEN Fangfang<sup>2</sup>, ZHANG Xin<sup>1</sup>

- (1. Jiangsu Jiangu Water Conservancy Project Management Office, Yangzhou 225200, China;
2. Jiangsu Water Conservancy Science and Education Center, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** A new generation of information technology is used to create a digital twin in the virtual digital world that maps and interacts with the physical entities in the real world in order to promote the construction of intelligent water conservancy and realize the high-quality development of the pump station in South-to-North Water Transfer Project, thereby realizing four pre-functions of pump state prediction, fault diagnosis and early warning, special working condition preview and dynamic optimization plan during operation of the pump station. The development demand of the digital twin pump station at the present stage is analyzed in the paper, the key technologies such as data construction, model construction and application construction are explored, and the technical construction scheme of the digital twin pump station is proposed, thereby providing a reference for the digital twin construction of the follow-up project of the South-to-North Water Transfer Project with high quality.

**Keywords:** South-to-North Water Transfer; pump station project; digital twin; intelligent water conservancy

智慧水利以物联网为核心,通过现场数据、图像及 状态实时采集、处理、分析、计算等,实现对工程现场泵

收稿日期: 2022-06-22

作者简介: 江如春(1987—),男,工程师,主要从事大型水利泵站工程生产运行管理、机电安装检修工作。

站运行的动态监视、远程控制、智能决策与流程优化,促进泵站各运行环节间高效地进行数据共享与协同工作。本文以南水北调东线源头江都水利枢纽第一抽水电站为典型,按照“需求牵引、应用至上、数字赋能、提升能力”要求,以数字化、网络化、智能化为主线,全面实现数字化场景、智慧化模拟、精准化决策,以构建数字孪生泵站为核心,全面推进算据、算法、算力建设,加快构建具有预报、预警、预演、预案等功能的智慧水利体系,实现精细化数字化泵站管理全覆盖。

## 1 工程概况

江都第一抽水站(简称江都一站)是南水北调东线源头——江都水利枢纽工程的重要组成部分。工程于1961年12月开始兴建,1963年3月竣工,是新中国成立后国内第一个自行设计、自行建设、自行管理的大型泵站。现装有8台1.75ZLQ-6.0立式机械全调节轴流泵,配套TL1000-24/2150型立式同步电动机,设计总流量 $81.6\text{m}^3/\text{s}$ 。泵站采用堤身式结构,肘形进水流道,虹吸式出水流道,真空破坏阀断流。

江都一站在探索工程管理精细化、信息化、标准化等方面均取得了较好成绩,实现了各高低压电气设备远程开关、主水泵远程启停、各项运行参数远程实时显示并预警;工程精细化管理平台实现了任务下达、任务实施、任务追踪、任务完成及任务评价等全过程管理体系,涵盖了工程管理中检查观测、维修保养、水政执法、评价考核等业务工作。面对新时代水利现代化高质量发展新要求,仍存在很大提升空间。

## 2 现状分析

国内有关大型泵站现代化技术的研究大多集中在监测、自动化控制和泵站运行优化等方面。我国泵站工程从规模和数量上来看,目前居于世界前列,当前的智慧水利建设也已经初具规模,然而尚存在以下缺陷和不足:

a. 缺乏深入的智慧化感知。当前的水利基础设施、平台建设还缺乏深入透彻的感知,没有实现水利数据自动采集和安全监测的全覆盖,在水情监测报讯方面存在欠缺,暴露出自动化、信息化技术应用不够深入

的问题。

b. 缺乏全面的互联共通。现有的水利建设网络覆盖面不足,不同业务系统之间的信息链接和共享存在欠缺,缺乏深入全面的业务协同。另外,在水利基础设施建设方面还存在缺失,基础软硬件支撑体系应用较为单薄。

c. 缺乏智能的应用终端。当前的水利建设中新一代信息技术应用还较为薄弱,没有充分突显大数据、人工智能、虚拟现实技术的智慧水利应用功能,在智能化应用服务终端方面尚存在欠缺。

## 3 重点任务

针对现有研究不足,需要不断优化和创新智慧水利的集约化、智能化、云端化和智能应用服务性能,充分利用互联网、大数据、云计算等新一代信息技术,做好水资源合理配置和调度,实现智慧水利的全面透彻感知、数据信息共享、协同智能管理和泛在服务。

### 3.1 研究确定水利智慧泵站数字孪生基础数据

数据是智慧水利建设的基础,有了数据,上层应用和智慧分析才有基础支撑。因此,通过数据主导应用,以数据为核心,再利用数据进行全域标识、状态精准感知、数据实时分析、动态优化调度、智能精准执行,充分发挥数据价值,构建泵站大数据库,使各监测数据联动,实现泵站工程的智能模拟、监控、诊断、预测和控制。

### 3.2 部署安装数字孪生信息采集物联传感设备

为了更好地发展智慧泵站数字孪生技术,进一步完善泵站运行基础数据的自动采集系统,在江都一站现有的水位检测、水泵运行参数(电气量、温度等信息)的基础上,以现有主机组为原形,完善泵站安全运行监测数据类别,增加实时运行流量监测、关键部位位移振动监测、电气室光感烟感等安全监测设施。

### 3.3 改造升级泵站远程诊断集中智能控制系统

江都一站已于2020年完成泵站测控保一体化升级改造,并顺利完成测控保一体化设备M60的各项参数设置和运行调试工作。在实际运行中发现,上位机监控系统与现场新设备设施存在通信延时、操作指令

卡死等现象,对工程安全稳定运行有一定影响。为提高江都一站监控系统的稳定性和兼容性,适应现代化智慧水利建设为新要求,打造集数据安全存储、智能分析、合理运用、科学决策、自动控制于一体的泵站远程诊断集中智能控制系统。

### 3.4 运用准确数据,辅助科学决策,实现智能管理

充分挖掘数据价值,构建水利数据大脑,实现水利的模拟、监控、诊断、预测和控制,以“一库、一平台、一张图、N应用”为核心架构,构建水利数据生态,创新业务应用。在确保数据准确的前提下,科学运用数据间的逻辑关系,人为赋予数据生命,使各数据在特定设置范围中,根据应用逻辑编程,作出数据联动“智能”响应,使泵站达到最佳运行状态,探索“集中监控、故障精确定位、动态调度、智能管理”智慧化管理模式,实现水利泵站安全、平稳、高效、低耗运行。

### 3.5 数字孪生+3D建模,提升教育培训和安全预警能力

数字孪生泵体运行实时监测是运用虚拟仿真技术与离散事件仿真系统对现实泵体进行数字建模、仿真验证校验,虚拟环境运行的技术措施。数字孪生泵体建设是“智慧水利”的基础工程,为后续的泵体故障识别及动态优化调度提供大量的实验数据及实验环境。在完善的仿真模型的基础上,在仿真系统里进行各种复杂的试验,获取现实系统的各项指标。在主水泵大修的过程中,运用仿真模型,根据大修现场安装测量数据,实时模拟,实时指导大修部件安装调整方向,提高检修效率和检修质量。在职工技术教育培训中,可以不限于主机大修周期要求,运用仿真模型,随时对水泵进行模拟拆解、安装,帮助职工迅速成长,提高队伍整体技术水平。

## 4 实现功能

### 4.1 泵站数据采集

数据采集是数字孪生泵体、设备故障识别以及泵站优化调度的基础。数据采集的类型包括电量监测、非电量监测、振动监测和温度监测等4个方面。电量监测内容:高压母线和低压母线的电流、电压、有功

率、无功功率、功率因数等,机组运行时的电压、定子电流、有功功率、无功功率、功率因数、励磁电流、励磁电压等,直流系统电压、电流等。非电量监测包括实时流量、上下游水位、扬程等。振动监测包括机组和压力管道的振动系数。温度监测包括电动机及水泵轴承(轴瓦)温度、电动机定子绕组温度(电机预埋电阻完好)、变压器温度、环境温度等,具体数据采集类型见表1。

表1 江都一站拟采集的数据类型统计

物理量	单位	物理量	单位
扬程	m	叶片数	片
转速	r/min	叶根叶栅稠密度	
转矩	N·m	水力损失	m
叶轮进口压力	Pa	湍动黏度	m <sup>2</sup> /s
阻力系数		升力系数	
翼型厚度值	mm	叶片安放角	(°)

为了实现上述数据的自动化采集,需配置智能传感装置以及设计相关的自动化数据采集程序,即采集硬件和上位机。在上述数据自动化采集的过程中需要解决下列关键问题:

a. 智能传感器部署。在进行泵体设备振动、温度等信息的采集时需遵循不改变设备原有结构及性能的原则,尤其在采集叶轮的振动频率时无法将传感器直接部署于叶片上,否则因叶轮高速运转将导致传感器脱落。

b. 多源异构数据的集成。由上述数据类型分析可知,包括电流、电压、功率、振动、温度等信息,通过部署多类传感器或者调用DCS系统汇聚了多源异构信息,此时需要解决此类信息的集成管理与统一传输问题。

c. 特征信号提取及处理。在采集泵体关键部位的振动信号时常常受到其他数据的干扰,例如水环境的波动、泵体的故障、电磁场的干扰等,此时需要利用特征信号提取及数据清洗技术获取所需振动信号。

### 4.2 泵体虚拟仿真

将虚拟仿真技术应用于水利工程运行管理领域,建立三维实时动态虚拟仿真环境,利用3D图显技术,使泵站运行管理人员能在虚拟环境下,实现水泵机组运行状态的虚拟演示,实时同步机组的运行状态。该

技术的应用不仅可以大大提高水利工程动态运行的控制能力,提高工作效率,降低管理损耗,同时对于水利工程运行管理水平的提升具有划时代的意义。在泵体虚拟仿真过程中拟解决的关键问题如下:

**a. 动态建模。**动态建模技术是虚拟仿真的核心技术,利用动态建模技术获取水利工程的实时监测数据,然后将这些数据信息转化成三维立体数据,并结合工程特点利用获取的三维立体数据建立三维虚拟环境模型。

**b. 三维图像快速生成。**为了使建立的泵站工程三维虚拟模型可视化程度较高,就要求建立的模型图像具有高刷新频率,所以在建立三维虚拟模型时需要利用三维图像快速生成技术,依据江都一站二维 CAD 图纸和相关建筑数据形成三维虚拟环境,提高模型的可视化程度。

#### 4.3 设备故障识别及诊断

随着现代工业的快速发展,泵站设备也变得更加多功能化、智能化,泵体能否正常运行对工程安全以及运行成本起着至关重要的作用。通过传统的人工化的技术手段对泵体进行检测和维护已经不能满足现代化水利进程的需求,因此,需要一种更智能化的检测手段对设备进行实时监测。在泵体故障识别及诊断过程中拟解决的关键问题如下:

**a. 泵体故障类型分析。**泵体故障类型分析是故障识别及诊断的基础,首先需要弄清泵体常见的故障类型以及故障关联的物理量特征,通过一定的数据关联算法预演故障可能发生的时间、位置以及原因。

**b. 故障识别及诊断技术。**泵体故障识别无论采用何种手段、何种技术,实质上都是围绕主机组运行时各核心部件温度信息、振动信息和噪声信息开展的,对泵体的故障诊断仅仅依靠专家和设备管理人员的经验判断,或者通过一些简单的仪器对故障进行诊断和维护显然是行不通的,需要通过进一步探索智能化故障识别技术。

#### 4.4 泵站优化调度

泵站优化调度拟解决的关键问题如下:

**a. 泵站在长期运行过程中,**由于磨损、不规范操作等因素,系统特性在缓慢发生变化,不同时期可能需

要不同的函数关系模型来描述各台水泵的性能特性。

**b. 优化调度目标函数确定及建模:**提出多目标函数的优化调度策略,在不同的运行工况下选取的优化调度目标不同,例如在汛期时应尽可能选取“运行效率及排水量最大化”作为调度目标,在淡水季应尽可能选取“运行费用及能耗最大化”作为调度目标等。

## 5 结 语

推进数字孪生泵站工程建设作为智慧水利体系的核心组成,是适应现代信息技术发展形势的必然要求,也是实现精细化、数字化管理的迫切需要。要按照“先行先试”的原则,以单座泵站工程为原型,初步建立较为完善的数字孪生平台,实现技术探索和积累,在探索和尝试中对数字孪生技术进行优化与完善,提高泵站工程预报、预警、预演、预案的科学性、实用性、可操作性,为高质量开展南水北调后续工程建设与运行管理提供数字孪生场景及应用技术参考。◆

#### 参考文献

- [1] 夏正创.大中型泵站无人值守运行管理模式研究[J].水利建设与管理,2020,40(3):75-79.
- [2] 黄艳.数字孪生长江建设关键技术与试点初探[J].中国防汛抗旱,2022,32(2):16-26.
- [3] 水利部印发关于完善流域防洪工程体系的指导意见和实施方案[J].水利建设与管理,2022,42(1):2.
- [4] 蔡阳,成建国,曾焱,等.加快构建具有“四预”功能的智慧水利体系[J].中国水利,2021(20):2-5.
- [5] 水利科普.建设智慧水利离不开的“三算”(I)[J].水利建设与管理,2021,41(10):2.
- [6] 段刚强.CWM80x数据采集系统在白鹤滩水电站混凝土温控中的应用[J].水利建设与管理,2020,40(2):39-42.
- [7] 杨汉成,孙京忠,索丽生,等.基于智能体的泵站智能控制维护管理集成系统[J].中国农村水利水电,2002(9):47-50.
- [8] 刘锡鸣.0轴绘图法在立式水轮发电机组盘车改进中的应用分析[J].中国水能及电气化,2020(3):20-25.
- [9] 楼华敏,詹少林,管敏琳,等.DCS自控系统在污水减排处理中的设计[J].资源节约与环保,2022(2):7-9,13.
- [10] 杨林,许哲,郑源.大型低扬程泵站的停机过渡过程研究[J].水利建设与管理,2020,40(2):73-79.

# 临淮岗数字孪生工程建设研究和探索

李君廷

(安徽省临淮岗洪水控制工程管理局,安徽 合肥 230088)

**【摘要】** 临淮岗工程数字孪生建设立足新起点,抢抓智慧水利发展新机遇,充分发挥新一代信息技术支撑驱动作用,深化信息技术与水利业务深度融合,以数字孪生赋能水灾害防御和水资源优化配置,实现工程科学化、智能化、精细化管理。本文结合临淮岗工程的特点和现状,深度剖析枢纽工程数字孪生建设关键技术及工程调度的全过程仿真模拟,按照《数字孪生水利工程建设技术导则》要求,从思路、技术、框架及调度仿真应用等方面进行研究,形成先进、高效、好用的临淮岗数字孪生工程,可为同类或同行业数字孪生建设提供可借鉴经验。

**【关键词】** 临淮岗工程;数字孪生工程;数字孪生技术;调度仿真模拟

中图分类号: TV873+.1

文献标志码: B

文章编号: 2097-0528(2022)09-012-06

## Research and exploration of Linhuaigang Digital Twin Project construction

LI Juntong

(Anhui Linhuaigang Flood Control Project Administration Bureau, Hefei 230088, China)

**Abstract:** Digital twin construction of Linhuaigang project is based on the new starting point. The opportunities of smart water conservancy development is seized. The support and driving role of new generation information technology is fully utilized. Deepened information technology is deeply integrated with water conservancy business. Water disaster prevention and water resources optimization configuration are energized with digital twins, thereby realizing scientific, intelligent and fine management of the project. Linhuaigang project characteristics and status quo are combined in the paper to deeply analyze digital twin construction key technology of key project and whole-process simulation of project scheduling. We study from the aspects of thought, technology, frame, scheduling simulation application and other aspects according to the requirements in 'Guidance for Digital Twin Water Conservancy Project Construction Technology'. Advanced, efficient and useful Linhuaigang digital twin project is formed, thereby providing reference experience for similar or peer digital twin construction.

**Keywords:** Linhuaigang Project; digital twin project; digital twin technology; scheduling simulation

加快数字化高质量发展,建设数字中国,是大势所趋。推进智慧水利建设,是建设数字中国的重要组成部分。2022年3月22日,水利部部长李国英提出将智慧水利建设提上日程,并提出智慧水利建设应以“需求

牵引、应用至上、数字赋能、提升能力”为要求,以“预报、预警、预演、预案”四预功能为目标<sup>[1]</sup>,实现水安全风险从被动应对向主动防控转变。

临淮岗洪水控制工程管理局为积极响应智慧水利

收稿日期: 2022-07-18

作者简介: 李君廷(1966—),男,本科,高级工程师,主要从事水利工程管理、水资源调度工作。

建设要求,探索数字孪生工程建设技术和工程调度全过程仿真应用,立足临淮岗洪水控制工程(以下简称“临淮岗工程”)实际,提出临淮岗工程数字孪生建设的总体框架和任务,运用三维建模、数字映射、虚拟仿真等技术,结合工程调度需求,形成数字孪生临淮岗工程智慧应用,进而提升临淮岗工程防洪调度能力以及工程运行科学化、精准化、高效化水平。

## 1 工程概况及信息化现状

### 1.1 工程概况

临淮岗工程(见图1)处于淮河流域中游,位于颍

上、霍邱、阜南三县,线性布置横亘于淮河之上,坝体由8.54km主坝、8.41km南副坝和60.56km北副坝三部分组成,其中临淮岗船闸、深孔闸、浅孔闸和姜唐湖进洪闸由南至北依次坐落于主坝之上,南北副坝上布置有50座穿坝涵闸和陶坝闸、张集闸2座中型水闸,姜唐湖退水闸、城西湖退水闸隶属临淮岗工程洪水调度运用。工程同上游大型水库、沿淮行蓄洪区、分洪河道一起构成淮河中游多层次综合防洪体系,使淮河中游正阳关以下地区防洪标准达到百年一遇,被誉为“淮河上的三峡工程和小浪底工程”,结束了淮河中游无大型洪水防御控制性工程的历史<sup>[2]</sup>。



图1 临淮岗工程鸟瞰图

### 1.2 信息化现状

临淮岗工程已竣工安全运行15年,管理单位积累了一定的管理经验。临淮岗工程信息化建设起点高、规模大,但因工程建设期间施工单位多,信息系统集成整合不到位,后期受维护经费限制,加之当今全球信息化技术的飞速发展,导致临淮岗工程信息化与智慧水利建设明显滞后,突出表现在以下几点:

a. 水利信息化基础设施建设较为薄弱,缺乏完善的雨水情、工情智能化采集设施,一些基础数据的采集还依赖人工作业。

b. 已建成的大型水闸自动化控制系统硬件厂家元器件更新换代且缺乏专业人员维护,损坏后难以及时修复。

c. 业务应用系统尚处于起步阶段,数据储存、统计分析、综合应用等系统还未建立。

d. 不同部分之间存在数据资源不对等、信息不能共享的现象,无法充分利用大数据、人工智能等技术进行数据整合、分析、优化和辅助决策。

## 2 数字孪生临淮岗工程建设思路研究

数字孪生临淮岗工程建设围绕新阶段水利高质量发展的要求,积极践行“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”治水思路,结合临淮岗工程管理现状,以数字化场景、智慧化模拟、精准化决策为路径<sup>[3]</sup>,充分运用新一代信息技术,以数字地形为基石,以倾斜摄影模型、BIM模型为重点,对临淮岗工程进行全要素数字化映射;强化信息技术和水利业务深度融合,以数字赋能工程防洪、水资源管理等重点领域,构建具有“四预”功能的数字孪生临淮岗工程体系,提升管理单位水治理和水管理能力。将大数据、数字孪生、人工智能、物联网等新兴数据处理、传输等技术与工程水旱灾害

防御、水资源精准调度、工程巡查管理、水行政执法等业务有效地结合起来,通过全量数据实时融合、实时处理与智能计算,形成数据采集、信息整合、综合调度、智能控制、智慧决策全过程智能监控系统,实现临淮岗物理实体工程与数字孪生临淮岗工程之间的数字化映射、同步仿真管理运行,有效支撑洪水防御和工程管理的精准化决策。逐步建成洪水防御、水资源管理、工程管理、水行政执法等各类系统,优先构建工程主坝核心区的数字孪生展示应用,进而逐步覆盖工程管理全过程管控、安全监测、设备养护及水行政执法等,扎实推进分系统模块化建设、数据全方位集成融合的建设思路,各类数据不但能为临淮岗数字孪生提供支撑,也同样能服务于整个淮河流域。

### 3 数字孪生临淮岗工程总体框架

统筹临淮岗工程信息化现状和管理需求,坚持智慧水利建设要求,研发 LHG 数字孪生架构平台,以场景全要素表达为基础,以数据信息加载为主线,实现宏观尺度 GIS 空间地理信息与微观尺度工程三维模型数据、运管监测数据及实时感知数据等多维多元异构数据融合,全面推进算据、算法、算力建设,充分利用数字孪生新技术,深入水利行业服务场景,打造实用先进的信息基础设施和数字孪生平台,建设具有“四预”功能的业务应用体系,逐步提升临淮岗工程防洪调度、水资源管理、工程运管等业务的现代化水平。数字孪生临淮岗工程的总体框架见图 2。

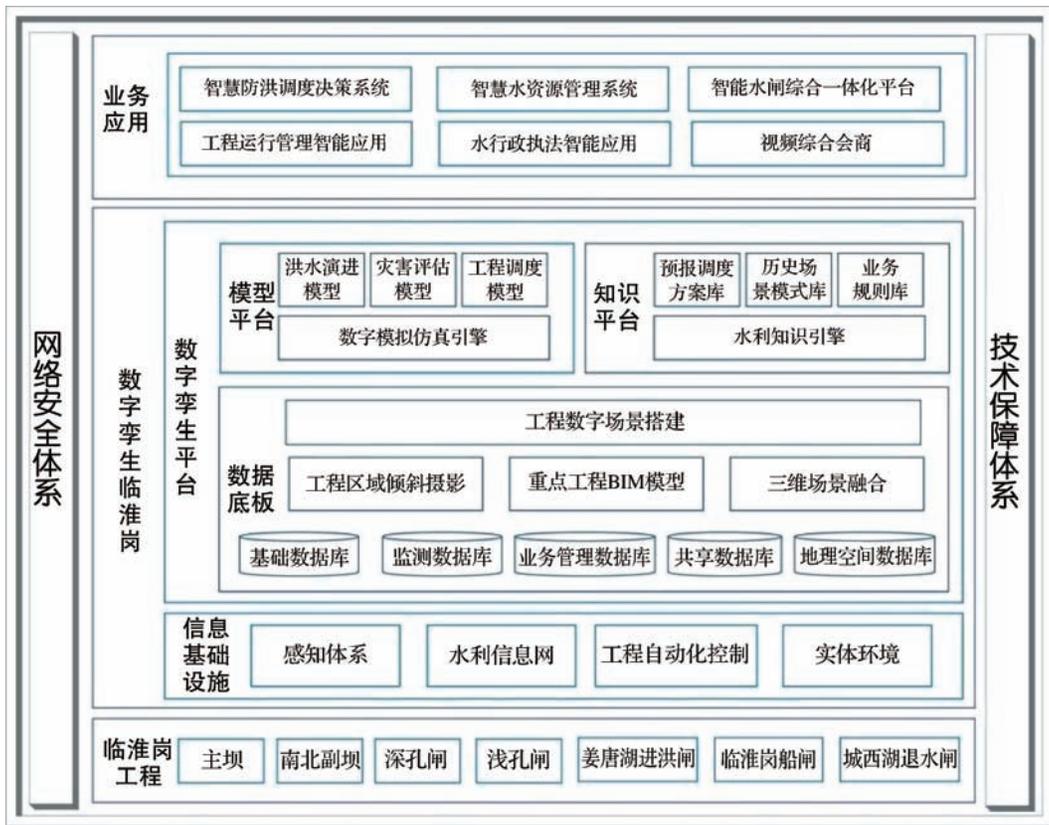


图 2 数字孪生临淮岗工程总体框架

### 4 数字孪生建设关键技术

数字孪生工程建设最为突出的是数字孪生技术的应用,相较于传统工程信息化建设,数字孪生工程从信息采集、信息传输、模型融合、交互协同及系统性能等

方面,都具有一定的先进性,能够支撑智慧应用。本次临淮岗数字孪生工程建设主要从数据采集和传输、模型融合、交互与协同等方面进行数字孪生技术应用说明,明确各技术定义及在数字孪生工程建设中的作用。

#### 4.1 数据采集和传输技术

数字孪生工程是将物理世界的实时动态数据反映在虚拟世界中,因此数据采集和传输的实时性至关重要。本次临淮岗数字孪生工程建设借助 IoT 等技术,将复杂的数据采集及传输过程简单化,并且兼顾临淮岗已有的监测体系,适配现有的感知体系,构建集数据采集、数据传输于一体的感知体系平台。

#### 4.2 数据模型融合技术

数字孪生工程建设时,涉及多专业、多领域模型,为实现多模型实时更新、修正、优化及动态评估,从结构、流程、物理场景等角度出发,利用神经网络、遗传算法、强化学习等技术进行针对性建设,进而实现数据模型的融合<sup>[4]</sup>。临淮岗工程地处淮河流域地形平缓区域,下游水位等要素对上游的水流运动的影响较大,在模型模拟计算时不能忽略,必须在一个时间步长之内进行耦合求解,也就是必须在内层考虑到空间上的耦合关系,外层按照时间循环进行求解。临淮岗工程在防洪调度时通过数值离散构建节点方程,在步长级耦合求解。

#### 4.3 交互与协同技术

数字孪生工程主要是在虚拟世界中,实现物理实体各类参数的模拟与仿真,突出工作人员在虚拟世界的沉浸感,真正做到解放双眼的目标。临淮岗数字孪生工程建设主要利用虚拟现实、增强现实等交互技术,将防洪调度和工程管理中的各类情形进行交互展现,增强防洪调度预演的真实体验感,增强闸门开度、工程管理、运行维护等场景应用的交互沉浸感。

### 5 数字孪生临淮岗工程建设方向

#### 5.1 构建临淮岗工程智慧防洪“四预”体系

##### 5.1.1 构建防洪数字化场景

基于工程三维地理场景,集成防汛基础数据、监测数据、业务管理数据、社会经济发展等跨行业共享数据,构建临淮岗工程防洪数字化场景,为提高洪水预报精度、提升防洪调度水平等提供数字化基础支撑。

##### 5.1.2 智慧化模拟

在数字化场景基础上,集成耦合洪水推进模型、工程联合调度模型、灾害淹没评估模型,结合预报调度方案库、历史场景库、业务数据库等知识,通过仿真引擎和知识引擎驱动,根据气象预报及洪水预报情况,对河道、水库、蓄滞洪区蓄泄情况进行模拟预演,实现洪水淹没分析、水资源管理与调配等功能的数字孪生三维可视化场景预演展示,为工程精细化调度提供决策支持,实现防洪调度决策的智慧化模拟<sup>[5]</sup>。

##### 5.1.3 精准化决策

建设智慧防洪调度管理系统,通过防洪数字化场景和智慧化模拟,根据实际雨水情预报情况,开展多目标协同联合调度,形成淮河流域不同水平年、不同工况条件下洪水调度方案,支撑构建临淮岗工程控制运用时的淮河流域水工程联合调度方案体系,为面临强降雨大洪水等灾害天气时科学决策提供支持。在数字流场中提升洪水防御工作中“四预”能力,做到“洪水有预报、预警信息有发布、防汛决策有预演、指挥调度有预案”,全面提升水灾害防御智能调度和精准化决策能力。

#### 5.2 提升临淮岗水资源综合利用精细化管理水平

淮河流域社会经济高速发展,水资源短缺现状日趋严重,迫切要求临淮岗工程调蓄利用好洪水资源。临淮岗水资源综合利用工程是 2020—2022 年拟开工建设的 150 项重大水利工程项目之一。在后期临淮岗水资源综合利用工程建设中,积极响应数字赋能号召,认真谋划数字孪生工程建设,建立覆盖临淮岗工程及上游库区范围内的水资源调度管理系统,充分运用仿真模拟、数字孪生、数字映射等技术,在数字流场中实现水资源管理“四预”,合理调配水资源,实现水资源节约集约利用、改善生态环境,提高水资源调配与管理水平,增强决策的快速反应能力和防断流能力,促进社会经济高质量发展。融合智慧防洪调度管理系统和水资源调度管理系统,可以将淮河洪水资源化,抓住洪水的尾巴,将坝上洪水尾量实时滚动计算,实现水资源的合理配置,从而促进临淮岗工程以上河南省信阳市,安

徽省阜阳市、六安市相关县区“取、用、耗、排”水资源全过程整合,为建立和完善城乡水资源合理配置和高效利用体系提供“智慧保障”。

### 5.3 打造工程调度全流程仿真模拟

针对临淮岗工程调度的现状和问题,运用 BIM、智能控制、三维仿真、监测诊断等技术,从工程调度日常数据展示、事中过程控制、闸门调度仿真及工程事后模拟评价等角度出发,开展工程调度全流程仿真模拟,打造工程调度可视、可管、可控及全流程预演。

#### 5.3.1 调度数据可视化

工程调度全流程仿真模拟,可以多种角度直观地展示水利工程的运行状态,支持基于地理信息系统,对管理范围内工程及上游库区、关键水位控制测站等管理要素进行综合监测。实时展示大坝主体、坝前水位情况和大坝水闸垂直水平位移以及测压管数据,同时对坝体的结构应力应变信息、气象信息、渗流信息、水质信息等进行实时监测,实现工程调度各类监测信息一屏展示。见图3。



图3 实时监测模块

#### 5.3.2 调度过程各类信息联动化

调度过程中,在三维场景下,融合综合展示信息和成组或单闸控制,提供闸门开闸过程中其前后水位在线监测信息及过程线,结合水位流量过程曲线,实现按

照调度指令要求实时调整闸门开度。同时展示安全监测信息与在线视频联动,实现现场闸门开度在线监控,为工程调度、泄洪监管提供支撑。见图4



图4 调度过程各类信息联动

### 5.3.3 工程调度管理标准化

工程调度管理标准化主要是在三维数字化场景上,融合水位过程线及水位预警信息,同时集成闸门状

态及开度,联合在线视频监控,实时洞察水闸泄洪过程中闸门运行状况及现场操作过程,为防汛管理及工程标准化操作提供技术支撑。见图5。



图5 调度仿真模块

### 5.3.4 调度事后评估智慧化

调度事后评估根据不同调度情形,制定不同的指标体系,实现对调度相关工作的考核评估,稳步推进调度业务高质量发展,从而推进防洪治理工作。本模块是在构建智慧化的调度评估体系并实施防洪调度后,根据灾后统计得出的灾情损失数据,在三维场景下,评价洪涝灾害发生前后过程中各种措施、方案、决策的合理性以及减灾的实际效果。同时,将模块估算的洪水淹没范围、受灾人口及重点设施影响程度与实际统计得出的灾情信息结果在三维场景中进行对比,供决策人员作进一步分析。如果成果对比分析表明模拟结果与实况统计结果相差较大,需在查清原因的基础上,对模型参数、结构做出修改,或对预估灾情信息作进一步分析。

## 6 结 论

数字孪生模型与传统数字模型如 CAD、GIS 及 BIM 等相比,其优势是集成人、机、物三维空间全生命周期在线实时数据持续迭代优化。临淮岗工程数字孪生模型不仅能精准化映射物联感知获得的基础静态数

据反映的工程物理特征,还能精准化映射其动态变化规律及洪水演进和预演,在感知手段局限的情况下,可以依靠水利专业及智能模型库和知识库进行推断。本文根据智慧水利、数字孪生工程建设等文件要求,结合临淮岗工程信息化现状和工程管理实际需求,对临淮岗工程数字孪生建设总体框架、建设思路、先进技术、建设方向等进行了研究和探索,希望对临淮岗以及其他水利工程数字孪生建设有一定的帮助和参考价值。◇

### 参考文献

- [1] 蔡阳,成建国,曾焱,等.大力推进智慧水利建设[J].水利发展研究,2021,21(9):32-36.
- [2] 倪晓虎.临淮岗工程主坝交通安全标志牌的设置与效果[J].大坝与安全,2020(3):28-31.
- [3] 李文学,寇怀忠.关于建设数字孪生黄河的思考[J].中国防汛抗旱,2022,32(2):27-31.
- [4] 聂蓉梅,周潇雅,肖进,等.数字孪生技术综述分析与展望[J].宇航总体技术,2022,1(6):1-6.
- [5] 柏平,刘业森,刘舒,等.极端大暴雨对昆明市城市洪涝防御的警示和思考[J].中国防汛抗旱,2021,31(9):25-29.

# 水下机器人在北京雨洪工程水下检测中的应用

肖俊<sup>1</sup> 曹温博<sup>2</sup> 郑鸿志<sup>2</sup>

- (1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038;
2. 北京市城市河湖管理处, 北京 100089)

**【摘要】** 水利工程的安全运行关系重大,长期水下运行的水下结构安全性尤为重要。为了对北京市西郊蓄滞雨洪工程暗涵出口检修闸在不断流的情况下进行安全检测,采用水下机器人 FIFISH PRO V6 PLUS 进行水下无损检测。水下机器人检测已成为水下建筑物检测方面最具潜力的方法,具有很大的发展空间。本次水下机器人检测取得了较好的检测结果,积累了水下检测的经验。通过和传统水下检测方法进行对比,验证了水下机器人检测的适用性及可靠性。

**【关键词】** 水下机器人;ROV;西郊蓄滞雨洪;水下检测

中图分类号: TV698.2+1

文献标志码: A

文章编号: 2097-0528(2022)09-018-06

## Application of underwater robot in underwater inspection of Beijing stormwater project

XIAO Jun<sup>1</sup>, CAO Wenbo<sup>2</sup>, ZHENG Hongzhi<sup>2</sup>

- (1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;
2. Beijing Municipal Administration of Rivers and Lakes, Beijing 100089, China)

**Abstract:** The safe operation of water conservancy projects is very important. The safety of underwater structures in long-term underwater operation is particularly important. The underwater robot FIFISH PRO V6 PLUS is used for nondestructive testing in order to test the safety of the entrance inspection gate of the underground culvert of the stormwater storage project in the western suburb of Beijing without interruption of flow. Underwater robot detection has become the most potential method of underwater building detection with great development space. Excellent inspection results are obtained from the underwater robot inspection. The experience of underwater inspection is accumulated. The applicability and reliability of underwater robot inspection are verified through comparing with the traditional underwater detection method.

