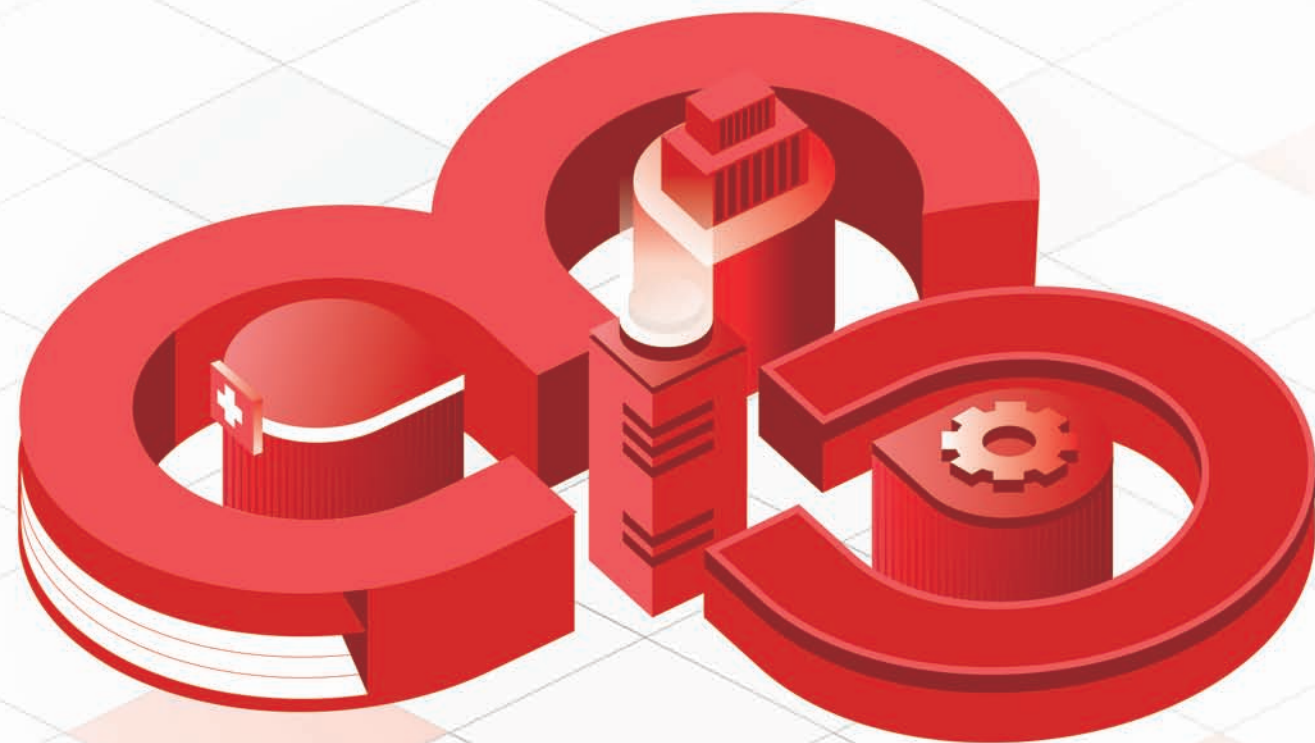




# 联通云

## 可信数智云



安全可信 · 云网一体 · 专属定制 · 多云协同



WWW.CUCLOUD.CN  
扫码关注联通云

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

广告

Vol.42 No.11 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 **11** 第42卷

# 水利建设与管理

WATER CONSERVANCY CONSTRUCTION AND MANAGEMENT

水利建设与管理



德泽水库大坝俯瞰

二〇二二年 第四十二卷 第十一期

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



# 上海宏波工程咨询管理有限公司

## 排水管网数字化平台应用场景多点开花 (建、采、检GIS平台)

生态环保、内涝治理、CIM底座，离不开地下一张网。排水管网是行业管理和问题治理的重点难点。宏波排水管网感知平台，历经3年研发迭代，伴随多项目使用。目前，平台空间上服务长江大保护系列项目，场景实现新建管线建设监管、存量管网普查、管线跟测、管道检测和修复监管的全业态覆盖，累计助力8000km管线数字化。平台持续迭代，化繁为简，追求“采集用户最少、填报动作最少、操作体验最好、数据质量最高”，实现“高效采集—过程监管—实时上图—同步移交”流程在线。我们竭诚为行业管理部门、管线项目法人、管线勘察单位提供平台服务。



联系电话：021-60150100 公司地址：上海市青浦区汇滨路1599号



## 河北省水利工程局集团有限公司

河北省水利工程局集团公司是河北省规模大、科技水平领先、实力较强的水利水电建设企业。具有国家水利水电施工总承包壹级、市政公用工程施工总承包壹级、地基与基础工程专业承包壹级、建筑机电安装专业承包壹级、建筑工程施工总承包贰级、钢结构工程专业承包叁级资质。公司注册资金10.18亿元，现有职工2500余人，各类型机械设备2365台(套)，年施工生产能力40亿元以上。现有下属分公司12个，一家医院及10个子公司，分支机构8个，省内外6个，国外2个。

河北省水利工程局集团有限公司先后承担了河北省90%以上的大中型水利水电工程的建设任务，承建了岗南水库、黄壁庄水库、桃林口水库、大浪淀水库等400余项省内大中型水利工程，自2003年南水北调工程开工以来，中标承建了南水北调中线京石段应急供水工程滹沱河倒虹吸、唐河倒虹吸、瀑河倒虹吸等三十多项大型干渠或建筑物工程，多项工程荣获中国水利工程优质(大禹)奖、省优质工程奖。引黄入冀补淀、雄安新区大树刘泵站、南拒马河治理工程先后中标，为集团公司高质量持续发展打下坚实基础。2021年中标固安县、宁晋县、定州市3项BOOT项目，投资估算共计32亿元。2018—2020年，全年新签合同额均达到60亿元以上，2021年突破80亿元，为集团公司实现“创百亿产值，建百年企业”的目标奠定了基础。

集团公司抓好省内市场，开拓省外市场，业务范围已扩展到新疆、西藏、内蒙古、宁夏、青海、甘肃、陕西、山西、河南、黑龙江、辽宁、吉林、山东、江西、江苏、浙江、福建、贵州、四川、云南、广东、广西、海南、北京、重庆、天津、深圳等地。

集团公司在立足省内、国内的同时，积极拓展国外业务，在突尼斯、孟加拉、卢旺达、布隆迪等国援助建设，工程品质获得好评。

集团公司注重科技投入，推行制度创新和科技创新，结合水利施工完成科技成果鉴定48项，其中2项获国家科技进步奖，44项获河北省科技奖。另有31项科技成果荣获国家专利，9项成果被评为水利行业工法。

集团公司以“守法经营、超前经营、自主经营、全员全过程经营”为经营理念，在激烈的市场竞争中潜心打造品牌，核心竞争力不断提升，综合实力显著增强，先后获得了“全国文明单位”“全国水利文明单位”“全国水利建设与管理先进集体”“全国水利建设市场‘AAA’级施工单位”“全国优秀水利企业”“2020年水利企业营业收入100强”“河北省消费者信得过单位”“河北省守合同重信用企业”“河北省建筑业先进企业”“河北省建设工程招标投标诚实守信5A级施工企业”等荣誉称号。

“育人、兴企、治水、报国”的宗旨已成为每一位水工人的不懈追求，河北省水利工程局集团有限公司将以优质的服务回馈社会，更愿与社会各界人士携手共铸新的辉煌，同谱盛世华章。



雄安新区白洋淀引黄大树刘泵站工程



南水北调滹沱河倒虹吸工程



南水北调青兰渡槽工程

电话：0311-86011258

传真：0311-86013211

邮箱：hebsgjbg@163.com

地址：河北省石家庄市金石街20号河北水建大厦



# 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 11 期

(总第 353 期)

2022 年 11 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11期

### 172 项节水供水重大水利工程专题

1 滇中引水工程弃渣场安全监测设计及应用 王和芬 晏 欣

### 科研设计

6 台阶式消能设计中相关参数的敏感性分析 姜 啸

12 丰溪河鸡公石崕段岸坡坍塌成因分析及对策研究  
戴 霖 简鸿福 邓 伟

18 弧形闸门机械开度与启闭机行程之间函数关系的研究及计算  
许海洋

23 防洪“四预”视域下海河流域防洪调度系统建设与发展构想  
齐师杰 吕天慧

### 地质与勘测

29 马街河水库坝基蚀变花岗岩勘察研究及其处理分析  
赵 静 郑培溪

37 吹填围垦堆载对临港道路及桥梁地基变形影响研究 竺中明

46 淤泥质黏土夹层对渗流坝体稳定性安全评价分析  
陈 超 王 霄 齐春舫

50 深层透水地基上水闸渗流安全分析与评价 罗居刚

### 水文泥沙

56 纳河袁家庵站测验方式优化可行性分析 蒙雅雯 崔建和

62 降水和下垫面对北峪河流域径流影响的定量研究 杨亚军

67 改进可公度法的丰满流域极端径流年预报  
班友康 梁 云 雷冠军

73 近 50 年乌江流域降雨演变趋势研究 李长江 吴海宽 付 杰

### 团体标准专题

79 水利团体标准发展策略研究 杨清风 王海燕

## 水利工程标准化管理经验交流

83 水利部调水管理司负责同志解读《调水工程标准化管理评价标准》

## 行业动态

• 10月12日,西藏湘河水利枢纽及配套灌区工程下闸蓄水,标志着工程正式投入初期运用。

西藏湘河水利枢纽水库正常蓄水位4099米,是目前在建海拔最高的重大水利工程。自2019年4月正式开工以来,项目参建各方努力克服高寒缺氧、低温施工等多重困难,全力以赴推动工程建设,特别是新冠肺炎疫情发生以来,参建各方贯彻党中央、国务院“疫情要防住、经济要稳住、发展要安全”的决策部署,广大建设者一手抓疫情防控,一手抓工程施工,成功实现了下闸蓄水的重要节点目标。

(来源:水利部网站,网址:[http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202210/t20221013\\_1600404.html](http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202210/t20221013_1600404.html),日期:2022年10月12日)

• 10月28日,西藏帕孜水利枢纽及配套灌区主体工程正式开工,工程全面进入实施阶段。

帕孜水利枢纽及配套灌区工程水库正常蓄水位4325m,是国务院确定的150项重大水利工程之一,是全国目前在建海拔最高的重大水利工程,也是西藏“十四五”新开工建设的首个重大水利工程。

(来源:水利部网站,网址:[http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202210/t20221028\\_1602385.html](http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202210/t20221028_1602385.html),日期:2022年10月28日)

## 宣传与广告

封面 德泽水库大坝工程

封二 上海宏波工程咨询管理有限公司

封三 河北省水利工程局集团有限公司

封底 中国联通

## 《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、中邮阅读网及其系列数据库产品中,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. 11 2022

## CONTENTS

### **Special Topic on 172 Major Water Conservancy Projects for Water Saving and Water Supply**

- 1 Design and application of safety monitoring for slag disposal yard in Dianzhong Water Diversion Project  
WANG Hefen, YAN Xin

### **Scientific Design**

- 6 Sensitivity analysis of related parameters in stepped energy dissipation design  
JIANG Xiao
- 12 Cause analysis and countermeasures of bank slope collapse in Jigongshizai Section of Fengxi River  
DAI Lin, JIAN Hongfu, DENG Wei
- 18 Study and calculation of the functional relationship between the mechanical opening of curved sluice and the hoist trip  
XU Haiyang
- 23 Construction and development of flood control dispatching system in Haihe River Basin from the perspective of “four pres” for flood control  
QI Shijie, LÜ Tianhui

### **Geology and Survey**

- 29 Exploration and treatment analysis of altered granite in dam foundation of Majiehe Reservoir  
ZHAO Jing, ZHENG Peixi
- 37 Study on the influence of hydraulic reclamation surcharge on the deformation of harbor road and bridge foundation  
DA Zhongming
- 46 Safety evaluation of the stability of seepage dam with silty clay partings  
CHEN Chao, WANG Xiao, QI Chunfang
- 50 Seepage safety analysis and evaluation of sluice on deep permeable foundation  
LUO Jugang

### **Hydrology and Sediment**

- 56 Feasibility analysis of test method optimization of Yuanjia'an Station in Ruihe River  
MENG Yawen, CUI Jianhe
- 62 Quantitative study on the influence of precipitation and underlying surface on runoff in Beiyu River Basin  
YANG Yajun
- 67 Annual prediction of extreme runoff in Fengman Watershed by improved commensurable method  
BAN Youkang, LIANG Yun, LEI Guanjun
- 73 Study on rainfall evolution trend in Wujiang River Basin in recent 50 years  
LI Changjiang, WU Haikuan, FU Jie

## Special Topic on Group Standards

79 Research on development strategy of water conservancy group standards YANG Qingfeng, WANG Haiyan

## Exchange of Experience in Standardization Management of Water Conservancy Projects

82 Interpretation of "Evaluation Standards for Standardization Management of Water Diversion Projects" by the Department of Water Diversion Management, Ministry of Water Resources

## 行业动态

• 十三届全国人大常委会第三十七次会议 2022 年 10 月 30 日表决通过黄河保护法。这部法律将从 2023 年 4 月 1 日起施行。

黄河保护法包括总则、规划与管控、生态保护与修复、水资源节约集约利用、水沙调控与防洪安全、污染防治、促进高质量发展、黄河文化保护传承弘扬、保障与监督、法律责任和附则 11 章，共 122 条。

(来源：中国水利公众号，日期：2022 年 10 月 30 日)

• 为加快构建“系统完备、安全可靠，集约高效、绿色智能，循环通畅、调控有序”的国家水网，贯彻落实《关于推进水利工程标准化管理的指导意见》和《水利工程标准化管理评价办法》有关要求，规范开展调水工程标准化管理评价工作，近日，水利部印发《调水工程标准化管理评价标准》(以下简称《评价标准》)。

《评价标准》明确了调水工程标准化管理评价的内容、方式和工作流程等。结合调水工程特点，《评价标准》将调水工程标准化管理评价分为整体评价和单项工程评价，并分别明确了评价标准。整体评价侧重对调水工程整体性、系统性功能发挥情况的评价，以促进实现工程安全、供水安全、水质安全。单项工程评价侧重水库、水闸、堤防、泵站、渠道(渡槽)、管涵(隧洞、倒虹吸)等 6 类单项工程管理情况的评价。

《评价标准》的出台，将进一步指导调水工程提升运行管理能力和水平，推进管理规范化、智慧化、标准化，确保调水工程运行安全和效益持续发挥，推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/202211/t20221103\\_1603144.html](http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202211/t20221103_1603144.html)，日期：2022 年 11 月 3 日)