**Keywords:** underwater robot; ROV; western suburbs rain flood storage; underwater inspection

收稿日期: 2022-01-07

基金项目: 国家重点研发计划课题“水库大坝安全诊断与智慧管理关键技术与应用”(2018YFC0407102);引江济淮(河南段)工程科研项目(HNYJJH/JS/FWKY-2021005);中国水科院基本科研业务费项目(SM0145B022021)

作者简介: 肖俊(1984—),男,硕士,高级工程师,主要从事水工建筑物检测、鉴定工作。

## 1 引言

水利工程建设投资大、周期长、社会效益深远。近些年随着社会不断发展,技术不断进步,对管理水平的要求也在逐渐提高。

目前水利工程水上部分的检测技术已经比较成熟,大部分能以无损或半破损方式进行<sup>[1-3]</sup>。在大力开发海洋自然资源进程中,水下检测技术得到了快速发展。水利工程的水下检测技术也应运而生,相继开发出多种先进、高效的水下检测设备及技术。目前水下检测多由潜水员携带水下检测设备进行,或采用水下无人遥控潜水器检测技术<sup>[4-5]</sup>。水下无人遥控潜水器又可称为水下机器人,广泛应用在民用和军事领域,以及在海洋、内湖环境下的各类水下工程作业、打捞救生和海洋科学考察等方面<sup>[6]</sup>。

水下检测设备一般由检测仪器和搭载平台两部分组成。检测仪器有水下超声测厚仪、水下磁粉探伤仪、水下电位测量仪、水下摄影机、水下无人遥控潜水器、水下无损探伤仪、浅层剖面仪、彩色图像声呐、水下测量电视等。搭载平台以无人水下机器人为主。无人水下机器人主要有有缆遥控机器人(潜水器)和无缆遥控机器人(潜水器)两种,其中有缆遥控潜水器又分为水中自航式、拖航式和能在海底结构物上爬行的三种<sup>[7-8]</sup>。

近年来,小型水下机器人检测技术日益成熟,其具有体型小巧、安全高效、可搭载多型传感器及费用低等特点,可有效解决传统水下检测作业难度大、效率低、费用高等难题,有利于开展定期检查检测任务,提升水利工程安全管理水平。有缆遥控机器人下潜深度可达100m以上,负载能力也在10kg以上,可以满足绝大多数水利工程水下检测和作业的需求<sup>[9]</sup>。

本文结合北京市西郊蓄滞雨洪工程中暗涵出口检修闸高水位运行状态下水下无损检测项目,验证了小型水下机器人在空间狭小区域进行水下作业的适用性,积累了水下检测工程经验,可为今后常态化检测和其他类似工程提供参考及经验。

## 2 水下机器人功能及检测系统

本次水下检测采用的智能水下机器人 FIFISH PRO V6 PLUS,属于无人潜水有缆遥控水下机器人(Remote Operated Vehicle, ROV),该水下机器人机身重量5kg,最大潜深150m,体积较小,最厚处仅158mm,灵巧高效,可进行长时间水下作业。

在操控方面,FIFISH PRO V6 PLUS 具有自动定距高声呐系统,见图1,可以实时测量前向距离和下向高度,通过距离锁定和高度锁定,降低操作难度,使各类检测工作更高效、精准。同时,该水下机器人具备6个自由度,全向360°运行姿态,可在各个方向上移动以及360°旋转、平移和倾斜。沿任何方向移动时,姿态锁定功能可以确保机器人的角度固定。

在定位和测量方面,FIFISH PRO V6 PLUS 具有水下快速定位系统(U-QPS),随时随地提供水下位置,配备高精度双重标尺功能:一是基于机器视觉的AR辅助标尺;二是基于传统激光方式的激光标尺。基于机器视觉的AR辅助标尺,量测精度1cm,自适应测量范围和可视化测量数据,并可以移动标尺和自定义标尺颜色。

照明和摄录像方面,FIFISH PRO V6 PLUS 配备6000lx 超强光照灯,配备4K超高清相机镜头,可真实地呈现高清图像内容。此外,采用闭环增稳算法,可自适应外部干扰环境自动调节动力曲线,使ROV拍摄图像更稳定。

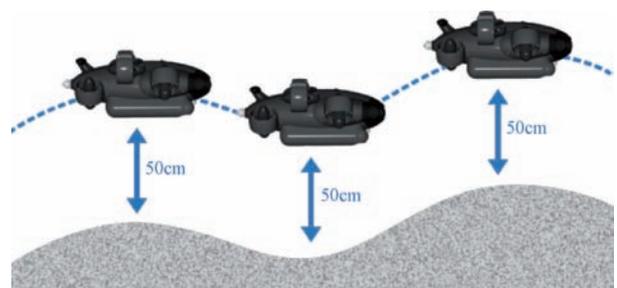


图1 声呐自动定距定高

检测作业时,根据检测内容及要求、现场水质能见度、水体生物分布情况等因素确定测线间距布设

及检测路径,确保完全覆盖检测面。在巡游检测过程中,对发现的缺陷利用水下快速定位系统(U-QPS)和

高精度双重标尺系统详细记录缺陷尺寸、位置及性状,具体检测流程见图2。

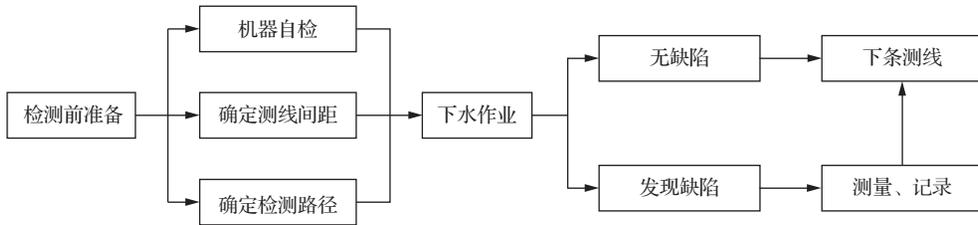


图2 水下检测流程

### 3 ROV 系统在北京市西郊雨洪蓄滞工程中的应用

#### 3.1 工程概况

北京市西郊雨洪蓄滞工程是为确保北京中心城区的防洪安全,不让八大处沟流域及北八排沟、琅黄沟流域 27km<sup>2</sup> 的 100 年一遇洪水下泄入城,解决其洪水出路的工程,是北京“西蓄、东排、南北分洪”的城市防洪体系中的重要组成部分。

阜石路分洪暗涵出口检修闸为 2 孔,出口闸在地面 52.00m 高程以下为 2 座竖井,见图 3。闸室底板建在原状砂砾石土层上。检修闸门为潜孔式平面闸门,孔口尺寸为 4.0m × 3.8m,闸门尺寸为 4.0m × 3.8m - 7.8m(宽 × 高 - 设计水头),闸门双向挡水,静水闭门,动水起门。

检修闸暗涵出口修建有检修平台,同时可以作为观赏平台。平台采用钢筋混凝土框架结构,平台顶高程 58.00 ~ 59.25m,平台下部高程 52.10m。

由于近年北京市频繁降雨,同时利用南水北调来水进行地下水回补,西郊雨洪蓄滞工程的蓄水水位和累计蓄水总量均达到历史最高。不仅在防洪方面,西郊雨洪蓄滞工程在回补地下水以及生态治理方面也发挥了重要作用,为保障首都人民生命财产安全做出了重要贡献。

阜石路分洪暗涵出口检修闸是西郊雨洪蓄滞工程的重要组成部分,该闸建成后已运行超过 5 年。根据《水闸安全鉴定管理办法》(水建管[2008]214 号)的要求,为加强水闸安全管理,保障水闸安全运行,需对



图3 阜石路分洪暗涵出口检修闸照片

其进行一次全面的安全鉴定。由于持续高水位运行,闸门金属结构和涵洞混凝土的情况无法掌握,加上水闸检修平台和两侧填土出现较大沉降,可能对闸室侧墙产生影响,因此,需要对检修闸水下部分进行水下检测,为后期的安全运行提供科学依据。

#### 3.2 检测方案

通过收集原设计资料、原始地形资料,结合工程高水位状态和库区水生植物多的特点,采用从闸门两侧狭小空间进入的方法,对两侧墙、暗涵及闸门底槛进行巡查,重点对侧墙顶部、伸缩缝、暗涵与水闸闸室连接处,出口消力池进行检测,并对存在的典型缺陷尺寸进行了测量。

检测时水闸处于高水位状态且上游涵洞持续补水,利用 FIFISH PRO V6 PLUS 体积较小的特点,从闸门两侧及底部狭小空间穿行至重点检测位置,见图 4。总体检测思路为“面积性普查与局部详查”。

水下作业时,从闸门开始由上至下、从左到右检测至底部,闸门检测完成后进行底板检测,然后检测

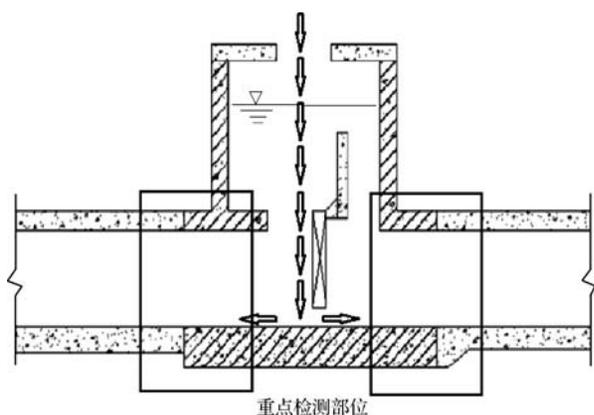


图4 水下检测区域剖面

侧墙及顶部,见图5。每个区域的测线间距根据水质情况及能见度情况设定,确保视频视角能够全面覆盖巡游范围,见图6。对重点检测部位,如暗涵与水闸连接处等,可加密测线以确保更细致的观测。

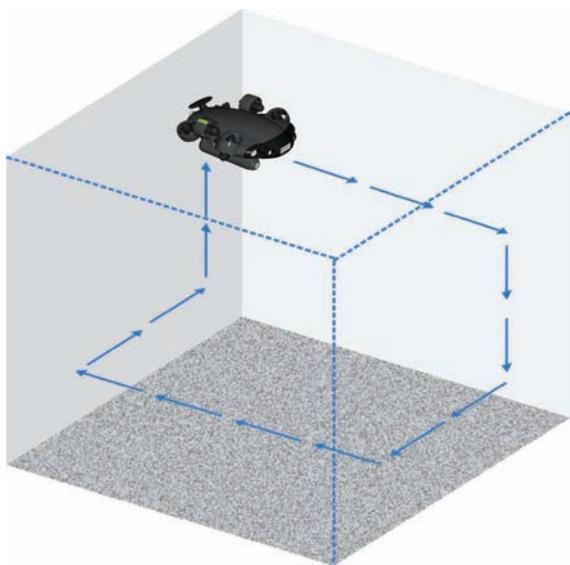


图5 水下巡游路线

检测过程中发现缺陷需要测量尺寸时,水下机器人悬停,利用高精密度双重标尺进行精确测量,见图7。激光标尺由左右两个激光发射器组成,两个激光发射器定距宽为12cm,在水下作业时可以根据红外线激光标尺结合AR算法来测量目标的尺寸,量测精度为1cm。

### 3.3 检测成果分析

通过对暗涵出口检修闸1孔、2孔的闸室底板,闸室侧墙、闸室相连的上下游段涵洞侧墙的全覆盖检测,

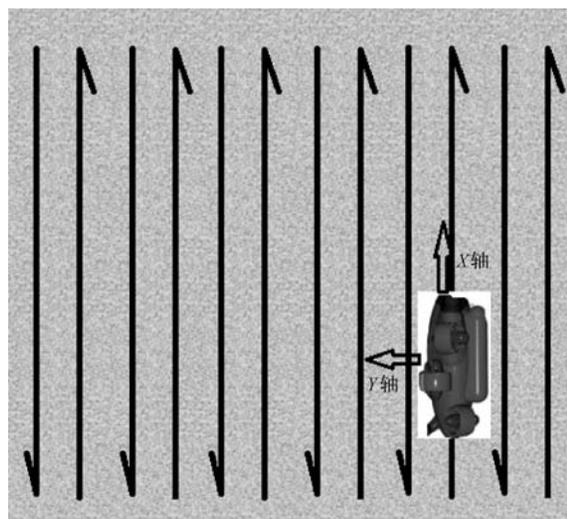


图6 水下检测测线



图7 高精度尺度测量

主要缺陷表现为裂缝、混凝土脱落、防水层破损、闸门底槛锈蚀、底板淤积物较多等。

a. 1号孔闸室上、下游侧墙基本完好,下游底板淤积物较多,涵洞右侧墙有一条纵向裂缝,可见长度约3m;一条竖向裂缝,可见长度约2.6m,无其他明显缺陷,见图8;1号孔涵洞下游右侧墙伸缩缝处混凝土局部脱落,见图9,面积为 $0.3\text{m} \times 1.6\text{m}$ ,底板基本完好,无其他明显缺陷。

b. 2号孔闸室及上、下游侧墙基本完好,闸门底槛金属结构有轻微锈蚀现象,见图10,闸室底板下游侧淤积物较多,见图11,无其他明显缺陷;2号孔涵洞侧墙及底板基本完好,无明显缺陷。

c. 出口消力池沉积物较多,无较大可见缺陷。本次全覆盖检测未发现较大变形、较宽裂缝、大面积混



图8 混凝土裂缝



图11 底板淤积物较多



图9 混凝土局部脱落



图10 金属结构轻微锈蚀

土脱落等严重缺陷,未发现影响水闸整体安全运行的重大缺陷。

### 3.4 不同检测方法对比

本次采用水下机器人对北京市西郊蓄滞雨洪工程暗涵出口检修闸进行检测取得了较好效果,从经济性、安全性、作业效率及检测效果等方面和常规水下检测方法进行对比,结果见表1。

表1 不同检测方法对比

对比项	方 法			
	围堰法	放空法	人工潜水	水下机器人
经济性	成本高	成本高	成本高	成本低
安全性	风险高	风险低	风险高	风险低
作业效率	效率低	效率低	效率低	效率高
检测效果	效果好	效果好	效果一般	效果好

由表1对比可见:经济性上,围堰法、放空法、人工潜水等传统常规检测手段成本较高,且围堰法、放空法需要停止生产,会造成一定经济损失;安全性上,围堰法对防水、加固等措施要求极高<sup>[10]</sup>,稍有不慎容易发生安全事故,放空法对检测人员友好但设施突然放空对设施本身带来一定的安全隐患<sup>[11]</sup>,人工潜水对检测人员素质有极高要求,属于危险作业;作业效率上,搭围堰、放空耗时较长,人工潜水有严格的时间和潜水深度规定,极大影响检测效率。

综上所述,使用水下机器人进行水下检测具有成本低、风险低、效率高、检测效果好等传统水下检测不具备或很难同时具备的优点。

## 4 结论及建议

### 4.1 结论

a. 通过水下机器人成像系统可以对水下建筑物的缺陷进行全面检测。通过“面积性普查与局部详查”的检测思路,普查和详查相结合的方式提高水下检测覆盖度,当发现局部缺陷时进行悬停检测,记录信息,检测效率较高。

b. 根据需求,水下机器人可搭载声呐系统、机械臂、取样装置、视踪装置等,根据检测要求灵活使用,提高检测适用性。

c. 水下机器人在深水作业、危险区域作业、通过狭小空间等方面具有极大优势,搭载岸电系统,水下机器人可实现连续长时间不间断水下作业。

d. 水下机器人进行水下检测具有成本低、风险低、效率高、检测效果好等传统水下检测不具备或很难同时具备的优点。

## 4.2 建议

a. 水下机器人操控受水流流速、流态影响明显,当水流流速超过 2 节(约 1m/s)时操控就较为困难,建议增加机器人自稳系统,进一步提高机器人的稳定性。

b. 鉴于南水北调来水入京后,北京市诸多水利工程常年处于高水位运行状态,很难具备无水检测的条件,建议对该类建筑物水下部位采用水下机器人检测技术进行定期检测,确保工程安全平稳运行。◆

## 参考文献

- [1] 郑向荣,富天生,刘凯坤. 水下混凝土表面缺陷综合检测技术分析[J]. 水利建设与管理,2018,38(7):67-71.
- [2] 龚晓南,贾金生,张春生. 大坝病险评估及除险加固技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2021.
- [3] 刘明杰,李斌,李骥. 怀柔水库混凝土结构安全检测及评价[J]. 水利建设与管理,2021,41(6):64-68.
- [4] 贝全荣. 水下工程检测技术及在坝上的应用[J]. 大坝与安全,2004(1):37-39.
- [5] 姚磊钧. 水下检测技术及水下遥控潜水器应用分析[J]. 四川水利,2021(S2):50-53.
- [6] 连琰,魏照宇,陶军,等. 无人遥控潜水器发展现状与展望[J]. 海洋工程装备与技术,2018(8):223-231.
- [7] 甘进,李世楨,王彬,等. 工程结构物水下检测技术及其应用[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2021(3):499-506.
- [8] 李永龙,王皓冉,张华. 水下机器人在水利水电工程检测中的应用现状及发展趋势[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2018(6):586-590.
- [9] 沈清华,杨青,朱长富. 测量型水下机器人在水下构筑物缺陷检测中的应用[J]. 水利技术监督,2021(9):9-11.
- [10] 何东航. 水利水电施工对于施工导流和围堰技术的运用[J]. 低碳世界,2019,9(10):111-112.
- [11] 王和章. 浙江省三座高水头电站引水隧洞放空检查情况[J]. 水力发电,1984(7):18-23.
- [6] 水利水电工程施工组织设计规范:SL 303—2017[S]. 北京:中国水利水电出版社,2017.
- [7] 邢权兴,孙虎,管滨,等. 基于模糊综合评价法的西安市免费公园游客满意度评价[J]. 资源科学,2014,36(8):1645-1651.
- [8] 彭张林,张强,杨善林. 综合评价理论与方法研究综述[J]. 中国管理科学,2015,23(S1):245-256.
- [9] 邓雪,李家铭,曾浩健,等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识,2012,42(7):93-100.
- [10] 黄秉杰,赵洁,刘小丽. 基于信息熵评价法的资源型地区可持续发展新探[J]. 统计与决策,2017(11):34-37.
- [11] 曹贤忠,曾刚. 基于熵权 TOPSIS 法的经济技术开发区产业转型升级模式选择研究:以芜湖市为例[J]. 经济地理,2014,34(4):13-18.
- [12] 沈进昌,杜树新,罗祎,等. 基于云模型的模糊综合评价方法及应用[J]. 模糊系统与数学,2012,26(6):115-123.
- [13] 刘常昱,冯芒,戴晓军,等. 基于云 X 信息的逆向云新算法[J]. 系统仿真学报,2004(11):2417-2420.
- [14] 王守信,张莉,李鹤松. 一种基于云模型的主观信任评价方法[J]. 软件学报,2010,21(6):1341-1352.
- [15] 李霞,干胜道. 基于功效系数法的非营利组织财务风险评价[J]. 财经问题研究,2016(4):88-94.

(上接第 84 页)



# 水电站调压阀水力学计算研究

洪振国 田 辉 刘俊华

(云南省水利水电勘测设计研究院, 云南 昆明 650021)

**【摘要】** 本文以水电站调压阀水力学计算研究为重要课题,采用特征线法建立了引水系统的数学模型,进行调压阀的电站水力学计算。结果表明:调压阀直径为 800mm 时,水轮机组导叶关闭时间采用导叶直线关机时间 7s,同时使调压阀以 7s 一段直线规律开启,达到全开并滞后 10s,调压阀最后 50s 以一段直线规律关闭,机组转速、蜗壳压力和尾水管压力在安全可靠、经济合理范围内,调压阀减小水锤升压的作用明显,因此以调压阀替代调压井是可行的。

**【关键词】** 水电站;调压阀;特征线法;数学模型

中图分类号: TV732.5 +1

文献标志码: A

文章编号: 2097-0528(2022)09-024-05

## Study on hydraulic calculation of pressure regulating valve in hydropower station

HONG Zhenguo, TIAN Hui, LIU Junhua

(Yunnan Water Conservancy and Hydropower Investigation, Design and Research Institute, Kunming 650021, China)

**Abstract:** The hydraulic calculation study of the pressure regulating valve of the hydropower station is adopted as an important subject in the paper. The mathematical model of the water diversion system is established by using the characteristic line method. The hydraulic calculation of the water pressure regulating valve is carried out. The results show that the diameter of the water pressure regulating valve is 800mm, the closing time of the guide vane of the hydraulic turbine unit is 7 seconds. Meanwhile, the pressure regulating valve is opened with a straight line rule of 7s, and it is fully opened with a delay of 10s, it is regularly closed at the last 50s straight line of the pressure regulating valve. The unit rotation speed, volute pressure and draft tube pressure are within the safe, reliable, economic and reasonable range. The pressure regulating valve has obvious effect on reducing water hammer pressure rise. Therefore, it is feasible to replace the surge shaft with the pressure regulating valve.

**Keywords:** hydropower station; pressure regulating valve; characteristic method; mathematical model

水电站调压阀是一种旁通的过流设备,通常安装在混流式水轮机蜗壳的某个部位。水轮机调压阀启闭与水轮机导叶紧急关闭受同一调速器的协联控制。当机组丢弃较大负荷时,调速器快速关闭水轮机导叶的

同时逐步开启调压阀向下游排放部分流量,以减小水击压强。待导叶关闭后,调速器再以缓慢的速度关闭调压阀。这样,既可控制水击压强上升不超过允许值,又可保证机组转速升高在允许范围内<sup>[1]</sup>。调压阀早在

收稿日期: 2021-09-13

作者简介: 洪振国(1976—),男,高级工程师,主要从事水工建筑物设计工作。

20世纪30年代就已出现,我国东方电站、广东大隆电站等均采用调压阀。但是调压阀采用机械式控制,阀开启操作可靠性差,时间滞留较长,调压效果较差,因此未得到广泛推广<sup>[2]</sup>。20世纪70年代,国内外专家开始研制调速器液压联动的调压阀,并在四川杨村水电站、西洱河二级水电站等工程中应用<sup>[3]</sup>。调压阀进水口接水轮机蜗壳,出水口接至尾水管,布置相对简单,安装工期短,设备所占空间小<sup>[4]</sup>。调压阀替代调压井,减少了调压井占地、工程量,避免了调压井建设对原始环境的破坏,弃渣造成的水土流失,具有显著的生态和环境效益。但是调压阀引水系统的小波动过程影响电网品质的争议较大,我国现行规范对于水电站调压阀水力学计算研究方法尚无统一规定,因此水电站调压阀水力学计算研究成为重要课题。

水电站水力计算有解析法、图解法、特征线法。解析法的优点是物理意义明确,应用简便,可以直接求出水力学的最高和最低水锤压强,但一般只适用于较简单的管路和边界条件,并忽略了管路中摩阻损失。图解法的优点是直观,物理概念明确,原则上可以反映各种复杂的管路和边界条件,也可计入管路的摩阻损失,但对于过分复杂的管路作图显得过于烦琐,甚至很难进行。因此,对于较复杂水电站出水口水力学的水锤问题,目前广泛采用特征线法进行计算,即把两个水锤基本偏微分方程变换成四个全微分方程,然后求其数值。其优点是理论严密,简化假设少,计算速度快,具有较高的精度。本文采用特征线法进行调压阀的电站水力学计算,分析以调压阀替代调压井的可行性,为类似工程的提供参考。

## 1 水力学计算

特征线法先建立有压隧洞、钢管、支管、岔管、水轮发电机组、调压阀、调速器等数学模型,将水轮机模型综合特性曲线以离散数据点的形式储存于计算机中,进行调压阀水力学计算研究,通过调压阀水力学计算,确定调压阀直径、导叶及调压阀开启时间等。

### 1.1 基本方程

运动方程:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fv|v|}{2D} = 0 \quad (1)$$

连续方程:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + v \frac{\partial H}{\partial x} - v \sin \alpha + \frac{a^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

式中: $H$ 为水头,m; $x$ 为从管段左端起算的距离,m; $v$ 为流速 m/s; $g$ 为重力加速度,m/s<sup>2</sup>; $D$ 为管径,m; $a$ 为水锤波速,m/s; $f$ 为沿程损失系数; $t$ 为时间,s。

由式(1)和式(2)可得特征线方程:

$$C + : H_p = C_p - BQ_p \quad (3)$$

$$C - : H_p = C_M + BQ_p \quad (4)$$

$$C_p = H_A + BQ_A - R|Q_A|Q_A \quad (5)$$

$$C_M = H_B - BQ_B + R|Q_B|Q_B \quad (6)$$

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

$$R = f\Delta x \frac{1}{2gDA^2}$$

式中: $H_B$ 、 $Q_B$ 分别为  $t \sim \Delta t$  时刻管段第  $i+1$  节点处的水头和流量,单位分别为 m 和 m<sup>2</sup>/s; $H_A$ 、 $Q_A$ 分别为  $t \sim \Delta t$  时刻管段第  $i-1$  节点处的水头和流量,单位分别为 m 和 m<sup>2</sup>/s; $C_p$ 、 $C_M$ 分别与  $t \sim \Delta t$  时刻的水头和流量有关,对  $t$  时刻是已知量; $\Delta x$ 为相邻两节点的距离,m; $R$ 为阻力系数; $B$ 为管段宽度; $A$ 为管段面积。

### 1.2 边界方程

a. 上游进水口边界方程为

$$H_p = H_R - \frac{1+k_1}{2gA^2} Q_p^2 \quad (7)$$

$$C - : H_p = C_{M1} + B_1 Q_p \quad (8)$$

式中: $H_R$ 为上游进口压头,m; $k_1$ 为进口损失系数; $B_1$ 为上游进口宽度,m;下标1表示上游进口的参数;由式(7)和式(8)得到  $H_p$ 和  $Q_p$ 值。

b. 调压阀。调压阀进出口水头及过流特性的公式如下:

$$C + : H_{p1} = C_{p1} - B_1 Q_{p1} \quad (9)$$

$$C -: H_{P2} = C_{M2} + B_2 Q_{P2} \quad (10)$$

$$Q_{P1} = Q_{P2} = Q_P$$

$$Q_P = f(\tau) D_x^2 \sqrt{H_{P1} - H_{P2}}$$

式中:  $Q_{P1}$ 、 $Q_{P2}$  分别为调压阀进出口流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $Q_P$  为调压阀流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $B_1$ 、 $B_2$  分别为调压阀进出口宽度,  $\text{m}$ ;  $f(\tau)$  为调压阀开度的非线性函数; 下标 1 和 2 分别表示调压阀进出口的参数;  $\tau$  为调压阀开度,  $\text{m}$ ;  $D_x$  为调压阀直径,  $\text{m}$ ;  $H_{P1}$ 、 $H_{P2}$  分别为调压阀进出口水头,  $\text{m}$ 。

c. 水轮机。水轮机边界方程为

$$H_{PU} = C_{P1} - B_1 Q_P \quad (11)$$

$$H_{PD} = C_{M2} + B_2 Q_P \quad (12)$$

$$H_P = H_{PU} + \frac{Q^2}{2gA_1^2} - H_{PD} - \frac{Q^2}{2gA_2^2} \quad (13)$$

式中:  $H_{PU}$  为水轮机进口断面水头,  $\text{m}$ ;  $B_1$ 、 $B_2$  分别为压力钢管和尾水管宽度,  $\text{m}$ ;  $A_1$ 、 $A_2$  分别为压力钢管和尾水管面积,  $\text{m}^2$ ; 下标 1 和 2 分别表示压力钢管和尾水管的参数;  $H_{PD}$  为水轮机出口断面水头,  $\text{m}$ ;  $Q_P$  为水轮机过渡状态时引用流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $Q$  为通过水轮机的全部流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ 。

d. 下游河道。尾水管出口的下游河道边界方程为

$$H_P = H_R - \frac{1 + K_2}{2gA^2} Q_P^2 \quad (14)$$

$$C +: H_P = C_{PS} - B_S Q_P \quad (15)$$

式中:  $K_2$  为尾水管出口损失系数;  $H_P$  为尾水管出口水头,  $\text{m}$ ;  $Q_P$  为尾水管出口流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $A$  为尾水管出口面积,  $\text{m}^2$ ;  $H_R$  为上游进口水头,  $\text{m}$ ;  $B_S$  为尾水管出口宽度,  $\text{m}$ 。

由式(14)和式(15)得到尾水管出口节点的压头和流量。

## 2 算例与分析

### 2.1 工程算例基本资料

庙林水电站由首部枢纽、引水系统、厂区枢纽等组成<sup>[5-6]</sup>。混凝土重力坝的最大坝高 56m, 坝顶长 144.1m,

坝顶高程为 819.00m, 坝顶宽度为 5m。引水系统由进水口、有压引水隧洞、压力管道等组成。引水隧洞长 8157.506m, 为圆形断面, 直径 6.5 ~ 7.3m, 由渐变段、转弯段、洞身段等组成, 根据地形、地质条件, 同时为满足施工支洞布置要求, 全线共设置 7 个转弯段。进口底板高程 792.00m, 出口底板高程 765.70m, 隧洞平均底坡为 3.228‰。压力管道为一管两机的供水方式, 压力管道上游进水口中心高程 768.400m, 最下端平管段中心高程为安装高程 718.189m。管道由主管、内加强月牙岔管、支管及附件构成, 管道主管长 194.5m, 管径 5.4m, 支管长 37.8m, 管径 3.4m。电站设计流量为 111.3  $\text{m}^3/\text{s}$ , 设计水头 94.413m, 安装 2 台机组, 总装机容量 65MW。

### 2.2 计算成果分析

#### 2.2.1 调节保证计算成果分析

根据水轮机转轮模型综合特性曲线, 确定水电站机组最大导叶开度为 25mm。水电站水轮机额定水头 75m, 最大水头 94.5m, 根据《水力发电厂机电设计规范》(DL/T 5186—2004) 中的有关规定<sup>[7]</sup>, 机组丢弃负荷后的蜗壳允许最大压力控制值为 135m 水头, 机组额定转速升高小于 55%, 由于调压阀直径、水轮机导叶、调压阀启闭规律对于引水系统的水锤压力及机组转速上升率的数值影响较大, 且其启闭参数在一定范围内是可以调节的<sup>[8-9]</sup>, 所以采用合理的调压阀直径、导叶及调压阀启闭时间来降低水锤压强与限制机组转速升高是可行的。

调节保证计算时应考虑两台机组同时丢弃负荷的情况, 分最大水头工况和设计水头工况进行计算, 而水库水位与水轮机水头直接相关, 选择有代表性的水库正常蓄水位进行计算。机组丢弃负荷后, 水轮机组导叶接力器按照一段直线规律关闭速度关闭导叶, 同时使调压阀一段直线规律开启, 达到全开并滞后, 调压阀再以一段直线规律关闭, 调节保证计算成果见表 1。

表 1 调节保证计算成果

调压阀直径/mm	水轮机组导叶关闭时间/s	调压阀开启时间/s	调压阀全开并滞后时间/s	调压阀最后关闭时间/s	$[GD^2]/(tf \cdot m^2)$	最大转速 $n_{max}$	转速升高 $\beta_{max}/\%$	蜗壳水锤最大压力/m	水锤压力升高 $\zeta_{max}/\%$	尾水管最低压力/m
600	5.0	5.0	6.0	20	710	437.74	45.91	124.07	31.40	-4.523
650	5.5	5.5	6.5	25	710	442.37	47.46	121.8	29.00	-3.162
700	6.0	6.0	7.0	30	710	446.93	48.98	119.58	26.70	-3.119
750	6.5	6.5	7.5	35	710	450.32	50.11	116.88	23.80	-3.096
800	7.0	7.0	8.0	40	710	453.03	51.01	115.03	21.80	-3.067
850	7.5	7.5	8.5	45	710	455.10	51.70	113.34	20.50	-2.976
900	8.0	8.0	9.0	50	1000	455.90	51.80	112.13	20.20	-2.911

由表 1 可知,调压阀直径增大,机组最大转速随着增大,蜗壳水锤最大压力减小,当调压阀直径等于 800mm 后,机组转速升高和蜗壳水锤压力升高随调压阀直径增加的变化较小,因此调压阀直径选取 800mm。随着导叶的关闭水轮机蜗壳压力迅速升高,水轮机组导叶关闭时间增加,机组最大转速随着增大,蜗壳水锤最大压力减小,当水轮机组导叶关闭时间等于 7s 时,机组转速升高和蜗壳水锤压力升高随水轮机组导叶关闭时间增加的变化小,从最经济合理的原则考虑,水轮机组导叶关闭时间选取 7s。调压阀开启时间、全开并滞后时间、最后关闭时间增加,机组最大转速随着增大,蜗壳水锤最大压力减小,当调压阀开启时间等于 7s,全开并滞后时间等于 8s,最后关闭时间等于 40s 时,机组转速升高和蜗壳水锤压力升高随调压阀开启时间增加的变化小,从最经济合理的原则考虑,调压阀开启时间选取 7s,全开并滞后时间选取 8s,最后关闭时间选取 40s,机组最大转速升高值 453.034r/min,机组额定转速升高 51.01%,机组额定转速升高小于 55%,相对静水头升高 22.6%,蜗壳水锤最大压力 115.026m,蜗壳最大水锤压力小于控制标准 135m 水头,尾水管最低压力为 -3.067m 水头,尾水管真空度小于 8m,调节保证计算结果满足《水力发电厂机电设计规范》(DL/T 5186—2004)的要求。

根据对以上计算结果的综合分析,调压阀直径为 800mm 时,水轮机组导叶关闭时间采用导叶直线关机时间 7s,同时使调压阀以 7s 一段直线规律开启,达到

全开并滞后 10s,调压阀最后 50s 以一段直线规律关闭。因此蜗壳水锤压力、尾水管压力、机组转速在安全可靠范围内,调压阀减小水锤升压的作用明显,以调压阀替代调压井是可行的<sup>[10]</sup>。

## 2.2.2 有压隧洞压力线计算成果分析

隧洞水力计算主要进行最大水头损失和压坡线的计算,根据电站调度运行时可能出现的情况,压坡线计算分两种工况。第一种工况:在水库校核洪水位 817.33m 时,两台机组同甩满负荷时计算结果见表 2。第二种工况:库水位为最低水位 806m 时,两台机组同增加满负荷时计算结果见表 3。

表 2 第一种工况压坡线计算成果

桩号	底板高程/m	洞顶高程/m	测压管水头线/m	洞顶以上水头/m
0+000.000	792.00	798.50	817.17	18.67
3+213.599	781.63	788.13	823.13	35.00
6+547.038	770.87	777.37	829.31	51.94
8+147.506	765.70	772.20	832.26	60.06

表 3 第二种工况压坡线计算成果

桩号	底板高程/m	洞顶高程/m	测压管水头线/m	洞顶以上水头/m
0+000.000	792.00	798.50	805.84	7.34
3+213.599	781.63	788.13	804.77	16.64
6+547.038	770.87	777.37	791.49	14.12
8+147.506	765.70	772.20	785.29	13.09

由以上两种工况计算结果可知:有压引水隧洞洞

顶最小水头为 7.34m,最大水头为 60.06m,两种工况结果均满足规范要求。

### 2.2.3 压力钢管最大压力线计算成果分析

压力钢管最大水头由水库校核洪水位 817.33m 和 2 台机组全部丢弃负荷计算确定。充分考虑压力钢管抗外压稳定要求和与岔管之间的衔接,分段进行计算,水电站压力钢管最大水头和壁厚分布见表 4。

表 4 压力钢管最大水头和壁厚分布

桩号	内径/mm	最大水头/m	最大外压荷载/MPa	材料	壁厚/mm
G0+0.000 ~ G0+072.786	5400	110.6	0.2	16MnR	20
G0+072.786 ~ G0+131.025	5400	130.2	0.2	16MnR	24
G0+131.025 ~ G0+180.189	5400	130.2	0.2	16MnR	28
G0+180.189 ~ G0+345.093	3600	130.2	0.2	16MnR	24

计算结果表明:压力钢管最大设计水头为 130.2m,钢管采用 16MnR 板制作,壁厚 20~28mm,满足钢管结构强度要求。

### 2.2.4 小波动稳定性计算成果分析

水库正常蓄水位 1102.5m 时机组额定负荷波动 5%,调速器参数  $b_i = 45\%$ 、 $b_p = 0$ 、 $T_d = 7s$ 、 $T_n = 0.57s$ ,转速最大偏差小于 4%,振荡次数小于 1 次,调节时间小于 30s,超调量小,具有较好的动态品质指标,水电站并入云南省电网参与西电东送,水电站容量占电力系统总容量较小,机组并网后的频率由电网确定,不存在运行稳定性问题。整个电网分担负荷变化和调速器的性能较好,因此以调压阀替代调压井是可行的。

## 3 结论

a. 调压阀直径为 800mm 时,水轮机组导叶关闭时

间采用导叶直线关机时间 7s,同时使调压阀以 7s 一段直线规律开启,达到全开并滞后 10s,调压阀最后 50s 以一段直线规律关闭。因此蜗壳水锤压力、尾水管压力机组转速在安全可靠范围内,调压阀减小水锤升压的作用明显,以调压阀替代调压井是可行的。

b. 机组额定负荷波动 5%,调速器参数  $b_i = 45\%$ 、 $T_d = 7s$ 、 $b_p = 0$ 、 $T_n = 0.57s$ ,转速最大偏差小于 4%,振荡次数小于 1 次,调节时间小于 30s,超调量小,具有较好的动态品质指标,水电站并入云南省电网参与西电东送,水电站容量占电力系统总容量较小,机组并网后的频率由电网确定,不存在运行稳定性问题。整个电网分担负荷变化和调速器的性能较好,因此以调压阀替代调压井是可行的。◆

### 参考文献

- [1] 水电水利规划设计总院. 水工设计手册(第 8 卷 水电站建筑物)[M]. 2 版. 北京:中国水利电力出版社,2013.
- [2] 肖微,杨鹏隆. 水轮机调压阀在中小型水电站的应用[J]. 北京农业,2014(11):233-234.
- [3] 孔昭年,田忠禄,王思文,等. 阿勒泰水电站“以阀代井”研究[J]. 水电站机电技术,2016(1):1-4.
- [4] 李江,崔炜,孔昭年,等. KYET 水电站调压方式设计优化及关键技术[J]. 人民黄河,2019,41(1):119-123.
- [5] 洪振国,刘浩林. 阻抗式调压井水力学计算研究[J]. 水力发电,2014,40(12):51-54.
- [6] 洪振国,刘浩林. 水电站调压井特征线法水力计算研究[J]. 中国农村水利水电,2015,(4):163-166.
- [7] 水力发电厂机电设计规范:DL/T 518—2004[S]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [8] 水电站调压室设计规范:SL 655—2014[S]. 北京:中国水利水电出版社,2014.
- [9] 潘家铮. 水工隧洞和调压室(调压室部分)[M]. 北京:水利电力出版社,1985:52-73.
- [10] 洪振国,王鹏. 露天上室式调压井在引水式电站中的设计研究[J]. 水利与建筑工程学报,2014,12(3):194-198.

# 闸坝下游局部冲刷计算方法的对比分析

高翔

(徽县水务局,甘肃陇南 742300)

**【摘要】** 闸坝下游的局部冲刷是威胁水电站安全的主要因素之一。本文首先将现有的冲刷公式分7类进行归纳总结,根据各家公式的理论依据、分析方法、经验数据来源不同,对各家公式进行了量纲和谐分析和各自的适用情况分析;其次,推导出了一种基于剪切应力下闸坝下游局部冲刷深度的计算公式。为了验证该公式的适用性,选取了其他工程的冲刷资料进行验证。结果表明,计算公式的计算值与实测值吻合较好。

**【关键词】** 闸坝工程;局部冲刷;计算方法;冲刷坑中水深

中图分类号:TV147+.3

文献标志码:A

文章编号:2097-0528(2022)09-029-04

## Comparative analysis on calculation methods for local scour at downstream part of gate dam

GAO Xiang

(Huixian Water Affairs Bureau, Longnan 742300, China)

**Abstract:** The local scour at the downstream of the gate dam is one of the main factors threatening the safety of the power station. Firstly, the existing scouring formulas are summarized into seven categories in the paper, the dimensional harmony of the formulas is analyzed and respective application is analyzed according to the difference in theoretical basis, analysis methods and experience data sources of each formula. Secondly, a depth calculation formula of local scour of gate dam downstream based on shear stress is derived. The scouring data of other projects are selected for verification in order to verify the applicability of the formula. The results showed that the calculated results of the calculation formula is well matched with the measured results.