# 滇中引水工程弃渣场安全监测设计及应用

王和芬<sup>1</sup> 晏 欣<sup>2</sup>

- (1. 云南省水利水电勘测设计研究院, 云南 昆明 650021;  
2. 云南省调水中心, 云南 昆明 650051)

**【摘 要】** 弃渣场作为工程建设的重要组成部分, 如何做好规划和设计方案, 不仅关乎环境问题, 更直接关系到周边人民的生命财产安全, 因此工程建设的弃渣场安全监测与其他建筑物安全监测同等重要。云南省滇中引水工程弃渣场安全监测设计以《土石坝安全监测技术规范》作为主要规范依据。本文分析研究并提出了弃渣场安全监测项目选取原则、监测基本方法, 详细论述了项目选取原则、监测技术手段、设施布置、监测时段及频次等。云南省滇中引水工程弃渣场安全监测设计方案取得的重要成果经验, 可为今后其他类似弃渣场安全监测设计提供必要的参考和借鉴。

**【关键词】** 弃渣场安全监测; 水土保持监测; 敏感因素; 堆渣高度

中图分类号: TV698.1

文献标志码: B

文章编号: 2097-0528(2022)11-001-05

## Design and application of safety monitoring for slag disposal yard in Dianzhong Water Diversion Project

WANG Hefen<sup>1</sup>, YAN Xin<sup>2</sup>

- (1. Yunnan Institute of Water & Hydropower Engineering Investigation, Design and Research, Kunming 650021, China;  
2. Yunnan Water Diversion Center, Kunming 650051, China)

**Abstract:** How to do a good job in planning and design scheme of slag disposal yard, which is an important part of project construction, is not only related to environmental issues, but also directly related to the safety of life and property of surrounding people. Therefore, the safety monitoring of slag disposal yard in project construction is as important as that of other buildings. The Technical Specification for Earth-Rockfill Dam Safety Monitoring is taken as the main standard basis for the safety monitoring design of slag disposal yard in Dianzhong Water Diversion Project of Yunnan Province. This paper analyzes and puts forward the project selection principles and basic methods of safety monitoring for slag disposal yard, and discusses in detail the project selection principle, monitoring technological means, facility arrangement and monitoring time and frequency. The important achievements and experiences obtained in the safety monitoring design scheme of slag disposal yard in Dianzhong Water Diversion Project of Yunnan Province can provide necessary reference for the safety monitoring design of other similar slag disposal yard in the future.

**Keywords:** safety monitoring of slag disposal yard; soil and water conservation monitoring; sensitivity factor; slag height

收稿日期: 2021-11-29

作者简介: 王和芬(1979—), 女, 高级工程师, 主要从事水利水电工程结构设计及永久安全监测工作。





滇中引水工程是国务院确定的172项节水供水重大水利工程中的标志性工程,是中国西南地区规模最大、投资最多的水资源配置工程<sup>[1]</sup>,也是西南地区最长距离输水工程。因此滇中引水工程具备长距离输水工程的典型特点:“点状”和“线型”兼具、跨越地貌类型多、土石方量大、沿线弃渣多等<sup>[2]</sup>。滇中引水工程中的隧洞工程占整个工程约92%,因此弃渣量大的特点更为突出。然而弃渣场位置的选择受生态红线、风景名胜区、基本农田、环保保护的制约,弃渣后还可能对周边公路、铁路、学校等安全带来一定程度的影响,因此可布设弃渣场的位置很有限,导致弃渣场规模越来越大、堆渣高度越来越高。为确保弃渣场运行期的稳定性,除了工程措施外,做好安全监测也是非常必要的,安全监测可实时监控弃渣场施工期及运行期的稳定性<sup>[3]</sup>,为工程安全运行提供有力的技术保障,为下游的安全工作提供预警。

## 1 工程概况

滇中引水工程是云南省可持续发展的战略性基础工程,工程从云南省西部金沙江取水,向相对缺水的滇中地区长距离引水<sup>[4]</sup>。整个工程由水源工程和输水工程两部分组成,其中输水工程穿越大理、丽江、楚雄、昆明、玉溪、红河6个自治州(市)的35个县(市、区),总干渠全长664.236km,沿引水路线划分为大理Ⅰ段、大理Ⅱ段、楚雄段、昆明段、玉溪段及红河段共6各部分,共设置各类建筑物245座。

滇中引水工程为长距离输水工程,沿线建筑物以隧洞为主,占比约92%,地下洞室开挖量较大,但填筑量和可利用量较小,因此引水隧道沿线弃渣量巨大。土石方开挖总量约8824.49万 $\text{m}^3$ ,土石方回填总量约1630.34万 $\text{m}^3$ ,弃渣总量达到7194.15万 $\text{m}^3$ 。工程建设征占地总面积3902.40 $\text{hm}^2$ ,共规划223处弃渣场,其中水源段3处,大理Ⅰ段27处,大理Ⅱ段34处,楚雄段62处,昆明段35处,玉溪段19处,红河段43处<sup>[1]</sup>。

## 2 安全监测的目的与意义

随着经济社会的发展和物联网技术、云计算、通信技术以及地球信息技术等高科技领域技术理论迅速崛起,为各行业各领域提供和创造了条件和机会,安全监测的地位优势与作用也日益凸显<sup>[5]</sup>。弃渣场作为水利工程建设的重要组成部分,做到渣场与周边环境以及水利工程的整体协调、互为支撑极为重要,因此弃渣场的监测与大坝安全监测同等重要。弃渣场的安全监测在今后较长一个时期还将会越来越被重视,尤其是对大型弃渣场以及对下游具有敏感影响的弃渣场,原则上都需要采取必要的安全监测措施,要把弃渣场的安全监测纳入工程建设项目“五位一体”的安全远程监测系统。

滇中引水工程的地下输水隧洞,开挖弃渣量巨大,且受各种因素的影响,弃渣场数量众多。由于每一个弃渣场位置与规模不同、重要性不一、地形地质条件不同、失稳危害性各异,为确保每一个弃渣场施工期和运行期的安全稳定运行,除了采取工程安全措施外,做好安全监测也是非常必要的。弃渣场的安全运行不仅关乎环境,也关乎人民的生命财产安全,更直接关系到云南省国民经济的总体发展。因此,对规模较大或具有敏感影响的弃渣场建立一套实用、高效、先进的安全监测系统,并进行长期的观测、分析、评价是十分必要的。

设置弃渣场的安全监测系统,建立弃渣全过程的安全监测监管体系,构建弃渣信息管理平台框架,一是可以监测弃渣场的变形、渗流、沉降变化情况<sup>[6]</sup>,获取相关的实测性态值,并进行分析、评价,判断其运行情况和安全程度,当发现其异常和有危险迹象时,可以及时采取有针对性的补救措施,以最大限度降低损失;二是根据滇中引水工程沿线弃渣场特点,建立弃渣安全监测监管体系后,可以大大提高工程运行期的管理效率,减少人力物力的投入,降低运营成本。

## 3 弃渣场安全监测项目选取原则

大规模弃渣场的安全监测设计,据可查证资料显



示,目前没有类似工程可借鉴参考,且国内还没有专门针对弃渣场的监测设计规范,现行《水利水电工程安全监测设计规范》(SL 725—2016)和《水土保持监测技术规程》(SL 277—2002)也未涉及弃渣场安全监测的内容。

弃渣场选址受生态红线、风景名胜区、基本农田、乔木林、地理环境、地形地质条件等因素的影响<sup>[7]</sup>,导致弃渣场容量越来越大,弃渣高度越来越高,弃渣本身的安全稳定监测也越来越受到重视。滇中引水工程作为国家“十三五”172项重点水利工程之一,也是云南省可持续发展的战略性基础工程,必须确保每座建筑物的安全运行。弃渣场作为规模较大的地面工程,面对复杂的地形地质条件和外部环境,一旦失稳造成的影响和危害较大,因此弃渣场的建设越来越受到各方的高度重视。为切实落实安全管理责任,确保弃渣场安全运行,做好安全监测工作非常重要,应用先进技术推进弃渣场安全监测预警建设势在必行<sup>[8]</sup>。滇中引水工程的弃渣场设计,由于目前没有明确的设计规范,为规范各弃渣场安全监测的设计标准和保证设计成果质量,经三家设计单位研究决定,以《土石坝安全监测技术规范》(SL 551—2012)<sup>[9]</sup>为基础,研究和细化监测项目选取、监测断面设置和监测设施布置等安全监测总体设计原则和基本方法。滇中引水工程弃渣场安全监测项目的选取原则如下:

a. 弃渣场级别为3级及以上、堆高超过50m、弃渣场下方布设有重要建筑物或敏感建筑物的,只要具备其中一个条件,弃渣场就必须进行安全监测设计。

b. 为及时、准确掌握弃渣场的情况,特别是在施工期、暴雨、洪灾等情况下,及时发现现场重大危害隐患,每个弃渣场设置一套视频监测系统。

c. 监测断面(部位)应布设在工程有代表性的部位。

d. 安全监测由自动化监测和人工巡视检查两部分组成。

e. 在满足精度要求的前提下,所选仪器应可靠、耐久、经济、实用。

#### 4 监测设计的技术手段及基本方法

弃渣场的监测内容主要包括表面变形监测(松动、坍塌、滑移等)、深部变形监测、渗压监测、视频监控、降雨量监测和人工巡视检查<sup>[10]</sup>。

滇中引水工程弃渣场监测借鉴土石坝安全监测的方法和技术手段,主要内容如下:

a. 表面变形监测。根据弃渣场的容量和堆高,布设2~3个监测断面,每个监测断面在弃渣场表面布设3~11个表面变形测点,采用交会法和三角高程法对弃渣场表面位移进行监测,测量水平位移中误差不大于5mm、垂直位移中误差不大于10mm;首次观测在最短时间内连续观测两次,取平均值作为初始值。

b. 深部变形监测。在最大坡高监测断面的弃渣场临空面布设一定数量的测斜管,对弃渣场内部滑移变形进行监测;将测斜仪测头放入测斜管内,导轮顺着施测方向的导槽,缓缓滑入,每0.5m设置一个传感器传输一组数据,该数据反映测斜管中逐段产生位移后管轴线与铅垂线夹角的正弦值,分段求出水平位移,累加得出总位移量及沿管轴线整个孔深位移的变化情况。

c. 渗压监测。利用深部变形测斜管进行渗压监测,将测斜管下部制作成花管,从而兼做测压管使用。当测斜管数量不足或位置不合适时,再在堆渣体底部布置一定数量的渗压计。用钢弦频率计观测,将仪器引出电缆与频率计接线柱相连,打开仪器开关,测读各个仪器稳定的频率读数及温度。

d. 视频监控。在有4G信号覆盖的弃渣场布置1个视频监控点,监控范围为整个弃渣场,监控弃渣场表面变形情况,特别是暴雨期间弃渣场的稳定情况。

e. 降雨量监测。在“滇中红层”区域的软岩弃渣场,布设1个遥测雨量站,监测弃渣场附近的降雨量变化情况。

f. 人工巡视检查。主要依靠目视、耳听、手摸等直观方法,可辅以量尺、放大镜、望远镜、照相摄像设备、无人机等工具,也可利用视频监视系统辅助现场检查。



## 5 典型弃渣场监测设施布置设计

滇中引水工程弃渣场数量达 223 处之多,弃渣场工程等别为 2 级的有 9 处,等别为 3 级的有 53 处,堆渣高度大于 100m 的有 10 处,弃渣量大于 100 万  $\text{m}^3$  的有 23 处,大多集中在大理段。因此选择等别高、堆渣高度较高的具有代表性的大理Ⅱ段洗窝帚山 1 号弃渣场作为典型进行安全监测设计,其他弃渣场安全监测设计参照该弃渣场进行。

洗窝帚山 1 号弃渣场,容量 126.45 万  $\text{m}^3$ ,堆高 106m,等别为 2 级。弃渣主要来自狮子山隧洞、牛驼子箐暗涵、洗窝帚山隧洞、麻栗园暗涵、麻栗园倒虹吸、品甸海隧洞进口段、进场路工程开挖所形成的废弃料,渣料以泥岩为主,并有部分砂岩。该渣场表面变形监测布置有 3 个监测断面:断面 1 布置于冲沟左岸,从最高平台 2030m 高程开始,每隔一级马道布置一个测点,共布置 3 个测点;断面 2 为重点监测断面,顺冲沟走向在每级马道上及拦渣坝坝顶各布置一个测点,共布置 11 个测点;断面 3 布置于冲沟右岸,从 2020m 高程开始,每隔一级马道布置一个测点,共布置 5 个测点。洗窝帚山 1 号弃渣场共布置测点 19 个,为节省工程投资,断面 1 与断面 3 均为互补方式隔级布置测点,以做到用最少的测点做最全面的监测。

弃渣场表面变形采用交会法和三角高程进行监测。根据弃渣场的地形条件,在左岸布设 2 个位移监测网点、在右岸布设 3 个位移监测网点作为表面位移观测的工作基点。

深部变形监测是在弃渣场中部选 1 个监测断面布置测斜管。为节省工程投资,同时也能监测出渣体的深部变形,采用隔级布置方式,共布设 4 根测压管。另外,为了用最省的工程投资达到监测渗透压力的目的,将测斜管下部制作成花管,从而兼做测压管使用,并在管底设置渗压计,对弃渣场浸润线变化进行监测。

由于弃渣场填料为弃渣,压实度很低,颗粒级配较差,因此测压管施工方案及材料的选择非常重要。考虑到渣体的变形量非常大,常规大坝及边坡深度变形

测量所用的 ABS 管材存在抗拉、抗剪强度低等问题,采用多维度变形测量仪器即柔性测斜仪投资较高,因此通过综合分析对比,滇中引水工程深部变形监测管材采用钢管;考虑到弃渣场渣料的随机堆放性、级配的不确定性 & 压实度低等因素,测压管如果采用预埋方式将达不到设计要求,因此本工程考虑测压管采用钻孔方式埋设,测压管钻孔若塌孔严重时允许跟套管,但要求套管能取出,当无法取出时,套管最大允许长度与测斜管管段长度一致,采用 2m,并尽量使套管接头与测斜管接头保持一致。

为了更及时、更全面、更直观地了解弃渣场的情况,特别是为了及时直观地掌握施工期及汛期弃渣场安全稳定情况<sup>[11]</sup>,在弃渣场旁布设 1 个视频监控点。洗窝帚山 1 号弃渣场视频监控点布置于右岸渣场旁 2000m 高程左右,可以覆盖整个弃渣场,监控弃渣场的变形情况。

另外,为实现自动化监测,根据弃渣场的重要性、交通条件及管理条件<sup>[12]</sup>,选择位于水源工程区的一个弃渣场作为试点弃渣场,采用全自动化安全监测系统,以 GPS、柔性测斜仪和渗压计对弃渣场表面变形、深部变形和渗压进行实时自动化监测。同时,根据滇中引水工程独有的“滇中红层”特点,选择位于“滇中红层”区域的重要弃渣场补充雨量自动化观测设施。

滇中引水工程共规划 223 处弃渣场,其中有 85 个需要布设安全监测设备,布设的原则、内容、方法与洗窝帚山 1 号弃渣场基本一致。

洗窝帚山 1 号弃渣场监测设备布置见图 1 和图 2。

## 6 监测时段及频次

弃渣场的变形主要集中在主体工程施工时段及完工初期,完工后期渣体沉降变形基本趋于稳定,变形量会越来越小且植被已经恢复。根据弃渣场特性,将安全监测关键时段定为弃渣场安全稳定最关键时期,即主体工程建设期至弃渣场施工完工后 3 年。弃渣场监测期结束后,应对其安全稳定状况进行一次系统性的分析评估,再决定对监测设施停止观测或继续观测。



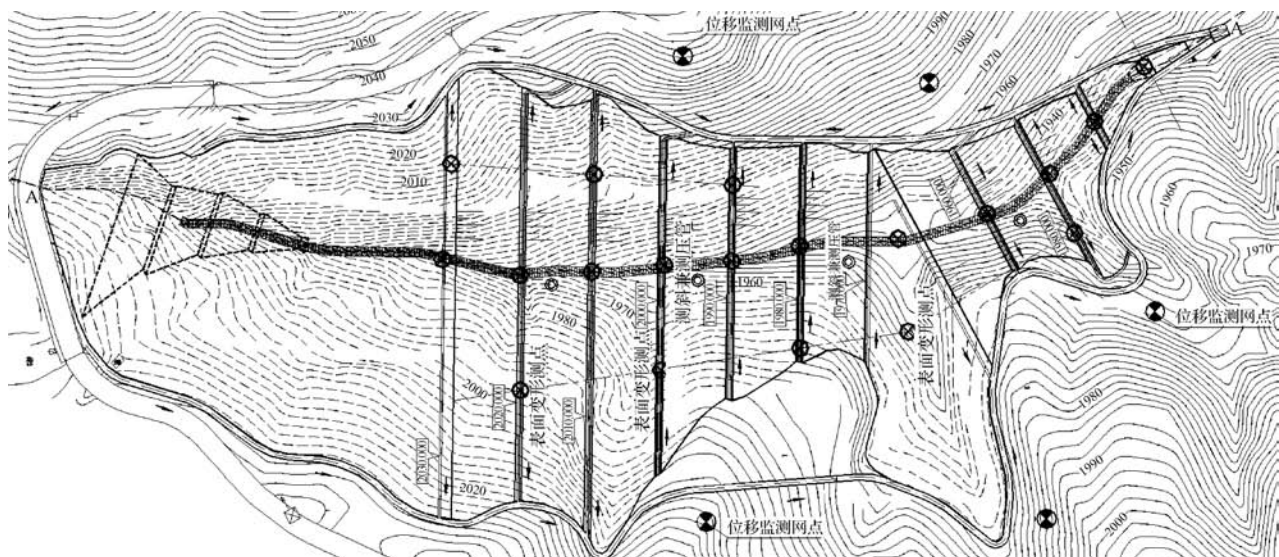


图1 洗窝昂山1号弃渣场监测设备平面布置

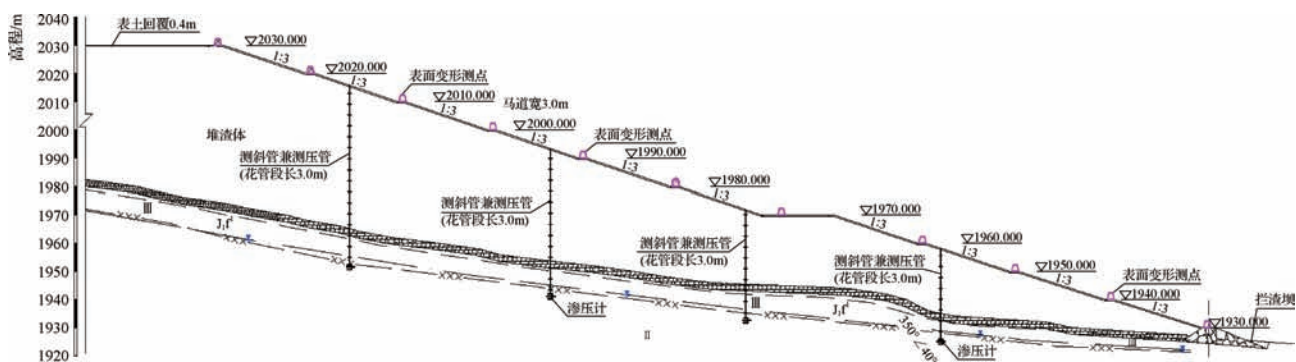


图2 弃渣场最大剖面监测设备布置(A—A)

根据初步拟定的弃渣场安全稳定最关键时期,确定其安全监测方法及频次为:①水平位移观测及垂直位移观测:施工期和完工后第1年汛期(6—10月)每月2次,非汛期每月1次;第2、3年汛期每月1次,非汛期每季度1次;若出现测值增长较快时应酌情加密测次;②水平位移监测网观测:水平位移监测网在施工期及运行期每年均进行1次稳定性复测;③测斜兼测压管观测:测斜兼测压管安装完工1周后开始观测,施工期和完工后第1年汛期(6—10月)每月4次,非汛期每月2次;第2、3年汛期每月2次,非汛期每月1次;若出现测值增长较快时应酌情加密测次;④渗压计观测:渗压计埋设安装完毕就应投入观测,施工期和完工后第1年汛期(6—10月)每月4次,非汛期每月2次;第2、3年汛期每月2次,非汛期每月1次;若出现

测值增长较快时应酌情加密测次。

## 7 结 论

弃渣场安全监测对弃渣场的安全稳定具有重要意义,目前国内外针对弃渣场开展的监测主要是水土保持监测,并非弃渣本身的安全稳定监测,然而弃渣场自身的安全稳定更为重要,它的稳定不仅关乎环境,更关乎人民的生命财产。因此,对于规模较大或者具备敏感因素的弃渣场增加安全监测是非常必要。但是,目前国内没有对弃渣场进行安全监测的工程实例,且国内还没有专门针对弃渣场安全稳定监测的设计规范。滇中引水工程弃渣场安全监测设计成果,以及积累的实践和经验,在今后一段时期内可为其他类似的弃渣场设计提供一定的借鉴和参考。◆ (下转第11页)



# 台阶式消能设计中相关参数的敏感性分析

姜 啸

(秀山县水利电力勘测设计院, 重庆 409900)

**【摘 要】** 台阶式坝面的消能率超过光滑坝面,但台阶式消能设计受许多参数影响。为充分利用溢流面消能,本文利用昌桑算法计算不同边界条件下的台阶式坝面的消能率。通过敏感性分析,对台阶尺寸、溢流面坡度、单宽下池流量和溢流面净高等不确定性因素进行比较。结果表明,单宽下泄流量和溢流面净高是较为敏感的因素。在设计方案中,应更加重视单宽下泄流量和溢流面净高对溢流面消能效果的影响。

**【关键词】** 台阶式消能;消能率;单宽流量;溢流面净高;敏感性

中图分类号: TV653+.9

文献标志码: A

文章编号: 2097-0528(2022)11-006-06

## Sensitivity analysis of related parameters in stepped energy dissipation design

JIANG Xiao

(Xiushan Institute of Water Conservancy and Electric Power Survey and Design, Chongqing 409900, China)

**Abstract:** The energy dissipation ratio of the stepped dam face is higher than that of the smooth dam face. However, the design of energy dissipation of stepped spillway is affected by many parameters. In order to make full use of the energy dissipation of overflow surface, the H. Chanson formula is used to calculate the energy dissipation ratio of stepped dam face under different boundary conditions. Through sensitivity analysis, the uncertain factors such as step size, overflow surface slope, single width flow ratio and overflow surface clear height are compared. The results show that single width discharge ratio and clear height of overflow surface are more sensitive factors. In the design scheme, more attention should be paid to the influence of single width discharge rate and clear height of overflow surface on the energy dissipation effect of overflow surface.

**Keywords:** energy dissipation of stepped spillway; energy dissipation ratio; single width flow; clear height of overflow surface; sensitivity

## 1 引 言

台阶式消能工在水库、电站、拦河闸坝甚至灌溉渠

道工程的泄水建筑物中都有应用,尤其是在数目众多的小型工程中更为常见。台阶式溢流坝模型试验结果表明:其消能率超过光滑坝面<sup>[1]</sup>。如果充分利用溢流

收稿日期: 2022-03-29

作者简介: 姜啸(1985—),男,高级工程师,主要从事水利水电工程设计工作。



面消能,则溢流面出口流速降低,下游消力池长度缩短,这样不仅节约工程布置空间,并且结构简单、施工难度小。台阶式消能工理论研究较多<sup>[2]</sup>,《混凝土重力坝设计规范》(SL 319—2018)的条文说明指出可参考《水工设计手册》(第2版)第7卷中的相关公式进行初步设计时的水力计算<sup>[3]</sup>。至此,台阶式消能在设计过程中具有了规范性质的理论支撑依据。

通过引入不确定性分析方法,以台阶式消能的效率为分析指标,对溢流面坡度、单宽流量和溢流面净高等不确定性因素采用昌桑(H. Chanson)算法(以下简称昌桑算法)进行测算,并分析不确定性因素对消能效果的敏感程度,推断其中相对主要的敏感因素。为溢流面消能方式的比选和水工结构体型的优化提供一定参考。

## 2 昌桑算法简介

根据《水工设计手册》(第2版)第7卷:当通过台阶下泄水流形成推移流流态时,可按昌桑算法进行台阶消能水力学计算。

均匀流水深为

$$d_0 = \left( \frac{fq^2}{8g\sin\alpha} \right)^{3/2} \quad (1)$$

式中: $f$ 为摩擦系数; $q$ 为单宽流量, $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ ; $\alpha$ 为泄槽的坡角, $(^\circ)$ 。

摩擦系数为

$$F_* = \frac{q}{\sqrt{gk_*^3 \sin\alpha}} \quad (2)$$

式中: $k_*$ 为糙度, $k_* = h\csc\alpha$ ; $q$ 为单宽流量, $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ ;其他参数含义同上。

堰顶至表面掺气起始断面的长度 $L_1$ 、断面水深 $d_1$ 和平均流速 $v$ 分别为

$$L_1 = k_* \times 9.719 (\sin\alpha)^{0.0796} F_*^{0.713} \quad (3)$$

$$d_1 = k_* \frac{0.4034}{(\sin\alpha)^{0.04}} F_*^{0.592} \quad (4)$$

$$v = \frac{q}{d_1}$$

形成全断面均匀掺气水流的距离为

$$L_2 = \frac{8.60q^{0.713}}{k_*^{0.0695} (\sin\alpha)^{0.277}} \quad (5)$$

均匀掺气水流系数分别为

$$c_e = 0.9\sin\alpha \quad (6)$$

$$x = 0.628 \frac{0.514 - c_e}{c_e - (1 - c_e)} \quad (7)$$

$$f_e = 0.5(1 + \tanh x) \quad (8)$$

式中: $\tanh x$ 为双曲正切函数。

稳定掺气区的均匀流掺气水流的水深 $d_0$ 、相应断面的平均流速 $v_0$ 分别为

$$d_0 = d_e \left( \frac{f_e}{8\sin\alpha} \right)^{1/3} \quad (9)$$

$$v_0 = \frac{q}{d_0} \quad (10)^{[4]}$$

## 3 消能率计算公式简介

溢流面出口断面的消能率为

$$\eta = \frac{E - \left( d_0 + \frac{v_0^2}{2g} \right)}{E} \times 100\% \quad (11)$$

$$E = H_{\text{堰}} + H \quad (12)$$

式中: $H_{\text{堰}}$ 为溢流面净高,m; $H$ 为堰上水头,m;其余符号意义同前<sup>[4]</sup>。

## 4 敏感性分析法简介

敏感性分析是一种定量风险分析,将项目结果的变化与定量风险分析模型中输入的变化建立关联,从而确定产生最大潜在影响的项目风险或不确定性来源。敏感性分析可从若干不确定性因素中逐一找出对分析指标有重要影响的敏感性因素,并通过计算分析重要因素对效益指标的影响程度和敏感性程度<sup>[5]</sup>。主要分析步骤如下:

- 初选台阶式消能率的不确定因素。
- 确定台阶式消能率的不确定因素变化程度并计算相应的敏感性系数。
- 计算变化后的不确定因素,并将所得评价指标与基本方案评价指标进行对比分析。
- 归纳敏感性分析的结论,推断相对主要的台阶



式消能工敏感因素之间可能存在的关联,指出最为关键的几个敏感因素,针对敏感性分析结果中不确定因素的影响,提出相应的减轻措施。

对台阶式消能工的消能效果进行量化分析,可避免只能按经验进行定性分析,或仅仅将台阶式消能工的消能率当作联合消能中的安全储备,有助于在消能效果变化与分析模型中的要素变化之间建立联系,并确定对其消能效果具有相对较大的潜在影响的不确定性来源。

## 5 台阶消能工基本模型及不确定性因素选取

以小(2)型工程观音阁水库初步设计推荐方案为例,其永久挡水建筑物推荐坝型为重力坝,属于4级水工建筑物。其溢流坝段在设计洪水位工况下,堰上水头  $H_w = 1.66\text{m}$ ,下泄流量  $Q = 60.6\text{m}^3/\text{s}$ 。溢流坝段的溢流面净高  $H_{\text{堰}} = 21.5\text{m}$ 、净宽  $B_{\text{堰}} = 16\text{m}$ 。为了减小大坝溢流面出口的流速,防止泄洪时坝趾被冲刷,同时缩短溢流面出口设置的消力池长度,考虑在大坝溢流面内设置消能台阶。初步拟定溢流面坡度为  $1:0.9$ ,设计溢流面坡长  $L = 26.9\text{m}$ ,台阶的步高  $h = 0.6\text{m}$ 、步长  $l = 0.54\text{m}$ 。按照前述公式计算得到消能后出口断面的水深  $d_2$ 、该断面平均流速  $v_2$  及其消能率  $\eta$ ,见表1。

根据昌桑算法公式组成,同时结合台阶式消能工结构特点,影响台阶式溢流面的水力学参数包括单宽流量、溢流面净高,溢流面的坡比(或坡角)、台阶断面几何尺寸等<sup>[6]</sup>。