**Keywords:** gate dam project; local scour; calculation method; water depth in scour pit

对于山区河流来说,由于中低水头闸坝工程的修建,抬高了上游水位,与下游水位形成了一定的水位差,过闸水历经泄水建筑物后把势能转换成巨大的动能<sup>[1]</sup>。中低水头闸坝工程的消能措施一般为底流消能,虽然有护坦、海漫等消能措施,但水流的流速仍然很大,达到泥沙的起动流速从而将下游泥沙冲向河道下游,形成了闸坝下游的冲刷坑<sup>[2]</sup>。

为了确保闸坝式水电站的安全运行,避免危及工程安全的情况发生,准确预测闸坝下游的冲刷深度对工程安全运行具有极其重要的意义<sup>[3]</sup>。目前针对闸坝工程下游的局部冲刷问题已有很多研究成果,但各家公式之间的计算结果相差较大,主要是由于所依据的分析理论、研究方法、实测资料来源不同等因素造成的<sup>[4]</sup>。本文在对比分析前人研究的基础上,以毛昶熙

收稿日期:2021-11-23

作者简介:高翔(1988—),男,硕士,高级工程师,主要从事水力学及水利工程管理。

的剪切应力推导公式为依据, 推导出了一类计算闸坝下游局部冲刷深度的计算公式, 并选取其他水电站下游冲刷坑实测资料进行了验证。

## 1 闸坝下游局部冲刷不同计算方法的归纳

根据现有公式的分析理论、研究方法、资料来源的不同, 本文选用较有代表性的7类冲刷公式进行对比分析。

### 1.1 引用普遍冲刷公式

我国学者王艺雄调查研究了淮河上的水闸冲刷观测资料, 得到的冲刷坑深度计算公式为<sup>[1]</sup>

$$T = Kq^{0.83} \quad (1)$$

式中:  $q$  为闸下游主流宽度上的单宽流量,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $K$  为经验系数, 与河床土质和水流的挟沙情况有关。

### 1.2 引用不冲流速公式

《水闸设计规范》(SL 265—2001) 中引用的水流出海漫末端冲刷坑深度公式为

$$T = 1.1 \frac{q_m}{[v_0]} \quad (2)$$

式中:  $T$  为海漫末端最大冲刷坑上水深,  $\text{m}$ ;  $q_m$  为海漫末端单宽流量,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $v_0$  为河床允许不冲流速,  $\text{m}/\text{s}$ 。

### 1.3 借助急流扩散理论的局部冲刷公式

国外学者维兹果从急流扩散理论出发, 引入了发生水跃的共轭水深计算公式, 通过多组模型试验数据, 得到了冲刷坑上水深公式<sup>[1]</sup>:

$$T = 0.81K_r K_\alpha q^{0.6} H^{0.1} \quad (3)$$

式中:  $T$  为冲刷坑上水深,  $\text{m}$ ;  $H$  为上下游水位差,  $\text{m}$ ;  $K_r$  为土质情况;  $K_\alpha$  为出流的倾角;  $q$  为下泄单宽流量,  $\text{m}^2/\text{s}$ 。

### 1.4 指数形式的试验公式

我国学者施振兴推导出了适用于消能岸下游河床冲刷坑计算的公式<sup>[1]</sup>:

$$T = Kq^{0.67} \left(\frac{H}{d_{50}}\right)^{0.182} \quad (4)$$

式中:  $q$  为下泄单宽流量,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $K$  为经验系数, 与淹没度、岸长比、岸末端挑角等有关;  $H$  为上下游水位差,

$\text{m}$ ;  $d_{50}$  为下游河床泥沙中值粒径,  $\text{m}$ 。

### 1.5 从输沙率推导的冲刷公式

从水流输沙率出发可以推导出随时间变化的下游局部冲刷深度计算公式<sup>[5]</sup>:

$$\frac{dh}{dt} = \beta_1 v_{\max} \left[ \frac{v_{\max}^2}{g(s-1)d} \right] \left[ \frac{v_{\max}^2}{[g(s-1)d]} \right] \quad (5)$$

式中:  $\beta_1$  为无量度的系数。

### 1.6 考虑河床粗化的冲刷公式

尹学良、万兆惠等依据非均匀沙河床粗化的原理, 对永定河官厅水库下游形成的典型粗化层特性的认识, 通过研究抗冲粗化层所需要的厚度、形成的粗化层泥沙颗粒所占百分数等因素, 建立了基于粗化理论的河床冲刷的极限深度计算公式<sup>[5]</sup>:

$$\Delta h = \left( \frac{1 - n_1 P_1}{1 - n_0 P_0} - 1 \right) d_m \quad (6)$$

式中:  $P_0$  为粗化层颗粒的重量占原始河床组成总重量的百分数;  $P_1$  为粗化颗粒的重量占粗化层总重量的百分数;  $n_0$ 、 $n_1$  分别为原始河床组成和粗化层的孔隙率;  $\Delta h$  为冲刷深度,  $\text{m}$ ;  $d_m$  为粗化层厚度,  $\text{m}$ 。

### 1.7 从剪切应力推导的冲刷公式

毛昶熙从水流对河底的剪切应力出发推导出下游局部冲刷深度计算公式, 然后考虑了水流流态和相对水深这些因素对公式进行修正<sup>[6]</sup>:

$$T = \psi \frac{q \sqrt{2\alpha - y/h}}{\sqrt{\left(\frac{\rho_1}{\rho} - 1\right)gh \left(\frac{h}{d}\right)^{1/6}}} \quad (7)$$

式中:  $\psi$  为冲刷经验系数, 闸坝下游一般取 0.66;  $\alpha$  为流速分布不均匀动量修正系数, 一般取 1~1.5;  $y$  为护坦末端垂直流速的最大值距地面的高度,  $\text{m}$ 。

## 2 各冲刷公式对比与分析

### 2.1 各家公式量纲和谐分析及适用情况分析

本文所列的七大类公式, 各自依据的理论不同, 推导方法不同, 各系数都是按照各自所参考的河流及模型试验所得, 适用条件不同, 每种公式计算所得的差距较大<sup>[7]</sup>。

式(1)中的系数都根据特定河流水流条件进行确

定,虽然公式左右量纲不和谐,但是计算简单。该公式只适用于河道普遍冲刷情况,一般不具有局部冲刷的普遍适用性。

式(2)左右量纲和谐,若有可靠的不冲流速数据,则计算较为简单。该公式只考虑了河床的土质和河流下泄单宽流量,并且由于对枢纽消能设施、闸门开启方式、高速水流流出消力池时的流态等因素没有考虑,计算出的冲刷坑深度误差较大。

式(3)和式(4)考虑了单宽流量、上下游水位差等影响因素,施振兴公式还引入了泥沙颗粒粒径的因素等,虽然左右量纲不和谐,但计算不复杂。因为只考虑了影响冲刷最主要的因素,计算结果与实测数据有一定偏差。

式(5)从输沙率出发推导出的冲刷深度计算公式,根据模型试验资料来确定系数。经计算与实测资料比较,吻合情况较好。但是该公式计算较为复杂。

式(6)从河床粗化的角度出发研究冲刷深度,左右量纲和谐。由于水流条件在粗化的过程中也会有所改变,因而此公式在实际应用中的准确性有待进一步验证。

式(7)毛昶熙从剪切应力推导出的冲刷关系式所考虑的因素,既包括河床的单宽流量、河床质的密度等因素,又包含了水流流态和相对水深这些修正因素,具有较为广泛的代表性,适用性较好,且量纲和谐。

## 2.2 基于剪切应力下一种新的闸坝下游局部冲刷公式推求

经以上分析研究,选取适用性较好,具有广泛代表性的毛昶熙公式,以二元水流为基础进行推导,考虑水流内部为静水压力分布时,沿水平方向的水流动量方程式为<sup>[1]</sup>

$$\frac{\gamma q}{g} d(\alpha v) = -\tau dx - \gamma h dH \quad (8)$$

式中: $q$ 为单宽流量, $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $v$ 为断面平均流速, $\text{m}/\text{s}$ ;  $\tau$ 为主流与漩涡分界面上的剪切应力, $\text{N}/\text{m}^2$ ;  $h$ 为漩涡分界面以上的水流深度, $\text{m}$ ;  $H$ 为水面高度, $\text{m}$ ;  $\alpha$ 为流速分布不均匀性的动量修正系数; $\gamma$ 为水的重度, $\text{N}/\text{m}^3$ 。

根据毛昶熙的计算推导,引入泥沙开始被冲动时

的平均流速或起动流速 $v_c$ ,推导出的冲刷坑上水深计算公式为

$$T = \psi \frac{q}{v_c} \sqrt{2\alpha - \frac{\gamma}{h}} \quad (9)$$

关于泥沙起动流速的计算公式,目前的研究还是以经验公式或者半经验半理论为主,采用沙莫夫公式来计算起动流速<sup>[1]</sup>:

$$v_c = 1.14 \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g D} \left(\frac{h}{D}\right)^{\frac{1}{6}} \quad (10)$$

一般计算的泥沙为天然无黏性泥沙,因此沙莫夫公式可简化为

$$v_c = 4.6 D^{\frac{1}{3}} h^{\frac{1}{6}} \quad (11)$$

将式(11)代入式(9)计算得冲刷坑上水深 $T$ 为

$$T = \psi \sqrt{2\alpha - \frac{\gamma}{h}} \left(\frac{q}{D^{1/3}}\right)^{6/7} \quad (12)$$

其中, $\sqrt{2\alpha - \frac{\gamma}{h}}$ 为流态参数,根据毛昶熙的试验资料,当消力池消能良好,尾槛后有较长倾斜海漫时,取1.05~1.22;当消能良好,尾槛后有较长水平海漫,或为不能产生水跃的缓流时,取1.1~1.3;当尾槛后没有海漫或海漫很短、槛前产生水跃时,取1.3~1.73。

为了确定系数 $\psi$ ,参考已有的水工模型试验冲刷试验数据,选用偏桥水电站、麒麟寺水电站的资料进行计算<sup>[5]</sup>,计算结果见表1。

表1 计算中流态参数的取值

组次	$\psi$	单宽流量/ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	平均粒 径/ $\text{m}$	坑上水深 计算值/ $\text{m}$	坑上水深 实测值/ $\text{m}$	误差/%
1	0.28	15.94	0.15	6.05	6.02	0.43
2	0.28	12.03	0.15	4.75	5.08	-6.50
3	0.28	9.46	0.15	3.87	3.94	-1.89
4	0.23	132.22	0.30	24.98	26.70	-6.45
5	0.23	127.73	0.30	24.25	23.30	4.07
6	0.23	111.33	0.30	21.55	21.50	0.26
7	0.23	82.00	0.30	16.95	16.75	-0.98

计算中,流态参数 $\sqrt{2\alpha - \frac{\gamma}{h}}$ 结合消力池情况,取1.17。

计算结果表明,系数 $\psi$ 取值分别为0.23、0.28时,

计算结果与实测冲刷坑上水深误差均在7%以内,误差的平均值为2.94%,在理想的范围内。

因此,式(12)系数 $\psi$ 初步取值为0.23~0.28。

### 2.3 本文公式验证

为了验证本文所推导公式的适用性,参考已有工程数据资料,选取横丹水电站<sup>[8]</sup>、黄丰水电站<sup>[9]</sup>、锁儿头水电站<sup>[10]</sup>、巨亭水电站<sup>[4]</sup>、潼南航电枢纽工程<sup>[5]</sup>、利泽航运枢纽工程<sup>[5]</sup>、当卡水电站<sup>[11]</sup>7个工程的43组冲刷资料进行验证,结果见表2,将计算值和实测值结果点绘于图中,见图1。

表2 各工程冲刷坑上水深验证结果

工程名称	组次	单宽流量/ (m <sup>2</sup> /s)	平均粒径/m	冲刷坑上水深实测值/m	冲刷坑上水深计算值/m	误差/%
横丹水电站	1	27.82	0.08	13.74	13.29	-3.25
	2	42.55	0.08	20.86	19.13	-8.27
黄丰水电站	1	68.90	0.33	17.20	16.36	-4.87
	2	64.04	0.33	15.40	15.37	-0.20
	3	62.27	0.33	15.18	15.00	-1.16
锁儿头水电站	1	22.15	0.03	9.65	10.43	8.06
	2	12.88	0.03	7.38	6.55	-11.22
巨亭水电站	1	78.81	0.75	21.71	20.54	-5.39
	2	105.07	0.75	27.51	26.28	-4.46
	3	52.54	0.50	18.64	16.29	-12.59
	4	78.81	0.50	23.61	23.06	-2.31
	5	105.07	0.50	30.45	29.51	-3.08
	6	78.81	0.38	27.40	24.94	-8.96
	7	105.07	0.38	33.60	31.92	-5.01
	8	39.40	0.12	21.51	19.14	-11.02
	9	52.54	0.12	24.26	24.49	0.97
潼南航电枢纽工程	1	15.08	0.03	7.79	8.50	9.11
	2	22.25	0.03	11.51	11.86	3.07
	3	32.14	0.03	16.68	16.26	-2.52
利泽航运枢纽工程	1	29.07	0.06	9.97	10.06	0.89
	2	36.80	0.06	11.91	12.31	3.37
	3	45.91	0.06	12.84	14.88	15.90
	4	33.40	0.06	13.15	11.33	-13.84
	5	48.67	0.06	16.15	15.64	-3.13

续表

工程名称	组次	单宽流量/ (m <sup>2</sup> /s)	平均粒径/m	冲刷坑上水深实测值/m	冲刷坑上水深计算值/m	误差/%
利泽航运枢纽工程	6	61.07	0.06	18.53	19.00	2.56
	7	75.31	0.06	21.12	22.74	7.69
	8	83.67	0.06	22.86	24.89	8.89
当卡水电站	1	36.41	0.50	10.35	11.29	9.06
	2	31.40	0.50	9.05	9.94	9.86
	3	26.49	0.50	8.55	8.59	0.51
	4	22.67	0.50	8.20	7.52	-8.29
	5	36.41	0.30	12.55	13.06	4.07
	6	31.40	0.30	11.60	11.50	-0.82
	7	26.49	0.30	10.85	9.94	-8.35
	8	22.67	0.30	9.45	8.70	-7.92
	9	36.41	0.20	14.00	14.67	4.75
	10	31.40	0.20	13.50	12.92	-4.32
	11	26.49	0.20	11.90	11.17	-6.17
	12	22.67	0.20	11.45	9.77	-14.67
	13	36.41	0.10	16.60	17.88	7.69
	14	31.40	0.10	13.95	15.75	12.88
	15	26.49	0.10	13.45	13.61	1.20
	16	22.67	0.10	12.95	11.91	-8.03

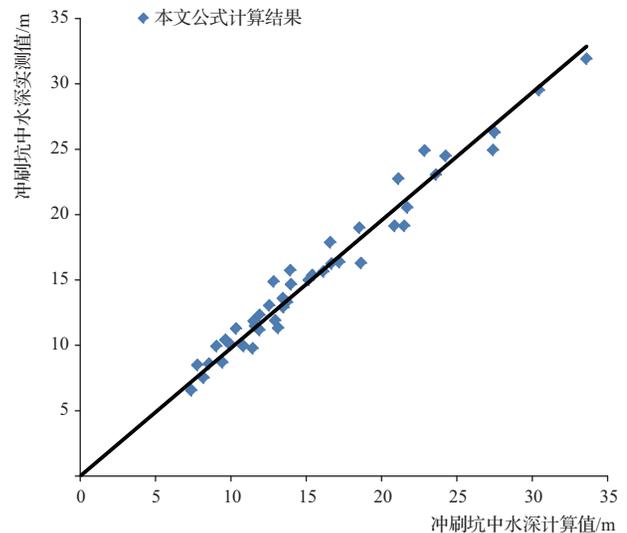


图1 闸坝下游局部冲刷资料验证结果

由图表可见,本文所推导的基于剪切应力下一种新的闸坝下游局部冲刷公式,用多个工程的冲刷资料验证表明,该公式计算冲刷坑上水深值与实测水深值吻合良好,两者平均相对误差在5%以(下转第54页)

# 基于细观损伤力学的四级配混凝土立方体试件单轴破坏有限元分析

糜凯华 邓水明

(中水珠江规划勘测设计有限公司,广东 广州 510610)

**【摘要】** 为在细观尺度上分析粗骨料、界面、砂浆基体参数对混凝土单轴破坏力学性能的影响,基于细观损伤力学和混凝土内部各相材料的本构关系,采用混凝土损伤塑性模型表达,本文运用有限元法分析四级配混凝土立方体试件单轴破坏的力学性能。分析结果表明:单轴荷载作用下,混凝土的宏观破坏是由于内部初始损伤不断演变、扩张、聚集的结果,数值分析的最终破坏形态与宏观破坏形态基本吻合,说明该分析方法合理可行。

**【关键词】** 混凝土;细观损伤;损伤塑性模型;有限元方法

中图分类号: TV41 + TU528.1

文献标志码: A

文章编号: 2097-0528(2022)09-033-07

## Finite element analysis on uniaxial damage of level 4 concrete cube specimen based on mesoscopic damage mechanics

MI Kaihua, DENG Shuiming

(China Pearl River Water Resources Planning Designing & Surveying Co. Ltd., Guangzhou 510610, China)

**Abstract:** The constitutive relation based on mesoscopic damage mechanics and each phase material within the concrete is expressed with the concrete damage plasticity model in order to analyze the influence of coarse aggregate, interface and mortar matrix parameters on the performance of concrete under uniaxial damage mechanics on mesoscopic scale. The finite element method is used in the paper to analyze the mechanics performance of level 4 concrete cube specimen uniaxial damage. The analysis results show that the macroscopic failure of concrete under uniaxial loading is the result of the continuous evolution, expansion and aggregation of the initial internal damage. The final failure mode of numerical analysis is basically consistent with the macroscopic failure mode. It is obvious that the analysis method is reasonable and feasible.

**Keywords:** concrete; mesoscopic damage; damage plastic model; finite element method

水利工程中混凝土挡水坝由于尺寸大,通常采用四级配混凝土,该级配混凝土粗骨料粒径最大可达150mm,而且骨料含量占比大。由于技术条件的限制,过去主要运用简单易行的湿筛法分析四级配混凝土的力学性能,不过该方法改变了混凝土中粗、细骨料和

泥浆的组成比例,因此用湿筛小试件力学性能近似四级配混凝土的力学性能显然不够合理。进行大规模的混凝土力学性能试验,需要较大的人力、物力,而试验结果受各因素的制约,也只能近似反映其力学指标<sup>[1]</sup>。

随着混凝土材料在复杂结构上的运用越来越广

收稿日期: 2021-12-13

作者简介: 糜凯华(1986—),男,硕士,主要从事水工结构工程及混凝土损伤断裂研究。

泛,一直以来对混凝土破坏的力学机制研究从未间断过。为了在细观尺度上合理地分析混凝土的力学性能和破坏机理,很多研究者从不同角度构建了不同的细观模型,如格构模型<sup>[2]</sup>、MFPA 细观模型<sup>[3]</sup>。本文简要介绍混凝土损伤塑性模型的基本特点,然后基于混凝土损伤塑性模型在静荷载作用下对混凝土立方体试件进行二维有限元分析,分析混凝土骨料、界面、砂浆基体参数对混凝土宏观破坏的影响。

### 1 细观各相材料本构关系

混凝土损伤塑性模型<sup>[4]</sup>是一个基于塑性的连续介质损伤模型。该模型考虑了材料拉压性能的不同,在单向加载情况下材料因损伤导致的永久退化具有良好的收敛性。

混凝土损伤塑性模型被广泛运用于混凝土损伤分析中,使用该模型的要点在于如何定义损伤因子与应变的关系。如分析过程中未给出损伤和应变的关系,则该模型只能分析混凝土的塑性变化过程。当缺少混凝土各相材料的应力与应变关系数据时,采用混凝土结构设计规范推荐的单轴本构关系推导各相材料的本构关系,从而实现四级配混凝土细观力学有限元分析。在单向加载的情况下,达到极限应力后采用式(1)、式(2)计算混凝土进入软化阶段后的应力应变关系数据。

$$y = \begin{cases} x & x \leq 1 \\ \frac{x}{\alpha_t (x - 1)^{1.7} + x} & x > 1 \end{cases} \quad (1)$$

$$y = \begin{cases} x & x \leq 0.211 \\ \alpha_a x + (3 - 2\alpha_a)x^2 + (\alpha_a - 2)x^3 & 0.211 < x \leq 1 \\ \frac{x}{\alpha_d (x - 1)^2 + x} & x > 1 \end{cases} \quad (2)$$

单轴荷载情况下的损伤因子与应变的关系根据能量等效的原理推导:

$$D_k = \frac{(1 - \beta_k) \bar{\varepsilon}_k^{in} E_0}{\sigma_k + (1 - \beta_k) \bar{\varepsilon}_k^{in} E_0}, \quad (k = t, c) \quad (3)$$

以上式中:t,c 分别表示拉伸和压缩; $\bar{\varepsilon}_k^{in}$ 为非弹性应变; $\beta_k$ 为塑性应变在非弹性应变中比例, $\beta_c = 0.525, \beta_t = 0.725; x = \varepsilon/\varepsilon_f; y = \sigma/\sigma_f; \alpha_t = 0.312f_t^2; \alpha_d = 0.157f_c^{0.785} - 0.905; \alpha_a = 2.17; D_k$ 为损伤因子。

### 2 混凝土单轴破坏有限元分析

为分析混凝土不同骨料分布、骨料形状、界面厚度、界面及砂浆基体强度对混凝土宏观破坏的影响,探索混凝土在荷载作用下的裂纹扩展规律<sup>[5]</sup>,根据《水工混凝土试验规程》(SL 352—2020)<sup>[6]</sup>,选取混凝土单轴拉伸、压缩试验二维试件尺寸均为 0.45m × 0.45m。按文献[7]中混凝土各相材料的比重构建混凝土二维细观有限元模型。模型中粗骨料粒径 80 ~ 150mm、40 ~ 80mm、20 ~ 40mm、5 ~ 20mm 的面积率分别为 0.1687、0.1676、0.1206、0.0854,骨料总含量为 54.23%。在进行混凝土单轴破坏有限元分析时,粗骨料本构关系采用线弹性模型,界面及砂浆基体的本构关系采用损伤塑性模型。混凝土细观各相材料的计算参数参照文献[8-13]取得,见表 1。

表 1 混凝土细观各相材料计算参数

材料	弹性模量/ GPa	泊松比	抗拉强度/ MPa	抗压强度/ MPa	容重/ (t/m <sup>3</sup> )	剪胀角 $\psi$ / (°)	流动势偏移 量 $\varepsilon$	不变量应力 之比 $K_c$	双、单轴抗压 强度之比 $\alpha_f$
骨料	50.0	0.2	10.0	100.0	2.7				
砂浆	25.0	0.2	4.0	40.0	2.1	15	0.1	0.667	1.16
界面	22.0	0.2	3.0	30.0	2.1	15	0.1	0.667	1.16
混凝土	28.0	0.2	3.0	47.9	2.4				

按照定义混凝土损伤塑性模型相关数据的方法,由表 1 中数据计算得到混凝土细观各相材料进入塑性阶段后的损伤因子与应变的关系曲线,见图 1 和图 2。

屈服应力与开裂应变及非弹性应变的关系曲线见图 3 和图 4。

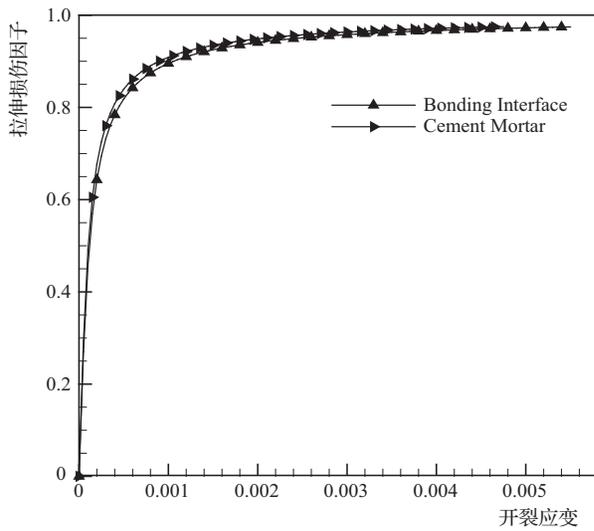


图1 损伤因子-开裂应变曲线

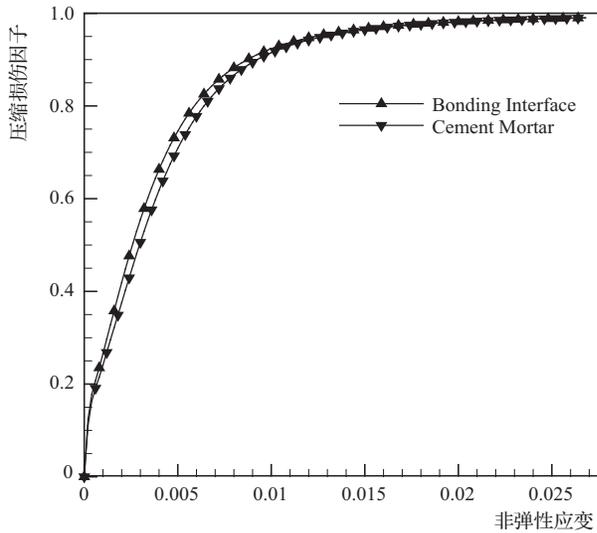


图2 损伤因子-非弹性应变曲线

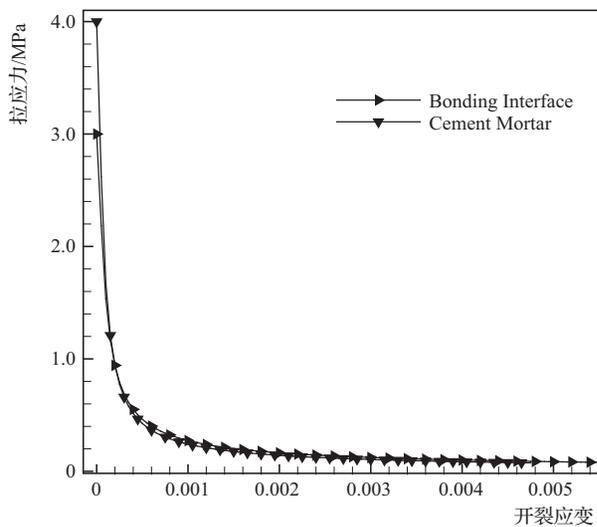


图3 应力与开裂应变曲线

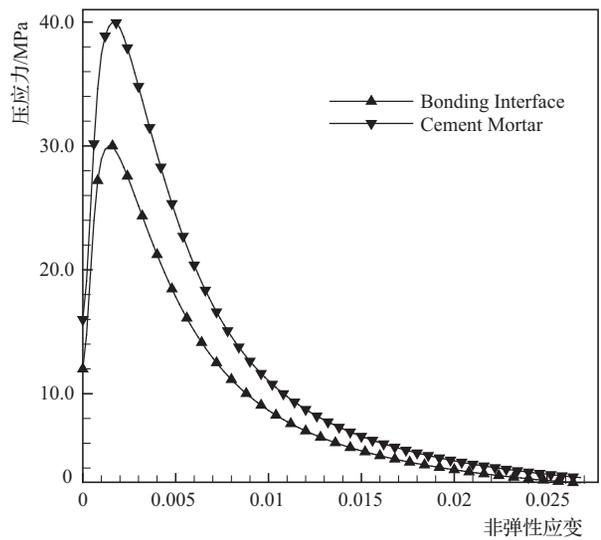


图4 应力与非弹性应变曲线

二维混凝土细观有限元模型的边界条件为试件左端所有节点横向竖向自由度为零,为获得混凝土在单向加载情况下应力-应变曲线的软化段,在试件右端所有节点采用位移加载。

### 2.1 骨料分布及形状对混凝土宏观破坏的影响

根据前述骨料含量及混凝土损伤塑性模型参数的定义,对圆形、多边形、椭圆形骨料分别构建6组二维混凝土细观有限元模型进行单轴拉伸、压缩情况下的损伤破坏分析。三种骨料形状的二维混凝土细观有限元模型在单轴拉伸、压缩情况下的应力-应变曲线分别见图5和图6;不同骨料参数的二维混凝土细观有限元模型在单轴拉伸荷载作用下的宏观破坏形态分别见图7和图8;不同骨料参数的二维混凝土细观有限元模型在单轴压缩荷载作用下的宏观破坏形态分别见图9和图10。

从图5可知,混凝土的应力未达到极限抗拉强度时,应力-应变呈线性变化;应力超过极限抗拉强度后,承载力不再提高但应变急剧增长,整个破坏过程历程短,表明混凝土的受拉破坏为脆性破坏。多边形、圆形、椭圆形骨料二维混凝土细观有限元模型的极限抗拉强度分别为1.84MPa、1.76MPa、1.78MPa,说明碎石骨料混凝土较卵石骨料混凝土极限抗拉强度略高。

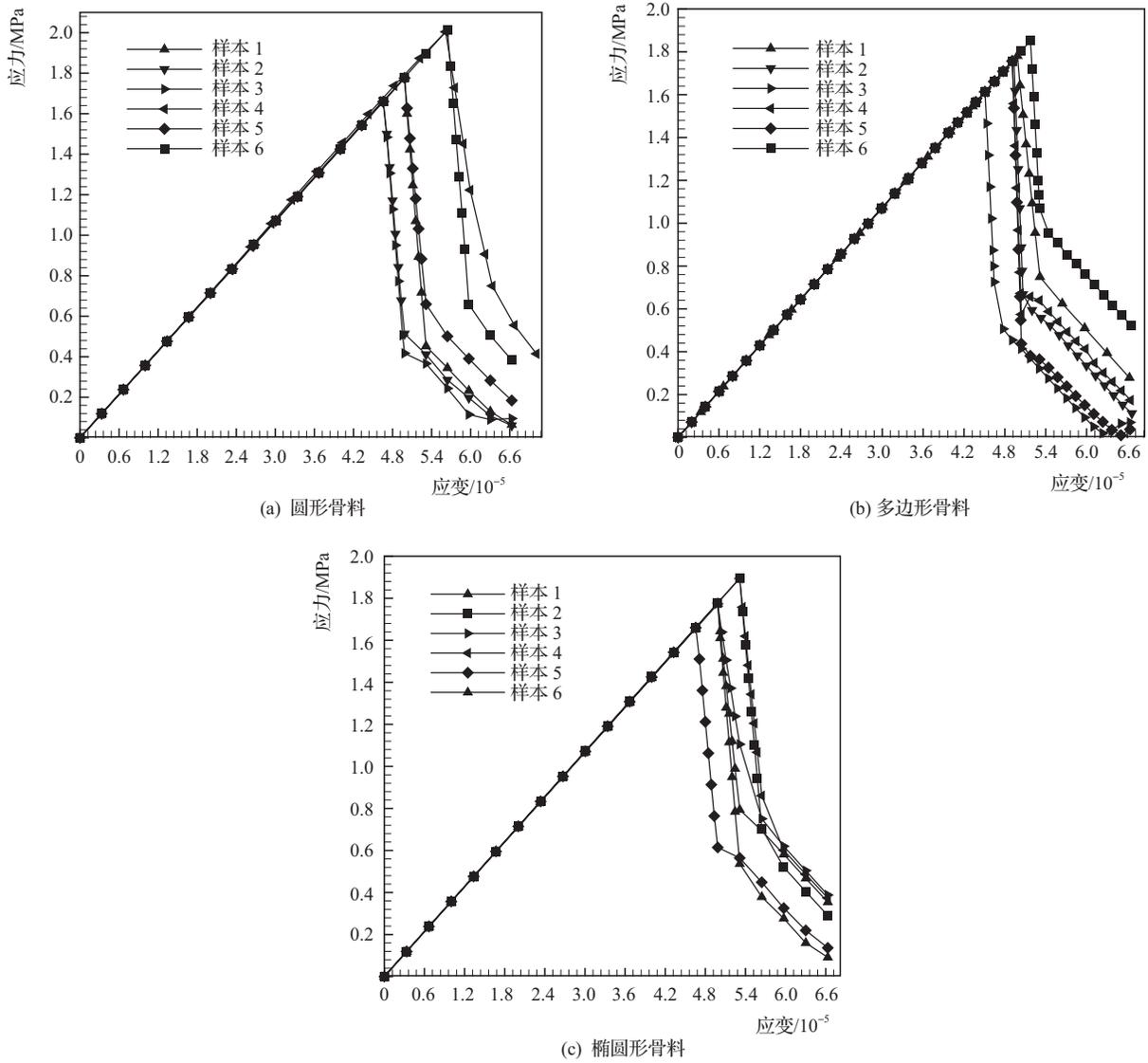
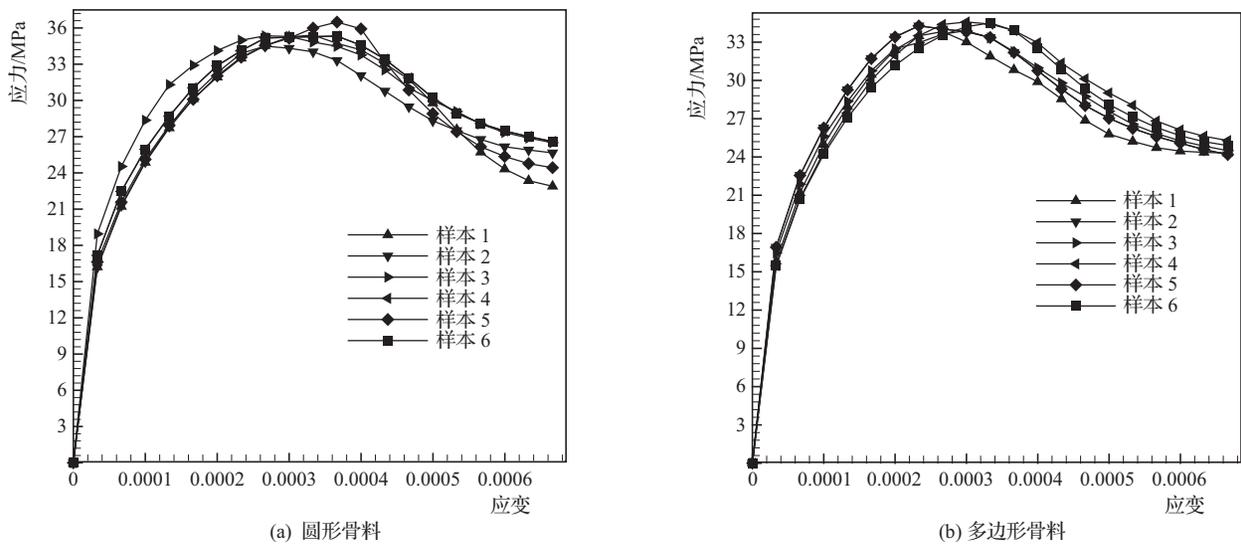


图5 细观模型单轴拉伸情况下应力-应变曲线



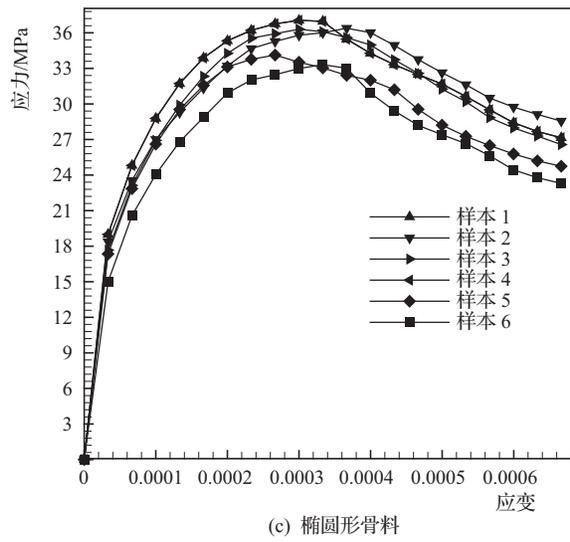


图6 细观模型单轴压缩情况下应力-应变曲线

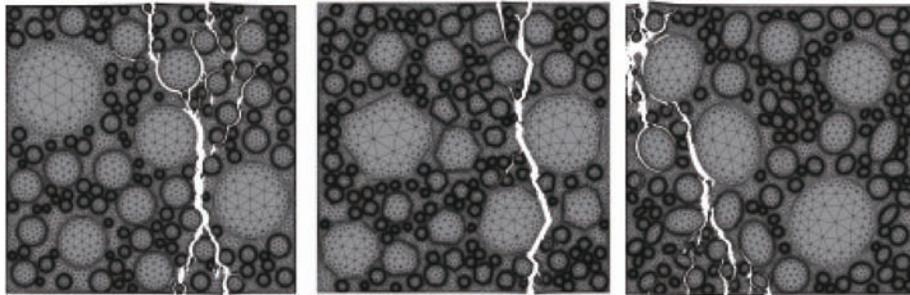


图7 不同骨料形状样本1单轴拉伸最终破坏形态

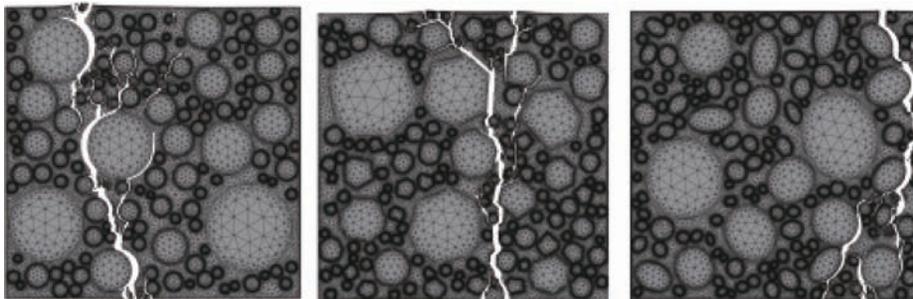


图8 不同骨料形状样本2单轴拉伸最终破坏形态

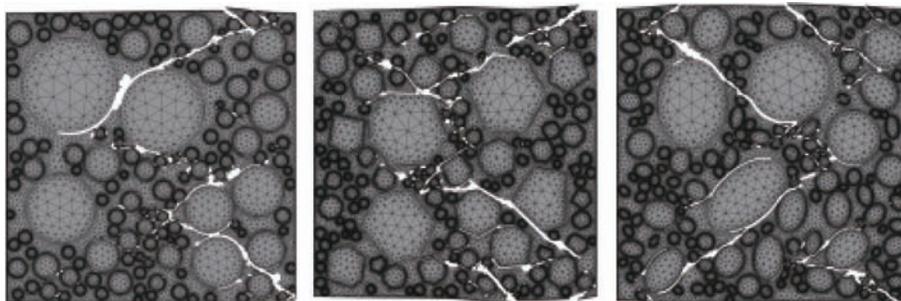


图9 不同骨料形状样本1单轴压缩最终破坏形态

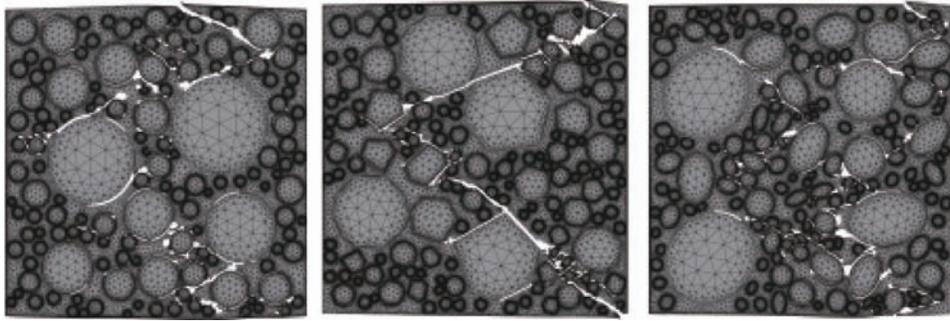


图10 不同骨料形状样本2单轴压缩最终破坏形态

从图6可看出,混凝土的应力小于极限抗压强度0.4倍时,应力-应变曲线呈直线形式变化;随着荷载的不断增大,混凝土表现出一定的塑性特性,此时应力-应变呈曲线形式变化;当混凝土的应力超过极限抗压强度后,承载力不再增加而应变却迅速增长。多边形、圆形、椭圆形骨料二维混凝土细观有限元模型的极限抗压强度分别为35.89MPa、34.42MPa、35.10MPa,说明碎石骨料混凝土较卵石骨料混凝土极限抗压强度略高。

上述混凝土试件的最终破坏形态表明:不同骨料分布的二维混凝土细观有限元模型在单向荷载作用下呈现出不同的裂纹发展形态。由于混凝土材料的特殊性,裂缝主要起于骨料与砂浆基体之间的界面并沿着骨料边界扩展,当荷载继续增加时,裂缝经界面延伸至砂浆基体内部并迅速蔓延,混凝土试件逐渐失稳破坏,丧失承载能力后最终出现断裂。因粗骨料强度和断裂能较其他两组分高,粗骨料内部几乎不会出现断裂,说明粗骨料对裂纹扩展有阻碍作用。混凝土试件单轴拉伸荷载作用下的破坏形态表现为断裂形式,主要是由于混凝土内部形成一条主裂纹造成混凝土试件的断裂;混凝土试件单轴压缩荷载作用下的破坏形态表现为自由面向外膨胀而呈现出破碎状态,主要是由于混凝土内部出现多条平行裂纹,自由边界向外膨胀所致。

## 2.2 界面厚度对混凝土宏观破坏的影响

界面是位于粗骨料与砂浆基体之间力学性能比较差的介质,混凝土内部的初始损伤往往就出现在界面

内。基于前述的骨料比重及损伤塑性模型参数的定义,对多边形骨料生成不同界面厚度的二维混凝土细观有限元模型,以分析不同界面厚度对混凝土宏观破坏性质的影响,不同界面厚度的二维细观有限元模型的数值分析结果见表2。

表2 界面厚度对混凝土宏观破坏的影响

界面厚度/mm	试件抗拉强度/MPa	试件抗压强度/MPa
7.5	1.69	34.52
6.0	1.71	36.26
4.5	1.78	37.22
3.0	1.79	37.91

从表2可看出随着界面厚度的减小,混凝土试件的极限强度有所增长。界面厚度每降低1.5mm,混凝土试件的单轴拉、压极限强度增幅分别为5.6%、8.9%。由于界面是混凝土内部薄弱层,界面厚度越小,其对混凝土内部结构的弱化也就越小。

## 2.3 界面和砂浆基体强度对混凝土宏观破坏的影响

通过前述骨料占比及混凝土损伤塑性模型参数的定义,建立多边形骨料二维混凝土细观有限元模型进行有限元分析,分析过程中调整界面和砂浆基体的抗拉、抗压强度,分析界面和砂浆基体的强度对混凝土宏观破坏时极限强度的影响。界面和砂浆基体抗拉、压强度分别按步长0.5MPa、5.0MPa逐级递减。其计算参数及计算结果见表3。

表3 界面和砂浆基体强度对混凝土试件宏观破坏的影响

单位:MPa

界面抗拉强度	试件抗拉强度	界面抗压强度	试件抗压强度	砂浆基体抗拉强度	试件抗拉强度	砂浆基体抗压强度	试件抗压强度
3.0	1.78	30.0	33.77	4.0	1.78	40.0	33.77
2.5	1.55	25.0	31.26	3.5	1.66	35.0	32.99
2.0	1.30	20.0	29.04	3.0	1.42	30.0	30.41
1.5	0.95	15.0	26.28	2.5	1.18	25.0	26.75

由表3数据可得出,界面抗拉、压强度逐级降低时,试件宏观抗拉、抗压强度降幅分别为55.9%、24.1%,表明混凝土试件宏观抗拉、抗压强度受界面强度影响较大;界面的强度越高,混凝土宏观破坏时的极限强度也越高。砂浆基体抗拉、抗压强度逐级降低时,混凝土试件宏观抗拉、抗压强度降幅分别为38.1%、22.2%,表明砂浆基体的强度对混凝土试件宏观破坏时极限强度的影响较小。

### 3 结 论

四级配混凝土试件在静载作用下的单轴拉伸、压缩有限元分析结果表明:不同骨料参数下的二维混凝土细观有限元模型极限强度略有不同,但数值分析结果基本上与工程实际吻合。界面厚度减小时混凝土宏观破坏的极限强度反而增加,另外界面和砂浆基体强度降低,混凝土试件宏观破坏的极限强度也随着降低,但界面强度对混凝土宏观破坏时的强度影响更大,表明引起混凝土力学性质弱化的内在原因是界面,破坏过程中初始损伤也最先产生于界面内部。混凝土因其骨料粒径较大,大骨料明显可阻碍裂纹进一步扩展,裂纹扩展时避开骨料并沿着阻力最小路径进行。◆

#### 参考文献

[1] 况渊,张风强. 马岩洞水电站枢纽建筑物物力学性能研究[J]. 水利建设与管理,2018,38(7):49-53.  
 [2] SCHLANGEN E, GARBOCZI E J. Fracture simulations of con-

crete using lattice models: computational aspects [J]. Engineering fracture mechanics, 1997, 57(2/3): 319-332.  
 [3] 唐春安,朱万成. 混凝土损伤与断裂:数值实验[M]. 北京:科学出版社,2003:112-156.  
 [4] HABBITT D, KARLSON B, SORENSEN P. Abaqus user subroutine reference manual for version 6. 8 [M]. Providence, RI: Dassault Systèmes Simulia Corp, 2008.  
 [5] 余来平. 高地下水位混凝土衬砌渠道冻胀损坏断裂数值分析[J]. 水利建设与管理, 2018, 38(6): 52-56.  
 [6] 水工混凝土试验规程:SL 352—2020[S]. 北京:中国水利水电出版社,2006.  
 [7] 刘强. 基于随机骨料模型的混凝土细观损伤与宏观强度研究[D]. 北京:北京工业大学,2020.  
 [8] 吴科如,周建华. 增强硬化水泥浆体-粗骨料界面结合对混凝土断裂能的影响[R]. 1987.  
 [9] SCHLANGEN E, VANMIER J G M. Simple lattice model for numerical simulation of fracture of concret materials & structures [J]. Matenals and structures, 1992, 25(9): 534-542.  
 [10] 中国水利水电科学研究院. 高拱坝地震应力控制标准和抗震结构工程措施研究:高拱坝混凝土动态试验研究[R]. 2000.  
 [11] 朱万成,唐春安,等. 混凝土式样在静态荷载作用下断裂过程的数值模拟研究[J]. 工程力学, 2002, 19(6): 148-153.  
 [12] 马怀发,陈厚群,黎宝琨. 混凝土试件细观结构的数值模拟[J]. 水利学报, 2004(10): 27-35.  
 [13] 马怀发,陈厚群,黎宝琨. 混凝土细观力学研究进展及评述[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2004(2): 124-128.

# 近36年来渭河定西段蒸发量时空变化及演变趋势研究

张跃峰

(甘肃省定西水文站,甘肃 定西 743000)

**【摘要】** 为了让气象、水文监测更精准地服务于社会,对蒸发量进行分析,掌握区域内蒸发量的时空变化及演变趋势具有深远意义。本文采用空间插值计算、线性回归法、Spearman秩次相关法、Mann-Kendall秩次相关法对各站蒸发量的年内分配、年际变化、时空分布、演变趋势及变化显著性做了深入的研究。结果表明:该地区蒸发量与降水量成反比关系、与气温成正比关系;年内分配极不均匀,集中在5—8月,年际变差系数 $C_v$ 值在0.09~0.12,变化幅度较小;蒸发量随高程增加而减小,出现由西北向东南递增的时空变化规律;各代表站及境内平均蒸发量均显示变化不显著且呈增加趋势。

**【关键词】** 蒸发量;渭河;蒸发站;定西市

中图分类号: TV121+.2

文献标志码: A

文章编号: 2097-0528(2022)09-040-06

## Study on temporal and spatial variation and evolution trend of evaporation in Dingxi section of Weihe River in recent 36 yrs

ZHANG Yuefeng

(Gansu Dingxi Hydrological Station, Dingxi 743000, China)

**Abstract:** It is of far-reaching significance to analyze the evaporation and master the temporal and spatial change and evolution trend of evaporation in the region in order to make meteorological and hydrological monitoring serve the society more accurately. Spatial interpolation calculation, linear regression method, Spearman rank correlation method and Mann Kendall rank correlation method are used for deeply studying the annual distribution, interannual variation, temporal and spatial distribution, evolution trend and change significance of evaporation at each station in the paper. The results show that the evaporation has an opposite relationship with precipitation and a positive proportion with temperature. The annual distribution is extremely uneven, which is mainly centralized from May to August with interannual variation coefficient  $C_v$  value between 0.09~0.12 and small variation range. The evaporation is decreased with the increase of elevation, which is increased from northwest to southeast. The average evaporation at each representative station and in China shows no significant change and an increasing trend.

**Keywords:** evaporation; Weihe River; evaporation station; Dingxi

水面蒸发量是指在自然条件下,水面的水分从液态转化为气态逸出水面的物理过程<sup>[1]</sup>,从某种角度来

收稿日期: 2021-12-13

作者简介: 张跃峰(1975—),男,工程师,主要从事水文测验、水文资料整编及水资源勘测评价等工作。

看,蒸发量的大小,直接决定了一定区域内的降水量与干旱程度,尤其是在水资源短缺的陇中黄土高原,蒸发量的大小,决定着农作物的生长质量。人类活动无疑加大了区域内下垫面条件的变化程度。武海喆<sup>[2]</sup> 认为全球气候变暖趋势愈发明显,流域的蒸发等水文气象环节受到直接性的影响;张鹏飞等<sup>[3]</sup> 对渭河流域蒸发皿蒸发量时空变化与驱动因素进行了深入研究,认为流域多年平均蒸发皿蒸发能力低于黄河流域的平均水平,其空间分布状况表现为由北向南逐渐减少,年蒸发皿蒸发量总体呈增加趋势;李洁等<sup>[4]</sup> 基于 SPEI 指数对渭河流域干旱特征进行了分析,认为蒸发量是干旱程度的主要驱动因素;高蓓等<sup>[5]</sup> 采用气候趋势系数、气候倾向率和相关系数方法对陕西渭河流域的蒸发量趋势进行了分析,结果表明:陕西渭河流域年蒸发皿蒸发量呈波动状升高,但并非显著性上升;春季和冬季的蒸发皿蒸发量表现为上升趋势,夏季和秋季则为下降趋势;和宛琳等<sup>[6]</sup> 采用 Mann-Kendall 倾斜度  $\beta$  等值线对渭河流域气温与蒸发量时空分布及其变化趋势进行分析,结果表明:空间上表现为从西北部向东南部逐渐增加分布规律,蒸发量随时间增加而逐渐减少,在空间上呈现出明显的从北部向南部逐渐减少的分布规律。定西市处于渭河的上游区,属全国少有的水资源极度匮乏区,查阅大量文献发现,针对渭河定西段蒸发量时空变化特性及演变趋势的研究目前还处于空白,为了更加准确地为当地水旱灾害防御及工农业生产服务,掌握该地区蒸发量的变化规律及今后的演变趋势很有必要。本文收集了气象、水文部门的实测蒸发量资料,在前述文献研究的基础上,对渭河流域定西段的蒸发量时空变化及演变趋势进行更大程度的研究,对区域经济发展具有重大意义。

## 1 区域概况

甘肃省横跨三大自然区,地处黄土高原、青藏高原、内蒙古高原的交汇处,定西市位于甘肃中部黄土高原<sup>[7]</sup>,介于东经  $103^{\circ}52' \sim 105^{\circ}13'$ 、北纬  $34^{\circ}26' \sim 35^{\circ}35'$  之间,面积 1.96 万  $\text{km}^2$ 。东邻天水、平凉;西邻临夏回族自治州、甘南藏族自治州;北接兰州;南部与陇南市

部分县区相邻。地形多以黄土丘陵、沟壑为主。地处副热带气候区,属中温带半干旱气候类型,多年平均气温  $5.7 \sim 7.7^{\circ}\text{C}$ ,无霜期 122 ~ 160 天。据定西水文站多年监测计算,多年平均降水量为 398.3mm,且降水量分布极不均匀。

## 2 数据及方法

### 2.1 数据

本次选用定西市通渭县、陇西县、漳县、岷县、渭源县、华家岭及周边榆中县气象站 1980—2016 年共 36 年实测长系列资料;选取临洮县李家村及周边会宁县水文部门长系列共 36 年资料,气象站及水文站均采用 20cm 口径蒸发器观测。上述资料通过一致性、可靠性、代表性分析,站点分布均匀、成果可靠,可以使用。代表站资料统计见表 1。

表 1 代表站蒸发量一览

测站类别	站名	测站高程/m	资料年限	观测年数
气象站	通渭	1768.266	1980—2016	36
	华家岭	2347.760	1980—2016	36
	陇西	1721.836	1980—2016	36
	漳县	1883.971	1980—2016	36
	岷县	2314.241	1980—2016	36
	渭源	2111.461	1980—2016	36
	榆中	1916.874	1980—2016	36
水文站	李家村	1929.780	1980—2016	36
	会宁	1740.945	1980—2016	36

### 2.2 方法

采用 GIS 系统对蒸发站的高程进行提取,并绘制出定西市境内蒸发量空间变化趋势图。采用 Mann-Kendall 秩次相关法、Spearman 秩次相关法及线性回归法<sup>[8]</sup> 对蒸发量的年际变化趋势进行分析并进行趋势显著性检验。

Mann-Kendall 秩次相关法是一种非参数检验方法,对于时间序列  $X(t) (t = 1, 2, \dots, N)$  计算出结果后和  $X(t') (t' = t + 1, t + 2, \dots, N)$  进行比较,这样不重复的计算进行了  $N(N - 1)/2$  次<sup>[9]</sup>,从而就有  $k$  的取值范围,就是从 1 到  $N(N - 1)/2$ ,将所有  $z$  函数的和相加。

趋势显著性检验需要定义统计量为  $T$ , 按照下列计量公式进行计算:

$$z(k) = \begin{cases} 1, & X(t) > X(t') \\ 0, & X(t) = X(t') \\ -1, & X(t) < X(t') \end{cases}$$

$$S = \sum_{k=1}^{N(N-1)/2} z(k)$$

$$T = \begin{cases} (S-1)/\sqrt{\text{Var}(S)}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ (S+1)/\sqrt{\text{Var}(S)}, & S < 0 \end{cases}$$

$$\text{Var}(S) = \frac{N(N-1)(2N+5)}{18}$$

以上式中:  $T$  为一个服从正态分布的统计量,  $T > 0$ , 说明系列趋势上升,  $T < 0$ , 说明系列趋势下降;  $\text{Var}(S)$  为系列方差;  $S$  为数值个数的累计数。当检验统计量  $T$  满足  $|T| > Z_{1-\alpha/2}$  时, 认为无趋势假设被拒绝, 时间序列的趋势是显著的, 其中  $\alpha$  是显著性水平, 一般取值为 0.05,  $Z_{1-\alpha/2}$  是标准正态分布下的随机变量值。如果上述原假设成立, 那么  $|T| \leq Z_{1-\alpha/2}$  的概率应该就是 0.95,  $|T| > Z_{1-\alpha/2}$ , 表示一个概率小于 0.05 的事件发生了, 说明原假设是显著不成立的, 也就是说, 该序列变化趋势是显著的。

### 3 蒸发量时空变化分析

由于蒸发量均采用 20cm 口径蒸发器观测, 需要将其折算成水面蒸发量。采用周边部分站点的 E601 型蒸发皿观测资料对上述各代表站的蒸发量进行折算。折算后的各代表站逐月及年水面蒸发量统计见表 2。

表 2 各代表站月水面蒸发量统计 单位:mm

站名	通渭	华家岭	陇西	漳县	岷县	渭源	李家村
1月	21.1	27.9	22.7	28.7	29.0	26.5	13.5
2月	30.2	29.7	35.8	36.5	38.6	32.4	22.2
3月	64.6	55.7	74.4	65.1	65.5	58.6	47.3
4月	109.9	94.1	119.5	100.7	92.0	95.1	77.6
5月	133.6	119.1	142.1	120.8	109.7	115.1	90.5
6月	128.0	113.6	143.4	122.4	110.6	110.3	89.2
7月	130.2	106.3	154.9	131.9	109.7	111.1	93.1
8月	116.7	93.4	140.9	123.4	109.5	101.1	85.2

续表

站名	通渭	华家岭	陇西	漳县	岷县	渭源	李家村
9月	71.9	60.9	89.0	79.2	78.4	64.3	52.6
10月	48.8	46.4	59.8	55.5	56.2	46.9	37.6
11月	31.4	39.0	36.0	38.2	38.9	35.0	21.6
12月	22.3	32.0	22.3	28.6	28.6	27.4	12.2
年蒸发量	908.7	817.8	1037.1	924.5	844.8	830.6	642.4

#### 3.1 蒸发量年内分配

受气压、降水、湿度、气温等因素影响<sup>[10]</sup>, 该地区水面蒸发量年内分配不均匀, 从图 1 看出, 随着气温的升高出现明显的不均匀变化, 各站蒸发量主要集中在 5—8 月, 非汛期(1—3 月、11—12 月)水面蒸发量明显较小。4 月气温上升, 蒸发量逐渐增大, 直到 10 月气温下降, 蒸发量回落。各代表站水面蒸发量集中在 5—8 月, 属连续 4 个月蒸发最大值, 占全年蒸发量的 52.7% ~ 56.0%; 连续 4 个月最小值出现在 11 月至次年 2 月, 占全年蒸发量的 11.3% ~ 15.7%。全年最大水面蒸发量出现在 7 月, 占全年蒸发量的 13.4% ~ 14.9%; 最小蒸发量出现在每年 1 月, 占比在 2.1% ~ 3.1%, 蒸发量极值比为 11.8, 差距较大。各时段蒸发量占比见表 3。

表 3 各时段蒸发量占比统计

项目	蒸发量区间/mm	占比/%	极值比
5—8月	357.9~581.2	52.7~56.0	4.40~5.15
11月至次年2月	69.4~131.8	11.3~15.7	
月最大值	143.3	13.8	11.8
月最小值	12.2	1.9	

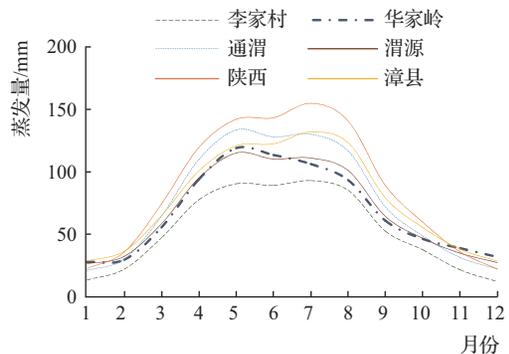


图 1 各代表站蒸发量年内分配

### 3.2 蒸发量空间分布

蒸发站分布在所辖各县,测站高程在 1721.836 ~ 2347.76m 之间,落差 625.92m,以横坐标为蒸发站高程,纵坐标为水面蒸发量,点绘蒸发量随高程变化曲线,见图 2。从图 2 可以看出,各代表站符合随高程增加而蒸发量减小的规律。临洮县李家村站蒸发量出现整体偏小的现象,主要原因是由于该观测站处于洮河河谷,风速较小,太阳辐射时间较短,加之受洮河水汽影响。

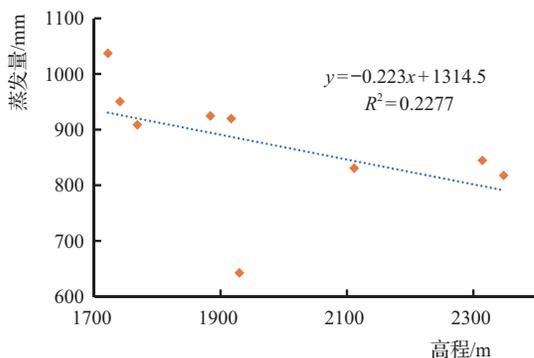


图 2 各代表站月水面蒸发量与高程关系

研究发现该地区蒸发量与降水量成反比例关系,与当地气温成正比例关系。在一些河谷地带,相对湿度大、风速小,水面蒸发量相对较小;在陇西、通渭等川坝地带,受太阳辐射、气温、地形等因素影响,水面蒸发量相

比较大。区域内蒸发量呈现由西北向东南递增趋势。

### 3.3 蒸发量年际变化

变差系数  $C_v$  值是水文统计中的一个重要参数,用来说明水文变量中的长期变化过程和稳定程度。可以用变差系数  $C_v$  值和极值比来衡量蒸发量的年际变化幅度, $C_v$  值小,说明年际小<sup>[11]</sup>,反之,则变化大。按照下列计量公式计算:

$$D(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} [x - E(X)]^2 f(x) dx$$

$$\sigma = \sqrt{D(X)}$$

$$C_v = \frac{\sigma}{E(X)}$$

计算各站的变差系数  $C_v$  值,对各站最大蒸发量出现的年份进行统计,计算出模比系数。各代表站的  $C_v$  值在 0.09 ~ 0.12 之间, $C_v$  值变化幅度不大,说明年际间变化相对稳定。最大年蒸发量出现在陇西站,为 1331.4mm,出现于 2002 年,模比系数为 1.28;最小年蒸发量出现在李家村站,为 503.0mm,模比系数为 1.59。年最大蒸发量与最小蒸发量极值比在 1.44 ~ 1.62 之间,差距较小(见表 4)。各计算值显示,该地区水面蒸发量分布均匀,年际变化小。

表 4 各代表站年蒸发量  $C_v$  值、模比系数和极值比计算统计

单位:mm

站名	多年平均	变差系数 $C_v$	最大年			最小年			最大最小极值比
			蒸发量	出现年份	模比系数	蒸发量	出现年份	模比系数	
通渭	908.7	0.09	1070.4	1997	1.18	662.8	1984	0.73	1.61
华家岭	817.8	0.10	936.4	2006	1.14	638.0	1989	0.78	1.47
陇西	1037.1	0.12	1331.4	2002	1.28	821.8	1984	0.79	1.62
漳县	924.5	0.10	1154.2	1997	1.25	790.2	2012	0.85	1.46
岷县	844.8	0.09	987.8	2010	1.17	685.8	1982	0.81	1.44
渭源	830.6	0.09	990.4	2002	1.19	686.7	1989	0.83	1.44
李家村	642.4	0.10	800.7	2016	1.25	503.0	1992	0.78	1.59

点绘各站年蒸发量变化曲线,见图 3。采用最小二乘法计算出线性回归方程,可以看出,各代表站水面蒸发量均呈现增大趋势,符合该地区蒸发量演变规律。其中,漳县站蒸发量年际变化较平缓,其余各站变化较

漳县站剧烈,整体变化相对稳定。采用垂直平分法对该地区平均蒸发量做了计算,多年平均蒸发量为 858.0mm,从年际变化趋势看,呈现逐年增加趋势。

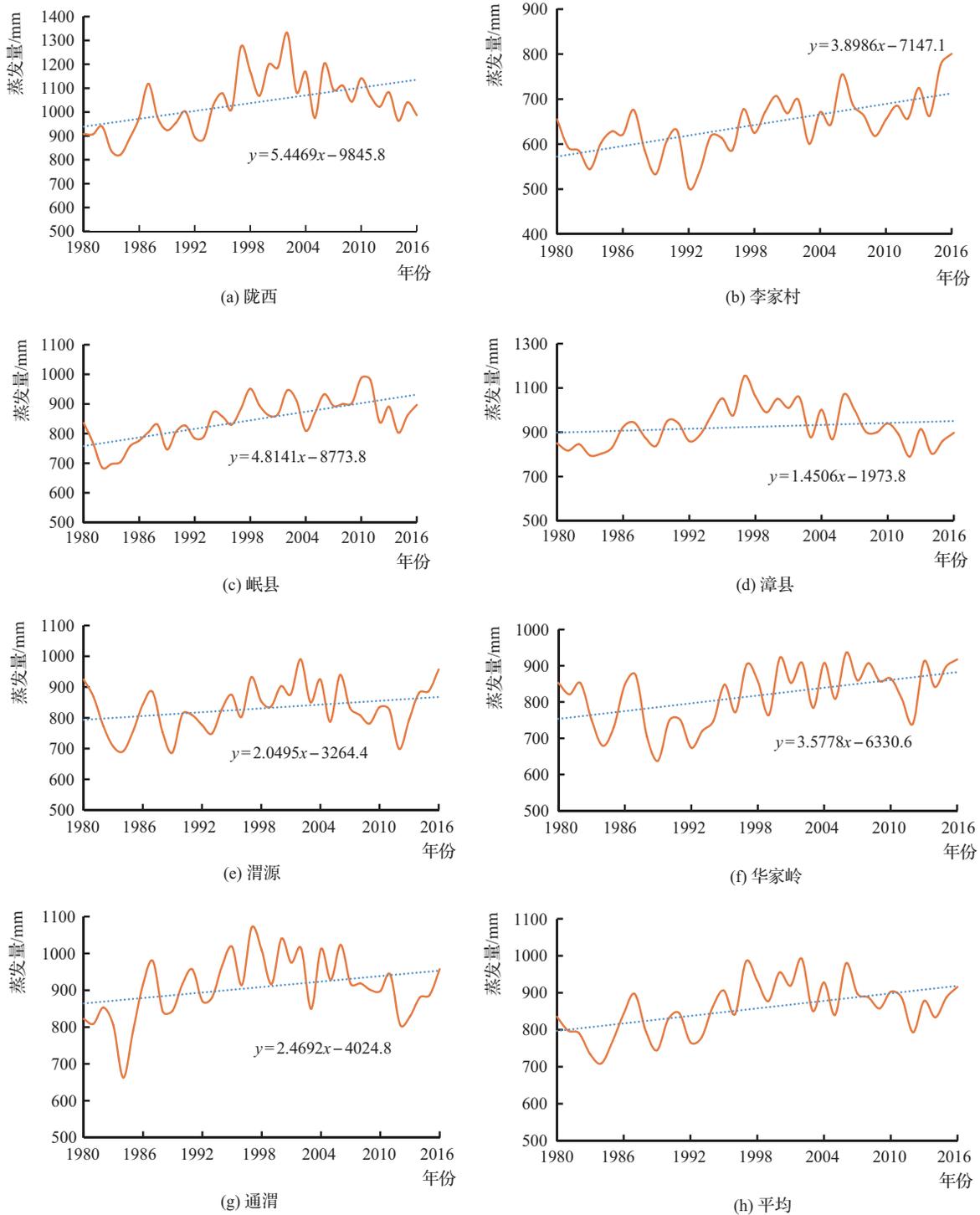


图3 渭河定西段各站蒸发量年际演变

### 3.4 趋势显著性检验

检验时,  $\alpha$  显著性水平取 5%, 这里将陇西站的年水面蒸发量带入计算, 对其进行变化趋势及显著性检验, 得出蒸发量 Mann-Kendall 统计曲线<sup>[12]</sup>。用同样的方法对其余各代表站及多年平均蒸发量进行变化趋势

检验, 发现各代表站的水面蒸发量均显示为不显著, 且变化趋势为增加。趋势检验结果见表 5。检验结果与上述文献研究的渭河流域蒸发量结果基本一致, 结果较合理。

表 5 各代表站趋势检验统计

序号	站名	趋势方程	Mann-Kendall 秩次相关法	Spearman 秩次相关法	线性趋势相关法	变化趋势
			$T_{a/2} = 1.96$	$ T  = 1.64$	$T_{a/2} = 1.64$	
1	通渭	$y = 2.4692x - 4024.8$	不显著	不显著	不显著	增加
2	华家岭	$y = 3.5778x - 6330.6$	不显著	不显著	不显著	增加
3	陇西	$y = 5.4469x - 9845.8$	不显著	不显著	不显著	增加
4	漳县	$y = 1.4506x - 1973.8$	不显著	不显著	不显著	增加
5	岷县	$y = 4.8141x - 8773.8$	不显著	不显著	不显著	增加
6	渭源	$y = 2.0495x - 3264.4$	不显著	不显著	不显著	增加
7	李家村	$y = 3.8986x - 7147.1$	不显著	不显著	不显著	增加

## 4 结 论

通过对近 36 年来渭河定西段蒸发量时空变化及演变趋势研究,主要得出以下结论:

a. 该地区蒸发量与降水量成反比例关系,与当地气温成正比例关系。

b. 受气温、地形及降水影响,蒸发量年内分配极不均匀,蒸发量主要集中在 5—8 月,非汛期蒸发量明显减小,汛期明显增大。

c. 年际蒸发量变差系数  $C_v$  值在 0.09 ~ 0.12 之间,年际变化幅度较小。

d. 在一些河谷地带,相对湿度大、风速小,水面蒸发量相对较小;蒸发量随高程增加而减小;区域内蒸发量由西北向东南递增。

e. 采用线性回归法、Spearman 秩次相关法、Mann-Kendall 秩次相关法检验其趋势显著性,各代表站及境内平均蒸发量均显示变化不显著且呈增加趋势。◆

### 参考文献

- [1] 詹道江,徐向阳. 工程水文学[M]. 北京:中国水利水电出版社,1987.
- [2] 武海喆. 渭河水文模拟中气象数据的适用性及模型参数特

性研究[D]. 西安:西安理工大学,2021.

- [3] 张鹏飞,赵广举,穆兴民,等. 渭河流域蒸发皿蒸发量时空变化与驱动因素[J]. 干旱区研究,2019,36(4):973-979.
- [4] 李洁,莫淑红,沈冰,等. 基于 SPEI 的渭河流域干旱特征分析[J]. 西安理工大学学报,2016,32(1):70-76.
- [5] 高蓓,范建忠,景毅刚,等. 近 33 年来渭河流域蒸发皿蒸发量的变化特征及原因分析[J]. 成都信息工程学院学报,2012,27(1):77-82.
- [6] 和宛琳,徐宗学. 渭河流域气温与蒸发量时空分布及其变化趋势分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2006(1):102-106.
- [7] 李文燕,冯小燕. 甘肃省三大流域水面蒸发量特性分析[J]. 地下水,2020,42(5):184-186,230.
- [8] 王文圣,金菊良,丁晶. 随机水文学[M]. 3 版. 北京:中国水利水电出版社,2016.
- [9] 杨大文,杨汉波,雷慧闽. 流域水文学[M]. 北京:清华大学出版社,2014.
- [10] 樊晶晶. 变化环境下水文要素变异研究[D]. 西安:西安理工大学,2016.
- [11] 刘霞. 白水江文县水文站水文特征研究[J]. 四川水利,2020,41(6):45-48.
- [12] 王毓森. 水文时间序列趋势与突变分析系统开发与应用[J]. 甘肃科技,2016,32(9):36-37,11.

# 加大流量对簸箕李引黄灌区泥沙输移影响分析

房本岩 魏守民

(滨州市引黄灌溉服务中心, 山东 滨州 256600)

**【摘要】** 本文以簸箕李引黄灌区为研究对象, 针对引用黄河水带来的泥沙影响, 结合灌区引水、引沙情况, 分析研究泥沙输移规律, 提出加大引水流量、减少泥沙淤积的水沙调度方案, 即增流减淤。经过实践运行, 条渠内泥沙淤积量明显减少, 出口含沙量增大, 条渠上游 4km 淤积极少, 条渠内淤积物主要为粗沙, 大部分较细泥沙以悬浮的形式输送到下游, 达到了远距离输沙、分散处理的目的。

**【关键词】** 含沙量; 泥沙淤积; 增流减淤; 引黄灌区

中图分类号: TV146+.1

文献标志码: B

文章编号: 2097-0528(2022)09-046-04

## Analysis on the influence of increased flow on sediment transportation in Bojili Yellow River Irrigation Area

FANG Benyan, WEI Shoumin

(Binzhou Yellow River Irrigation Service Center, Binzhou 256600, China)

**Abstract:** Bojili Yellow River Irrigation Area is adopted as the object of study in the paper. Aiming at sediment influence caused by the use of water in the Yellow River, the condition of water diversion and sediment diversion in irrigation area is combined to analyze and study the sediment movement law and propose to increase the diversion flow and reduce sediment siltation as water and sand scheduling programs, i. e. flow increase and sediment deposition decrease. Operation practice shows that the sediment deposition is significantly reduced in the strip channel, the sediment concentration is increased at the outlet, and silt is little at 4km upstream area of the channel. The siltation is mainly coarse sand, and most of the fine sediment is transported downstream in the form of suspension in the channel, thereby achieving the purpose of long-distance sediment transport and dispersion treatment.

**Keywords:** sediment concentration; sediment deposition; flow increase and siltation decrease; Yellow River Irrigation Area

### 1 泥沙对灌区的影响

簸箕李引黄灌区位于黄河下游左岸, 山东省滨州市境内, 承担着滨州市惠民、阳信、无棣 3 县 24 个乡镇

的工农业生产和 111.9 万城乡居民的供水任务, 工程规模为大型(1)型, 设计灌溉面积 7.87 万  $\text{hm}^2$ , 年引水 3 亿 ~ 4 亿  $\text{m}^3$ 。灌区没有天然沉沙条件, 在泥沙处理方面一直采用“以挖待沉”的集中处理方式, 在引黄闸

收稿日期: 2022-02-09

作者简介: 房本岩(1969—), 男, 高级工程师, 主要从事灌区供水管理与水沙监测等工作。

后设置了一条长 22km 的沉沙条渠。条渠设计流量为  $75\text{m}^3/\text{s}$ ;设计水深 2.2 m;底宽 34m;边坡 1:2;渠底纵比降 1/8000。当渠内泥沙淤积到一定程度后进行清挖,从而维持灌区效益的正常发挥。

引黄必引沙,灌区引水的同时,也引入了大量泥沙,运行至今已引进泥沙 1.64 亿 t,年均引沙 421.75 万 t,最大年引沙量发生在 1989 年,多达 1039.6 万 t,沉积在条渠内的泥沙累计 4796 万 t,占总引沙量的 29.24%。自条渠内清挖出的泥沙堆积在渠道两岸,越堆越多,形成宽 90~150m、高 5~9m 的沙岭,使清淤难度不断增加,费用逐年升高,虽然经过近几年的水土保持治理,但是仍有一半的泥沙滞留在两岸。堆积的泥沙对周围农民的生产生活带来诸多不利影响,泥沙在风和降雨径流的带动下进入周围农田,造成土壤沙化。沙化土地保水、保肥性差,不利作物生长,造成种植结构单一。

## 2 增流减淤方案的提出

### 2.1 引水流量与条渠泥沙淤积的关系

灌区引水流量主要是由黄河来水量和灌区农作物需水情况决定,引水流量变化幅度较大。不同流量条件下条渠进口、出口含沙量变化情况见图 1。图中数据是 2008—2014 年春灌时期测得。

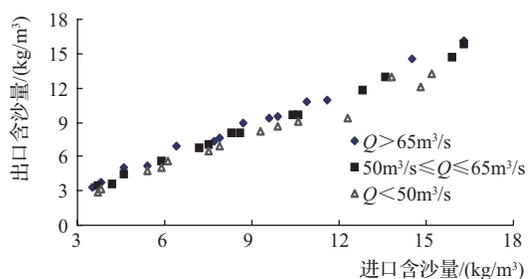


图 1 不同流量条件下条渠进、出口含沙量关系

从图 1 可看出,条渠出口含沙量随着进口含沙量的变化而变化,进口含沙量增大,出口含沙量亦增大,符合“多来多排”的规律。从点群分布上可以看出,流量较大时测得的点分布在流量较小时测得的点之上,存在进口含沙量基本不变时,出口含沙量随着流量增大而增大的趋势。

## 2.2 增流减淤

为了减少泥沙危害,针对灌区实际情况,2015 年提出改“以挖待沉”的集中处理方式分散处理。通过加强水沙运行调度,加大水流挟沙能力,把大量泥沙输送到灌区下游和支渠田间。灌区下游的无棣县,濒临渤海,低洼地、盐碱地较多,输送过去的泥沙可以填平洼地,改良土壤。因此,根据多年的水沙观测和灌区现状,决定实施加大引水流量,减少条渠泥沙淤积措施,即“增流减淤”。

## 2.3 渠道整治

为实现增流减淤,对灌区的输水干渠进行了治理。结合灌区工程建设,对渠道低矮薄弱堤坝进行加高加固、渠道边坡砌护硬化,以适应大流量引水。经过治理,渠道输水能力显著增强。

## 3 加大流量对泥沙输移影响分析

### 3.1 条渠进口、出口含沙量的变化

2015 年以前,条渠进口含沙量绝大多数情况下大于出口含沙量,一部分泥沙在渠内淤积下来,条渠起到了拦截泥沙的作用,部分含沙量测定数据见表 1。表中淤积率由  $(S_{进} - S_{出})/S_{进}$  算得, $S$  为含沙量。

表 1 2012—2018 年条渠春灌进口、出口含沙量测定

日期	流量/ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	$S_{进}/$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	$S_{出}/$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	$S_{进} - S_{出}$	淤积率/ %
2012 年 2 月 26 日	37.0	5.20	4.00	1.40	26.9
2012 年 3 月 6 日	39.0	13.10	10.90	2.20	16.8
2012 年 4 月 27 日	43.5	38.30	23.00	15.30	40.3
2013 年 2 月 20 日	36.0	5.14	4.20	0.94	18.3
2013 年 3 月 31 日	49.0	10.64	8.82	1.82	17.1
2013 年 4 月 11 日	51.0	19.40	15.20	4.20	21.6
2013 年 5 月 2 日	50.0	4.52	3.90	0.62	17.7
2014 年 3 月 14 日	40.0	13.70	9.00	4.70	34.3
2014 年 4 月 13 日	57.0	6.50	7.10	-0.60	-9.2
2014 年 5 月 9 日	47.0	8.10	7.00	1.10	13.6
2016 年 3 月 2 日	60.0	7.10	6.90	0.20	2.8
2016 年 3 月 27 日	33.0	2.90	2.20	0.70	24.1
2016 年 4 月 18 日	65.0	6.80	6.90	-0.10	-1.5
2016 年 5 月 15 日	59.0	23.60	21.80	1.80	7.6

续表

日期	流量/ (m <sup>3</sup> /s)	S <sub>进</sub> / (kg/m <sup>3</sup> )	S <sub>出</sub> / (kg/m <sup>3</sup> )	S <sub>进</sub> -S <sub>出</sub>	淤积率/ %
2017年3月24日	66.0	6.10	6.80	-0.70	-11.5
2017年4月6日	48.0	13.90	12.60	1.30	9.4
2017年4月27日	72.0	7.30	7.70	-0.40	-5.5
2017年5月11日	39.0	5.40	4.20	1.20	22.2
2018年3月21日	68.0	9.40	9.10	0.30	3.2
2018年3月13日	57.0	6.60	6.10	0.50	7.6
2018年4月22日	75.0	15.90	16.70	-0.80	-5.0