表1 台阶消能工基本模型计算结果

计 算 参 数	设计工况计算结果
堰上水头 $H_w/\text{m}$	1.66
溢流面净高 $H_{\text{堰}}/\text{m}$	21.50
单宽流量 $q/[\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})]$	3.79
坡度 $m$	0.90
台阶的步高 $h/\text{m}$	0.60
台阶的步长 $l/\text{m}$	0.54
出现均匀掺气水流的距离 $L_2/\text{m}$	25.72
出口断面水深 $d_2/\text{m}$	0.45
出口断面平均流速 $v_2/(\text{m}/\text{s})$	8.42
坝趾处的消能率 $\eta/\%$	82.5

因此,分别选定台阶步高  $h$ 、溢流面的底坡  $m$ 、设计洪水位工况下的单宽流量  $q$  和溢流面净高  $H_{\text{堰}}$  等4项作为不确定因素<sup>[7]</sup>,并采用昌桑算法对同一工程算例进行计算,比较在以上影响因素相同的设计条件下,当溢流面形成推移流流态时,消能率的不同,并确定其偏离基本情况的程度。

## 6 不确定因素变化程度的确定及对应消能率的计算

为观察各种变化对分析指标的影响,将台阶式消能工消能率的变化与分析模型中输入的不确定因素变化建立关联,分别选择不确定因素变化的  $\pm 10\%$ 、 $\pm 20\%$ 、 $\pm 30\%$ 、 $\pm 40\%$  和  $\pm 50\%$  作为不利和有利的变化程度,以便计算敏感性分析指标,并编制敏感性分析表或绘制敏感性分析图。从而确定对台阶式消能工消能效果产生最大潜在影响的不确定性来源<sup>[8]</sup>。

溢流面台阶步高尺寸从增加50%到减少50%时,消能率计算结果见表2。

表2 基本模型台阶尺寸变化的计算结果

不确定因素变化率/%	+50	+40	+30	+20	+10	0	-10	-20	-30	-40	-50
坡度 $m$	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
台阶的步高 $h/\text{m}$	0.90	0.84	0.78	0.72	0.66	0.60	0.54	0.48	0.42	0.36	0.30
台阶的步长 $l/\text{m}$	0.81	0.76	0.70	0.65	0.59	0.54	0.49	0.43	0.38	0.32	0.27
出现均匀掺气水流的距离 $L_2/\text{m}$	25.00	25.12	25.25	25.39	25.55	25.72	25.91	26.12	26.36	26.65	26.99
出口断面水深 $d_2/\text{m}$	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
出口断面平均流速 $v_2/(\text{m}/\text{s})$	8.42	8.42	8.42	8.42	8.42	8.42	8.42	8.42	8.42	8.42	8.42
坝趾处消能率 $\eta/\%$	82.5	82.5	82.5	82.5	82.5	82.5	82.5	82.5	82.5	82.5	82.5



溢流面坡度从增加 50% 到减少 50% 时,消能率计算结果见表 3。

表 3 基本模型溢流面坡度变化的计算结果

不确定因素变化率/%	+50	+40	+30	+20	+10	0	-10	-20	-30	-40	-50
坡度/m	1.35	1.26	1.17	1.08	0.99	0.90	0.81	0.72	0.63	0.54	0.45
出现均匀掺气水流的距离 $L_2$ /m	27.00	26.72	26.43	26.19	25.95	25.72	25.49	25.33	25.20	25.10	25.11
出口断面水深 $d_2$ /m	0.50	0.48	0.47	0.46	0.46	0.45	0.44	0.43	0.43	<u>0.42</u>	<u>0.42</u>
出口断面平均流速 $v_2$ /(m/s)	7.58	7.89	8.06	8.23	8.23	8.42	8.61	8.81	8.81	9.03	9.07
坝趾处消能率 $\eta$ /%	85.2	84.2	83.7	83.1	83.1	82.5	81.8	81.1	81.1	80.2	80.1

注 表中出口断面水深  $d_2$  等带下划线数值,因该模型溢流面出口断面未形成稳定掺气均匀流,其相应数据内插而得。

单宽下泄流量从增加 50% 到减少 50% 时,消能率计算结果见表 4。

表 4 基本模型单宽下泄流量变化的计算结果

不确定因素变化率/%	+50	+40	+30	+20	+10	0	-10	-20	-30	-40	-50
单宽流量 $q$ /[ $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ ]	5.68	5.30	4.92	4.55	4.17	3.79	3.41	3.03	2.65	2.27	1.89
出现均匀掺气水流的距离 $L_2$ /m	34.34	32.69	31.01	29.29	27.53	25.72	23.86	21.93	19.94	17.87	15.69
出口断面水深 $d_2$ /m	<u>0.58</u>	<u>0.56</u>	<u>0.53</u>	<u>0.50</u>	0.48	0.45	0.42	0.38	0.35	0.32	0.28
出口断面平均流速 $v_2$ /(m/s)	9.73	9.51	9.29	9.09	8.68	8.42	8.12	7.97	7.58	7.10	6.76
坝趾处消能率 $\eta$ /%	77.1	78.1	79.0	79.8	81.4	82.5	83.6	84.2	85.6	87.3	88.4

注 表中出口断面水深  $d_2$  等带下划线数值,因该模型溢流面出口断面未形成稳定掺气均匀流,其相应数据内插而得。

溢流面净高从增加 50% 到减少 50% 时,消能率计算结果见表 5。

表 5 台阶消能工模型溢流面净高变化的计算结果

不确定因素变化率/%	+50	+40	+30	+20	+10	0	-10	-20	-30	-40	-50
净高差 $H_{\text{堰}}$ /m	32.25	30.10	27.95	25.80	23.65	21.50	19.35	17.20	15.05	12.90	10.75
出现均匀掺气水流的距离 $L_2$ /m	25.72	25.72	25.72	25.72	25.72	25.72	25.72	25.72	25.72	25.72	25.72
出口断面水深 $d_2$ /m	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	<u>0.45</u>	<u>0.45</u>	<u>0.45</u>	<u>0.45</u>
出口断面平均流速 $v_2$ /(m/s)	8.42	8.42	8.42	8.42	8.42	8.42	8.42	8.42	8.42	8.42	8.42
坝趾处消能率 $\eta$ /%	88.0	87.2	86.3	85.2	84.0	82.5	80.7	78.5	75.7	72.1	67.3

注 表中出口断面水深  $d_2$  等带下划线数值,因该模型溢流面出口断面未形成稳定掺气均匀流,其相应数据内插而得。

## 7 敏感性分析指标计算结果表述和分析

敏感度系数是项目分析指标变化的百分率与不确定因素变化的百分率之比。敏感度系数计算公式如下:

$$E = \frac{(\Delta A/A)}{(\Delta F/F)} \quad (13)$$

式中: $E$  为分析指标  $A$  对于不确定因素  $F$  的敏感度系数; $\Delta A/A$  为不确定因素  $F$  发生  $\Delta F/F$  变化时,分析指标  $A$  的相应变化率,%; $\Delta F/F$  为不确定因素  $F$  的变化率,%<sup>[9]</sup>。

本例以消能率  $\eta$  作为分析指标,分别计算台阶尺寸、溢流面坡度、单宽下泄流量和溢流面净高等不确定因素的敏感度系数,结果见表 6。

本例采用昌桑算法计算台阶式消能工消能效率时,由本算例计算成果表和图 1 可知:④台阶步高从增加 50% 到减少 50% 时,其敏感度系数  $E_h$  均为零,台阶尺寸变化未导致消能率发生改变,故台阶尺寸为非敏感性因素;⑤溢流面坡度从增加 50% 到减少 50% 时,其敏感度系数  $E_m$  为 0.06~0.08,均大于零;溢流面坡度系数递减,溢流面坡度变陡,消能率降低,该不确定



表6 敏感性分析指标计算成果

不确定因素	变化率/%	+50	+40	+30	+20	+10	0	-10	-20	-30	-40	-50
台阶尺寸	消能率 $\eta_h$	82.5	82.5	82.5	82.5	82.5	82.5	82.5	82.5	82.5	82.5	82.5
	敏感度系数 $E_h$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
溢流面坡度	消能率 $\eta_m$	85.2	84.2	83.7	83.1	83.1	82.5	81.8	81.1	81.1	80.2	80.1
	敏感度系数 $E_m$	0.07	0.05	0.05	0.04	0.08	0.00	0.08	0.08	0.06	0.07	0.06
单宽下泄流量	消能率 $\eta_H$	77.1	78.1	79.0	79.8	81.4	82.5	83.6	84.2	85.6	87.3	88.4
	敏感度系数 $E_H$	-0.13	-0.13	-0.14	-0.16	-0.13	0.00	-0.14	-0.11	-0.13	-0.15	-0.14
溢流面净高	消能率 $\eta_H$	88.0	87.2	86.3	85.2	84.0	82.5	80.7	78.5	75.7	72.1	67.3
	敏感度系数 $E_H$	0.13	0.14	0.15	0.17	0.18	0.00	0.22	0.24	0.27	0.31	0.37

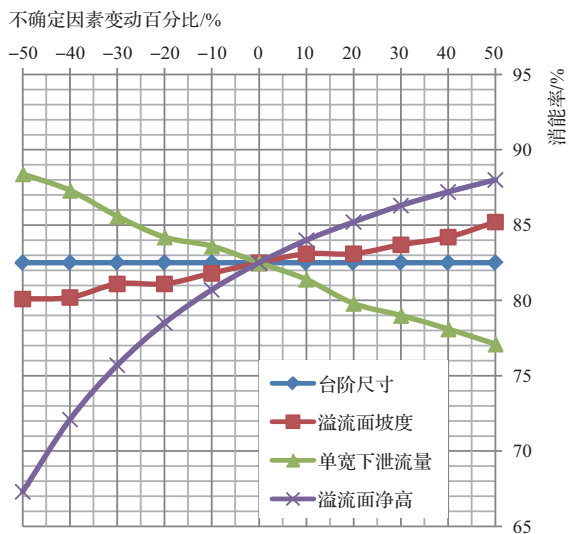


图1 台阶消能工敏感性分析

因素与分析指标同方向变化;③单宽下泄流量从增加50%到减少50%时,其敏感度系数  $E_q$  为  $-0.11 \sim -0.16$ ,均小于零;单宽下泄流量递减,消能率提高,该不确定因素与分析指标反方向变化;④溢流面净高从增加50%到减少50%时,其敏感度系数  $E_H$  为  $0.13 \sim 0.37$ ,均大于零;溢流面净高递减,消能率降低,该不确定因素与分析指标同方向变化;⑤比较溢流面坡度、单宽下泄流量和溢流面净高的敏感度系数的绝对值,可以看出  $E_q$  略低于  $E_H$ ,  $E_m$  则明显小于  $E_q$  和  $E_H$ ,说明溢

流面坡度比单宽下泄流量和溢流面净高对消能率指标的影响程度相对较小。即以消能率为考察指标,其对单宽下泄流量和溢流面净高的敏感程度大于对溢流面坡度的敏感程度,单宽下泄流量和溢流面净高是较为敏感的不确定因素。因此,在设计方案中,应更加重视单宽下泄流量和溢流面净高对溢流面消能方式的布置比选和水利结构体型优化的影响。

## 8 对比分析单宽下泄流量 $q$ 、溢流面净高 $H_{堰}$ 变化对消能率的影响

由前述可知,单宽下泄流量  $q$  和溢流面净高  $H_{堰}$  是台阶式消能工设计的关键参数,对消能率影响较大。推断这主要是由于采用昌桑算法时,出口断面水深  $d$  与临界水深  $d_c$  有关,而临界水深  $d_c$  可由单宽下泄流量  $q$  求得;同时,从堰顶算起至开始出现表面掺气处的长度  $L_1$  和出现均匀掺气水流的距离  $L_2$  受溢流面净高  $H_{堰}$  影响。

根据单宽下泄流量  $q$  和溢流面净高  $H_{堰}$  的相关性,再定出流能比参数  $K = q / (g^{0.5} H_{堰}^{1.5})^{[10]}$ ,进一步计算单宽下泄流量和溢流面净高分别改变的情况下的流能比参数。计算结果见表7。

表7 流能比计算成果

不确定因素	变化率/%	+50	+40	+30	+20	+10	0	-10	-20	-30	-40	-50
单宽下泄流量	消能率 $\eta_H$	77.1	78.1	79.0	79.8	81.4	82.5	83.6	84.2	85.6	87.3	88.4
	流能比 $K_q$	0.016	0.015	0.014	0.013	0.012	0.011	0.010	0.009	0.008	0.007	0.006
溢流面净高	消能率 $\eta_H$	88.0	87.2	86.3	85.2	84.0	82.5	80.7	78.5	75.7	72.1	67.3
	流能比 $K_H$	0.006	0.007	0.008	0.008	0.009	0.011	0.013	0.015	0.018	0.022	0.028



从假设的算例计算结果中发现:若以  $K = q / (g^{0.5} H_{\text{堰}}^{1.5})$  作为台阶式消能效果预判条件,则当  $K \geq 0.010$  时,消能率  $E < 83\%$ ,消能效果较差;而当  $K < 0.010$  时,消能率  $E > 83\%$ ,消能效果较好。

## 9 结 语

综上所述,通过具体的算例结果进行推断,台阶尺寸为非敏感性因素。溢流面坡度系数与消能率同方向变化;单宽下泄流量与消能率反方向变化;溢流面净高与消能率同方向变化。消能率指标对单宽下泄流量和溢流面净高的敏感程度大于对溢流面坡度的敏感程度,是较为敏感的不确定因素。

在初步方案设计中,应更加重视单宽下泄流量和溢流面净高对溢流面消能方式的布置比选和水工结构体型优化的影响。若以  $K = q / (g^{0.5} H_{\text{堰}}^{1.5})$  作为台阶式消能效果预判条件,则当  $K \geq 0.010$  时,消能率  $E < 83\%$ ,消能效果较差;而当  $K < 0.010$  时,消能率  $E > 83\%$ ,消能效果较好。

由此可见,在初步设计中,调整泄水建筑物体型或提高工程规模有利于发挥台阶式溢流面的消能效果,比如通过适当增加溢流面宽度以降低单宽下泄流量,或者适当增加防洪库容、提高调蓄能力,减小下泄流量等手段,能使水工建筑物消能工结构的设