2015年以后灌区引水流量明显大于2015年以前,出口含沙量有时低于进口含沙量,有时高于进口含沙量,淤积率时正时负。当淤积率为负值时,渠底发生冲刷,使一部分淤积物(床沙)在水流的拖拽力和上举力作用下,被拽起成为悬移质向下游输送。由表1可看出淤积率不稳定,变化较大。这是因为受黄河来水来沙的影响,当黄河来水量小、泥沙粒径偏大时,灌区引水淤积率则大;黄河来水量多、泥沙粒径偏细时,则淤积率偏小。点绘出2012—2018年平均淤积率图,见图2。明显看出2015年以后年均淤积率小于2015年以前,即加大引水流量后平均淤积率相对减小,起到了减淤的目的。

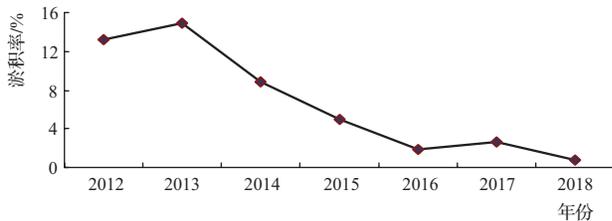


图2 2012—2018年年均淤积率

### 3.2 泥沙粒径的变化

在不同引水期,灌区引水泥沙粒径变化较大。一般在春、冬季引水时泥沙粒径较粗,在夏、秋两季引水时泥沙粒径较细。不同粒径级配泥沙经过条渠后,泥沙颗粒沉积速度也不一样。2015年前不同月份条渠泥沙平均中值粒径如下:2—6月进口泥沙中值粒径  $D_{50} = 0.0272\text{mm}$ ,出口泥沙中值粒径  $D_{50} = 0.0235\text{mm}$ ;7—9月进口  $D_{50} = 0.0067\text{mm}$ ,出口  $D_{50} = 0.0062\text{mm}$ ;

11—12月进口  $D_{50} = 0.0133\text{mm}$ ,出口  $D_{50} = 0.0117\text{mm}$ 。从进口与出口中值粒径  $D_{50}$  值的变化程度可以看出,2—6月泥沙颗粒沉积速度最快,7—9月相对沉积较慢。这是因为受黄河来水来沙的影响,灌区引黄泥沙在2—6月比较粗,水流难以携带全部较粗的泥沙,致使一部分粗沙淤积下来;而7—9月黄河水量较大,泥沙粒径偏细,在这个时期引水,灌区平均引水流量大于其他月份,且泥沙粒径较其他月份小,因而泥沙淤积得较慢,粗泥沙颗粒沉积也较慢。在2015年以后测得的引水泥沙粒径变化规律与2015年以前极为相似。现列出典型年2013年和2016年条渠泥沙中值粒径变化对比图,见图3。由图3可看出,2013年泥沙平均粒径大于2016年,且冬、春季大于夏季。

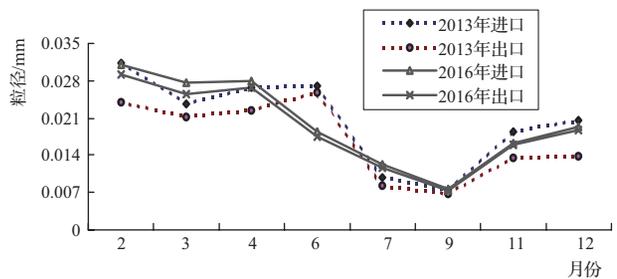


图3 条渠典型年不同月份进、出口泥沙中值粒径变化

2012—2018年条渠淤积物(床沙)不同粒径泥沙所占的比例见表2。由表2可看出,2016年以后床沙中粗沙所占比例明显增大,细泥沙在条渠内淤积相对较少。

表2 2012—2018年条渠不同泥沙粒径平均淤积比例

年份	粒 径			
	<0.01mm	0.01 ~ 0.025mm	0.025 ~ 0.05mm	>0.05mm
2012	1.9	5.6	16.0	76.5
2013	2.3	4.3	15.5	77.9
2014	1.7	5.3	19.9	73.1
2016	0.7	3.8	14.3	81.2
2017	1.3	4.2	13.9	80.6
2018	0.2	2.8	15.4	81.6

### 3.3 泥沙淤积量的变化

2012—2018年淤积在条渠内的泥沙量统计见表3。其中2017年度引沙量较多的原因是灌区全年干旱

较重,夏季降雨偏少,为缓解旱情,灌区夏季引水量相对较多,且夏季引水时间长达 54 天,最大引水含沙量  $139.6\text{kg}/\text{m}^3$ ,2017 年全年平均引水含沙量  $17.09\text{kg}/\text{m}^3$ ,比灌区平均引水含沙量  $7.8\text{kg}/\text{m}^3$  高出许多。由表 3 可看出,年均引水流量增加后,淤积比相对减小,淤积在条渠内的泥沙数量相对减少,虽然 2017 年引沙量高达  $1039.6\text{万 m}^3$ ,但淤积比并不高,只有 11.4%。自实施增流减淤后,灌区已由以前的一年一次清淤变为两年一次清淤(2016 年和 2018 年没有清淤),为灌区节省了清淤费用,带来较大的经济效益和社会效益。

表 3 2012—2018 年条渠泥沙不同年份淤积量统计

年份	平均流量/ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	引水量/ 万 $\text{m}^3$	引沙量/ 万 t	淤积量/ 万 t	淤积比/ %
2012	38.48	4.85	622.0	138.2	22.22
2013	35.86	4.4	455.4	99.0	21.74
2014	34.29	4.01	310.8	61.0	19.63
2015	43.57	4.63	401.2	54.4	13.56
2016	47.11	6.31	346.3	35.2	10.16
2017	45.70	6.12	1039.6	118.5	11.4
2018	54.01	6.16	406.9	34.3	8.43

### 3.4 泥沙淤积的沿程变化

灌区每年 10 月对 22km 长的条渠泥沙淤积情况进行勘测,现选择较为典型的 2013 年和 2018 年作为研究对象(每年灌区的清淤时间安排在 11 月,勘测工作在清淤实施后的 10 月进行),勘测的淤积情况见图 4。由图 4 可看出,2018 年淤积深度小于 2013 年,且在 4km 以前基本不淤,6km 以下淤积比较均匀,深度在 40~50cm 之间。2013 年淤积情况为:6km 前淤积呈递增趋势,在 6km 以下淤积较深也较均匀,深度在 100cm 左右。2013 年和 2018 年总体淤积变化趋势相似,皆在 6km 处发生变化,在 6km 前呈逐步增长趋势,6km 后淤

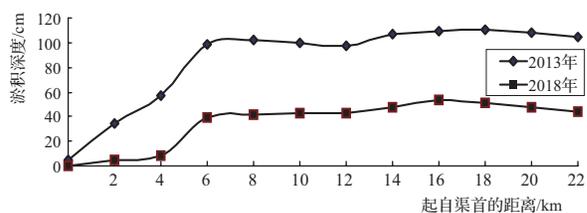


图 4 1995 年与 2000 年条渠淤积深度对比

积较多也较均匀,在 16km 前后略有增加,但变化不大。可见,加大引水流量后,只改变了条渠泥沙淤积量、淤积深度,对泥沙沿程分布规律和趋势影响不大。

## 4 结 语

针对簸箕李引黄灌区“以挖待沉”泥沙集中处理方式带来的危害,提出了增流减淤的水沙调度方案,经过运行实践,效果较好。条渠出口含沙量明显增大,淤积率相对减小;淤积物中粗沙含量增加,泥沙颗粒沉积速度略有减弱,全年变化基本规律为:冬、春季大于夏、秋季;条渠内泥沙淤积量明显减少,淤积比减小;上游 4km 基本不淤积,6km 以下淤积较均匀,深度在 40~50cm,淤积深度相对变浅。条渠大部分较细泥沙以悬浮的形式输送到下游和支渠田间,达到了分散处理的目的,并由以前的一年一次清淤变为两年一次清淤,取得了较好的经济效益和社会效益。◆

## 参考文献

- [1] 王延贵,李希霞. 典型引黄灌区水沙分布及其特点[J]. 泥沙研究,1997(2):41-45.
- [2] 王延贵,胡春宏,周宗军. 引黄灌区泥沙远距离分散配置模式及其评价指标[J]. 水利学报,2010,41(7):764-770.
- [3] 陈康,苏佳林,王延贵,等. 黄河干流水沙关系变化及其成因分析[J]. 泥沙研究,2019,44(6):19-26.
- [4] 吴保生,张原锋. 黄河下游输沙量的沿程变化规律和计算方法[J]. 泥沙研究,2007(1):30-35.
- [5] 中国水利学会泥沙专业委员会. 泥沙手册[M]. 北京:中国环境科学出版社,1992.
- [6] 曹文洪. 引黄灌区水沙配置理论与关键技术研究[M]. 北京:中国水利水电出版社,2008.
- [7] 王延贵,李希霞,王冰伟. 典型引黄灌区泥沙运动及泥沙淤积成因[J]. 水利学报,1997(7):6.
- [8] 蒋如琴,曹文洪. 引黄灌区泥沙研究[M]. 北京:中国水利水电出版社,2012.
- [9] 张燕菁,王延贵,胡春宏. 黄河下游引黄灌区水沙分配不均衡性研究[C]//第七届全国泥沙基本理论研究学术讨论会论文集. 北京:中国水利学会,2008.
- [10] 戴清,王景元,曹文洪,等. 小开河灌区水沙分布及泥沙长距离输送机理研究[J]. 泥沙研究,2010(4):6.

# 对郑州“7·20”洪水中水库作用的分析与思考

董永立

(郑州市水利建筑勘测设计院,河南 郑州 450006)

**【摘要】** 为了及时复盘“7·20”洪水期间水库的调度运用过程,总结调度方法和效果,为今后水库调度运行提供案例参考和科学指导,本文通过收集气象、水文及水库管理部门的实测资料,经现场调研和数据分析,对水库的防洪抗洪作用进行了客观论述与评价。结果表明,水库承担着防洪、供水、灌溉等重要兴利减灾功能,利用水库调蓄洪水,削减洪峰,能够有效地减免下游洪灾损失,最大程度地保障下游防洪安全。

**【关键词】** 水库;洪峰;流量;防洪;郑州“7·20”洪水

中图分类号: TV122+.1

文献标志码: B

文章编号: 2097-0528(2022)09-050-05

## Analysis and consideration on the role of reservoir in Zhengzhou “July 20” Flood

DONG Yongli

(Zhengzhou Water Conservancy Building Survey and Design Institute, Zhengzhou 450006, China)

**Abstract:** The flood control and flood fighting roles of reservoirs are objectively discussed and evaluated through field survey and data analysis by collecting measured data from meteorological, hydrological and reservoir management department in order to timely check operation and dispatching of the reservoir during “July 20” Flood, summarize the scheduling methods and effect, and provide case reference and scientific guidance for reservoir dispatching operation reference in the future. The results show that the reservoir is responsible for flood control, water supply, irrigation and other important functions for profit and disaster reduction. The reservoir can be used for dispatching flood, and reducing flood peak, thereby effectively reducing the downstream flood losses and guaranteeing the downstream flood control safety to the greatest extent.

**Keywords:** reservoir; flood peak; flow; flood control; Zhengzhou “July 20” Flood

### 1 郑州市水库现状

郑州市共有中小型水库 143 座,总库容 4.9 亿  $m^3$ 。其中,按水库规模划分,共有中型水库 14 座,小(1)型

水库 59 座,小(2)型水库 70 座;按所在行政区域划分,市管 2 座,管城区 2 座,经开区 1 座,二七区 1 座,登封市 50 座,新密市 37 座,新郑市 20 座,荥阳市 13 座,巩义 17 市座;按水库位置重要性划分,位于郑州市主城

收稿日期: 2021-10-28

作者简介: 董永立(1981—),男,硕士,高级工程师,主要从事水利工程规划、设计工作。

区上游共 10 座,位于南水北调总干渠左岸共 17 座,位于县城城区上游共 21 座,位于重要交通等基础设施上游共 38 座。

这些水库几乎全部建于 20 世纪 50—70 年代,并且基本上都是均质土坝,七成以上水库坝高在 30m 左右。除常庄水库溢洪道上建有泄洪闸外,其余水库均为开敞式溢洪道。除尖岗、常庄、丁店三座水库有泄洪洞外,其余水库均仅靠溢洪道泄洪。输水洞多为坝下浆砌石无压涵洞,输水流量多在  $2\text{m}^3/\text{s}$  以下。放水管多为坝下埋管,直径多在 0.8m 以下,约 1/3 的小型水库放水管进口靠流量极小的斜卧管控制,甚至有十余座小型水库没有任何放水设施,泄洪依靠溢洪道,而兴利或放水依靠水泵抽取。

## 2 “7·20”雨情

2021 年 7 月 17—22 日,郑州市遭遇有水文记录以来最大降雨袭击,全市普降暴雨、大暴雨,局部特大暴雨。此次特大暴雨历时 120h,全市平均降水量 514.6mm,降雨时段主要集中在 19 日 8 时至 21 日 8 时,累计平均降雨 456.9mm。此次特大暴雨具有持续时间长、累积雨量大、强降水范围广、强降水时段集中、极端性突出等特点。气象系统观测单小时降雨量 201.9mm,突破中国大陆小时降雨量历史极值;郑州国家观测站 24h 最大降雨量 624.1mm,为建站以来最大日降雨量的 3.3 倍。

虽然水文系统与气象系统雨量点分布不尽相同,但观测的降雨数据同样呈现出雨量大、强度大的极端

特征。本次降雨过程中,水文系统观测 24h 最大降雨量 672mm。在全市 214 处雨量站中,观测值超 600mm 的站点有 39 处。其中,新密白寨站 993.1mm、市区尖岗站 946.0mm、荥阳刘河站 872.5mm、荥阳环翠峪站 868.0mm、市区樱桃沟站 866.0mm、新密驼腰站 865.5mm、巩义杜沟站 847.0mm,很多雨量观测点观测的降雨数据均突破了有水文记录以来的极值。

## 3 “7·20”水情

“7.20”特大暴雨,郑州全市折合总降水量 38.3 亿  $\text{m}^3$ ,受特大暴雨影响,市域内所有河流普遍暴涨,多条河流超警戒水位,贾鲁河、双洎河超历史最高洪水位。市内金水河、熊耳河、东风渠等河渠持续高水位运行,部分河段发生洪水漫溢,河道洪水与地表内涝连成一片,部分积水区域持续长时间不具备抽排条件,全市有 2000 多个小区不同程度受灾,城区多条道路积水严重,地铁停运,部分地区铁路、公路、电力、通信受到严重影响。县城内主要河流如登封书院河,巩义后汜河、西汜河、汜水河,新密双洎河、溱水河等河流,涨水迅猛,漫堤行洪,水流湍急,破坏性极大。

## 4 水库汛情

汛前全市所有水库均按调度运用计划执行,水位全部降至汛限水位以下,预留防洪库容 8527 万  $\text{m}^3$ 。李湾、丁店、老观寨、少林、纸坊 5 座水库汛前水位比汛限水位低 10m 以上。“7·20”以前中型水库水位和库容情况见表 1。

表 1 “7·20”以前中型水库水位和库容情况

名称	汛限情况		7月18日8时水位情况		水位差/m	预留防洪库容/万 $\text{m}^3$	备注
	水位/m	库容/万 $\text{m}^3$	水位/m	库容/万 $\text{m}^3$			
尖岗	150.55	3350	145.08	1787	5.47	1563	
常庄	127.49	615	126.59	522	0.90	93	
丁店	175.00 (往年汛限水位)	2050	159.40	30	15.6	2020	2021 年汛前正在除险加固工程施工,按空库运行
楚楼	146.50	572	138.00	75	8.50	497	
河王	123.90	1100	123.35	1008	0.55	92	
唐岗	117.00	405	116.11	304	0.89	101	
券门	346.75	663	337.13	165	9.62	498	
少林	528.55	521	518.20	142	10.35	379	

续表

名称	汛限情况		7月18日8时水位情况		水位差/m	预留防洪 库容/万 m <sup>3</sup>	备注
	水位/m	库容/万 m <sup>3</sup>	水位/m	库容/万 m <sup>3</sup>			
纸坊	448.00	820	438.00	157	10.00	663	
后胡	152.50	520	143.15	63	9.35	457	
老观寨	150.00	213	138.00	3	12.00	210	
李湾	327.50	1500	306.32	39	21.18	1461	
五星	216.00	304	213.15	173	2.85	131	
坞罗	250.00	415	242.28	53	7.72	362	

7月18日,本轮大范围降雨过程首先从登封、巩义开始,由西自东发展。登封、巩义、新密、荥阳位于郑州西部山区,流域内河道坡降陡,地质条件多为岩层出露,降雨汇流速度快,形成洪峰时间短。到7月20日12时,登封纸坊、少林水库已经达到本次汛情最高洪水位。随着7月20日下午特大暴雨向东移动,到晚19时13分,常庄水库汇入荥阳、新密交界处伏羲山区域径流,经贾峪河注入,逐步达到最高洪水位。流域面积较大、蓄洪能力最强的尖岗、丁店水库,虽然均已开闸泄洪,但入库洪峰流量远远大于出库下泄流量,水位仍然直线上涨,超过汛限水位之后,一度刷新建库以来最高水位记录,到21日6时40分和12时,水位达到历史最高,之后开始缓慢降落。

“7·20”特大暴雨,郑州全市14座中型水库均超汛限水位,最大超限幅度6.67m;尖岗、常庄、丁店、五星、后胡、纸坊、唐岗、坞罗、楚楼9座中型水库超建库以来最高洪水位。李湾水库自7月20日0时至23时,库水位从306.32m涨至328.00m,23h内涨幅21.68m,刷新了郑州有史以来水库水位涨幅、涨速的最高记录。丁店水库自7月19日8时至21日12时,库水位从159.40m涨至178.81m,累计上涨19.41m,也同样将有史以来抵御洪水的能力发挥到了极致。“7·20”期间郑州市中型水库最高水位情况见表2。

“7·20”汛中,小型水库作为防洪的补充力量,同样担当起了各自的责任。全市129座小型水库,有90座超汛限水位,占比69.8%,最大超限幅度7.4m,一半以上超历史最高水位。特别是西部山区的小型水库,多在小流域山坡坡脚,山洪汇流速度极快,洪峰陡涨,

表2 “7·20”期间郑州市中型水库最高水位情况

名称	最高水位/m	库容/万 m <sup>3</sup>	时间	水位涨幅/m	较汛前增加蓄洪量/万 m <sup>3</sup>
尖岗	153.64	4538	7月21日6时40分	8.56	2751
常庄	131.31	1097	7月20日19时13分	4.72	575
丁店	178.81	3303	7月21日12时	19.41	3273
楚楼	150.08	990	7月23日22时	12.08	915
河王	125.84	1430	7月20日21时	2.49	422
唐岗	118.76	749	7月21日9时	2.65	445
券门	348.10	770	7月21日16时	10.97	605
少林	533.87	820	7月20日15时15分	15.67	678
纸坊	451.80	1230	7月20日12时	13.80	1073
后胡	155.50	803	7月21日8时	12.35	740
老观寨	152.84	367	7月21日19时	14.84	364
李湾	328.40	1632	7月21日8时	22.08	1593
五星	218.94	497	7月21日4时5分	5.79	324
坞罗	256.67	972	7月20日21时	14.39	919
合计		19198			14678

约九成以上水库在暴雨过程中,短时间内溢洪道流出下泄。

## 5 水库防洪效益

全市143座水库在本次“7·20”洪水中,共拦蓄洪水6.7亿 m<sup>3</sup>,其中14座中型水库共拦蓄1.7亿 m<sup>3</sup>,有效发挥了拦洪削峰错峰作用和防洪减灾效益,各水库防洪效益见表3。其中尖岗、丁店、楚楼、河王、券门、少林、老观寨、李湾、坞罗、五星10座水库,削峰率达到90%以上,为下游减灾做出了突出贡献;券门、李湾水

库,在最大流量入库时零下泄,为下游颍河、双洎河洪水错峰争取了时间,有效减小了颍河和双洎河的洪峰流量;特别是丁店和尖岗这两座水库,其库容位列郑州

所有水库中前两名,本次汛期发挥了调洪、蓄洪、削峰等综合防洪效益,无可置疑地再次成为郑州的“明星”水库,分别拦下了各自控制流域内上游几乎所有洪水。

表3 “7·20”特大暴雨郑州市中型水库防洪效益

名称	最大入库流量情况			最大出库流量情况		防洪效益	
	最大入库流量/ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	相应出库流量/( $\text{m}^3/\text{s}$ )		最大出库流量/( $\text{m}^3/\text{s}$ )		削峰率	拦洪量/ $\text{万 m}^3$
		溢洪道	泄洪洞/输水洞	溢洪道	泄洪洞/输水洞		
尖岗	1120.0	0	64.0	0	64.0	94.3%	3193
常庄	865.0	400.0	30.0	487.0	38.0	52.0%	2800
丁店	2230.0	0	6.8	14.0	6.8	99.7%	3303
楚楼	201.0	0	0.6	48.6	0.6	99.7%	915
河王	98.3	0	1.7	87.4	1.7	98.3%	422
唐岗	92.0	20.0	2.0	86.0	2.5	76.0%	446
券门	461.0	0	0	0	5.2	100.0%	605
少林	363.0	0	25.0	18.0	25.0	93.1%	678
纸坊	805.0	378.0	50.0	378.0	66.0	53.2%	1073
后胡	167.0	110.0	2.5	110.0	3.0	67.4%	500
老观寨	63.0	0	4.0	0	4.0	93.7%	364
李湾	561.0	0	0	53.0	3.5	100.0%	1461
坞罗	316.0	0	6.0	177.0	8.0	98.1%	771
五星	238.0	9.3	3.0	19.5	3.0	95.5%	324

“7·20”之前丁店水库正在进行除险加固工程施工,库水放至死水位以下1m,即159.4m,蓄水量不足30万 $\text{m}^3$ 。7月19日8时至21日12时,库水位从159.40m暴涨至178.81m,累计上涨19.41m,库容达到3303万 $\text{m}^3$ ,超过建库以来历史最高水位(174.55m)4.26m。最大入库流量集中在7月20日16时至17时19分区间,该时段水位上涨5.27m,库容从723万 $\text{m}^3$ 增至1780万 $\text{m}^3$ ,79min库容增加了1057万 $\text{m}^3$ ,折合平均入库流量2230 $\text{m}^3/\text{s}$ 。期间溢洪道未出流,仅泄洪洞下泄,最大泄流6.8 $\text{m}^3/\text{s}$ ,削峰达99.7%,水库的防洪作用发挥到了极致。

由于荥阳、新密交界山区也是极大地超过历史极值,而其径流主要通过荥阳索河向东汇入索须河,再汇入贾鲁河。索河上的丁店水库在“7·20”洪水中也为荥阳城区和郑州城区防洪起到了极大的作用。

尖岗水库自20日20时开始以64 $\text{m}^3/\text{s}$ 流量泄洪,拦蓄洪水3193万 $\text{m}^3$ ,入库洪峰流量1120 $\text{m}^3/\text{s}$ ,削峰率达94.3%,为下游错峰18.5h,有效保护了下游主城区

群众生命财产安全。常庄水库自20日11时20分开始以3 $\text{m}^3/\text{s}$ 流量泄洪,13时20分加大至30 $\text{m}^3/\text{s}$ ,15时30分溢洪道闸门以400 $\text{m}^3/\text{s}$ 的流量泄洪,拦蓄洪水2800万 $\text{m}^3$ ,入库洪峰流量达到865 $\text{m}^3/\text{s}$ ,超过水库百年设计洪峰流量(761 $\text{m}^3/\text{s}$ ),相应出库流量430 $\text{m}^3/\text{s}$ ,削峰率52%。

常庄、尖岗两座水库联合调度,错峰下泄,防洪作用明显。若无这两座水库,南水北调总干渠将遭受极大风险挑战,两水库上游洪峰在中原路桥上游叠加后,近2000 $\text{m}^3/\text{s}$ 的流量不仅西流湖段不能承受,下游贾鲁河也无法承受,将会给整个城市带来极大灾难。

## 6 结 语

水库承担着防洪、供水、灌溉等重要兴利减灾功能,是城市防洪的一道安全屏障。水库防汛安全坚持“以防为主、防抗救相结合”的方针,牢固树立“防”的意识,做好防汛“前半篇文章”,加强体制机制建设,综合施策,采取必要的工程和非工程措施,给洪水“出

路”,做到人与洪水和谐相处。利用水库调蓄洪水,削减上游来水洪峰,可以非常有效地减免下游洪灾损失。位于主城区上游或县城上游的水库,为城市安全拦下了洪水;位于南水北调总干渠左岸的水库,成为南水北调后续工程高质量发展中不可或缺的重要一环。

“7·20”洪水后,一些水库不同程度地受到损害。从水库的兴利作用与安全风险两方面入手,通过分析水库所处位置、大坝规模、蓄水量、削峰能力、主要功能等,统筹流域内上下游梯级水库、不同支流水库的错峰关系,水库与河道的协调作用等,收集“7·20”及以前水库作用和险情资料,评价水库下游保护对象的重要性,论证水库正常发挥作用对下游的有利因素和兴利作用,评估水库失事对下游的影响程度,对比利弊,权衡轻重,逐库提出评估意见,是必要和迫切的。◆

#### 参考文献

- [1] 方继斌. 关于给洪水“出路”做好防汛“前半篇文章”的思考[J]. 水利建设与管理,2021,41(8):78-80,84.

(上接第32页)内,表明该公式可以用来预测闸坝下游的局部冲刷深度。

### 3 结 语

准确预测闸坝式水电站下游局部冲刷坑的深度和形态,可以预判实际工程在运行过程中可能会出现冲刷问题,提前通过模型试验、数值模拟等手段优化建筑物体型、改变运行工况,有效防止实际工程中因过闸水流的冲刷而形成冲刷坑,有效避免工程因冲刷而造成破坏,从而保证电站和建筑物的安全。本文对目前7类冲刷公式进行了对比研究,分析了各类公式推导所依据的理论、适用条件以及各家公式的优缺点,并在前人研究的基础上推导出了一类闸坝下游局部冲刷的计算公式,该公式表明,闸坝下游局部冲刷深度的主要影响因素为水流的单宽流量和泥沙平均粒径,冲刷深度与单宽流量成正比,与泥沙平均粒径成反比,且单宽流量的影响要大于平均粒径的影响。并选取了其他7个工程的43组冲刷资料进行验证,结果吻合良好。因此,该公式可以用来很好地预测闸坝式工程下游的局部冲刷问题,有效避免因冲刷对电站造成破坏。◆

- [2] 张宇驰,周志维. 中小型水库大坝安全监测设施更新改造初探[J]. 水利建设与管理,2021,41(4):41-46.
- [3] 董永立,缪晓涓. 对郑州市雨水资源化利用的思考[J]. 水资源开发与管理,2021(7):19-23.
- [4] 张万友. 中型水库管理存在的问题及改进措施[J]. 清洗世界,2021,37(7):161-162.
- [5] 吕建红,罗小巧,仇健. 关于加强小型水库运行管理有效措施的探讨[J]. 浙江水利科技,2020,48(3):38-40.
- [6] 刘强. 中型水库测量工作实例分析[J]. 河南水利与南水北调,2021,50(7):67-69.
- [7] 张克铤. 水库管理存在的问题及对策[J]. 农村经济与科技,2019,303(14):30.
- [8] 董永立. 郑州市小型病险水库的现状及除险加固的对策[J]. 河南科技,2010(16):95-96.
- [9] 杨好周. 常庄水库超标洪水风险及应对措施[J]. 河南水利与南水北调,2020,49(11):12-13.
- [10] 李守业. 尖岗水库输泄水建筑物隐患处理措施设计[J]. 河南科技,2020,39(28):86-88.

#### 参考文献

- [1] 毛昶熙,周名德,柴恭纯. 闸坝工程水力学与设计管理[M]. 北京:中国水利水电出版社,1995.
- [2] 贾香香. 金鸡拦河闸闸下河床冲刷分析及对策研究[J]. 水资源开发与管理,2020(6):9-14.
- [3] 侯斌. 低水头航电枢纽泄水闸下游局部冲刷问题研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2010.
- [4] 陈琳,方华山. 整治建筑物周边局部冲刷速率研究方法初探[J]. 水运工程,2012(12):188-193.
- [5] 高翔. 闸坝式水电站下游局部冲刷及水力特性试验研究[D]. 西安:西北农林科技大学,2015.
- [6] 郭毅. 山区河流中低水头坝下局部冲刷深度公式及应用[D]. 重庆:重庆交通大学,2017.
- [7] 钱撼,郭志学,苏杨中. 堆积体作用下的河道最大冲刷深度[J]. 泥沙研究,2013(3):65-70.
- [8] 张根广,高改玉,田艳,等. 横丹水电站下游冲刷坑二维数值模拟[J]. 应用基础与工程科学学报,2017,25(6):1139-1146.
- [9] 李蕾. 黄丰水电站泄洪闸泄流三维数值模拟[D]. 西安:西北农林科技大学,2014.
- [10] 田贵智. 锁儿头水电站泄流及河床局部冲刷数值模拟[D]. 西安:西北农林科技大学,2013.
- [11] 刘向宇. 当卡水电站下游局部冲刷坑深度试验研究[D]. 西安:西北农林科技大学,2014.

# 2007—2020年引江济太环境效益分析及工程优化调度研究

殷鹏 华萍 胡晓雨

(江苏省水资源服务中心,江苏南京 210029)

**【摘要】** 为更好地发挥引江济太工程生态环境效益,统筹考虑防洪、供水、生态、环境等多目标调度需求,本文统计了2000—2020年引江济太入湖水量、水质情况,分析了引江济太与太湖总磷、蓝藻生物量之间的关系,并结合当前太湖引江济太管控规定,有针对性地提出了完善调度规则的建议。研究表明,引江济太入湖水质稳定达到Ⅲ类水标准;实施引江济太可有效降低湖体蓝藻生物量,同时不会增加湖体总磷浓度。

**【关键词】** 太湖;引江济太;水工程调度

中图分类号: TV213.4

文献标志码: B

文章编号: 2097-0528(2022)09-055-05

## Environmental benefit analysis and study on project optimal dispatching of Yangtze River to Taihu Lake Diversion Project from 2007 to 2020

YIN Peng, HUA Ping, HU Xiaoyu

(Jiangsu Water Resources Service Center, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** In order to give better play to the ecological and environmental benefits of Yangtze River to Taihu Lake Water Diversion Project and comprehensively consider the multi-objective dispatching needs of flood control, water supply, ecology and environment, etc., the water quantity and water quality of Yangtze River to Taihu Lake Water Diversion Project from 2007 to 2020 are counted in the paper. The relationship between Yangtze River to Taihu Lake Water Diversion Project and the total phosphorus and cyanobacteria biomass of Taihu Lake is analyzed. The control regulation of Taihu Lake in Yangtze River to Taihu Lake Water Diversion Project is combined to propose the suggestion of perfecting scheduling rules in a targeted mode. The research shows that the water into Taihu Lake is stable and reaches class III water standard in Yangtze River to Taihu Lake Water Diversion Project. The cyanobacteria biomass in the lake can be effectively reduced through implementing Yangtze River to Taihu Lake Water Diversion Project without increasing the total phosphorus concentration in the lake.

**Keywords:** Taihu Lake; Yangtze River to Taihu Lake Water Diversion Project; water project dispatching

引江济太通过望虞河常熟水利枢纽引长江水,由望亭水利枢纽入太湖,为增加流域水资源供给、保障水源地水质安全发挥了重要作用<sup>[1-3]</sup>。近期,有专家指出“长江总磷浓度要高于太湖湖体总磷浓度,引江济太可

收稿日期: 2021-10-28

基金项目: 江苏省重大水利科技项目(201906)

作者简介: 殷鹏(1987—),男,硕士,高级工程师,主要从事水资源保护和太湖治理研究。

能是造成 2016 年之后太湖总磷升高的原因之一”。本研究对 2007—2020 年引江济太环境效益进行了统计研究,并分析了引江济太工程调度管理中遇到的实际问题,提出了工程优化调度的建议,为更好地发挥引江济太工程效益,提供技术支撑。

## 1 引江济太及环湖入湖河流水质变化趋势分析

根据江苏省水文水资源勘测局监测数据,统计了 2007—2020 年引江济太期间望虞河入湖总磷、总氮浓度,并根据太湖流域管理局太湖健康状况报告中入湖水量及入湖氮磷通量计算了太湖环湖入湖河流总磷、总氮平均浓度,结果见图 1 和图 2。其中 2007—2020 年引江济太期间,望虞河望亭立交入湖水水质总体稳定,望虞河年均入湖总磷浓度在 0.101~0.149mg/L 之间波动,总体呈稳定的趋势,均达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) 河流 III 类水标准,平均浓度为 0.131mg/L;年均入湖总氮浓度在 1.91~2.74mg/L 之间波动,平均浓度为 2.36mg/L。太湖环湖入湖河流总磷平均浓度在 0.138~0.275mg/L 之间波动,为 III~IV 类水水质,浓度总体呈下降趋势,平均浓度为 0.193mg/L;年均入湖总氮浓度在 5.67~2.85mg/L 之间波动,平均浓度为 4.12mg/L。

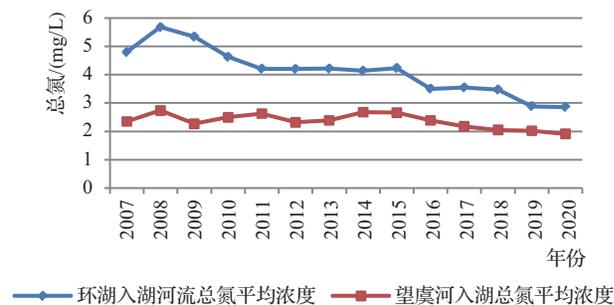


图 1 2007—2020 年望虞河及环湖河流入湖总氮平均浓度

通过上述两组数据比较分析,2007 年以来,历年望虞河入湖氮、磷浓度均低于太湖环湖入湖河流入湖氮磷浓度,其中总磷低 12.4%~53.8%,平均低 32.1%;总氮低 30.0%~57.4%,平均低 42.7%。

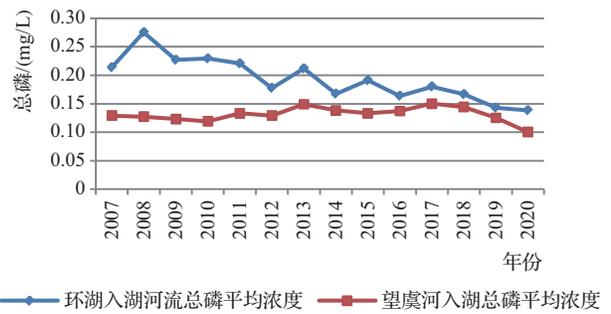


图 2 2007—2020 年望虞河及环湖河流入湖总磷平均浓度

## 2 太湖蓝藻生物量及湖泛统计分析

根据江苏省水文水资源勘测局太湖湖泛巡查数据,统计了太湖湖泛情况,并根据水利部太湖流域管理局数据统计了 2007—2020 年太湖逐月叶绿素 a 月均值,结果见图 3。结果显示,2007 年之后,太湖未发生大面积湖泛,但是共发生 96 次小范围水质异常(小范围湖泛),集中分布在 5—9 月,其中 5 月 16 次,占 16.7%,6 月 38 次,占 39.6%,7 月 27 次,占 28.1%,8 月 9 次,占 9.4%,9 月 6 次,占 6.3%;太湖 5—10 月,太湖叶绿素 a 浓度月均值均超过 0.03mg/L,其余月份均低于 0.03mg/L;5—10 月,共有 2 个峰值,分别为 5 月(0.051mg/L)、8 月(0.061mg/L)。

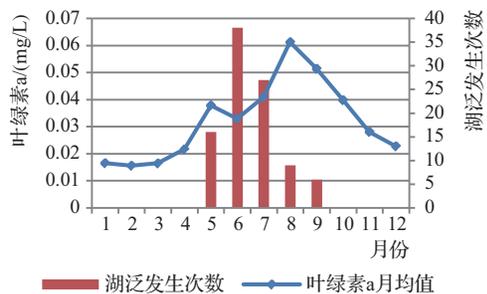


图 3 2007—2020 年太湖叶绿素 a 平均浓度及湖泛发生次数

江苏省政府印发了《江苏省太湖蓝藻暴发应急预案》,根据蓝藻水华面积、藻密度、叶绿素 a 浓度等指标,制定了 I 级、II 级、III 级预警标准,根据江苏省环境监测中心数据统计了 2020 年太湖蓝藻预警触发次数,见表 1。结果表明 2020 年太湖共触发蓝藻预警 21 次,其中触发 II 级预警条件 6 次,触发 III 级预警条件 16 次,分布在 5—10 月。

表 1 2020 年太湖蓝藻预警触发次数统计

月 份	5	6	7	8	9	10
Ⅲ级预警次数	0	1	2	2	6	4
Ⅱ级预警次数	1	0	1	1	2	1
合 计	1	1	3	3	8	5

通过上述 3 组数据分析,定义 5—10 月为太湖蓝藻湖泛高发期,1—4 月以及 11 月、12 月为太湖蓝藻湖泛非高发期。

### 3 引江济太入湖水量统计分析

#### 3.1 引江济太调度管理要求变化情况

2011 年 8 月,国家防汛抗旱总指挥部批复《太湖流域洪水与水量调度方案》,引入了调水限制水位的机制,调水限制水位与时间的关系见图 4,该机制主要目的是为了保障太湖防洪安全,在汛期来临之前,提前预降太湖水位,规定除突发水污染、水质恶化等事件外,原则上太湖水位超过调水限制水位后,不得实施引江济太<sup>[4]</sup>。

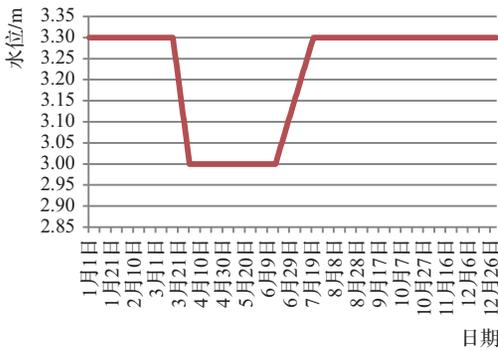


图 4 不同时间太湖调水限制水位

#### 3.2 引江济太入湖水量年际变化

根据江苏省水旱灾害防御调度指挥中心监测数据,统计了望虞河引江济太入湖水量情况,见图 5。结果表明 2007—2020 年望虞河引江济太累计入湖水量 105.2 亿 m<sup>3</sup>,年均引水入湖水量 7.52 亿 m<sup>3</sup>、年均引水入湖持续 99.6d,引水入湖水量与引水入湖持续时间成良好的正相关关系,引水期间,平均每天入湖水量 755 万 m<sup>3</sup>。