计得以优化和完善。◆

## 参考文献

- [1] 吴宪生. 台阶式溢流坝的消能及计算[C]//1999年全国水力学与水工水力学学术讨论会. 北京:中国水力发电工程学会,1999:284-288.
- [2] 陈群,戴光清,刘浩吾. 阶梯式溢流坝研究综述[J]. 水利水电科技进展,2020,22(1):47-50.
- [3] 混凝土重力坝设计规范:SL 319—2018[S]. 北京:中国水利水电出版社,2018:109-110.
- [4] 刘志明,温续余. 水工设计手册:第7卷 泄水与过坝建筑物[M]. 2版. 北京:中国水利电力出版社,2014:17-19.
- [5] 美国项目管理协会. 项目管理知识体系指南(PMBOK指南):第6版[M]. 北京:电子工业出版社,2018:434,715.
- [6] 赫庆彬,王景涛. 喀麦隆莫肯水电工程溢流坝台阶消能计算[J]. 水利水电工程设计,2020,39(4):15-16,22.
- [7] 张永涛. 台阶式消能的水力特性及计算[J]. 中南水力发电,2020(2):9-14.
- [8] 杨林,邹爽,廖海梅,等. 软岩筑堆石坝坝坡稳定性的参数敏感性分析[J]. 水力规范与设计,2020(9):105-108.
- [9] 全国咨询工程师(投资)职业资格考试参考教材编写委员会. 项目决策分析与评价[M]. 北京:中国统计出版社,2020:275-282.
- [10] 李炜. 水力计算手册[M]. 2版. 北京:中国水利电力出版社,2006:118-119.
- [11] 杨静宗,杨在华. 红谷田水库大坝安全自动监测系统的建设与运用[J]. 水利建设与管理,2021,41(5):60-66.
- [12] 吴俊,马红钧,王曙东,等. 滇中引水工程弃渣场布置研究[J]. 人民长江,2020,51(9):142-145.
- [13] 冯磊,张晓利,崔磊. 水电建设项目弃渣监测信息化初步研究[J]. 中国水土保持,2020(8):51-53.
- [14] 土石坝安全监测技术规范:SL 551—2012[S]. 北京:中国水利水电出版社,2012.
- [15] 杜泽快,胡长华. 滇中引水工程输水隧洞安全监测设计原则研究[J]. 人民长江,2019,50(10):157-161.
- [16] 许峰,郭华东,郭索彦. 我国水土保持监测的理论与发展之初步探讨[J]. 水土保持学报,2001,15(6):1-5.
- [17] 严丽,蒋碧. 大型线型水利工程水土保持监测技术研究[J]. 浙江水利水电学院学报,2019,31(1):28-31.
- [18] 云南省水利水电勘测设计研究院. 滇中引水工程输水总干渠Ⅱ段初步设计报告:5 工程布置及建筑物[R]. 昆明:云南省水利水电勘测设计研究院,2009:154-218.
- [19] 饶艳,李喻,廖文丽. 滇中引水工程弃渣场水土保持设计[J]. 水利建设与管理,2016,36(6):29-31,17.
- [20] 水利水电工程安全监测设计规范:SL 725—2016[S]. 北京:中国水利水电出版社,2016.
- [21] 水土保持监测技术规程:SL 277—2002[S]. 北京:中国水利水电出版社,2002.
- [22] 刘加喜. 倾尽全力 超常规推进滇中引水工程建设[J]. 水利建设与管理,2021,41(8):8-10.

(上接第5页)

## 参考文献



# 丰溪河鸡公石崽段岸坡坍塌成因分析及对策研究

戴霖 简鸿福 邓伟

(江西省水利科学院, 江西 南昌 330031)

**【摘要】** 本文根据丰溪河地质条件、水动力特性、地形特点等方面情况对鸡公石崽段右岸岸坡坍塌成因进行了分析。针对施工期河水深、水流快的问题,通过加固方案综合比选、典型断面优化设计等,采取了网兜抛石固基及雷诺护垫护坡相结合的处理措施。处理后,河岸稳定性增强、生态性良好,取得了较好的社会和生态效益,可为今后其他类似的工程项目提供参考。

**【关键词】** 岸坡坍塌;雷诺护垫;断面设计;对策研究

中图分类号: TV861

文献标志码: A

文章编号: 2097-0528(2022)11-012-06

## Cause analysis and countermeasures of bank slope collapse in Jigongshizai Section of Fengxi River

DAI Lin, JIAN Hongfu, DENG Wei

(Jiangxi Academy of Water Science and Engineering, Nanchang 330031, China)

**Abstract:** Based on the geological conditions, hydrodynamic characteristics and topographic characteristics of Fengxi River, this paper analyzes the causes of bank slope collapse on the right bank of Jigongshizai Section. In order to solve the problems of river water depth and rapid water flow during the construction period, through the comprehensive selection of reinforcement schemes and the optimization design of typical cross-sections, the treatment measures combining the net bag riprap foundation reinforcement and the slope protection of Reynolds pads are adopted. Aftertreatment, the stability of the riverbank is enhanced with good ecology and better social and ecological benefits, which can provide reference for other similar projects in the future.

**Keywords:** bank slope collapse; Reynolds pads; cross-section design; countermeasure study

自然弯曲河流迎流顶冲段受水流冲刷、水位暴涨暴落和不良人为活动影响,河岸坡脚掏空和崩岸现象频发,严重威胁堤防稳定和两岸居民安全。多数崩岸是河道自然演变形成的,由水动力条件、水位变化、河

岸形态及河岸地质条件等自然因素驱动;同时人为荷载、采砂、兴建建筑物等人为因素也会对河岸稳定性产生影响<sup>[1]</sup>。稳固而生态的护岸工程是沿河区域社会发展的安全保障<sup>[2]</sup>。针对不同险工险段,在选取工程措

收稿日期: 2022-03-29

基金项目: 江西省水利厅科技项目(202223BZKT02);江西省水利厅科技项目(202224ZDKT06)

作者简介: 戴霖(1989—),男,硕士,主要从事水利规划与设计相关工作。



施时,需要从不同衬护结构的抗冲刷能力、适应变形能力、生态性、经济性和施工难易程度等方面考虑,优选河岸固脚和护坡技术。

长期以来,国内外学者在岸坡崩岸、坍塌等失稳成因和采取对策方面做了大量的研究。陈景<sup>[3]</sup>、黄河<sup>[4]</sup>结合各种典型崩岸工程实际,在理论上分析了河道岸坡破坏机理;刘小平等<sup>[5]</sup>、简鸿福等<sup>[6]</sup>、江辉等<sup>[7]</sup>根据河流治理工程实例,开展了中小河流岸坡整治生态固岸技术集成及典型模式研究。

为进一步理清丰溪河鸡公石崮段岸坡失稳的原因和优选治理方案,有必要进行相关技术研究。本文从水流、地质、地形地貌和上下游建筑物等因素分析了河岸坍塌的原因,优选了岸坡固脚和护岸工程方案,计算了雷诺护垫的厚度,对类似工程问题的处理具有一定

的参考价值。

1 工程概况

丰溪河位于江西省东北部,是信江流域第二大支流。主河道长 117km, 坡降 1.8‰。流域面积 2258km<sup>2</sup>。鸡公石崮段位于丰溪河中游段右岸,丰溪河支流十都港(集雨面积 190km<sup>2</sup>,河长 29.50km)汇入口处,在广丰区五都镇境内(见图 1)。该段现状为土质岸坡(见图 2),植被覆盖少,水土流失较严重,未进行衬护处理。该段长约 300m, 现状岸坡顶高程为 110.0~113.0m,岸坡高 4.8~7.5m,迎水坡坡比一般为 1:1.0~1:2.5,近年来因冲刷能力较低,导致堤段堤脚淘空、岸坡坍塌等问题(见图 3),给沿岸居民的生命财产安全构成威胁。

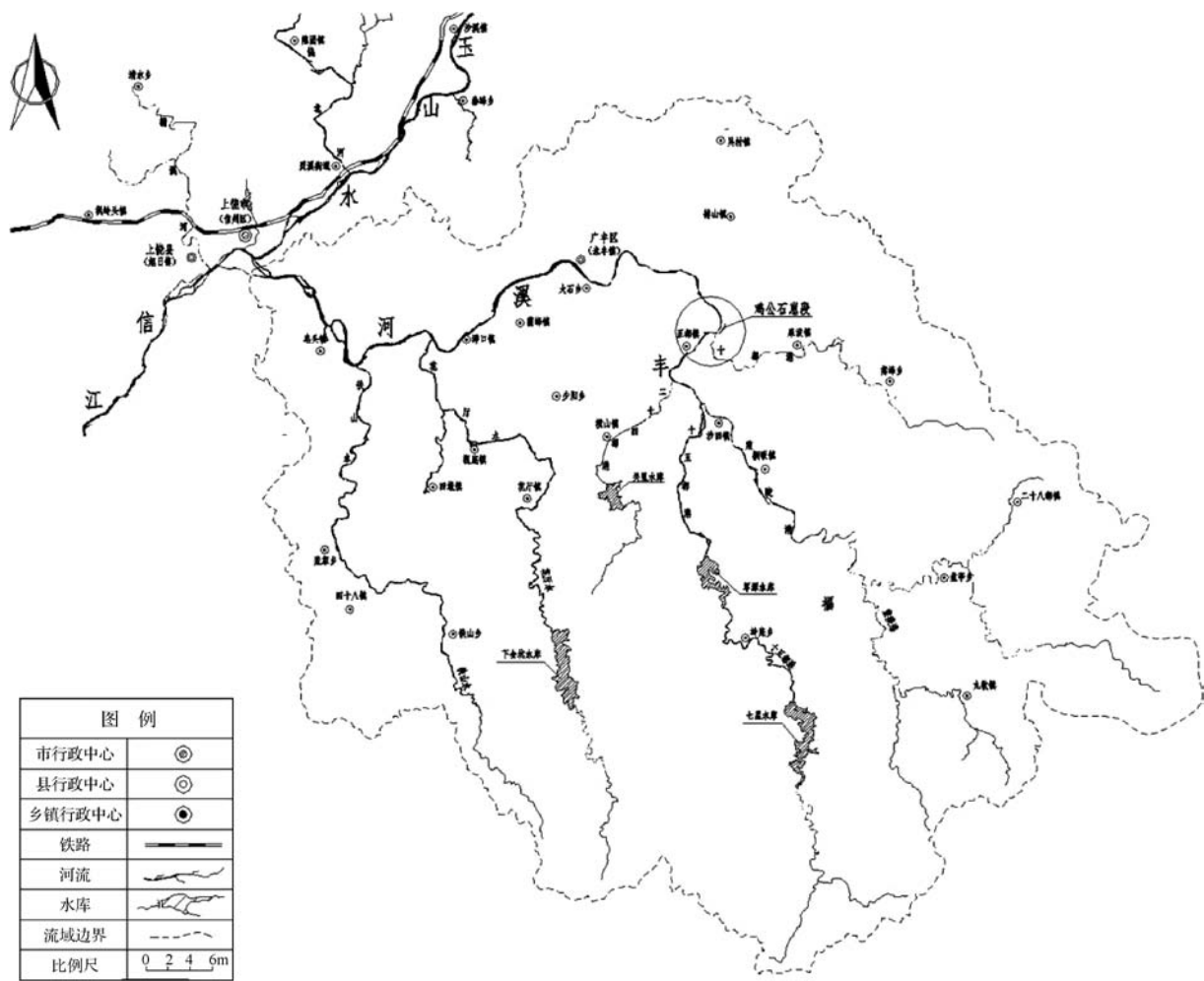


图 1 丰溪河流域图



图2 鸡公石崕段现状



图3 鸡公石崕段岸坡局部坍塌

## 2 岸坡坍塌成因分析

该河道岸坡坍塌的主要原因如下：

**a. 地质条件。**据钻探成果及现场调查,丰溪河鸡公石崕段岸坡局部段较陡,漫滩一般发育,现状为土质岸坡,未护坡。该段河岸从上至下分布的土层为人工填土、第四系残坡积含砾粉质黏土、卵石,下伏基岩为强风化砂砾岩。其中,人工填土主要以壤土、砂卵石为主,呈松散状,填筑质量较差,具中等透水性,抗冲性能及防渗性较差,岸坡类型属稳定性较差的岸坡。由于不良土质的影响,岸坡土体黏聚性较差,强度偏低,受水流的冲刷侵蚀影响较大。岸坡在水流侵蚀过程中,松散土质易被水流带走,导致坡脚快速后退,特别是河流弯道凹岸处作用更为明显。

**b. 水流条件。**丰溪河历年来常有因暴雨产生的洪水灾害,具有典型的山溪性洪水特点,暴雨次数多,且强度大,大多发生在4—7月,汇流时间短,洪水来水快,流速较大。水流因素作为导致岸坡坍塌的重要因素之一,多发生于受水流纵向冲刷河段,即河道凹岸,因其流速大,冲刷程度相应变大,极易对河道弯曲段冲刷形成险段;并且随着洪水流量增大,河道在高水位时,岸坡土体受水浸泡,孔隙水压力变高,抗剪强度下降;当洪峰过后,河道水位迅速降低,在岸坡内形成非恒定渗流,使得岸坡稳定性下降<sup>[8]</sup>。

**c. 地形条件(见图4)。**该河段岸坡多位于凹岸段,正对丰溪河主干段迎流顶冲,导致岸坡及基础冲刷



图4 丰溪河鸡公石崕段位置平面图



严重;其次,由于十都港支流汇合丰溪河主流后,纵向水流及横向水流汇合在一起,形成涡旋水流直接对河堤堤脚进行掏蚀,在堤脚下易冲成深坑。最后,该河段上游约 500m 处建有下忠良坝,该坝坝高 6~7m,在汛期洪水通过陂坝下泄过程中,加剧了鸡公石崽段的坝坡冲刷及基础掏刷,从而导致堤岸坍塌事件的发生。

### 3 措施对策

#### 3.1 现状断面

根据近年来地质勘察及测量成果(见图 5),该段坡脚冲刷、掏空严重,已基本出露基岩面,与上述该险段分

析基本一致。由于基岩面高程约为 101.86m,距历年枯水位 105.16m 相差 3.3m 左右,河水较深,且位于迎流顶冲段,存在较大的施工难度。

#### 3.2 方案比选

根据该河段地质、地形、水流河势特征,分别对固基工程及岸坡衬护工程进行方案比选;在满足结构安全、生态、投资等条件下选出最优方案。

##### 3.2.1 固基工程

为保证该段坡脚安全,基础应具有较强的抗冲及稳定能力。本次比选了 3 种基础加固方案:

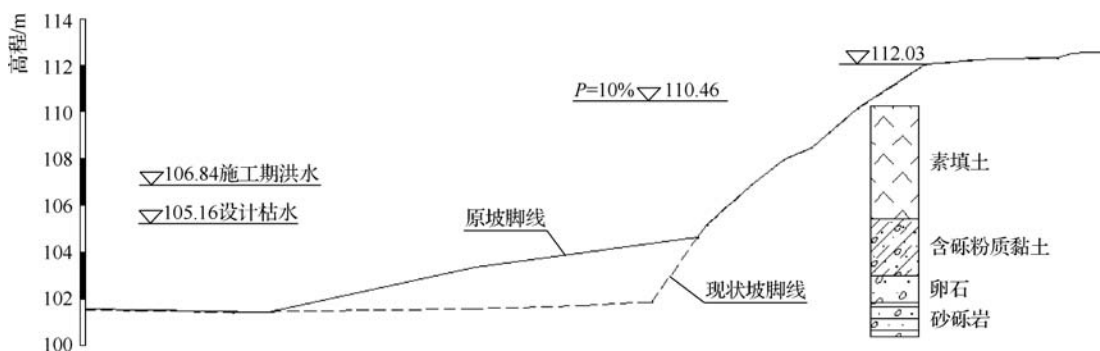


图 5 丰溪河鸡公石崽段典型断面

方案一:浆砌石固基。浆砌石作为传统加固结构形式之一,其施工工艺简单,结构强度较高,抗冲性能好,在水利工程中大量被使用。多用于河流原岸坡结构不稳、冲刷较严重的河岸,以提高护岸的防洪功能。

方案二:传统抛石固基。抛石是为防止河岸坡脚受水流冲刷而抛填较大石块的一种防护措施,传统抛石由于其施工工艺简单,单价较低,在水利工程基础加固中较为常用<sup>[9]</sup>。

方案三:网兜抛石固基。网兜抛石利用钢丝立体网格,将块石料填充后,再用机械将其吊装至指定位置,达到防护效果。相较于传统抛石,网箱将块石包裹,使其整体性更好,抗冲性更强。在长江河段整治中应用较为广泛<sup>[10]</sup>。

综合上述三种基础加固方案对比,方案一采用浆砌石情况下,由于施工期水位较高导致出现如围堰填筑断面较大、填筑困难等问题,施工存在一定难度;其次该河

段无开挖利用料,围堰填筑及开挖均需外运导致投资较大。方案二传统抛石由于在施工中块石抛投的散落范围较大,且在水流冲击下,块石容易发生流失,导致损耗较大,影响投资及效果。方案三网兜抛石相较于传统抛石,在面对复杂地形、不同河势下,由于网箱强度高且对填充块石存在一定的约束,使得网兜抛石具有整体性更好、稳定性更高、抗冲能力更强等特点。其受水流影响较小,块石到位率较高,施工质量更容易得到控制。

因此,本次采用网兜抛石对该段岸坡坡脚基础进行加固。

##### 3.2.2 护岸工程

本次共比选了 3 种岸坡衬护方案:

方案一:浆砌石护坡。浆砌石护坡是对砌石之间使用胶结材料(如水泥砂浆)进行填充,对河道岸坡进行防护的砌体结构。石块依靠胶结材料的黏聚力、摩



擦力和石块本身重量,保持坡面的稳定。由于石块间空隙被充塞密实,因而具有更好的整体性、密实性和强度,可以防止渗水漏水,增加抵抗侵蚀的能力。

**方案二:干砌石护坡。**干砌石护坡是将块石砌筑规整对河道岸坡进行防护。它依靠石块自身重量及石块接触面间的摩擦力在外力作用下保持稳定,常用来固定土质坡式河岸,防止水流直接冲刷坡面土体。无须胶凝材料,块石之间存在的大量空隙有利于水生、两栖类动植物的生长。施工方法相对简单,易操作,工程造价相对较低。

**方案三:雷诺护垫。**雷诺护垫是将符合要求的石料填充到经过特殊加工的机编的高伸张率低碳钢丝扎成的柔性立体网笼中,使整体具有一定的孔隙率,然后绑扎盖网,形成的石垫整体岸坡护面。因其造价低、生态性好、适用性强、具有一定的柔韧性等特点得到了越来越多的应用。是目前水利工程生态护坡中运用较多的一种型式<sup>[11]</sup>。

结合河段地形的特点,对各方案从抗冲刷能力、适应变形能力、施工难易程度、生态性以及经济性等影响因素方面进行综合对比分析:

**a. 抗冲刷能力。**雷诺护垫及浆砌石护坡相比干砌石护坡均具有较强的抗冲刷能力,但雷诺护垫由于笼内填块石存在一定空隙,减小了风浪的冲击力,风浪、浪峰退下时,箱笼有空隙,破坏了风浪的真空吸力,减小了对防护工程的破坏力度,整体结构可在风浪力作用时进行微调,避免了如浆砌石护坡墙身出现裂缝的缺陷。

**b. 适应变形能力。**浆砌石护坡因其为刚性防护,适应变形能力较弱;干砌石护坡可以适应局部变形,但由于其整体性较差,若局部发生破坏或块石丢失则会导致坡面整体出现坍塌或失稳。雷诺护垫中所用柔韧性较好的低碳钢丝可以将全部箱体连成整体,即使在坡面土体局部沉陷或发生小的变形影响时,结构也能根据自身良好的延展性和柔韧性进行适应性微调,适应变形能力较强。

**c. 施工难易程度。**干砌石护坡需要由人工进行堆砌,施工过程中还应保证表面块石咬扣紧密,不能出

现局部空洞等现象;浆砌石护坡在干砌石护坡工艺的基础上,必须控制好砌筑砂浆的质量及缝内充分灌浆,对施工有一定的要求。雷诺护垫则操作简便、工序少、无须特殊的技术工人,整体施工效率颇高且效果易于保证。在有机械进行配合的时候,更能加快施工进度。

**d. 生态性。**相较于浆砌石护坡,雷诺护垫及干砌石护坡的块石间隙可自然生长出当地水陆生植物,可以起到恢复植被、绿化河岸的作用,此外,结构的渗透性有利于增强河岸带的潜流交换作用,提高河流生态环境和水质净化能力。

**e. 经济性。**根据类似工程经验,考虑当地材料价格水平,以上三种护坡对比方案工程造价对照见表1。

表1 三种护坡工程造价对照

序号	护坡型式	工程可比造价/(元/m <sup>2</sup> )	备注
方案一	浆砌石护坡	185	浆砌石护坡厚30cm,下设10cm厚砂石垫层
方案二	干砌石护坡	138	干砌石厚30cm,下设10cm厚砂石垫层
方案三	雷诺护垫	157	雷诺护垫厚30cm,下设聚酯长纤无纺布

综合上述三种护坡方案对比,雷诺护垫在各方面均较突出,本次选择方案三即雷诺护垫对该段岸坡进行衬护。

### 3.3 断面设计

根据丰溪河该险段地质、地形条件,结合现状情况,确定本次治理方案为:坝脚采用网兜抛石固基,雷诺护垫进行护岸。典型断面设计见图6。

根据《堤防工程设计规范》(GB 50286—2013)<sup>[12]</sup>,结合施工实际情况,网兜抛石固基顶高程为105.40m,顶宽3.0m,坡比1:2.0;其上设置0.4m厚浆砌石压顶,稳固抛石的同时可作为护坡固脚,雷诺护垫厚度0.3m,边坡1.75~1:2.0,护垫下设置聚酯长纤无纺布。



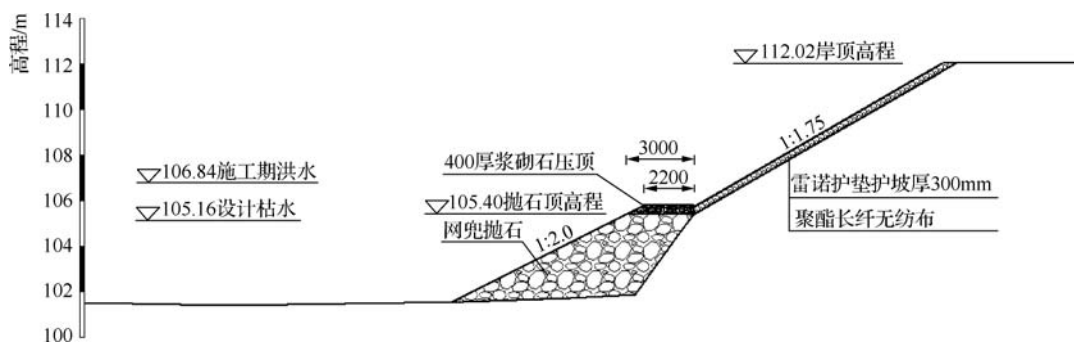


图6 丰溪河鸡公石崕段典型断面设计图

### 3.4 设计计算

雷诺护垫设计主要对护垫坡脚长度、填石粒径及护垫厚度进行计算<sup>[13-14]</sup>。护垫坡脚长度可根据坡脚最大冲刷深度及护垫抗滑稳定性综合确定。由于本次计算所需护垫坡脚长度较大,与实际施工情况不符,且对于其他固脚形式而言,投资较大,本次采用浆砌石固脚设计。

雷诺护垫的厚度可参照《生态格网结构技术规范》(CECS 353—2013)<sup>[15]</sup>中相关公式进行计算,该方法可适用于厚度为150~500mm的雷诺护垫计算,用于河道坡降小于2%的缓流河段。公式为

$$T = 2.0D_m \quad (1)$$

$$D_m = S_o C_s C_v d \left[ \left( \frac{r_w}{r_s - r_w} \right)^{0.5} \frac{V}{(gdK_1)^{0.5}} \right]^{2.5} \quad (2)$$

$$C_v = 1.283 - 0.21 \lg(R/b) \quad (3)$$

式中:  $T$  为护垫最小厚度, m;  $D_m$  为护垫中填石的平均粒径, m;  $S_o$  为粒径安全系数;  $C_s$  为填石稳定系数;  $C_v$  为流速分布系数;  $d$  为流速  $v$  处的局部水深度, m;  $r_w$ 、 $r_s$  分别为水及填石的重度,  $\text{kN/m}^3$ ;  $V$  为断面平均流速,  $\text{m/s}$ ;  $g$  为重力加速度,  $9.81 \text{ m/s}^2$ ;  $K_1$  为边坡修正因子, 坡度 1:1、1:1.15、1:2、1:3 分别取 0.46、0.71、0.88、0.98, 坡度 1:4 以上取 1.0;  $R$  为水力半径, m;  $b$  为水面宽度, m。

根据式(2), 计算出丰溪河该险段雷诺护垫填石的平均粒径  $D_m$  为 0.14m, 由式(1)得到护垫最小厚度  $T$  为 0.28m, 结合雷诺护垫一般生产规格, 确定本次选取 0.3m 厚雷诺护垫。

### 4 结论

以丰溪河鸡公石崕段堤防加固工程为例, 针对险段存在的问题, 进行成因分析, 并提出了相应的治理方案措施。

a. 鸡公石崕段的坝坡冲刷及基础掏刷的主要原因是丰溪河属山溪性洪水, 具有暴涨暴落的特点, 河段处于河道拐弯的凹岸、十都港支流汇入口下游, 长年迎流顶冲, 岸坡地质属松散冲积物, 且其上游不远的上忠良坝下泄洪水也是主要原因。

b. 相较于建造围堰浆砌石固脚和传统抛石固脚, 网兜抛石可在有水条件下填筑, 整体性更好, 抗冲性更强, 对石料的要求更低, 可减少工程量。

c. 相较于干砌石和浆砌石护坡, 雷诺护垫护坡的抗冲刷能力、适应变能力较强, 施工较容易, 生态性较好, 经济性相当。◆

### 参考文献

- [1] 岳红艳, 吕庆标, 朱勇辉, 等. 河道岸坡水位涨落变化对崩岸影响试验研究[J]. 人民长江, 2021, 52(S2): 15-20.
- [2] 李金瑞, 方娟娟, 丁兵. 强水沙变化下长江安徽河段护岸失稳及防护研究[J]. 人民长江, 2021, 52(12): 9-14, 71.
- [3] 陈景. 河道岸坡破坏机理及防护技术研究[J]. 中国水土保持, 2021(12): 38-40.
- [4] 黄河. 河岸崩塌机理及其流固耦合模型研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2008.
- [5] 刘小平, 王萱子, 李艳红. 江西省中小河流岸坡整治技术集成及典型模式研究[J]. 江西水利科技, 2016, 42(3): 166-170, 180.

(下转第55页)



# 弧形闸门机械开度与启闭机行程之间 函数关系的研究及计算

许海洋

(贵州乌江水电开发有限责任公司沙沱发电厂, 贵州 沿河 565300)

**【摘要】** 弧形闸门的机械开度往往不便于直接测量,需要通过启闭机行程进行换算。本文通过建立弧门及启闭机的联动几何关系模型,推导出弧形闸门机械开度与启闭机行程之间的递进函数,可为其他类型弧门启闭机开度计算公式的推导提供借鉴。根据该递进函数计算沙沱水电站溢流表孔弧形闸门在液压启闭机不同行程下的准确机械开度,其计算结果可为弧形闸门机械开度的精确控制提供依据。

**【关键词】** 弧形闸门;开度;函数关系;计算

中图分类号: TV314

文献标志码: A

文章编号: 2097-0528(2022)11-018-05

## Study and calculation of the functional relationship between the mechanical opening of curved sluice and the hoist trip

XU Haiyang

(Shatuo Power Plant of Guizhou Wujiang Hydropower Development Co., Ltd., Yanhe 565300, China)

**Abstract:** The mechanical opening of curved sluice is often not easy to be measured directly. It needs to be converted by the hoist trip. In this paper, the progressive function between the mechanical opening degree of the curved sluice and the hoist trip is derived by establishing the linkage geometric relation model of the curved gate and the hoist, which can provide reference for the derivation of the opening degree calculation formula of other types of the hoist of curved sluice. According to the progressive function, the exact mechanical opening of the curved sluice with overflow gauge hole in Shatuo Hydropower Station is calculated under different trips of the hydraulic hoist. The calculation results can provide a basis for the precise control of the mechanical opening of the curved sluice.