引江济太入湖水量总体呈下降趋势,调水限制水

位机制实行之前(2007—2011 年),年均引江济太入湖水量 10.6 亿 m<sup>3</sup>,调水限制水位机制实行之后(2012—2020 年),年均入湖水量降至 5.81 亿 m<sup>3</sup>,较之前减少 45.2%,其中 2015—2020 年,年均入湖水量进一步下降至 3.91 亿 m<sup>3</sup>。



图 5 2007—2020 年历年望虞河引江入湖水量及引水入湖时间

#### 3.3 太湖蓝藻湖泛非高发期入湖水量年际变化

2007—2020 年,太湖蓝藻湖泛非高发期(1—4 月以及 11 月、12 月)累计引水 60.5 亿 m<sup>3</sup>,该段时间年均引水 4.32 亿 m<sup>3</sup>,其中 2007—2011 年年均引水 4.45 亿 m<sup>3</sup>,2012—2020 年年均引水 4.25 亿 m<sup>3</sup>,历年具体数据见图 6。调水限制水位机制实行之后,太湖蓝藻、湖泛非高发期入湖水量仅比之前低 4.5%,主要是由于太湖蓝藻、湖泛非高发期同时也是一年当中的非汛期,这段时间太湖流域降雨偏少,水位偏低,调水限制水位的机制引入后,并没有对该段时间的引水产生明显影响。

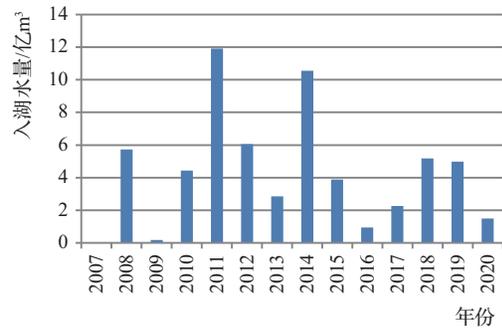


图 6 2007—2020 年历年太湖蓝藻湖泛非高发期引江济太入湖水量

#### 3.4 太湖蓝藻湖泛高发期入湖水量年际变化

2007—2020 年,太湖蓝藻湖泛高发期(5—10 月)

累计引水 44.8 亿  $m^3$ , 该段时间年均引水 3.20 亿  $m^3$ , 其中 2007—2011 年年均引水 6.14 亿  $m^3$ , 2012—2020 年年均引水 1.56 亿  $m^3$ , 历年具体数据见图 7。调水限制水位机制实行之后, 太湖蓝藻湖泛高发期引水量较之前大幅度减少 74.6%。主要原因是蓝藻水华及湖泛高发期也是一年中的主汛期, 加之这段时间太湖水位偏高, 以及 5 月 1 日至 7 月 19 日这段时间太湖调水限制水位偏低, 造成太湖调水限制水位机制引入后, 蓝藻水华及湖泛高发期引江入湖水量大幅度减少。

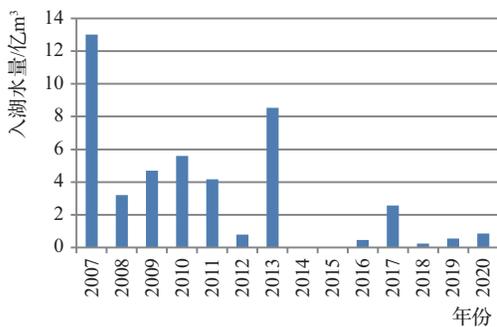


图 7 2007—2020 年历年太湖蓝藻湖泛高发期引江济太入湖水量

通过上述分析可以得出, 调水限制水位机制实行之后, 对太湖蓝藻湖泛非高发期引江济太没有产生明显影响, 但是对太湖蓝藻湖泛高发期影响制约明显, 调水限制水位机制实行前后引江济太入湖水量对比情况见图 8。

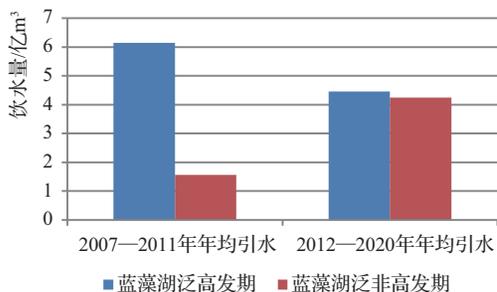


图 8 调水限制水位机制实行前后引江济太入湖水量变化

#### 4 调水限制水位机制实行后水污染、水质恶化等突发事件条款的实际运用

《太湖流域洪水与水量调度方案》实行之前, 2007—2011 年, 在蓝藻水华高峰期, 在调水入湖时段每

年平均有 62.8d 太湖实际水位超过了之后规定的调水限制水位, 2011 年之后, 在调水入湖时段每年平均只有 3.5d 出现太湖实际水位超过调水限制水位的情况<sup>[5-6]</sup>。

这些调水入湖的时段太湖实际水位超过调水限制水位的情况集中发生在 2012 年、2017 年、2020 年, 其中 2012 年 5 月贡湖湾发生了 3 起小范围水质异常(小范围湖泛), 威胁水源地供水安全, 期间引水 16d, 其中超调水限制水位 3d; 2020 年 5 月、6 月贡湖湾共发生 2 起小范围水质异常, 期间调水 13d, 其中超调水限制水位 7d; 2017 年为 2007 年以来蓝藻水华最严重的一年, 卫片监测到的蓝藻水华总面积、最大面积都是 2008 年以来最大的一次, 5—9 月共发生小范围水质异常 17 次, 远超年均发生次数(7.4 次), 期间调水 38d, 其中超调水限制水位 25d, 为 2011 年之后最多的一次<sup>[7-8]</sup>。

统计太湖蓝藻湖泛高发期引江调水期间实际水位超调水限制水位最高高度情况, 2011 年之前最高为 0.26m, 发生在 2009 年; 2011 年之后最高为 0.17m, 发生在 2017 年。历年具体情况见图 9。

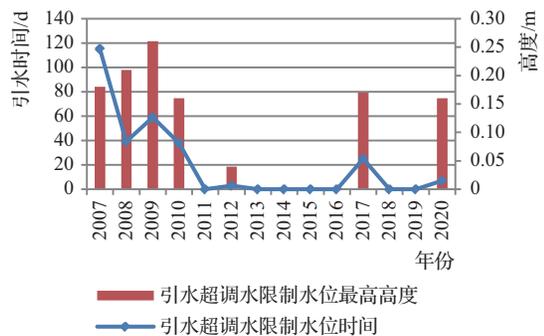


图 9 太湖蓝藻湖泛高发期超调水限制水位引水时间及最大高度

综上所述, 2011 年《太湖流域洪水与水量调度方案》执行之后, 仅在贡湖湾发生小范围水质异常, 严重威胁水源地供水安全的条件下, 以及太湖蓝藻水华及小范围水质异常(小范围湖泛)异常严重的 2017 年, 实施过超调水限制水位引江济太入湖, 时间总计只有 35d。

#### 5 引江济太入湖水量与太湖水质之间的关系

##### 5.1 引江济太入湖水量与太湖总磷浓度的关系

利用线性趋势法分析了 2007—2020 年历年蓝藻

湖泛高发期及非高发期引江济太入湖水量与同时期太湖总磷浓度之间的关系,结果见图 10 和图 11,结果表明蓝藻湖泛高发期及非高发期引江济太入湖水量的增加或降低均不会明显影响太湖总磷浓度。

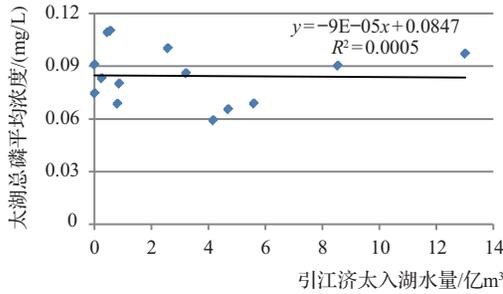


图 10 2007—2020 年历年太湖蓝藻湖泛高发期引江济太入湖水量与太湖总磷浓度的关系

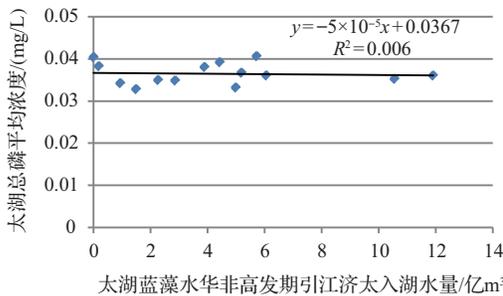


图 11 2007—2020 年历年太湖蓝藻湖泛非高发期引江济太入湖水量与太湖总磷浓度的关系

### 5.2 引江济太入湖水量与太湖叶绿素 a 浓度的关系

利用线性趋势法分析了 2007—2020 年历年蓝藻湖泛高发期及非高发期引江济太入湖水量与同时期太湖叶绿素 a 浓度之间的关系,见图 12 和图 13,结果表明蓝藻湖泛高发期及非高发期引江济太入湖水量均与同时期太湖叶绿素 a 浓度成负相关关系。

同时进行了统计假设检验,得出蓝藻湖泛高发期及非高发期引江济太入湖水量与同时期太湖叶绿素 a 浓度之间,  $P$  值分别为 0.00469 和 0.00012,均小于 0.01,说明 2007—2020 年历年太湖蓝藻湖泛非高发期引江济太入湖水量与太湖叶绿素 a 浓度的关系高度显著。

综上所述说明,增加引江济太入湖水量有利于降

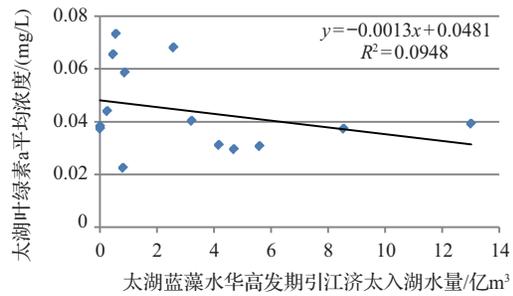


图 12 2007—2020 年历年太湖蓝藻湖泛高发期引江济太入湖水量与太湖叶绿素 a 浓度的关系

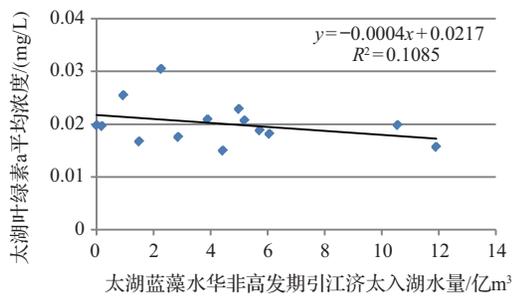


图 13 2007—2020 年历年太湖蓝藻湖泛非高发期引江济太入湖水量与太湖叶绿素 a 浓度的关系

低湖体蓝藻生物量。

## 6 结 论

a. 2007—2020 年,历年望虞河引江入湖总磷、总氮浓度均低于当年太湖入湖河流总磷、总氮平均浓度,其中总磷浓度均达到河流Ⅲ类水标准。

b. 5—10 月为蓝藻、湖泛高发易发期,根据 2007—2020 年数据分析,6 月为小范围水质异常(小范围湖泛)发生最多的月份,共计 38 次,8 月为太湖平均叶绿素浓度最高的月份,平均浓度为 0.061mg/L。

c. 2007—2020 年太湖引江济太水量总体呈下降趋势,主要原因是 2011 年 8 月《太湖流域洪水与水量调度方案》执行之后,蓝藻、湖泛高发易发期(5—10 月)引江济太明显受限,2012—2020 年蓝藻、湖泛高发易发期平均年引水 1.56 亿  $m^3$ ,比 2007—2011 年年均引水量下降 74.6%。

d. 2012—2020 年,历年蓝藻、湖泛高发易发期(5—10 月),仅在发生小范围水质异常(小范围湖泛)威胁水源地供水安全的情况下,实施 (下转第 69 页)

# 应用大口径管道截流老城区溢流污水方案研究

马方凯<sup>1</sup> 王雪健<sup>2</sup> 高兆波<sup>1</sup>

- (1. 长江勘测规划设计研究有限责任公司,湖北 武汉 430010;
2. 长江生态环保集团有限公司,湖北 武汉 430062)

**【摘要】** 在城市地下敷设大口径管道截流城市溢流污水,是解决老城区地下管线密集、雨污分流困难的有效措施。本文以黄冈市遗爱湖片区为目标片区,通过收集区域资料,利用 InfoWorks ICM 建立模型,模拟分析 2m、3m 和 4m 三种大口径管道的截污能力,结果发现,三种口径管道对溢流水量的截流率分别为 46%、57% 和 58%,对 COD 的截留率分别为 67%、77% 和 81%;此外,结合 RTC 智能调度,进一步分析小雨、中雨和大雨工况下大口径管道的截污效果,结果表明,小雨情况下可以实现零溢流,中雨和大雨工况下可以有效减少溢流水量。综上所述,大口径管道截污方案是治理城市溢流污染的有效方式。

**【关键词】** 大口径管道;溢流污染;InfoWorks ICM 模型

中图分类号: X524

文献标志码: B

文章编号: 2097-0528(2022)09-060-10

## Study on intercepting overflowing sewage in old city by using large diameter pipelines

MA Fangkai<sup>1</sup>, WANG Xuejian<sup>2</sup>, GAO Zhaobo<sup>1,\*</sup>

- (1. Yangtze River Survey Planning and Design Research Co., Ltd., Wuhan 430010, China;
2. Yangtze River Ecology and Environment Group Co., Ltd., Wuhan 430062, China)

**Abstract:** It is an effective measure to solve the difficulties of dense underground pipelines as well as rain and sewage diversion in old urban areas by laying large diameter underground pipelines to intercept urban overflow sewage. The sewage interception capacity of three large diameter pipelines, with the diameter of 2m, 3m and 4m are analyzed based on the collected regional data and the InfoWorks ICM model with Yi'ai Lake in Huanggang as the target area. The result shows that the flow interception rates of pipelines with three diameters are 46%, 57% and 58% respectively. The interception rates of COD are 67%, 77% and 81% respectively. In addition, the interception effect of large-diameter pipelines under 3 raining situations (light rain, moderate rain and heavy rain) are further analyzed by combining with RTC intelligent scheduling. The result shows that zero overflow can be achieved in light rain situation and the amount of overflow water can be effectively reduced in moderate and heavy rain situations. In summary, it is an effective way to control urban overflow pollution by using large diameter pipelines.

**Keywords:** large diameter pipeline; overflow pollution; InfoWorks ICM model

收稿日期: 2021-10-11

作者简介: 马方凯(1983—),男,博士,高级工程师,主要从事城市水生态环境设计工作。

经济的高速发展推动城镇化进程加快,城市的不断扩张带来诸多排水问题,如雨水及污水管网不足、雨季城市内涝严重和溢流污染频繁出现等。地表的初期雨水和溢流的污水汇入河流、湖泊等水体后造成水体富营养化甚至黑臭。解决问题的重要方法之一是进行雨污分流改造,然而老城区地下管线密集,雨污分流改造涉及千家万户,改造难度大,改造费用高昂,施工周期制约条件多。

针对这一问题,目前国内外各大城市采取排水深隧技术<sup>[1]</sup>,通过排水深隧技术在城市深层地下空间建设大型排水隧道解决排水问题。如美国芝加哥深隧工程、新加坡深隧工程和香港深隧工程等<sup>[2,3]</sup>。此外,随着城市建设用地面积的不断扩大,雨水地面径流的汇水面积增大;城市用地紧张,硬化地面的比例提高,综合径流系数随之提高<sup>[4]</sup>。这些均导致雨水管道的设计流量逐渐增大,相应地管道的口径需要增大,目前大口径排水管道越来越多地在城市排水系统中应用<sup>[5]</sup>。

借鉴大口径管道排水应用增多的趋势,对城区(尤其是地下管线复杂的老城区)排水系统的改造提出多

功能大口径管道方案,近期拦截 CSO 溢流污染,远期待雨污水分流后,可用作初雨收集管。多功能大口径管道方案可有效节约地上空间、规避地下管道障碍、避免现状管线大范围拆改、兼顾治理 CSO 溢流污染和面源污染。

本文以黄冈市遗爱湖区域排水管网改造为例,结合遗爱湖区域排水和污染现状,基于模型模拟和不同口径管道方案比选,结合多种雨水工况模拟,详细论证多功能大口径管道方案的可行性及有效性。

## 1 研究区域概况

黄冈市位于湖北省东部、长江中游北岸、大别山南麓,是鄂东的重要门户。遗爱湖位于长江中游北岸,湖北省黄冈市城区中东部,位于东经 114°53'7" ~ 114°55'18"、北纬 30°25'45" ~ 30°27'39"之间,由东湖、西湖、菱角湖组成,湖泊水面面积 3.16 km<sup>2</sup>。

本文研究范围为黄冈市环遗爱湖区域现状合流制排水体制的区域,研究区域范围见图 1,北至中环路、

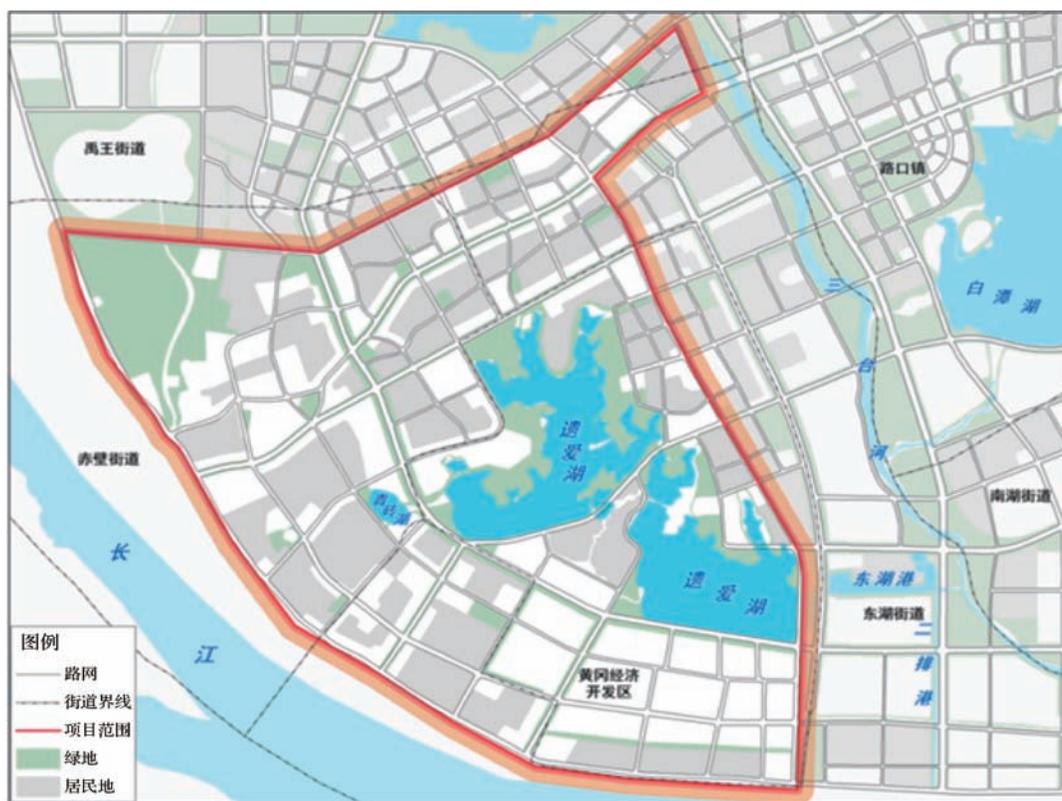


图 1 研究区域范围

西南至长江大堤、东至新港大道以及三台河,总面积 25.18km<sup>2</sup>,其中水域面积 3.25km<sup>2</sup>(遗爱湖 3.16km<sup>2</sup>、青砖湖 0.09km<sup>2</sup>),陆域面积 21.93km<sup>2</sup>(绿地 3.16km<sup>2</sup>、工业用地 3.05km<sup>2</sup>、居住用地 15.72km<sup>2</sup>)。

遗爱湖原为城郊的荒野湖泊,随着城市急剧向东扩张,逐步转变为城市中心城区内湖,同时也变成了承接大量城市污水的“聚污盆”,水质恶化为劣 V 类。从 2007 年起,黄冈市正式启动遗爱湖水环境治理工程,先后实施了沿湖截污、退渔还湖、底泥清淤、生态修复等工程,一定程度上削减了入湖污染负荷,但遗爱湖水质并未出现明显好转,现状水质仍为劣 V 类,因此遗爱湖迫切需要治理。

遗爱湖片区管网建设缺乏系统性,存在大管接小管、部分道路局部路段有多条排水管并行、管径都比较小的现象;地下排水管网建设年代较为久远,地下管线无详细准确的档案资料。同时,地下管线错接、混接、漏接等现象普遍存在,部分地下管线年久失修,破损、

淤塞严重,且地下管线庞杂。

本文研究范围河岸线总长度超过 29km,排口分散,且部分排口位于河道水面以下,合流区排口是否有效拦截溢流污染,分流区排口是否有效拦截初雨,直接决定了遗爱湖治理的效果。同时,早期合流体制的建设体制,导致从小区源头起即存在雨污水混接,剥离合流混接,治理工作量巨大。如何在短期内,提高截污系统的效能,控制住更多的污染物,为湖泊治理创造治理的基础条件,是本文研究的重点。

## 2 总体方案

根据《黄冈市海绵城市专项规划(2016—2030)》《黄冈市老城区雨、污水分流专项规划》(2019.5)及《黄冈市中心城区污水专项规划(2014—2030)》要求,确定本研究范围内旱季污水、合流溢流污染以及城市面源控制目标,见表 1。

表 1 研究目标

类别	总体控制指标	规划指标要求(2020年)	本工程指标	控制要求
海绵指标	年径流总量控制率	中心城区 73%,20% 建成区达到目标要求	≥75%	强制性
径流污染消减率	中心城区 55%,20% 建成区达到目标要求	中心城区 55%,80% 建成区达到目标要求	≥60%	引导性
合流制溢流频率	10mm 以内降雨无溢流	引导性	27.8mm 以内降雨无溢流	引导性
水环境	遗爱湖水质	近期Ⅳ类标准 远期Ⅲ类标准	2022 年底Ⅳ类标准,2024 年遗爱湖大部分水域向地表水Ⅲ类转变	强制性

在当前全面实施雨污分流难度大,且建设初雨调蓄池用地受限的情势下,应用大口径管道截流、调蓄、运输并处理溢流污水,成为近期改善遗爱湖水环境的一种有效选择。通过测算片区污水总量,梳理污水系统布局、污水处理设施,明确面源污染分区及径流控制标准并结合遗爱湖水环境容量进行规划。通过调查、模拟论证合流制区域截流倍数、CSO 调蓄处理时间,进而提出 CSO 调蓄、收集、处理方案,确定研究区的截污总量及 CSO 处理站的规模。结合截流、调蓄及处理设施布局,并与雨水径流污染控制、内涝治理衔接,综合考虑 CSO 处理站的处理工艺及效能。总体方案思路如图 2 所示。

## 3 模型构建

为了模拟、分析并指导大口径管道设施截流的实际效果,通过 InfoWorks ICM 软件建立模型,验证方案合流制溢流控制的实际效果和可行性。InfoWorks ICM 是英国 Wallingford 公司研发的排水模型软件,是城市排水领域内采用最为广泛的模拟软件之一。InfoWorks ICM 软件可利用计算机构建排水管网系统水文水力模型,可以精确、细致地模拟暴雨系统、污水系统、合流制排水系统以及地表漫流系统等。本研究建模的技术路线如图 3 所示。

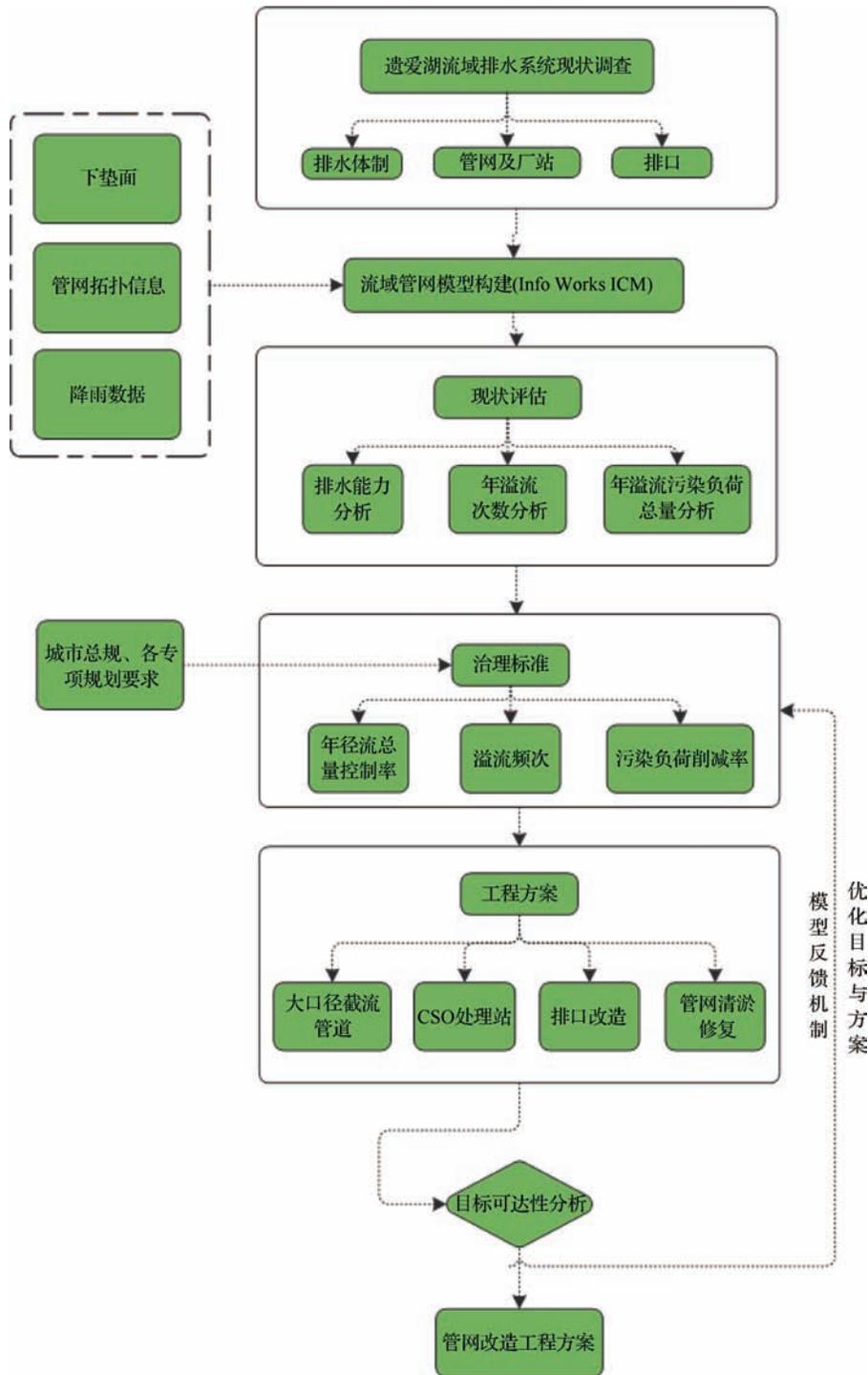


图2 总体方案思路

本文以黄冈市中心城区污水专项规划中的老城区、城西片区现状污水规划图作为基础,以黄冈市老城区雨、污分流专项规划中排水系统现状图作为参考,整理管网数据,对相关缺失的数据进行概化处理。本文采用黄冈市2012年全年每5min降雨量数据;以黄冈

市老城区雨、污分流专项规划中遗爱湖片区各系统用地分布图作为下垫面数据参考;由黄冈市中心城区污水专项规划中可知,老城区近期平均日污水量为3.7万 $m^3$ ,老城区近期人口为17.2万,以此预测旱季污水水量数据。

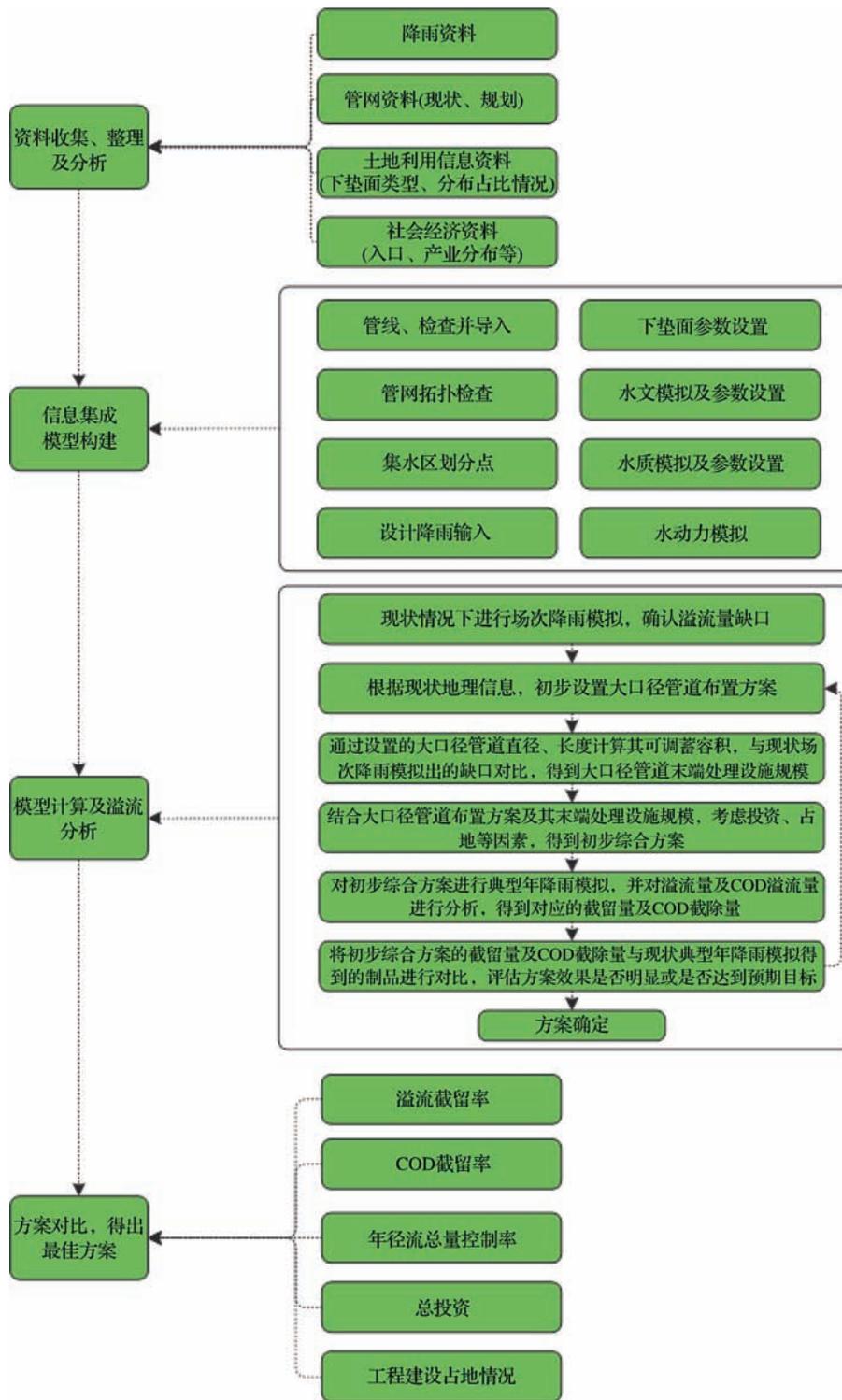


图3 InfoWorks ICM 建模技术路线

基于已获得的数据,在划分排水分区的基础上建立排水系统水文水力模型,进行一维模拟分析,评估管网溢流量及 COD 溢流量。模型区排水管道总长 89337.1m,包括截流管道 15.11km,市政合流制管道

74.23km,有检查井 291 个。模型区的管网布置如图 4 所示。Infoworks ICM 软件中采用分布式水文模型方法计算集水区水量,通过系统划分方式,划分排水模型的子集水区共计 264 块,其中合流制集水区 233 块,共

15.83km<sup>2</sup>;分流制集水区31块,共3.32km<sup>2</sup>。本研究表面产流分为两种:一种是硬化面积,主要是路面和屋面,且这部分面积占了大部分;另外一种为非硬化面积,主要是道路绿化以及一些植被草坪。采用固定径流系数产流模型,分别模拟不同下垫面的扣损和产流特征;采用SWMM模型非线性水库法模拟不同集水区的地形坡度下的汇流特征,进行各集水区的动态汇流模拟。典型场次降雨总雨量采用27.8mm,设计典型场次降雨雨量分配参考2012年7月12日全天24h雨型,典型年降雨总雨量采用2012年全年每5min降雨数据。关于水动力计算,InfoWorks ICM中管道明渠流的模拟采用完全求解的圣维南方程,对明渠超负荷的模

拟采用Preissmann Slot方法,以仿真各种复杂的水利情况。

#### 4 大口径方案模型分析比选

利用典型场次降雨,结合现状管网,模拟计算现状溢流量和COD溢流量,分析确认现状溢流缺口,见表2。

表2 典型场次降雨现状溢流量

项目名	遗爱清风一号港排口	东坡外滩排口	曹家畷排口	伊利排口	总计
溢流量/m <sup>3</sup>	46705	29853	31680	226548	334786
COD溢流量/kg	2656	1691	1809	19860	26016

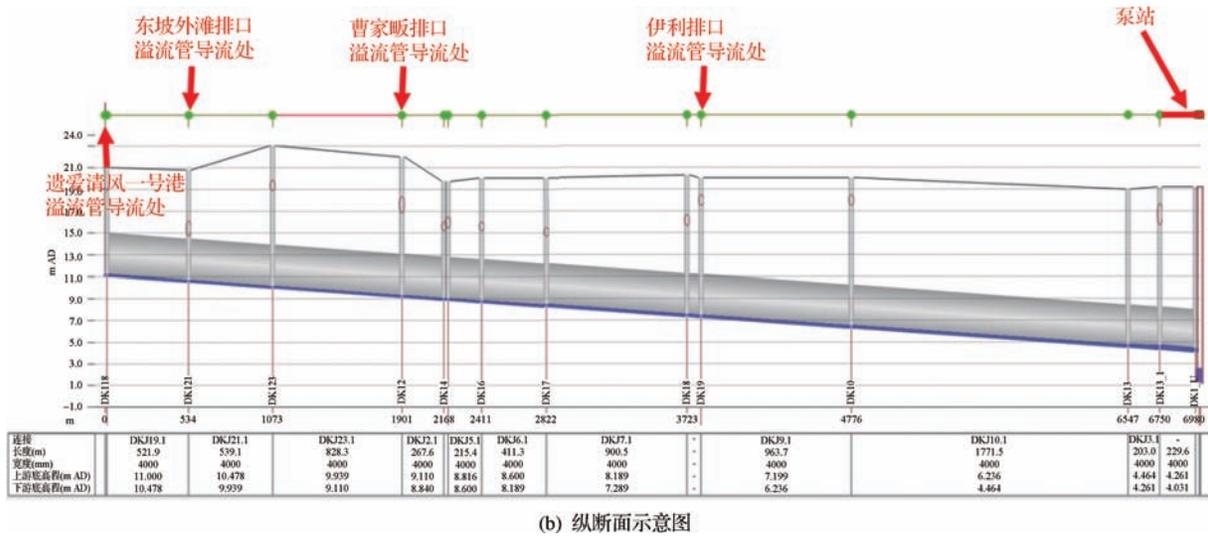
大口径管道布置方式都以遗爱清风一号港排口为起点,依次通过导流管将遗爱清风一号港排口,东坡外滩排口、曹家畷排口以及伊利排口的溢流管与大口径管道相连,保证溢流管的水流先进入大口径管道,待大口径管道超负荷运行后,再发生溢流。大口径管道末端通过一个恒定流量的泵站与末端处理设施相连,处理过的水外排。大口径管道布置方式平面示意图及纵断面示意图如图5所示,此外以曹家畷排口为例解释其溢流管与现状截流管、大口径管道的连接关系,如图6所示。



图4 模型区管网布置



(a) 平面示意图



(b) 纵断面示意图

图5 大口径管道布置方式平面示意图及大口径管道布置方式纵断面示意图

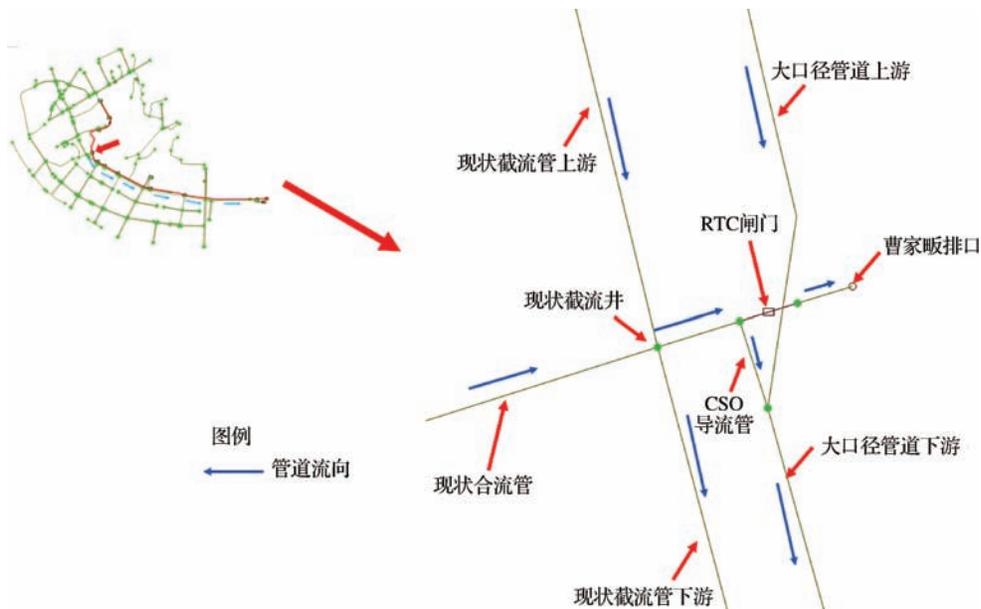


图6 溢流管与现状截流管、大口径管道的连接方式(曹家畷排口)

通过实地踏勘,整理资料及观察卫星地图,本模型和4m。通过各方案大口径管道调蓄容积,对比现状溢流缺口,确定大口径管道末端处理设施规模,见表3。

表3 方案估算

方案名称	截流管管径/mm	大口径断面面积/m <sup>2</sup>	大口径长度/m	大口径调蓄容积/m <sup>3</sup>	每米造价/(万/m)	大口径造价/亿	调蓄容积缺口/m <sup>3</sup>	末端处理设施规模/(t/d)	末端处理设施造价/(万/t)	末端处理设施造价/亿	总投资/亿
大口径管径2m	2000	3.140	7700	20410.0	2	1.3	314375.56	200000	0.15	3.00	4.6
大口径管径3m	3000	7.065	7700	45922.5	3	1.95	288863.06	150000	0.15	2.25	4.5
大口径管径4m	4000	12.560	7700	81640.0	4	2.60	253145.66	100000	0.15	1.50	4.4

利用典型年降雨,结合各方案管网模型,模拟计算 除率,综合方案估算,选取最佳方案,见表4。  
各方案溢流量和 COD 溢流量,分析截流率和 COD 截

表 4 各方案截流率

方 案	评估类别	遗爱清风一号港排口	东坡外滩排口	曹家畷排口	伊利排口	总 计	截流率/%
现 状	溢流量/m <sup>3</sup>	1248189	660460	916440	9918642	12743731	—
大口径 2m		132050	1176433	279808	5293324	6881615	46
大口径 3m		85453	889071	214452	4261681	5450657	57
大口径 4m		64722	826006	202300	4226704	5319732	58

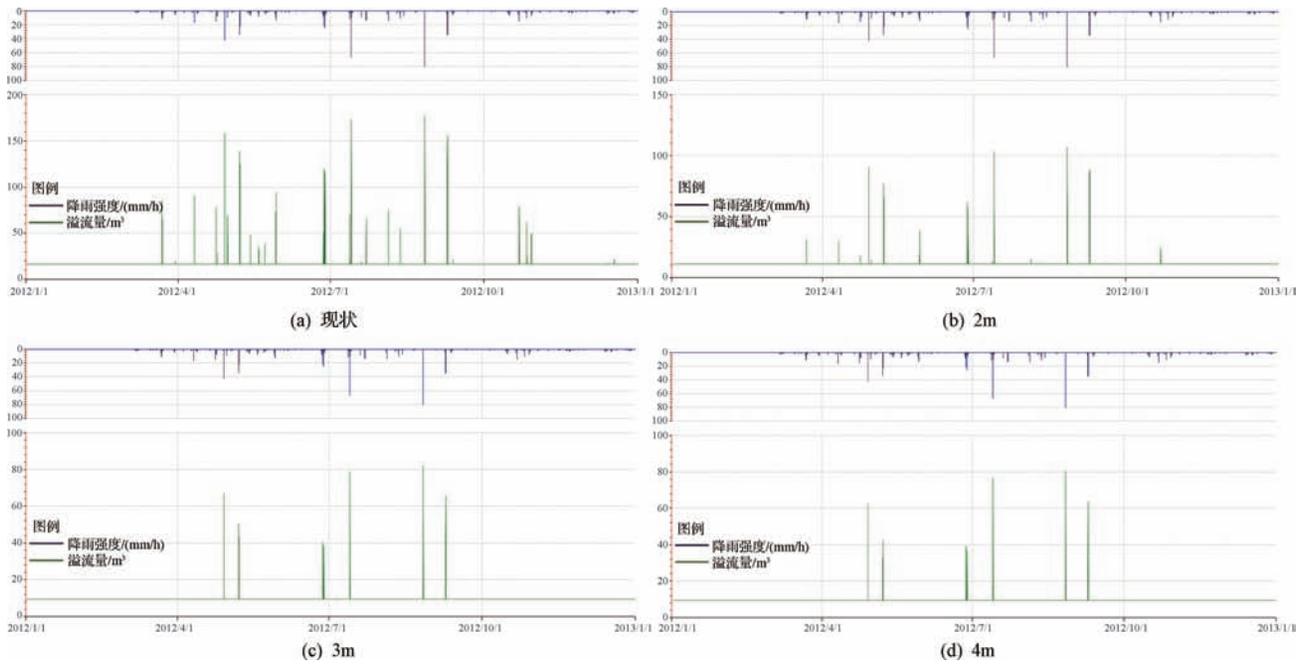


图 7 曹家畷排口及大口径管径全年溢流量

由图 7 可知,三种方案中曹家畷排口的年溢流量 减少,大口径管道管径 4m 的方案年溢流截流率最大。相对现状情况都有降低,同时在溢流频次上也会有所

表 5 各方案 COD 截除率

方 案	评估类别	遗爱清风一号港排口	东坡外滩排口	曹家畷排口	伊利排口	总 计	COD 截除率/%
现 状	COD 溢流量/ kg	387903	225734	192013	2287848	3093498	—
大口径 2m		4503	138252	13035	865065	1020854	67
大口径 3m		3019	84432	9359	606357	703168	77
大口径 4m		2455	61554	8142	515635	587786	81

由图 8 可知,三种方案中曹家畷排口的 COD 年溢流量相对现状情况都有降低,同时在溢流频次上也会有所减少,大口径管径 4m 的方案尤为明显。由表 5 可知,四个方案中,大口径管径 4m 的方案 COD 年溢流截除率最大。

综合各方案估算、截流率以及 COD 截除率,及工程经济性、施工的难易程度,得出大口径管径为 3.0 ~ 3.5m、末端处理设施日处理量为 10 万 m<sup>3</sup>/d 的方案是最优方案,溢流量截流率为 52%,COD 溢流量截除率为 73%,效果显著。

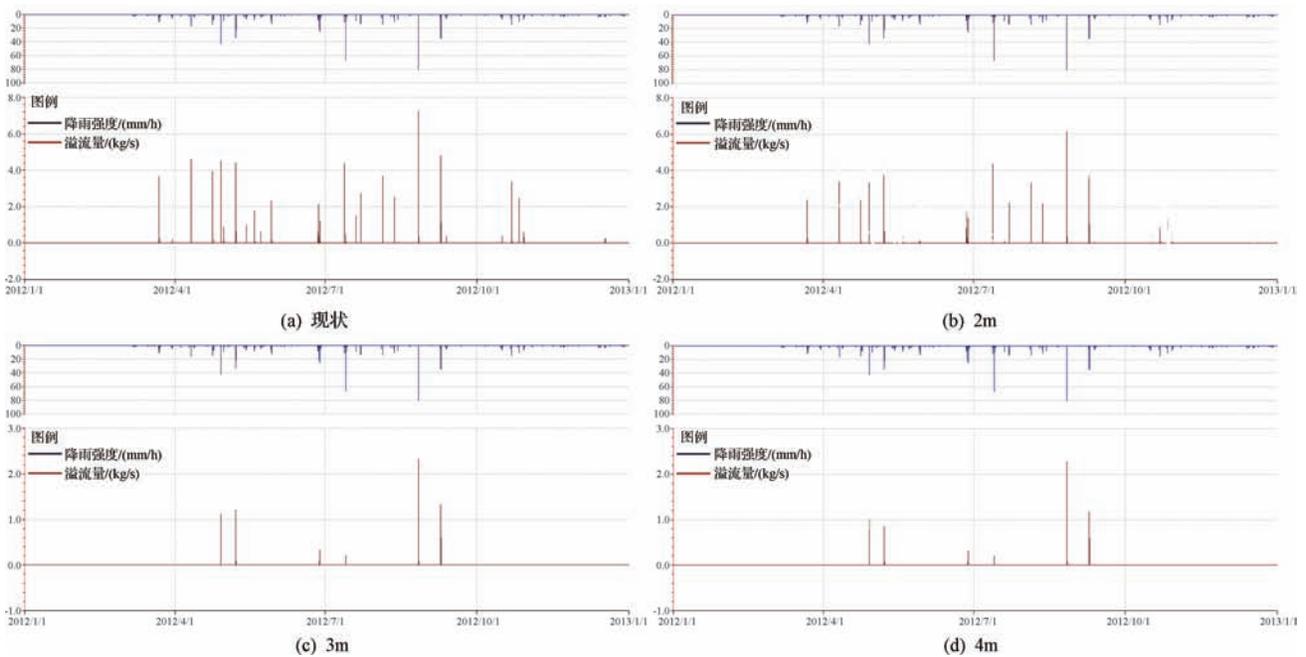


图8 曹家畷排口及大口径管径方案曹家畷排溢流量

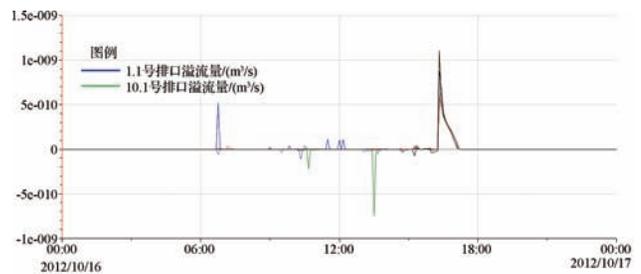
### 5 溢流控制效果评价

在新建大口径管道和末端合流制溢流污水处理设施等基础设施的基础上,充分挖掘已建和新建设施潜力,以不增加新的内涝风险点为原则,利用管网自身调蓄容积和末端在线处理设施能力,采用 RTC (real time control) 智能调度,进一步提高溢流量截流率和年径流总量控制率 15% 以上。通过设置小雨、中雨以及大雨工况来评价大口径管道方案的控制溢流能力。

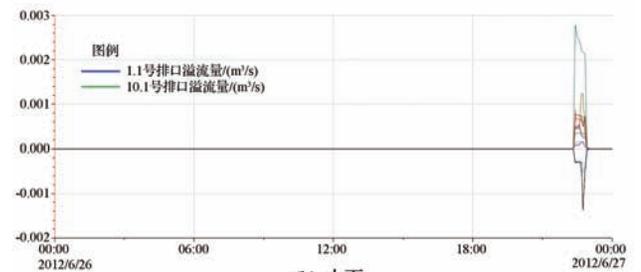
小雨、中雨以及大雨工况是通过将 2012 年全年每 5min 降雨整合为全年每日降雨,对比优化方案全年降雨结果文件,筛选出完全不发生溢流的最大日降雨数据作为小雨工况,各排口完全溢流的最小日降雨数据作为大雨工况,以及在两者间选取不完全发生溢流的日降雨数据作为中雨工况。

经过筛选后,小雨工况为日降雨量不大于 23.9mm,最大降雨强度不大于 6.48mm/h;中雨工况为日降雨量大于 23.9mm 小于 60.2mm,最大降雨强度大于 6.48mm/h 小于 11.37mm/h;大雨工况为日降雨量不小于 60.2mm,最大降雨强度不小于 11.37mm/h。经模拟分析后发现:小雨工况选用日降雨量为 23.9mm

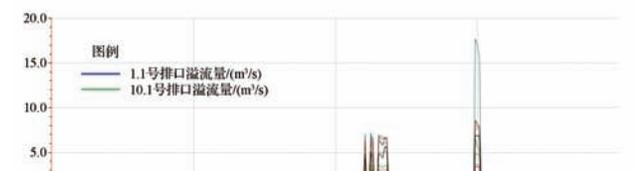
的降雨数据进行模拟,结果显示各排口溢流量为零,不会发生溢流;中雨工况选用日降雨量为 42mm 的降雨数据进行模拟,结果显示部分排口发生少量溢流,少数排口不发生溢流;溢流排口溢流量为 0.17 ~ 4.29m<sup>3</sup>,总溢流量为 11.55m<sup>3</sup>;大雨工况选用日降雨量为 60.2mm 的降雨数据进行模拟,结果显示各排口都会发生溢流;溢流排口溢流量为 74.63 ~ 30582.1m<sup>3</sup>,总溢流量为 176756.48m<sup>3</sup>。三种情形工况结果如图 9 所示。



(a) 小雨



(b) 中雨



### 大雨工况下溢流情况

上述模型模拟结果表明,大口径管道结合 RTC 智能实时调度,可使遗爱湖片区年径流总量控制率为 75%,径流污染削减率为 60%。待远期遗爱湖污水处理厂扩建至 15 万  $\text{m}^3/\text{d}$  后,遗爱湖老城区的污水处理规模可提升为 5 万  $\text{m}^3/\text{d}$ ,该方案效果还可进一步提升,COD 溢流截除率为 81%,年径流总量控制率为 77%,径流污染削减率为 62%。

## 6 结 论

本文以黄冈市遗爱湖片区水环境治理为例,结合遗爱湖区域排水和污染现状,基于模型模拟,通过设置不同工况模拟分析,论证了大口径管道截流方案的可行性,表明大口径管道截流在城市水环境治理中,尤其

(上接第 59 页)了超调水限制水位引江济太入湖,累计入湖时间仅为 35d。

e. 引江济太水量增加并没有增加太湖湖体总磷浓度,但有利于降低湖体蓝藻生物量,可对确保太湖水源地水源安全发挥关键作用。

## 7 建 议

《太湖流域洪水与水量调度方案》确有提出在突发水污染、水质恶化等事件时,可以在超调水限制水位的条件下实施引江济太,但是并没有对何为水污染、水质恶化突发事件进行量化。2021 年,生态环境部修订了重点湖库水华预警工作机制,明确了 I 级(红色)、II 级(橙色)和 III 级(黄色)预警标准,建议参照该标准,对《太湖流域洪水与水量调度方案》中“水污染、水质恶化等突发事件”这一条款进行量化明确,更好地发挥引江济太在湖泛及蓝藻水华防控方面的功能效益。◆

对老城区管道改造中具有良好的效果,同时大口管道截流方案具有较高经济性,在市政工程中具有良好的应用前景。◆

### 参考文献

- [1] 黎晓林,刘建华. 大口径排水管道优化设计研究[J]. 中国给水排水,2013,29(13):60-68.
- [2] 袁煦,郑全兴. 长距离大口径自流管道施工关键技术探讨[J]. 中国给水排水,2019(20):114-117.
- [3] 张冲博,阮超,张延军,等. 大口径 CWF 管道在排水深隧二衬结构中的应用分析[J]. 安徽建筑,2020,27(12):108-110.
- [4] 吉大昌. 大口径管道在市政工程中的应用[J]. 山西建筑,2016,42(34):127-128.
- [5] 郭伟,陈波,吴纪东. 大口径钢筋混凝土排水管道施工新工艺:半开槽顶管施工技术介绍[J]. 给水排水,2012,48(12):100-103.

### 参考文献

- [1] 史益鲜. 望亭水利枢纽防御超标洪水运行的实践与思考[J]. 水利建设与管理,2021,41(7):67-71.
- [2] 李五勤,王彤彤. 浅谈调水工程管理制度体系的建立和完善[J]. 水利建设与管理,2020,40(11):46-49.
- [3] 华焯. 无锡市水生态文明城市建设试点的实践与思考[J]. 水资源开发与管理,2019(7):73-77.
- [4] 王遥,陈雨清,戴晓焯. 重点区域实时监控工程在太湖流域河湖管理工作中的实践与思考[J]. 水资源开发与管理,2021(2):80-84.
- [5] 朱喜,朱云. 大数据结合治理太湖消除蓝藻暴发实践的思路[J]. 水资源开发与管理,2020(1):70-77.
- [6] 殷鹏,张建华. 江苏省水资源保护实践与对策研究[J]. 治淮,2019(12):13-14.
- [7] 贾更华,戴晶晶,吴亚男,等. 新发展阶段太湖治理与保护关键问题探讨[J]. 中国水利,2021(5):24-27.
- [8] 张小稳,陈光育,蒋立新. 构建苏南地区水情调度一体化体系的设想[J]. 水资源开发与管理,2020(12):14-19.

# 调水引流改善平原河网水质分析及 优化调度方案研究

何妙妙<sup>1</sup> 司黎晶<sup>2</sup> 王 姣<sup>3</sup>

- (1. 苏州市吴中区水务局, 江苏 苏州 215104;  
2. 镇江市工程勘测设计研究院, 江苏 镇江 212003;  
3. 苏州市相城区漕湖街道建设管理办公室, 江苏 苏州 215011)

**【摘要】** 为科学定量地评估引调水工程对平原河网水质的改善效果, 本文以苏州市吴中区为例, 构建了平原河网水质评价模型, 模拟了不同的调度方式对吴中区河道水质的影响。结果表明: 吴中区调水引流供水3~5天后区域水质得到普遍改善并基本稳定在Ⅳ类水平, 水质改善效果相对较差的区域主要分布在未启用的闸站前控制段河道; 不同片区供水调度方案不同, 水质改善效率存在差异。通过对比各种方案的计算结果, 从水质改善效果及水生态角度优化调度方案, 为决策部门提供了技术指导。

**【关键词】** 调水引流; 平原河网; 河网模型; 水质提升

中图分类号: TV213.4

文献标志码: B

文章编号: 2097-0528(2022)09-070-07

## Analysis of water quality improvement of plain river network by water diversion and optimal operation scheme

HE Miaomiao<sup>1</sup>, SI Lijing<sup>2</sup>, WANG Jiao<sup>3</sup>

- (1. Suzhou Wuzhong Water Affairs Bureau, Suzhou 215104, China;  
2. Zhenjiang Engineering Investigation, Design and Research Institute, Zhenjiang 212003, China;  
3. Suzhou XiangchengCaohu Street Construction Management Office, Suzhou 215011, China)

**Abstract:** In order to scientifically and quantitatively evaluate the improvement effect of water diversion projects on the water quality of plain river network, this paper takes Wuzhong District of Suzhou as an example to construct the water quality evaluation model of plain river network and simulate the influence of different operation methods on the river water quality of Wuzhong District. The results show that the water quality in Wuzhong District is generally improved and basically stable at the level of Class IV after 3 to 5 days of water supply from water diversion. The areas with relatively poor water quality improvement are mainly distributed in the river channel of the control section before the inactive gate station. Water quality improvement efficiency varies with different water supply operation schemes in different areas. By comparing the calculation results of various schemes, the scheme is optimized from the perspective of water quality improvement effect and water ecology, which provides technical guidance for decision-making departments.

**Keywords:** water diversion; plain river network; network model; water quality improvement

收稿日期: 2021-09-15

作者简介: 何妙妙(1987—),女,硕士,主要从事水利工程建设与管理方面的研究。

城市水环境提升是生态文明建设的主要内容之一,水环境治理是城市水利建设的重要组成部分。随着城市化建设的加速、城市化率进程的加快,城市产生的污水越来越多,而城市污水处理基础设施与城市化进程的不匹配,导致城市水环境越来越恶劣<sup>[1-3]</sup>。平原河网通过调水引流、增大河道流量、提升河道流速等措施可有效提高河流本身的自净能力,改善河道水体流动条件,提升水环境质量<sup>[4]</sup>。科学的调水引流是实现城市水系连通,改善城市水环境的重要举措。目前的调水引流对城市河道水环境的改善集中于引水水量和引水水质<sup>[5-8]</sup>,闸泵堰等水利工程的联合调度对水环境的研究成果颇丰<sup>[9-11]</sup>,调水引流的研究对地区城市内河环境的改善有重要的借鉴意义。

苏州市吴中区作为环太湖重要城市,是典型平原河

网区,区内河港纵横,湖泊众多,依托外围河网发展,区内构成“两线(京杭大运河及吴淞江)一点(太湖)”的骨干水系框架。本文构建的吴中区河道水环境数学分析模型,通过对比低水引清和高水引清调度方案对城区内主要河流水质改善的影响,提出区域内引调水优化方案,以期对平原河网调水引流优化调度提供技术支持。

## 1 工程概况

吴中城区外围京杭运河绕城而过,西侧苏东河承泄吴中区南部包括山丘区来水北排石湖后,由越城河、跃进河、西塘河等北排、东排入大运河,目前形成了“两线(京杭大运河及吴淞江)一点(太湖)”的骨干框架,起到承接该片区涝水及石湖来水外排京杭运河的作用。吴中城区水系图见图1。



图1 吴中城区水系

吴中区城市化率较高,人口密度大,污水排放量较大,城乡结合部生活污水的无序排放,以及城市化建设过程中对水系的干扰使得城区的整体水环境不理想。平原河网地区河道水力坡降小的特性决定了城区河道水体流动性较差,外部清水来量有限,加上城区在骨干河道西塘河上缺乏有效控制手段,导致区域与外部水体交换有限、内部自身水体滞流,河网自净能力较差,水体一旦污染后,水质改善难度大。根据最新吴中区地表水监测资料,2018年5月南城区地表水共监测断面7个,监测频次数94次,主要监测透明度、溶解氧、氧化还原电位、氨氮等指标,其中氨氮(NH<sub>3</sub>-N)2次满足Ⅲ类水要求,比例为2%,14次满足Ⅳ类水以上要求,比例为15%,37次满足Ⅴ类水以上要求,比例为39%,其余均为劣Ⅴ类,比例为61%。从上述数据分析,虽然近年来加强了治理力度,但水质指标仍普遍超标。

本次以苏州市吴中区为例,结合京杭运河、石湖、小石河排涝闸站等水利工程,引入优质水源,增加城区清水流量,采用水环境数学模型分析河道自然水位差和闸站工程调度对河道水环境的影响,提出科学的调水引流方案,增强水动力,实现水体有序流动,改善城区水环境质量,为周边居民建设创造更好的水环境。

## 2 模型构建及评价方法

采用河网水动力对调水引流后河道的流量、流速、水位等水力要素进行模拟,在河网概化的基础上模拟水流运动。利用能量守恒定律,根据水流条件及污染物在水中迁移转化过程规律,建立水质评价模型。

### 2.1 水动力数学模型

河道水动力模型采用节点-河道模型对圣维南方程组离散求解<sup>[12]</sup>。河网中每条河道控制方程均为一维圣维南方程组;河道连接处为模型的节点,节点处满足质量守恒及动量守恒定律。以流量 $Q$ 、水位 $Z$ 为未知变量结合边界条件、节点衔接的圣维南方程组为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial x} + B_w \frac{\partial Z}{\partial t} &= q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + 2u \frac{\partial Q}{\partial x} + (gA - Bu^2) \frac{\partial A}{\partial x} + g \frac{n|u|Q}{R^{\frac{4}{3}}} &= 0 \end{aligned} \right\} (1)$$

式中: $Q$ 为流量,m<sup>3</sup>/s; $B_w$ 为河宽,m; $Z$ 为水位,m; $x$ 为顺水流方向坐标,m; $t$ 为时间,s; $q$ 为节点其他河道入流流量,流入为正,流出为负,m<sup>2</sup>/s; $A$ 为主河槽过水断面面积,m<sup>2</sup>; $u$ 为过水平面平均流速,m/s; $n$ 为河道糙率; $R$ 为河道水力半径,m, $g$ 为重力加速度,m/s<sup>2</sup>。

### 2.2 水质数学模型

水质数学模型以水动力数学模型生成的水动力条件为基础,采用对流扩散方程进行计算<sup>[13]</sup>。河网对流传输移动问题的河道方程和河道叉点方程表达为

$$\frac{\partial(A'C)}{\partial t} + \frac{\partial(QC)}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left( A'E_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + S_c - S = 0 \quad (2)$$

$$\sum_{l=1}^n (QC)_{l,j} = (C\Omega) \left( \frac{dZ}{dt} \right)_j \quad (3)$$

式中: $A'$ 为节点水面面积,m<sup>2</sup>; $C$ 为河道内物质浓度,mg/L; $E_x$ 为纵向分散系数; $\Omega$ 为河道叉点节点的水面面积,m<sup>2</sup>; $j$ 为节点编号; $l$ 为与节点 $j$ 相连接的河道编号; $S_c$ 为衰减项; $S$ 为外部项。

### 2.3 水环境质量评价方法

为了定量表达调水引流对河道水环境质量改善的效果,根据吴中区水污染物监测情况,本文以氨氮(NH<sub>3</sub>-N)浓度为影响因子,根据调水引流对影响因子的改善率,评价调水引流对水环境的改善效果。水质浓度改善率采用下式计算:

$$N = \frac{C_0 - C_i}{C_0} \times 100\% \quad (4)$$

式中: $N$ 为NH<sub>3</sub>-N浓度改善率; $C_0$ 为河道初始NH<sub>3</sub>-N浓度,mg/L; $C_i$ 为河道引水第 $i$ 时刻NH<sub>3</sub>-N监测浓度,mg/L。 $N$ 值反映调水引流对河道氨氮(NH<sub>3</sub>-N)浓度影响, $N$ 值为正说明河道氨氮(NH<sub>3</sub>-N)浓度降低, $N$ 值为负说明河道氨氮(NH<sub>3</sub>-N)浓度升高。

## 3 吴中区调水引流方案及水质影响预测

### 3.1 调水引流方案

吴中南城区调水引流,主要是利用现状水利工程功能并配合科学引排调度,改善水体流动条件,提升水环境质量。本次调水引流方案主要有低水引清和高水引清两类共4个小方案。

### 3.1.1 低水引清

低水引清方案总体设计思路为:在东太湖水位适宜条件下(常水位以上),以石湖清水稳定入城为基础,充分利用现有及规划水利工程,通过包围圈外围沿运河侧泵闸向外抽排降低区域水位,打开九亩浜、农场河、大鲇鱼口闸门,利用内河与东太湖水位差通过九亩浜、农场河、西塘河自引小石河及东太湖优质水源入城,提升水体流动性,改善水质。经试算,按照排水方式不同设计“集中泵排”和“分散泵排”两组方案。

**集中泵排:**包围圈外围沿运河侧泵闸中,仅开启西塘河枢纽、潭湖枢纽、钢铁桥泵站向运河排水,排水流量均为  $5\text{m}^3/\text{s}$ ,其他运河侧口门关闭。

**分散泵排:**包围圈外围沿运河侧泵闸中,开启西塘河枢纽、碧波枢纽、东港河泵站、西夏田泵站、潭湖枢纽、尹山桥泵站、钢铁桥泵站、罗布箕涵站向运河排水,其他运河侧口门关闭。

### 3.1.2 高水引清

高水引清方案总体设计思路为:考虑低水引清方案区域水位在一般情况下较常水位低约  $10\text{cm}$ ,在现有石湖  $5\text{m}^3/\text{s}$  来水的基础上,充分利用小石河优质水源,根据引水流量需求,利用小石河沿线泵站的引水功能,控制入城流量  $10\text{m}^3/\text{s}$ ;同时,通过包围圈外围泵闸灵活调度北排、东排运河,控制域内水位在  $3.1\sim 3.3\text{m}$  适宜范围,此时由于地区水位抬高后超过了东太湖水位,

西塘河连接东太湖的大鲇鱼口水闸关闭。按照排水方式不同设计“分散泵排”和“泵排+自流”两组方案。

**高水引清-分散泵排:**与低水引清方案中优选的分散泵排方案排水流量布置相同,开启西塘河枢纽、碧波枢纽、东港河泵站、西夏田泵站、潭湖枢纽、尹山桥泵站、钢铁桥泵站、罗布箕涵站向运河排水,其他运河侧口门关闭。

**高水引清-泵排+自排:**对于高水引清方案下运河水位低于区内水位、有条件向运河自流排水的区域,打开其沿运河侧闸门;对于运河水位高于区内水位的区域,其沿运河侧泵站沿用分散泵排子方案中排水流量布置。

## 3.2 水质影响预测

**a. 低水引清-集中泵排方案。**该方案换水期间,从片区整体来看,换水  $3\sim 5\text{d}$  后区域水质得到普遍改善并基本稳定在Ⅳ类(接近Ⅲ类上限)水平,其中水质改善效果相对较差的区域主要分布在东北、东南片区未启用的闸站前控制段河道。从分区来看,西北片区、西南片区改善速率接近且较快,换水  $2\text{d}$  后氨氮即可稳定在  $1.03\text{mg/L}$ (接近Ⅲ类上限),东北片区改善速率次之,换水  $3\text{d}$  后氨氮基本稳定在  $1.09\text{mg/L}$ ,东南片区改善速率最慢,换水  $4\text{d}$  后氨氮趋于稳定,约  $1.2\text{mg/L}$ ,各个片区  $5\text{d}$  后的改善幅度差异不大,东南片区改善幅度相对较低方案中各片区换水期间水质变化见图 2。



图 2 低水引清-集中泵排方案水质变化统计

**b. 低水引清-分散泵排方案。**该方案换水期间,从片区整体来看,换水  $3\sim 5\text{d}$  后区域水质得到普遍改善并基本稳定在Ⅳ类(接近Ⅲ类上限)水平,区内全部河道水质均由Ⅴ类降至Ⅳ类;从分区来看,西北片区、西南片区改善速率接近且较快,换水  $2\text{d}$  后氨氮即可稳定

在  $1.03\text{mg/L}$ (接近Ⅲ类上限),东北片区、东南片区改善速率接近且次之,换水  $3\text{d}$  后氨氮基本稳定在  $1.05\text{mg/L}$ ,各个片区  $5\text{d}$  后的改善幅度基本相当。方案中各片区换水期间水质变化见图 3。

**c. 高水引清-分散泵排方案。**该方案换水期间,从

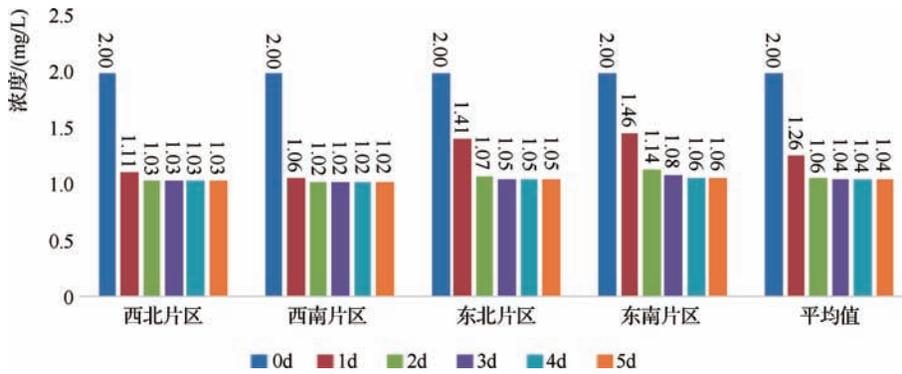


图3 低水引清-集中泵排方案水质变化统计

片区整体来看,换水3~5d后区域水质得到普遍改善并基本稳定在IV类(接近III类上限)水平,区内全部河道水质均由V类降至IV类;从分区来看,西北片区、西南片区改善速率接近且较快,换水1d后氨氮即可稳定

在1.02mg/L(接近III类上限),东北片区、东南片区改善速率相近且次之,换水3d后氨氮趋于稳定,在1.08mg/L左右,各个片区5d后的改善幅度基本相当,方案中各片区换水期间水质变化见图4。

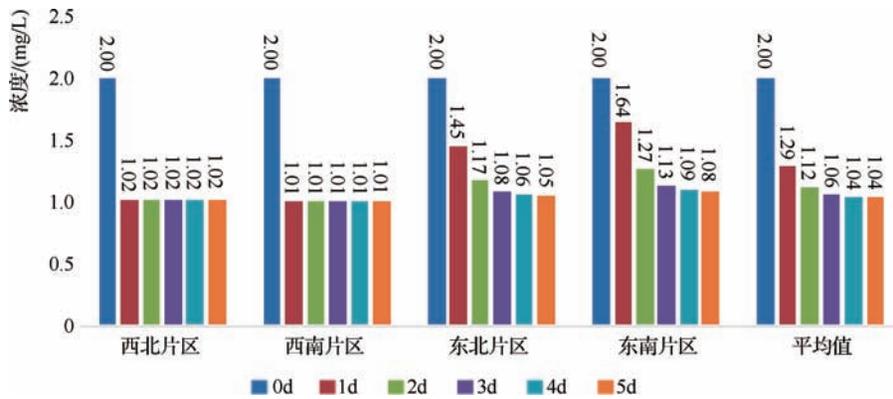


图4 高水引清-分散泵排方案水质变化统计

d. 高水引清-泵排+自排方案。该方案换水期间,从片区整体来看,换水3~5d后区域水质得到普遍改善并基本稳定在IV类(接近III类上限)水平,区内全部河道水质均由V类降至IV类;从分区来看,西北片区、西南片区改善速率接近且较快,换水1d后氨氮即可稳

定在1.03mg/L(接近III类上限),东北片区、东南片区改善速率相近且次之,换水3d后氨氮趋于稳定,在1.08mg/L左右,各个片区5d后的改善幅度基本相当。方案中各片区换水期间水质变化见图5。

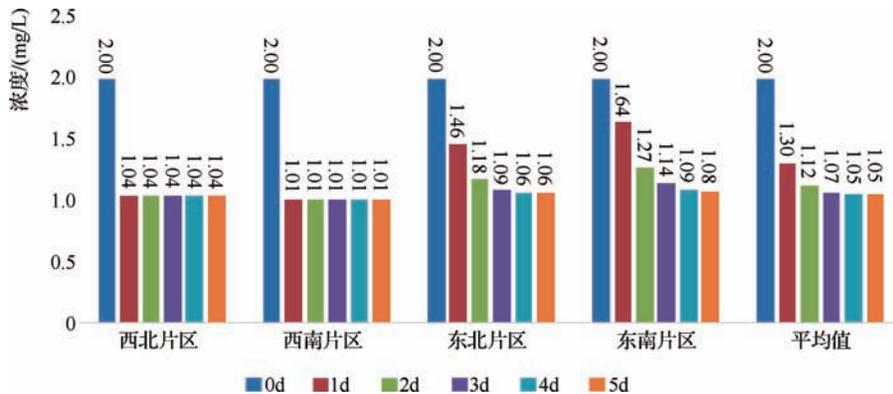


图5 高水引清-泵排+自排方案水质变化统计

### 3.3 调水引流方案水质变化分析

#### 3.3.1 低水引清

吴中区通过低水引清方案调水引流后片区水质改善率明显,引水5d后水质改善率为40%~50%,片区内不同供水方案水质改善速率存在差异,低水引清方案水质改善率见图6。其中西北片区、西南片区在集中泵排与分散泵排的水质改善速率大致相同,供水2d后水质即可达标,供水3~5d氨氮浓度改善率保持不变,水质改善率可达50%;东北片区集中泵排1d水质改善速率25%,2d水质改善率43%,3~5d水质改善率趋于稳定,为46%、东北片区分散泵排1d水质改善速率为29%,2d水质改善率为47%,3~5d水质改善率趋于稳定,为48%;东南片区集中泵排1~5d水质改善为27%~41%,水质改善率逐渐增加,水质持续提

升,东北片区分散泵排1d水质改善速率为26%,2d水质改善率为43%,3~5d水质改善率趋于稳定,为47%;东北片区、东南片区在分散泵排的水质改善速率更快,5d后水质改善幅度更大,且分散泵排片区全部河道水质均由V类降至IV类,基本不存在难以改善、仍为V类的区域。从水质改善率整体来看,引水初期清水对河道内氨氮浓度改善幅度较大,但随着引水天数的增加,河道内氨氮浓度逐渐降低,使得引水对河道内氨氮浓度的改善减弱;低水引清方案中,分散泵排较集中泵排水质增加了碧波枢纽、东港河泵站、西夏田泵站、尹山桥泵站、罗布箕涵泵站排水,而改善效果相对较差的区域主要分布在东北、东南片区上述未启用的闸站前控制段河道,故引水时开启内河泵站将上游污水排出,可以更好地改善城市内河水质。

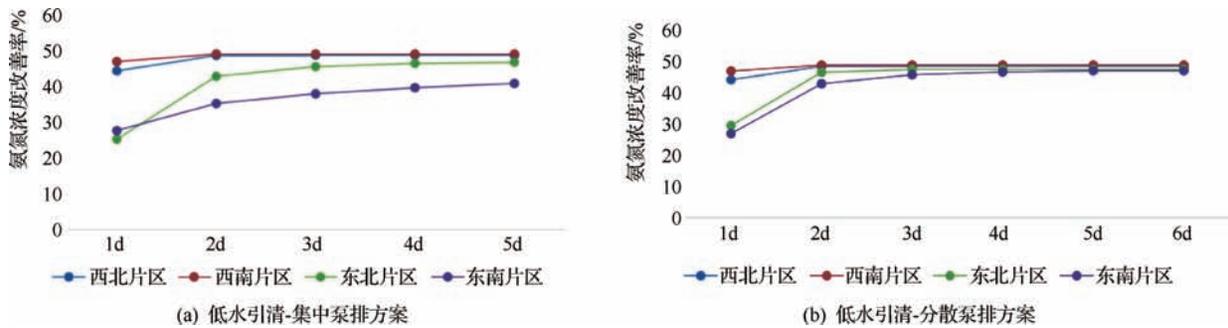


图6 低水引清子方案片区水质改善效果对比

低水引清方案在东太湖水位适宜情况下(常水位以上),充分利用河道自流,将小石河和东太湖作为引水水源,引清入城,河网水质基本能够维持在适宜水位的下限左右;其中,调度管理上低水引清-分散泵排方案比集中泵排方案难度相对较大,但在空间上活水和改善水质效果较好。低水引清方案受东太湖水位制约,在小石河、东太湖水位较低情况下,地区河网水位过低,为实现预期调水流量,水位将抽排至3.0m以下,不利于景观和生态。

#### 3.3.2 高水引清

“高水引清”方案将小石河作为引水水源,利用泵站抽引小石河优质水入城,引水期间城区内部河网水

高水引清方案可结合运河水位条件相机采用,在一般情况下(运河常水位),以自流排水为主,加上局

位可灵活调度,保证维持在适宜水位。

吴中区通过高水引清方案调水引流后片区水质改善率明显高,高水引清方案水质改善率见图7。其中西北片区、西南片区换水1d水质改善率达50%,水质处于优质稳定的状态。西北片区、西南片区利用泵站抽引小石河优质水入城提高了河道内清水流量,加快清水的补给速度,河道内氨氮浓度改善率明显,这表明河道水质的改善速率与引水时段内通过的流量密切相关。东北、东南片区高水引清-分散泵排与泵排+自排方案在水质改善率及水质改善速率方面效果相当,东北及东南处于河道下游,大部分河道采用自排方式,引水流量差别不大,水质改善效果相当。

部区域适当抽排的方式排水,就可实现较好的预期活水效果。但在运河水位较高或异常的情况下,高水引

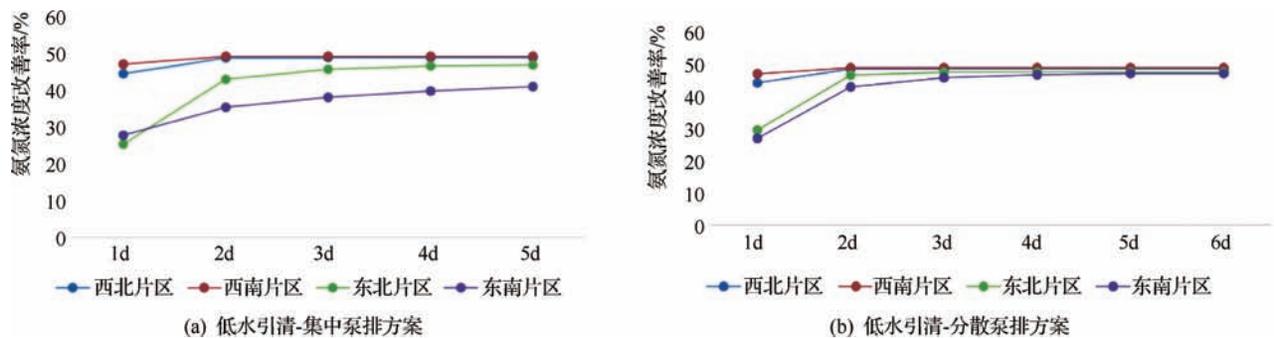


图7 高水引清子方案片区水质改善效果对比

清-分散泵排方案将发挥优势,实现包围圈内水位完全可控的效果。

## 4 结论

a. 调水引流工程对吴中区水质改善明显,引水5d后区内水质改善率为40%~50%。利用南城包围沿京杭运河、小石河排涝闸站,并扩展沿小石河两座排涝泵站的引水功能,在现状西部石湖来水基础上,科学利用包围圈外围河道(湖泊)优质水源,提升城区清水来量,区域水质得到普遍改善并基本稳定在Ⅳ类(接近Ⅲ类上限)水平。

b. 水质改善率在引水初期改善幅度较大,随着引水天数的增加,河道内氨氮浓度改善减弱;部分河道改善效果相对较差,改善效果差的区域位于未启用的闸站前控制段河道;对比低水引清与高水引清方案,河道水质的改善速率与引水时段内通过的流量密切相关。

c. 科学利用河道自然水位差和闸站工程合理调度,实现区内水体有序流动,保证维持在适宜水位,工程调度方案根据东太湖、运河水位不同情况方案为:当东太湖水位位于常水位以上时,采用低水引清-分散泵排方案,通过包围圈外围运河侧泵闸向外抽排降低吴中南城区水位,利用内河与东太湖水位差自引小石河及东太湖优质水入城;当东太湖水位位于常水位以下时,启用沿小石河泵站,抽引小石河清水(10m<sup>3</sup>/s),高水引清方案采用以自流排水为主,加上局部区域适当抽排的方式排水,在运河水位较高或异常的情况下,采用高水引清-分散泵排方案,实现包围圈内水位完全可控的效果。◆

## 参考文献

- [1] 黄显峰,郑延科,方国华,等.平原河网地区河流生态修复技术研究与实践[J].水资源保护,2017,33(5):170-176.
- [2] 魏志远,王婷,徐凯,等.平原河网水体氮污染对氮循环菌的影响[J].湖泊科学,2016,28(4):812-817.
- [3] 周琦,逢勇,罗慧萍.镇江长江征润州水源地综合风险评价[J].河海大学学报(自然科学版),2016,44(2):108-114.
- [4] 潘小保,蔡斌,柳杨,等.平原河网区调水引流研究进展[J].水利规划与设计,2019,33(9):10-12.
- [5] 高程程,陈长太,唐迎洲.上海市青松水利片引清调水方案研究[J].水电能源科学,2012,30(2):115-119.
- [6] 贾海峰,杨聪,张玉虎,等.城镇河网水环境模拟及水质改善情景方案[J].清华大学学报(自然科学版),2013(5):665-672.
- [7] 陈昌军,张卫飞.平原河网区城市引水工程水质改善预测研究[J].人民长江,2012,43(13):88-90.
- [8] 陈建标,钱小娟,朱友银,等.南通市引江调水对河网水环境改善效果的模拟[J].水资源保护,2014,30(1):38-42.
- [9] 王超,卫臻,张磊,等.平原河网区调水改善水环境实验研究[J].河海大学学报(自然科学版),2005,33(2):136-138.
- [10] 韦忠,王晓杰.调引长江水改善常州地区水环境效果分析[J].人民长江,2013,44(5):78-81.
- [11] 童朝锋,岳亮亮,郝嘉凌,等.南京市外秦淮河水质模拟及引调水效果[J].水资源保护,2012,28(6):49-54.
- [12] 唐磊.河流水动力水质模拟及应急调度研究[D].武汉:华中科技大学,2014.
- [13] 邓波,雷翠翠,果利娟.调水泵站对改善水系水环境重要性的分析研究[J].中国市政工程,2018(1):62-66.