**Keywords:** curved sluice; opening; functional relationship; calculation

弧形闸门工作稳定、可靠,受力条件好,对启闭设备的启闭力要求较小,因此被水利工程广泛使用<sup>[1]</sup>。弧形闸门的特点是挡水面为弧形面,其支臂的支承铰位于圆心,启闭时闸门绕支承铰转动。弧形闸门的机械开度以弧门门叶底部与弧门底坎之间的垂直高度来

计量,而弧形闸门的启闭轨迹是弧形面板绕支承铰中心的圆周运动轨迹。因此,弧门门叶底部位置在弧形闸门启闭过程中相对于弧门底坎的位置,不仅仅在垂直高度上有变化,在水平位置上也有相对的位移。同时,由于受闸门开启后过水的影响,弧形闸门的机械开

收稿日期: 2022-01-21

作者简介: 许海洋(1988—),男,工程师,主要从事水电站机械设备检修、维护及运行管理等工作。



度不便于采用常规的各类测量线性位移的开度仪进行直接测量。工程上普遍采用的方法是在弧形闸门的启闭系统中,安装监测启闭机行程的开度传感器,闸门开度传感器安装在油缸端口法兰处<sup>[2]</sup>,通过感应计数活塞杆上加工的等距凹凸槽,测量液压启闭机活塞杆的行程变化。通过开度传感器测值的一系列转换从而达到间接监视、控制弧形闸门机械开度的目的。实际运用中,调试人员常常因为不清楚两者之间的关系,在控制程序中简单设置为线性关系来换算,将整个弧门机械开度分成若干段,每一段选取一个线性比例系数来换算<sup>[3,4]</sup>。这样弧形闸门的机械开度只是近似值,无法满足调控精度要求。

笔者通过建立弧门及启闭机的联动几何关系模型,分析联动中的几何原理,通过中间变量的传递,形成弧形闸门机械开度与启闭机行程之间的递进函数,

从而使弧形闸门机械开度满足无极准确测量和控制的目的。

## 1 弧形闸门机械开度与启闭机行程之间变化规律的分析

弧形闸门在开启和关闭过程中,门叶运行在以弧形闸门支铰中心为圆心,弧形闸门面板曲率半径为半径的圆弧上。运行过程中弧门门叶底部相对于弧门底坎处的垂直距离即为弧形闸门的机械开度。同样连接弧形闸门与液压启闭机活塞杆的销轴,运行在以弧形闸门支铰中心为圆心,销孔中心到弧形闸门支铰中心的距离为半径的圆弧上。销轴运行过程中相对于油缸支铰中心的距离也相应发生变化,该变化值即为启闭机的行程。弧形闸门全关和局部开度位置对比见图1。

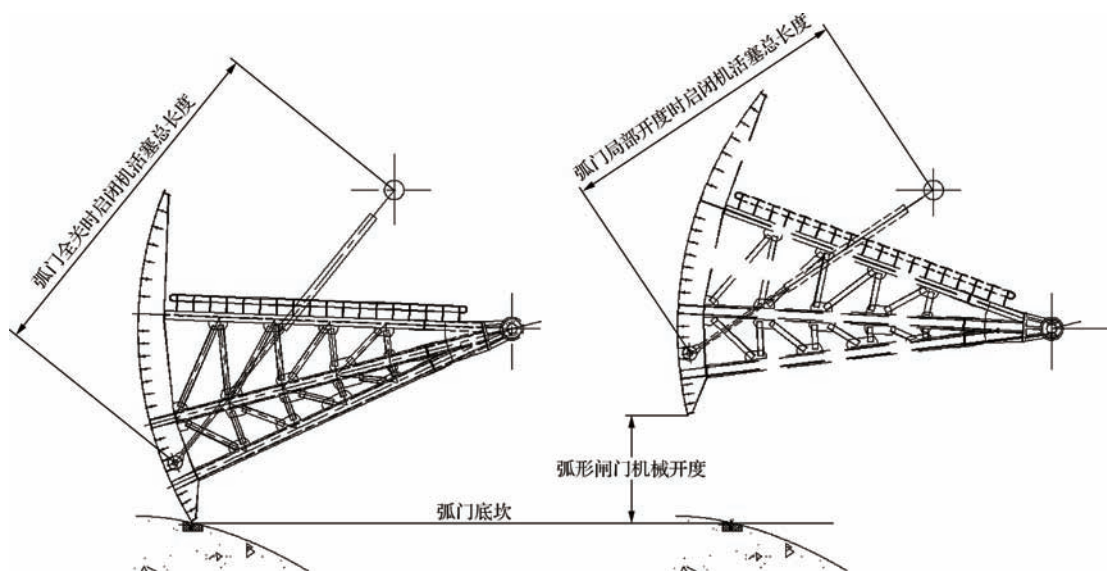


图1 弧形闸门全关和局部开度位置对比示意图

## 2 运动关系几何模型的建立

### 2.1 弧形闸门及启闭机运动关系几何模型

将弧形闸门在开启和关闭过程中的运动机构进行简化,建立整个机构的运动关系几何模型<sup>[5-8]</sup>,见图2。

图中 $O$ 点代表弧形闸门支铰中心, $O'$ 点代表液压启闭机油缸支铰中心, $A$ 点代表弧门全关时弧门与底坎的接触点, $B$ 点代表弧门全关时启闭机活塞杆前端

吊头连接门叶的销轴中心。 $a$ 点代表弧门某一局部开度下弧门底部位置, $b$ 点代表某一开度下启闭机活塞杆前端吊头连接门叶的销轴中心位置。 $AOD$ 组成的扇形轮廓线表示弧门在全关位置, $aOd$ 组成的扇形轮廓线表示弧门在某一局部开度下的位置。

图中 $H$ 代表弧形闸门支铰中心与弧门底坎之间的垂直高度,mm; $Y$ 代表弧形闸门支铰中心与液压启闭机油缸支铰中心的垂直高度,mm; $X$ 代表弧形闸门支

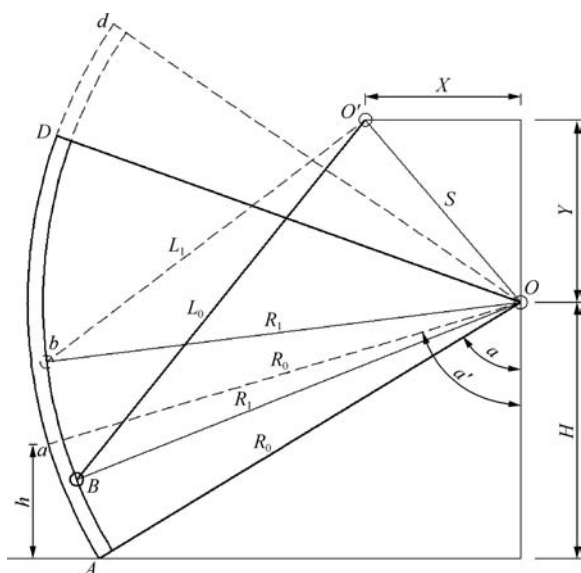


图2 弧形闸门及启闭机运动关系几何模型(长度单位:mm)

铰中心与液压启闭机油缸支铰中心的水平距离,mm; $S$ 代表弧形闸门支铰中心与液压启闭机油缸支铰中心的直线距离,mm; $R_0$ 代表弧形闸门半径,mm; $R_1$ 代表弧形闸门吊耳孔中心的旋转半径,mm; $L_0$ 代表弧形闸门全关位置时液压启闭机油缸支铰中心与弧形闸门吊耳孔中心的距离,mm; $L_1$ 代表弧形闸门某一开度时液压启闭机油缸支铰中心与弧形闸门吊耳孔中心的距离,mm; $l$ 代表启闭机的行程值,mm; $h$ 代表弧形闸门机械开度,mm。

## 2.2 模型中各构件相互关系

根据上面的几何模型,不难发现弧门在全关到全开的任一位置,弧形闸门旋转半径不变,即 $OA = Oa = R_0$ ,弧形闸门吊耳孔中心的旋转半径不变,即 $OB = Ob = R_1$ ,弧形闸门吊耳孔中心点和弧门门叶最低点相对于弧门支铰中心的夹角不变,即 $\angle AOB = \angle aOb$ 。弧门开启或关闭过程中, $A$ 点转到 $a$ 点旋转的角度 $\angle AOa$ 和 $B$ 点转到 $b$ 点旋转的角度 $\angle BOb$ 相等。弧形闸门支铰中心和液压启闭机油缸支铰中心距离为 $S$ 。

$$S = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (1)$$

弧门开启关闭过程中,弧门液压油缸支铰到弧形闸门吊耳孔中心的距离变化值即为启闭机的行程值,即 $l = L_0 - L_1$ 。

$a$ 点相对于弧门底坎的垂直高度即为弧门机械开

度 $h$ (mm); $\alpha$ 为弧形闸门全关时弧门门叶底部到弧形闸门支铰中心的连线与弧形闸门支铰中心垂线之间的夹角( $^\circ$ ); $\alpha'$ 为弧形闸门某一开度下弧门门叶底部到弧形闸门支铰中心的连线与弧形闸门支铰中心垂线之间的夹角( $^\circ$ )。

$$h = H - R_0 \cos \alpha' \quad (2)$$

## 3 弧门机械开度与启闭机行程之间函数关系的推导

根据运动关系的几何模型,结合勾股定理、余弦定理、三角函数和反三角函数,将几何模型中各种已知的量和未知的量之间的关系,用数学公式表达出来,建立弧门机械开度与启闭机行程之间的函数关系。

### 3.1 根据弧门机械开度 $h$ ,推导启闭机行程 $l$

已知弧门机械开度 $h$ ,可求得

$$\alpha' = \arccos \frac{H - h}{R_0} \quad (3)$$

根据余弦定理和反三角函数,可求得弧门全关位置时弧形闸门吊耳孔中心点 $B$ 和液压启闭机油缸支铰中心点 $O'$ 相对于弧门支铰中心点 $O$ 的夹角:

$$\angle BOO' = \arccos \frac{S^2 + R_1^2 - L_0^2}{2SR_1} \quad (4)$$

因 $\alpha = \arccos \frac{H}{R_0}$ ,则弧门开启到某一开度时,弧门

整体旋转的角度为

$$\angle AOa = \arccos \frac{H - h}{R_0} - \arccos \frac{H}{R_0} \quad (5)$$

因

$$\angle BOb = \angle AOa = \arccos \frac{H - h}{R_0} - \arccos \frac{H}{R_0} \quad (6)$$

则弧门在某一开度位置时弧形闸门吊耳孔中心点 $b$ 和液压启闭机油缸支铰中心点 $O'$ 相对于弧门支铰中心点 $O$ 的夹角为

$$\begin{aligned} \angle bOO' &= \angle BOO' - \angle BOb = \arccos \frac{S^2 + R_1^2 - L_0^2}{2SR_1} - \\ &\arccos \frac{H - h}{R_0} + \arccos \frac{H}{R_0} \end{aligned} \quad (7)$$

故

$$L_1 = \sqrt{S^2 + R_1^2 - 2SR_1 \cos \angle bOO'} \quad (8)$$



则启闭机行程公式为

$$l = L_0 - L_1 = L_0 - \sqrt{S^2 + R_1^2 - 2SR_1 \cos \angle BOO'} \quad (9)$$

### 3.2 根据启闭机行程推导弧形闸门机械开度

已知启闭机行程  $l$ , 可求得

$$L_1 = L_0 - l \quad (10)$$

根据余弦定理和反三角函数, 可求得弧形闸门全关位置时弧形闸门吊耳孔中心点  $B$  和液压启闭机油缸支铰中心点  $O'$  相对于弧形闸门支铰中心点  $O$  的夹角:

$$\angle BOO' = \arccos \frac{S^2 + R_1^2 - L_0^2}{2SR_1} \quad (11)$$

根据余弦定理和反三角函数, 弧形在某一开度位置时弧形闸门吊耳孔中心点  $b$  和液压启闭机油缸支铰中心点  $O'$  相对于弧形闸门支铰中心点  $O$  的夹角为

$$\begin{aligned} \angle bOO' &= \arccos \frac{S^2 + R_1^2 - L_1^2}{2SR_1} \\ &= \arccos \frac{S^2 + R_1^2 - (L_0 - l)^2}{2SR_1} \end{aligned} \quad (12)$$

又因

$$\alpha = \arccos \frac{H}{R_0}, \alpha' = \alpha + \angle BOO' - \angle bOO' \quad (13)$$

故

$$\begin{aligned} \alpha' &= \arccos \frac{H}{R_0} + \arccos \frac{S^2 + R_1^2 - L_0^2}{2SR_1} - \\ &\quad \arccos \frac{S^2 + R_1^2 - (L_0 - l)^2}{2SR_1} \end{aligned} \quad (14)$$

根据三角函数关系, 弧形闸门机械开度为

$$h = H - R_0 \cos \alpha' \quad (15)$$

## 4 沙沱水电站溢流表孔弧形闸门机械开度的计算

### 4.1 沙沱水电站溢流表孔弧形闸门及其启闭机基本情况

沙沱水电站大坝枢纽工程泄洪建筑物由七孔溢流表孔组成, 每孔设置弧形工作闸门一扇, 弧形闸门为三斜支臂球铰的结构, 尺寸  $15\text{m} \times 24\text{m}$  (宽  $\times$  高)。每扇弧形闸门采用露顶式双缸液压启闭机进行启闭操作, 液压油缸采用双吊点后拉斜吊形式, 两端铰支方式, 活塞杆工作行程为  $10500\text{mm}$ 。弧形闸门支铰中心和油缸支铰中心水平距离  $X$  为  $8500\text{mm}$ , 弧形闸门支铰中心和油缸支铰中心之间高度差  $Y$  为  $10000\text{mm}$ 。弧形闸门门叶面板绕支铰中心旋转半径  $R_0$  为  $27000\text{mm}$ , 启闭机活塞杆前端吊头连接门叶销轴中心相对于弧形闸门支铰中心旋转半径  $R_1$  为  $26117\text{mm}$ 。弧形闸门支铰中心至弧形闸门底坎的高度  $H$  为  $14000\text{mm}$ , 弧形闸门全关时, 启闭机油缸支铰中心到活塞杆前端吊头连接门叶销轴中心的距离  $L_0$  为  $25536\text{mm}$ 。

### 4.2 弧形闸门机械开度计算

利用式(10)~式(15), 启闭机行程  $l$  以每  $1000\text{mm}$  为步长, 通过建立 Excel 表格计算<sup>[9]</sup>, 分别计算出对应的弧形闸门机械开度, 计算结果见表 1。

表 1 弧形闸门机械开度计算

启闭机行程/mm	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
弧形闸门机械开度/mm	1829	3710	5642	7623	9654	11741	13893	16126	18473	20992

根据表中数据, 直观地用图表表示, 弧形闸门机械开度与启闭机行程之间并不是简单的线性关系, 见图 3。

## 5 结 语

通过对弧形闸门机械开度与启闭机行程之间函数关系的研究推导, 提出了两者之间对应函数关系的分析方法, 得出两者之间互相换算的计算公式, 为同类型

弧形闸门机械开度的精确计算提供理论依据, 固定卷扬式和螺杆式弧形闸门启闭机的工况同样可以借鉴该分析思路进行函数关系的推导。推导出来的换算公式和数学模型, 将直接用于启闭机自动控制程序中, 进行开度控制变量的数学编程和程序开发, 摆脱以前采用简单的线性等比例法或者分段插值法等近似控制方法, 为更加精确控制弧形闸门开度提供理论依据, 这是函数

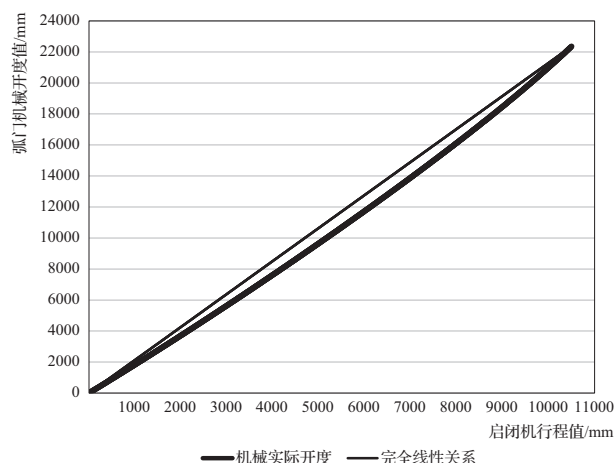


图3 弧形闸门机械开度与启闭机行程关系曲线

关系推导结果的实际应用意义。通过编程将函数关系的数学语言编辑为计算机 PLC 程序语言,达到“精准操作、远程控制”<sup>[10]</sup>的目标,推动了水工金属结构设备管理现代化建设<sup>[11]</sup>。◆

#### 参考文献

[1] 朴维军. 弧形闸门小开度运行分析[J]. 水利建设与管理, 2017, 37(7): 51-54.