# 金厂坪水库除险加固工程综合效益后评价

肖俊<sup>1</sup> 郑棚<sup>1</sup> 汤程<sup>2</sup>

- (1. 湖南百舸水利建设股份有限公司, 湖南长沙 410007;
2. 长沙国水信息科技有限公司, 湖南长沙 410021)

**【摘要】** 近年来,病险水库的除险加固成为社会各方关注的焦点,亟待定性、定量评价其综合效益,判定工程效益,构建一套科学合理的除险加固工程综合效益后评价体系具有重要意义。本文基于博弈论-云模型理论构建了一套病险水库除险加固工程综合效益后评价模型,并在芷江县金厂坪水库除险加固工程中进行了验证。结果表明,该模型具有良好的可行性,金厂坪水库除险加固项目取得了较好的综合效益。

**【关键词】** 病险水库;除险加固;效益后评价;博弈论;云模型

中图分类号: TV512

文献标志码: A

文章编号: 2097-0528(2022)09-077-08

## Comprehensive benefit post-evaluation of Jinchangping Reservoir risk removal and reinforcement project

XIAO Jun<sup>1</sup>, ZHENG Peng<sup>1</sup>, TANG Cheng<sup>2</sup>

- (1. Hunan Baige Water Conservancy Construction Co., Ltd., Changsha 410007, China;
2. Changsha Guoshui Information Technology Co., Ltd., Changsha 410021, China)

**Abstract:** Risk removal and reinforcement of dangerous reservoirs have become the focus of attention from all parties in the society in recent years. It is of great significance to evaluate its comprehensive benefits qualitatively and quantitatively, judge the effect of the project, and build a set of scientific and reasonable comprehensive benefit post-evaluation system of risk removal and reinforcement project. A set of comprehensive benefit post-evaluation model of risk removal and reinforcement projects for dangerous reservoirs is established based on the game theory-cloud model theory. It is proved in Jinchangping reservoir risk removal and reinforcement project of Zhijiang County. The results show that the model has excellent feasibility, and Jinchangping Reservoir Reinforcement Project has achieved excellent comprehensive benefits.

**Keywords:** dangerous reservoir; risk removal and reinforcement; post-benefit evaluation; game theory; cloud model

### 1 研究背景

《第一次全国水利普查公报》显示,我国现存水库

98002座,总库容达9312.12亿 $m^3$ ,已建水库97246座,总库容8104.1亿 $m^3$ ,在建水库756座,总库容1219.02亿 $m^3$ <sup>[1]</sup>。这些水库在防洪、养殖、发电、灌溉等方面发

收稿日期: 2021-11-15

作者简介: 肖俊(1989—),男,工程师,主要从事水利工程领域的研究。

挥了巨大的作用,是国内水利基础设施的重要组成部分<sup>[2]</sup>。但大部分水库建设年代久远,受技术条件和人为因素的影响,大部分水库标准低、质量差;在后续的运行过程中,缺乏必要的维修养护,多数水库处于带病运行状态,安全隐患严重。病险水库不仅影响着下游群众的生命财产安全,也难以发挥其防洪、蓄水等功能。

2021年4月,国务院办公厅印发的《关于切实加强水库除险加固和运行管护工作的通知》指出<sup>[3]</sup>,病险水库关乎人民群众的生命财产安全,部分水库存在运行时间长、管理不到位等问题,安全隐患严重。大多数病险水库在除险加固后并未进行项目后评价,难以定性、定量地分析其综合效益;部分地区病险水库加固的项目在完成后仍旧存在整治不合格的问题,给当地的经济、环境造成了较大的损失。现有除险加固项目后评价规范中部分评价指标较为简单,难以精确地评估除险加固项目的综合效益。

针对以上问题,本文提出了基于博弈论-云模型组合赋权理论的除险加固综合效益评价体系,从社会效

益、经济效益、环境效益三个维度对除险加固项目后评价进行研究,博弈论综合考虑了评价指标的主客观权重,云模型则融合了评价指标的随机性与模糊性<sup>[4]</sup>,基于该理论建立的评价指标兼具合理性与可靠性,最后选择了芷江县金厂坪水库除险加固项目作为研究对象,以验证该模型的可行性。

## 2 指标体系构建

病险水库除险加固综合效益后评价模型作为一个复杂的评价系统,选取评价指标时应充分考虑除险加固项目的工程特点与现行规范标准,依据《病险水库除险加固项目后评价规程》(DB41/T 1390—2017)与《水利水电工程施工组织设计规范》<sup>[5]</sup>(SL 303—2017)的要求,结合中部地区生态环境的相关特点,在查阅了大量文献的基础上,依照层次分析法的原理,将评价指标分为目标层、准则层与指标层三类<sup>[6]</sup>,以确保该体系能够客观反映除险加固工程的综合效益。该评价体系包含经济效益、社会效益、环境效益3个一级指标与15个二级指标(见图1)。

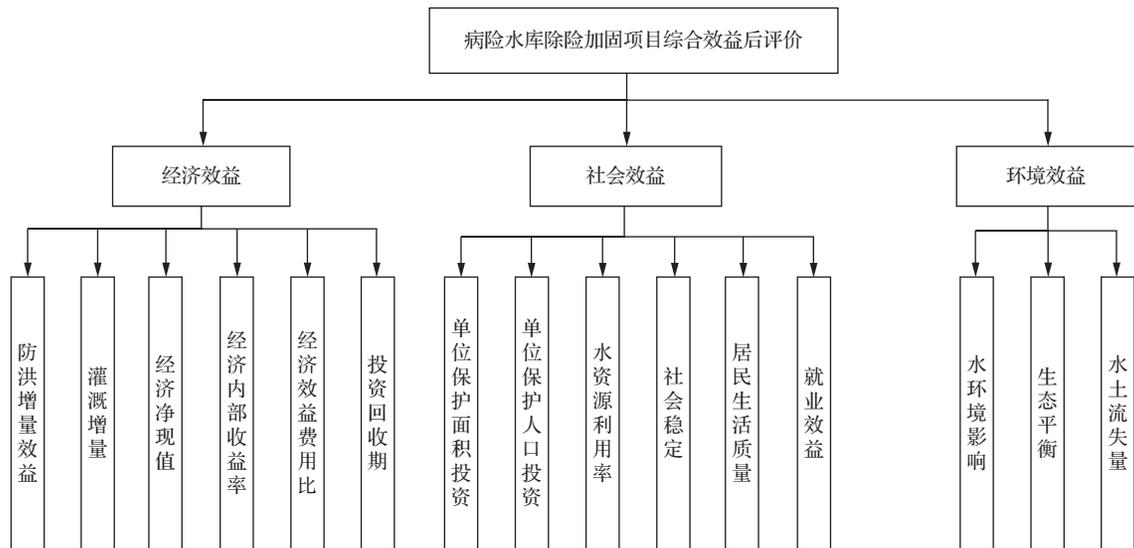


图1 病险水库除险加固工程综合效益后评价体系

## 3 指标权重的确定

组合权重可避免仅采用主观赋权法导致的指标仅受决策者主观判断影响却并未考虑客观因素的情

况<sup>[7]</sup>,或仅采用客观赋权法未考虑决策者实际经验而与实际情况偏离的问题。经过综合考虑,本文采用层次分析法进行主观权重赋值,熵权法进行客观权重赋值,具体步骤如下。

### 3.1 层次分析法确定主观权重

在层次分析法建立的指标体系中,通常由专家遵循 1—9 的比例标度进行打分,在此基础上构造判断矩阵  $A = (a_{ij})_{n \times n}$ , 对应的元素组成如下:

$$a_{ij} > 0, a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}, i, j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

层次分析法中权重向量  $W$  可采用方根法、求和法、特征向量法、最小二乘法等方法确定<sup>[8]</sup>, 本文采用求和法进行权重计算。

求和法采用全部列向量的算术平均值来估算权重, 即

$$W_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{kj}}, i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

计算步骤如下:

a. 将  $A$  的元素进行列归一化计算:

$$\bar{m}_{ij} = \frac{m_{ij}}{\sum_{i=1}^n m_{ij}}, i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

b. 归一化后的各列相加, 即

$$W_i = \sum_{j=1}^n \bar{m}_{ij}, i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

c. 相加后的向量除以  $n$  后得到权重向量:

$$\bar{W}_i = \frac{W_i}{\sum_{i=1}^n W_i}, i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

从而计算判断矩阵  $A$  的最大特征值:

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{nW_i} \quad (6)$$

式中:  $(AW)_i$  为矩阵  $A$  与对应特征向量  $W$  相乘所得第  $i$  行元素;  $W_i$  为矩阵  $A$  最大特征向量的第  $i$  行元素。

当判定矩阵的阶数大于 2 时, 需要进行一致性检验。

一次性指标 CI (consistency index, CI) 计算方式如下:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (7)$$

将计算得到的 CI 与随机性指标 RI 进行比较, 并通过公式  $CR = \frac{CI}{RI}$  判定矩阵的一致性, 当  $CR < 0.10$  时, 可判定矩阵具备一致性, 否则需要对判断矩阵进行调整, 使其满足该条件, 随机一致性指标 RI 的取值见表 1。

表 1 随机一致性指标 RI 取值

阶数 $n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.24	1.36	1.41	1.46	1.49

### 3.2 熵权法确定客观权重

假定系统存在多种状态, 每种状态发生的概率为  $p_i (i = 1, 2, \dots, n)$ , 系统的熵定义为<sup>[9]</sup>

$$e = \sum_{i=1}^m p_i \ln p_i \quad (8)$$

熵权法的具体计算步骤如下:

a. 建立原始评价矩阵  $R = (R_{ij})_{m \times n}$ :

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m1} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

b. 计算第  $i$  位专家评价指标  $j$  时评分值的比重:

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}} \quad (10)$$

c. 计算第  $j$  项指标的熵值:

$$H_j = \frac{1}{\lg n} \sum_{i=1}^n p_{ij} \lg p_{ij} \quad (11)$$

d. 进行客观权重  $\omega_i$  的计算:

$$\omega_i = \frac{1 - H_i}{\sum_{i=1}^n (1 - H_i)} \quad (12)$$

### 3.3 基于博弈论的组合权重确定

假定可通过  $m$  种方法对各项评价指标进行赋权, 那么  $m$  种赋权方法可得到的  $m$  个评价指标向量为<sup>[10]</sup>

$$P_k = \{W_1^k, W_2^k, \dots, W_n^k\} (k = 1, 2, \dots, m) \quad (13)$$

a. 设线性组合系数  $a_k = (a_1, a_2, \dots, a_m)$ , 则向量线性组合为

$$p = \sum_{k=1}^m a_k p_k \quad (14)$$

b. 对线性组合系数  $a_k$  通过博弈论的思想进行优化, 优化为  $p$  和  $p_k$  的离差最小化, 方程如下:

$$\begin{bmatrix} p_1 \cdot p_1^T & p_1 \cdot p_2^T & \cdots & p_1 \cdot p_m^T \\ p_2 \cdot p_1^T & p_2 \cdot p_2^T & \cdots & p_2 \cdot p_m^T \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_m \cdot p_1^T & p_m \cdot p_2^T & \cdots & p_m \cdot p_m^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1 \cdot p_1^T \\ p_2 \cdot p_2^T \\ \vdots \\ p_m \cdot p_m^T \end{bmatrix} \quad (15)$$

c. 将组合系数  $a_k = (a_1, a_2, \dots, a_m)$  进行归一化处理:

$$a_k^* = a_k \sum_{k=1}^m a_k \quad (16)$$

d. 得出组合权重:

$$p^* = \sum_{k=1}^m a_k^* p_k^T \quad (17)$$

## 4 云模型理论

### 4.1 基本算法简介

假设  $U$  是一个采用精确数值描述的定量领域,  $C$  作为  $U$  中的定性概念, 若存在定量  $x \in U$ , 且  $x$  可作为  $C$  的一个随机实现数值, 则  $x$  在  $C$  的确定度  $\mu(x) \in [0, 1]$  中属于具有稳定倾向的随机数<sup>[11]</sup>。若  $\mu: U \rightarrow [0, 1]$ , 且对于任意  $x \in U, x \rightarrow \mu(x)$ , 那么  $x$  称之为云滴, 其在论域  $U$  的分布称之为云。云用数字特征期望  $Ex$ 、熵  $En$ 、超熵  $He$  来表示概念的整体特性。

### 4.2 云模型的数字特征

a. 期望  $Ex$ 。表示云滴在论域上分布概念的中心值, 是定性概念的代表性映射。

b. 熵  $En$ 。用于度量定性概念的不确定性, 由定性概念自身具备的模糊性与不确定性共同决定<sup>[12]</sup>。  $En$  的值同时反映了云滴在论域中的离散程度,  $En$  值大, 关于定性概念的云滴取值范围也增大, 反之亦然。

c. 超熵  $He$ 。超熵作为熵的不确定性的衡量数值, 反映了论域空间内所有点不确定性的凝聚程度, 超熵

的大小也间接地反映了云的厚度。

云模型采用云发生器作为基本算法工具, 可分为正向云发生器与逆向云发生器两种, 正向云发生器用以表示定性概念到定量概念的转换过程, 逆向云发生器则表示定量概念到定性概念的转化过程<sup>[13]</sup>。

### 4.3 综合云生成

将两朵以上相似的云合成后可以得到综合云, 作为更高层次的云模型。假设存在两个正态云  $C_1$  和  $C_2$ ,  $CT_1(x)$  与  $CT_2(x)$  用来表示  $C_1$  与  $C_2$  的期望曲线, 通过计算得到综合云, 在综合云的基础上比较两个正态云的整体数据<sup>[14]</sup>。

假定某个指标体系具有三层, 每层含有  $N$  个二级指标, 各个二级指标的权重分别为  $\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n$ , 每个指标的云模型参数为  $(Ex_1, En_1, He_1), (Ex_2, En_2, He_2), (Ex_3, En_3, He_3), \dots, (Ex_n, En_n, He_n)$ 。

## 5 基于博弈论的综合评价云模型构建

### 5.1 标准云

首先, 利用公式将包含边界约束的评语集转化为云模型的数字特征, 其中边界约束为  $[d_{\min}, d_{\max}]$ , 公式如下:

$$\left. \begin{aligned} Ex &= (d_{\min} + d_{\max})/2 \\ En &= (d_{\max} - d_{\min})/6 \\ He &= k \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

式中,  $Ex, En$  表示标准云的期望和熵,  $d_{\min}$  反映了评语集区间的最小值,  $d_{\max}$  反映了评语集区间的最大值; 当  $d_{\min} = 0$  时,  $Ex = 0$ ; 当  $d_{\max} = 1$  时,  $Ex = 1$ , 当  $Ex$  等于 0 或 1 时,  $En = (d_{\max} - d_{\min})/3$ 。超熵则反映了评价值的随机性, 超熵越大, 代表评价价值越不稳定, 即误差越大, 结合实际情况, 本文的超熵  $He$  取 0.05。

### 5.2 评语集确定

依据病险水库除险加固工程的项目特点, 本文将综合效益后评价划分为五个等级, 评价区间分为  $[0, 2), [2, 4), [4, 6), [6, 8), [8, 10]$ , 对应的效益评价等级为极佳、较好、一般、较差、极差。结合式 (18) 计算出每个随机子区间的云数字特征值, 具体数据见表 2。

表2 评价等级及云数字特征

评价等级	区间	期望 $E_x$	熵 $En$	超熵 $He$
极差	[0,2)	1	0.33	0.05
较差	[2,4)	3	0.33	0.05
一般	[4,6)	5	0.33	0.05
较好	[6,8)	7	0.33	0.05
极佳	[8,10]	9	0.33	0.05

利用上述过程得到病险水库除险加固工程效益后评价评语集对应的云数字特征后,采用 MATLAB 软件进行计算,完成对除险加固效益后评价的五个评价等级的云处理,最终生成对应的标准评价云图,作为后续评价的标准,见图2。

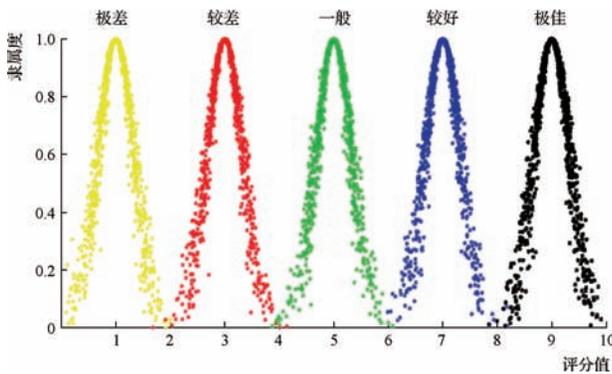


图2 标准评价云图

### 5.3 综合评价

完成指标体系构建、权重计算与评语集构建等工作后,需要对病险水库除险加固项目的指标进行效益后评价。本文采用专家咨询法对各指标进行打分,结合专家打分的结果构建评价矩阵  $Y(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im})$ , 利用 MATLAB 对构造的矩阵进行处理后,可以获得包含  $m$  个指标层的云模型数字特征  $C_j(E_{x_j}, E_{n_j}, He_j)$ , 其中:  $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$ 。具体的处理公式如下:

$$\left. \begin{aligned} E_{x_j} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij} \\ S_j^2 &= \frac{i}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - E_{x_j})^2 \\ E_{n_j} &= \frac{1}{n} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sum_{i=1}^n |x_{ij} - E_{x_j}| \\ He_j &= \sqrt{S_j^2 - E_{n_j}^2} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

式中:  $n$  为专家人数;  $m$  为指标个数;  $x_{ij}$  为第  $i$  号专家对第  $j$  号指标的打分后显示的结果。

结合病险水库除险加固效益后评价体系中 3 个一级指标包含的 15 个二级指标,将 4.2 中确定的指标权重与评价指标的云模型数字特征纳入计算过程,具体公式如下:

$$\begin{cases} E_x = \sum_{i=1}^n E_{x_j} \omega_j \\ E_n = \sqrt{\sum_{i=1}^n (E_{x_j}^2 \omega_j)} \\ He = \sum_{j=1}^n He_j \omega_j \end{cases} \quad (20)$$

综合评价云  $C(E_x, E_n, He)$  生成后,将各标准云与其进行相似度计算,对计算结果排序后选择相似度最高的等级作为最终评价等级。该相似度由 MATLAB 中编辑的云发生器计算,以“极佳”效益的标准云与综合评价云为例,其在云模型中的数字特征分别为  $C_1(E_{x_1}, E_{n_1}, He_1)$  与  $C_2(E_{x_2}, E_{n_2}, He_2)$ , 计算步骤为:

- 令  $E_n = \text{NORM}(E_{n_1}, He_1^2)$
- 令  $X_k = \text{NORM}(E_{x_1}, E_{n_1}^2)$ ;
- 计算隶属度  $\mu_k$ :

$$\mu_k = \exp\left(-\frac{(x_k - E_{x_2})^2}{2E_{n_2}^2}\right) \quad (21)$$

- 重复 a ~ c, 直至生成  $p$  个  $\mu_k$ , 并计算相似度:

$$\delta = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p \mu_k \quad (22)$$

式中: a 步骤产生期望为  $E_{n_1}$ , 方差为  $He_1^2$  的正态随机数  $E_n$ ; b 步骤产生期望为  $E_{x_1}$ , 方差为  $E_{n_1}^2$  的正态随机数  $X_k$ 。

## 6 实例验证

### 6.1 工程概况

金厂坪水库位于湖南省芷江县金厂坪村,属沅水一级支流口水支流五郎溪上游,水库集雨面积 58.9 km<sup>2</sup>,干流长度 14.6 km,正常蓄水位 400.00 m,正常库容 1500 万 m<sup>3</sup>,校核洪水位 400.25 m,灌溉面积 31000 亩,多年平均发电量 250.0 万 kW·h,是一座以农

田灌溉为主,兼顾防洪、发电、养殖等综合效益的中型水库。邀请具备经济效益、环境影响等方面背景的10位资深专家,对评价体系中定性、定量的相关指标以

10分为满分的机制进行打分,分数越高则代表影响越大。一级指标的评分值见表3。

表3 指标权重打分数据

一级指标	专家1	专家2	专家3	专家4	专家5	专家6	专家7	专家8	专家9	专家10
B <sub>1</sub>	7.4	7.9	6.8	8.1	7.3	6.9	7.5	8.3	7.5	6.7
B <sub>2</sub>	8.1	8.4	6.7	8.0	6.7	6.8	8.1	7.7	7.6	6.9
B <sub>3</sub>	6.7	6.8	8.1	8.2	8.1	7.2	6.7	7.3	8.3	7.7

## 6.2 权重的确定

### 6.2.1 主观权重确定

本文通过专家打分进行准则层指标的重要性分析,利用式(1)中给定的判定矩阵A与式(2)~式(5)来计算指标层的具体权重,具体的步骤见表4~表7。

表4 准则层判断矩阵及计算结果

二级指标	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	指标权重 W <sub>i</sub> '	一致性检验
B <sub>1</sub>	1	1/3	2	0.391	λ <sub>max</sub> = 3.014
B <sub>2</sub>	3	1	4	0.309	CI = 0.007
B <sub>3</sub>	1/2	1/4	1	0.300	CR = 0.013 < 0.1

表5 经济效益后评价判断矩阵及计算结果

二级指标	B <sub>11</sub>	B <sub>12</sub>	B <sub>13</sub>	B <sub>14</sub>	B <sub>15</sub>	B <sub>16</sub>	指标权重 W <sub>i</sub>	一致性检验
B <sub>11</sub>	1	1	3	3	3	3	0.403	
B <sub>12</sub>	1	1	3	3	3	3	0.267	
B <sub>13</sub>	1/3	1/3	1	2	2	2	0.137	λ <sub>max</sub> = 4.081
B <sub>14</sub>	1/3	1/3	1/2	1	1	1	0.080	CI = 0.020
B <sub>15</sub>	4	2	1	1	1		0.070	CR = 0.016 < 0.1
B <sub>16</sub>	1/3	2	4	1	1	1	0.044	

表6 社会效益后评价判断矩阵及计算结果

二级指标	B <sub>21</sub>	B <sub>22</sub>	B <sub>23</sub>	B <sub>24</sub>	B <sub>25</sub>	B <sub>26</sub>	指标权重 W <sub>i</sub>	一致性检验
B <sub>21</sub>	1	1/3	1/4	1/2	2	3	0.193	
B <sub>22</sub>	3	1	1/2	2	2	2	0.373	
B <sub>23</sub>	4	2	1	3	3	3	0.189	λ <sub>max</sub> = 6.541
B <sub>24</sub>	2	1/2	1/3	1	2	2	0.126	CI = 0.1082
B <sub>25</sub>	1/2	1/2	1/3	1/2	1	3	0.074	CR = 0.059 < 0.1
B <sub>26</sub>	1/3	1/2	1/3	1/2	1/3	1	0.045	

表7 环境效益后评价判断矩阵及计算结果

二级指标	B <sub>31</sub>	B <sub>32</sub>	B <sub>33</sub>	指标权重 W <sub>i</sub>	一致性检验
B <sub>31</sub>	1	4	3	0.267	λ <sub>max</sub> = 3.008
B <sub>32</sub>	1/4	1	2	0.434	CI = 0.004
B <sub>33</sub>	1/3	1/2	1	0.299	CR = 0.007 < 0.1

### 6.2.2 客观权重确定

将各级指标评分值代入式(8)~式(11)中计算客观权重,得到的熵值与熵权数据见表8。

表8 各指标熵权计算结果

一级指标	二级指标	熵值 H <sub>i</sub>	熵权 W <sub>i</sub>
B <sub>1</sub>	防洪增量效益 B <sub>11</sub>	0.9971	0.083
	灌溉增量效益 B <sub>12</sub>	0.9812	0.045
	经济净现值 B <sub>13</sub>	0.9832	0.070
	经济内部收益率 B <sub>14</sub>	0.9752	0.091
	经济效益费用比 B <sub>15</sub>	0.9983	0.070
	投资回收期 B <sub>16</sub>	0.9856	0.074

续表

一级指标	二级指标	熵值 $H_i$	熵权 $W_i$
$B_2$	单位保护面积投资 $B_{21}$	0.9981	0.061
	单位保护人口投资 $B_{22}$	0.9921	0.076
	水资源利用率 $B_{23}$	0.9842	0.098
	社会稳定 $B_{24}$	0.9875	0.077
	居民生活质量 $B_{25}$	0.9911	0.072
	就业效益 $B_{26}$	0.9767	0.051
$B_3$	水环境影响 $B_{31}$	0.9982	0.029
	生态平衡 $B_{32}$	0.9864	0.062
	水土流失量 $B_{33}$	0.9871	0.035

续表

指标	AHP 相对权重 $W_i'$	熵权法相对权重 $W_i''$	博弈论综合权重
$B_{14}$	0.080	0.091	0.0847
$B_{15}$	0.070	0.070	0.0895
$B_{16}$	0.044	0.074	0.0310
$B_{21}$	0.193	0.061	0.1176
$B_{22}$	0.373	0.076	0.4080
$B_{23}$	0.189	0.098	0.2013
$B_{24}$	0.126	0.077	0.1167
$B_{25}$	0.074	0.072	0.0954
$B_{26}$	0.045	0.051	0.0610
$B_{31}$	0.267	0.029	0.2062
$B_{32}$	0.434	0.062	0.5462
$B_{33}$	0.299	0.035	0.2476

### 6.2.3 组合权重确定

综合上述计算结果,得到两种赋值方法下的相对权重,并利用式(16)计算,得到最后的综合权重,见表9。

表9 两种方法确定各指标层的相对权重

二级指标	AHP 相对权重 $W_i'$	熵权法相对权重 $W_i''$	博弈论综合权重
$B_{11}$	0.403	0.083	0.3401
$B_{12}$	0.267	0.045	0.2268
$B_{13}$	0.137	0.070	0.2279

### 6.2.4 评价指标云确定

结合背景工程的效益后评价打分表,邀请各专家对本工程各指标施工情况进行评价打分,依据8位专家对背景工程项目的打分结果,构建病险水库除险加固效益后评价矩阵并计算云模型数字特征值,打分情况与云模型数字特征值计算结果见表10。

表10 专家打分表及云模型数字特征计算结果

二级指标	专家1	专家2	专家3	专家4	专家5	专家6	专家7	专家8	云模型数字特征
$B_{11}$	8.5	8.3	8.7	8.6	8.7	8.5	8.9	9.0	(8.65,0.219,0.046)
$B_{12}$	7.5	6.8	7.4	7.2	7.8	7.6	7.4	7.2	(7.36,0.278,0.051)
$B_{13}$	7.2	7.0	6.9	7.5	7.4	7.2	7.5	7.2	(7.24,0.216,0.038)
$B_{14}$	8.0	7.2	7.6	7.5	7.8	7.8	8.0	7.8	(7.71,0.263,0.039)
$B_{15}$	9.0	8.6	8.7	8.8	8.4	8.8	8.5	9.2	(8.75,0.251,0.058)
$B_{16}$	8.8	8.5	8.0	8.2	8.0	8.8	8.5	8.3	(8.39,0.329,0.053)
$B_{21}$	7.5	6.8	7.4	7.2	7.8	7.6	7.4	7.2	(7.36,0.279,0.050)
$B_{22}$	8.5	8.3	8.7	8.6	8.7	8.5	8.9	9.0	(8.65,0.219,0.046)
$B_{23}$	9.0	8.7	8.5	8.8	8.4	8.6	8.8	8.9	(8.71,0.204,0.035)
$B_{24}$	7.2	7.0	6.9	7.5	7.4	7.2	7.5	7.2	(7.24,0.216,0.038)
$B_{25}$	8.8	8.5	8.0	8.2	8.0	8.8	8.5	8.3	(8.39,0.329,0.053)
$B_{26}$	7.5	6.8	7.4	7.2	7.8	7.6	7.4	7.2	(7.36,0.279,0.049)
$B_{31}$	7.8	7.6	7.4	7.8	7.0	6.9	7.5	7.2	(7.40,0.345,0.062)
$B_{32}$	7.5	6.8	7.4	8.6	8.7	8.5	8.9	9.0	(8.18,0.884,0.132)
$B_{33}$	7.2	7.0	7.6	7.5	7.8	7.8	8.0	7.2	(7.51,0.360,0.067)

运用式(19)可以计算出该项目的效益后综合评价云模型数字特征值为(7.43,0.292,0.051),并通过

MATLAB 软件生成病险水库除险加固工程综合效益后评价的综合评价云,见图3。

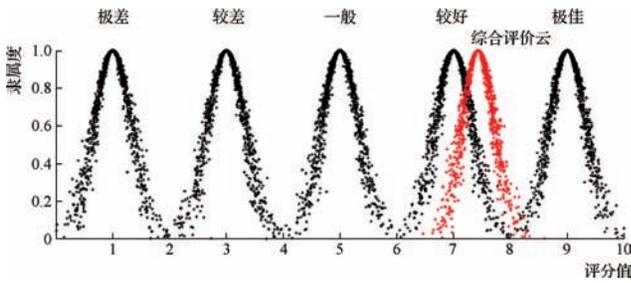


图3 综合效益评价云图与标准云图对比

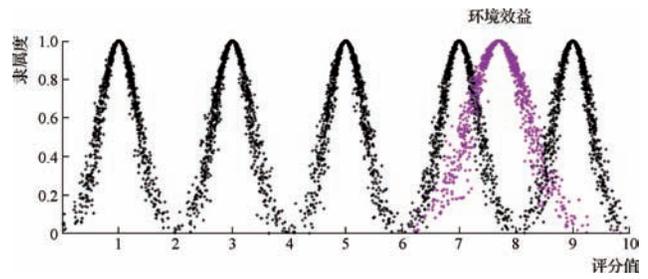


图6 环境效益后评价云图

### 6.2.5 相似度计算

将得到的病险水库除险加固工程综合效益后评价云图与本文建立的标准评价云图进行相似度比较,确定最终的评价等级,见图3。首先,可看出综合评价云图介于“较好”和“极佳”之间;其次,在进行最相似度大小比较后得出,项目综合效益后评价云图与“较好”等级的标准云图更为接近。据此可以认为金厂坪水库除险加固项目综合效益后评价等级为“较好”。

同理,三个准则层的评价等级也可以确定。根据表10数据计算出经济效益后评价云模型数字特征为(8.01,0.259,0.048)、社会效益后评价云模型数字特征为(7.95,0.254,0.045)、环境效益后评价云模型数字特征为(7.70,0.530,0.087),生成云图后与标准云图进行最相似度对比后依次确定其效益(较好)、社会效益(较好)、环境效益(较好)(见图4~图6)。

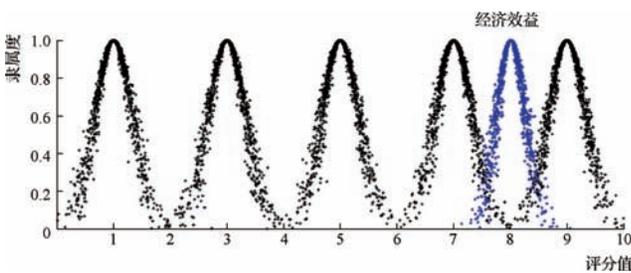


图4 经济效益后评价云图

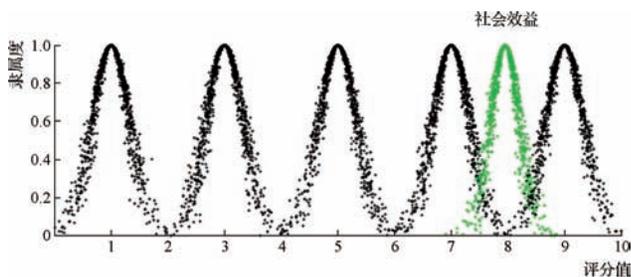


图5 社会效益后评价云图

## 7 结论

本文依据病险水库除险加固工程的相关设计规范与后评价理论,结合中部地区的除险加固实践,建立了一套行之有效的除险加固工程综合效益后评价体系,并在金厂坪水库除险加固项目中实际应用。

a. 采用层次分析法与熵权法分别确定评价指标的主客观权重,能够有效减少人为因素对指标权重的干扰,且充分考虑了客观事实,引入博弈论思想来确定组合权重,加大了指标权重赋值的科学性,使其能更符合除险加固工程综合效益的实际情况。

b. 金厂坪水库除险加固项目的工程实践表明,基于博弈论-云模型理论构建的病险水库除险加固工程综合效益后评价模型基本可行,这不仅能丰富除险加固项目后评价体系的指标内容,也为类似项目的方案设计提供了一定参考。◇

### 参考文献

- [1] 河南省地方标准病险水库除险加固项目后评价规程:DB41/T 1390—2017[S]. 郑州:黄河水利出版社,2017.
- [2] 中华人民共和国水利部,中华人民共和国国家统计局. 第一次全国水利普查公报[J]. 中国水利,2013,721(7):1-3.
- [3] 严祖文,魏迎奇,张国栋. 病险水库除险加固现状分析及对策[J]. 水利水电技术,2010,41(10):76-79.
- [4] 国务院办公厅关于切实加强水库除险加固和运行管护工作的通知[EB/OL]. (2021-04-02)[2021-04-05]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-04/02/content\\_5597502.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-04/02/content_5597502.htm).
- [5] 付斌,李道国,王慕快. 云模型研究的回顾与展望[J]. 计算机应用研究,2011,28(2):420-426.

(下转第23页)