[2] 陈飞,王亚兵,赵宏为. X型流道泵站液压启闭机数字化行程研究[J]. 水利建设与管理, 2020, 40(12): 17-21.

[3] 孙鲁安. 弧门开度与启闭机行程的函数关系推导[J]. 水利电力机械, 2006, 28(11): 41-44.

[4] 袁文波,张峰亮,温柳,等. 水电厂弧型闸门计算机监控系统设计[J]. 工业控制计算机, 2012, 25(12): 6-7.

[5] 王藤. 弧形闸门上升与下降过程开度分析[J]. 水利水电技术, 2013, 44(6): 54-56.

[6] 张延忠. 安格庄水库溢洪道液压启闭机纠偏系统调试与优化[J]. 水科学与工程, 2021(1): 4-7.

[7] 姜涛. 基于 SM338 的闸门开度计算方法及应用[J]. 今日制造与升级, 2020(10): 68-69.

[8] 卢建军. 弧形闸门液压启闭机同步运动控制算法的研究[J]. 工程建设与设计, 2020(8): 149-150.

[9] 代威. 弧门闸门开度计算[J]. 山西水利科技, 2014(2): 18-20.

[10] 温少林,傅金,王豹. 浅谈远程控制系统在三汉河河口闸运行管理中的运用[J]. 水利建设与管理, 2018, 38(3): 90-92.

[11] 缪慧丽,陈华,田磊磊. 以管理创新和技术创新助力智慧水闸建设[J]. 水利建设与管理, 2021, 41(3): 65-71.

## 水利工程标准化管理工作动态

### 江都水利工程管理处:标准化管理有成效

江都水利工程管理处作为管理单位,通过 50 多年的积累和发展,构建了较为完善的工程体系,形成了良好的管理基础。近几年,为适应新时代水利高质量发展和现代化建设的新形势、新要求,在江苏率先探索水利工程管理标准化精细化,以科学管理理论指导水利工程管理实践。突破工程管理传统思维定式,贯彻“精、准、细、严”的核心思想,以专业化、系统化、标准化、信息化为基本方法,谋划推进方案,开展专题研究,构建理论体系,确立水利工程精细化管理的基本模式、工作体系、实施路径,重点从管理任务、管理标准、管理制度、管理流程、管理评价和管理平台等多方位系统推进,细化目标任务,健全管理制度,明晰工作标准,规范作业流程,强化考核评价,构建信息平台。先行先试,从易到难,以点带面,逐步推广,探索实践水利工程精细化管理新模式,取得显著的成效,在全省得到推广应用。参与编写出版《大中型灌排泵站标准化规范化管理工作指南》《江苏水利工程精细化管理丛书》,编写出版《江都水利枢纽精细化管理丛书》,“水利枢纽精细化质量管理模式”获第四届中国质量奖提名奖。

(来源:江都水利工程管理处)



# 防洪“四预”视域下海河流域防洪调度系统建设与发展构想

齐师杰<sup>1</sup> 吕天慧<sup>2</sup>

(1. 天津市龙网科技发展有限公司, 天津 300171;  
2. 北京七兆科技有限公司, 北京 100070)

**【摘要】** 为有效提升流域防汛抗旱智能化管理水平,充分发挥国家防汛抗旱指挥系统在流域防汛抗旱减灾体系中的综合效益和支撑能力,本文立足防洪“四预”视域,探讨新阶段防洪调度系统在海河流域防汛抗旱业务中的问题和发展构想,旨在加快实现“十四五”时期具有防洪“四预”功能的流域智慧防汛体系建设,逐步推进流域治理体系和治理能力现代化。

**【关键词】** 防汛抗旱;四预;防洪调度;数字孪生;发展构想

中图分类号: TV877

文献标志码: B

文章编号: 2097-0528(2022)11-023-06

## Construction and development of flood control dispatching system in Haihe River Basin from the perspective of “four pres” for flood control

QI Shijie<sup>1</sup>, LÜ Tianhui<sup>2</sup>

(1. Tianjin Lonwin Technology Development Co., Ltd., Tianjin 300171, China;  
2. Beijing Seven Trillion Technology Co., Ltd., Beijing 100070, China)

**Abstract:** To effectively enhance the intelligent management level of flood control and drought relief in the river basin, and give full play to the comprehensive benefits and support ability of the national flood control and drought relief command system in the flood control and drought relief system of the river basin, this paper, based on the “four pres” for flood control, discusses the construction status and development idea of the flood control dispatching system in the new stage in the flood control and drought relief business of Haihe River Basin. The purpose is to accelerate the construction of the intelligent flood control system with the “four pres” function for flood control during the 14th Five-Year Plan period, and gradually promote the modernization of governance system and governance capacity in the river basin.

**Keywords:** flood control and drought relief; four pres; flood control dispatching; digital twin; development idea

水旱灾害历来是中华民族的心腹之患,水旱灾害防御工作关系人民生命财产安全和社会经济安全。伴随全球极端天气的频发和中国城市化进程的加快,水

旱灾害造成的社会经济损失也愈加惨重。为适应我国防汛抗旱新形势新要求,构筑完整的防洪抗旱减灾体系,利用现代化信息技术全面提升防汛抗旱效率,2005

收稿日期: 2022-04-06

作者简介: 齐师杰(1987—),女,工程师,主要研究方向为水利信息化与智慧水利。



年水利部正式启动国家防汛抗旱指挥系统工程建设。按照水利部统一部署,水利部海河水利委员会(以下简称海委)分别于2005—2007年和2014—2016年实施开展了国家防汛抗旱指挥系统一期工程和二期工程建设,开发了综合信息服务、防洪调度、洪灾评估、抗旱业务应用、工情业务应用等系统,成为现阶段流域机构开展防汛抗旱业务的主要决策支持,在近年来流域防汛减灾业务工作中发挥了重要作用<sup>[1]</sup>。“十四五”时期,防汛管理新体制、治水管水新形势以及气候变化新趋势对流域水旱灾害防御工作提出了新要求。因此,积极推进水利部关于智慧水利和数字孪生建设规划,立足防洪“四预”目标,融合新一代信息技术,升级完善洪水预报、预警功能,重点构建模拟仿真模块,完善原防洪调度系统防汛“四预”功能建设,加快实现“预报精准化、预警超前化、预演数字化、预案科学化”的防汛调度业务应用,对于提升新时期流域防汛抗旱信息化能力具有重要意义。

## 1 防洪“四预”概述

智慧水利建设主要任务是构建数字孪生流域、建设具有“四预”功能的“2+N”水利智能业务应用体系和完善网络安全防护体系。“2”即防洪和水资源管理与调配,“四预”即预报、预警、预演、预案。其中,预报是防洪“四预”的数据基础,对水雨情、工情、气象等水安全要素进行不同预见期的预测预报;预警是防洪“四预”的实时前哨,将洪涝灾害、山洪灾害、工程灾害、干旱灾害等预警信息及时传达有关部门,辅助决策;预演是防洪“四预”的处理关键;预案是防洪“四预”的最终目的<sup>[2-4]</sup>。

强化预报、预警、预演、预案“四预”措施,是最大限度防范灾害风险的重要抓手。水利部部长李国英多次强调,水旱灾害防御要坚持预字当先、关口前移,提出要推进智慧水利在水旱灾害防御工作中的先行先试,智慧水利要准确把握“需求牵引、应用至上”总要求,目标是建立物理水利及其影响区域的数字化映射,目的是能够在物理水利及其影响区域的数字化映射中实现“四预”。通过数字流场进行“四预”尤其是预演,得到水旱灾害防御等的决策支撑信息,并及时、精准、

科学地作出研判,主动或超前完成水旱灾害防御相关管理工作。

为积极响应智慧水利的建设要求,满足新形势下海河流域防洪调度系统的业务需求,确保在物理水利及其影响区域的数字化映射中实现“四预”,需进一步对海河流域防洪调度系统进行功能完善。通过建立防洪“四预”模拟仿真平台,将数字孪生、数字模拟、数字仿真等最新科技成果赋能智慧流域建设,将进一步提升流域防汛抗旱管理科技化、智能化水平,为调度决策提供高效支持,对于推进智慧流域探索具有重要的示范意义。

## 2 防洪调度系统在流域防汛抗旱业务中的设计与应用

### 2.1 防洪调度系统建设背景

海河流域防洪调度系统建设是国家防汛指挥系统二期工程中重要的单项工程。项目基于流域防汛工作的实际需要,以现行的防洪调度工作流程、组织分工为基础,依据批复的洪水调度方案,通过开发专业的调度模型,开发建设北三河、滦河防洪调度系统,重点新增调度区域调度方案研发、功能模块开发和防洪调度专用数据库建设;完善国家防汛指挥系统一期建设的大清河、永定河、子牙河防洪调度系统,从而解决海河流域防汛指挥现状中存在的问题,为保障安全度汛、合理调度提供先进的科学工具。

### 2.2 防洪调度系统总体框架

海河流域防洪调度系统总体基于“两台一库”的结构,即遵循“应用支撑平台”“数据汇集平台”“公用数据库”的规定,并在专用数据库的支持下,集成已建(大清河、永定河、子牙河)和新建(北三河、滦河)的各河系防洪调度系统。各河系防洪调度系统的设计思路将采用“服务”+“业务流程”+“规则”相结合的方式,即调度算法以服务组件的方式进行封装,开放输入、输出、边界等设置接口,调度方案的制定将通过“业务流程引擎”+“规则引擎”进行重组和编排,实现各河系调度节点和调度规则的动态配置,从而满足系统自动适应调度方案修订或变化的功能。系统总体框架结构分为数据汇集平台层、数据资源层、应用支撑层、应用



服务层、用户层以及标准规范体系和网络安全体系等保障环境,系统总体结构见图1。

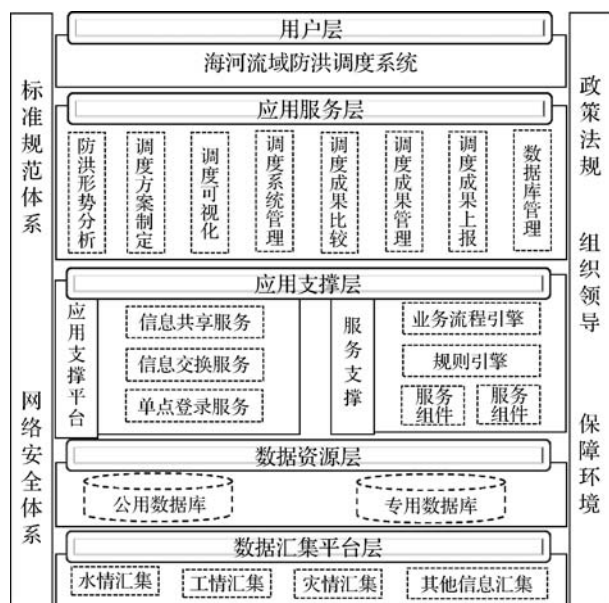


图1 防洪调度系统体系结构

#### 2.2.1 数据汇集平台层

数据汇集平台层可实现从下到上的水雨情、工情、气象、灾情等各类实时采集数据的自动接收与交换,统计数据的在线填报与汇总,文档材料等非结构化数据的实时交换与管理。汇集功能主要包括数据接入、数据处理、数据传输、业务接口、配置管理和监控统计等。

#### 2.2.2 数据资源层

数据资源层是防洪调度系统的信息支撑层,存储和管理系统所需的公共数据和专用数据。各数据库间通过公共数据字典建立相应的引用关系。公共数据库主要包括实时水雨情数据库、历史大洪水数据库、热带气旋数据库、防洪工程数据库、实时工情库、社会经济数据库、地理空间库、历史洪灾数据库、旱情数据库、洪涝灾害统计数据库、专题成果数据库等;专用数据库是专门针对防洪调度系统而建设的数据库,存储与调度方案有关的数据,其他应用系统没有对其共享数据的需求。包括调度方案数据、启用工程参数数据、调度结果数据等。

#### 2.2.3 应用支撑层

应用支撑层包括应用支撑平台部分和服务支撑部分。应用支撑平台实现系统基础支撑功能的重复调

用,如单点登录服务、信息交换服务、信息共享服务等。服务支撑部分实现调度算法的服务组件化,并结合业务流程引擎和规则引擎,实现调度节点和调度规则的动态配置,以及应用层功能的重复利用。

#### 2.2.4 应用服务层

应用服务层实现防洪调度系统功能,具有防洪形势分析、调度方案制定、调度成果可视化、调度成果评价比较、调度成果管理、调度成果上报、调度系统管理、专用数据库管理等功能。

#### 2.2.5 用户层

用户层为海河流域防洪调度系统的各级用户提供统一的登录入口,同时各河系调度系统也可独立运行。

### 2.3 系统功能实现

按照“需求至上”的设计原则,海河流域防洪调度系统基于流域防洪调度实际业务需求进行开发建设,主要包括防洪形势分析、调度方案制定、调度成果可视化、调度方案比较、调度方案管理、调度系统管理等功能模块,见图2。

#### 2.3.1 防洪形势分析

防洪形势分析模块对海河流域雨水情、灾情、暴雨洪水预报成果、工情险情进行分析,对洪水规模、特点、发展态势作出判断,并把它有机组织起来,帮助调度人员认清防洪形势,明确防洪的主要问题和防汛目标。

#### 2.3.2 调度方案制定

调度方案制定是防洪调度系统的核心。该模块实现对海河流域内各河系的洪水状态进行演进、模拟,达到描述整个水系内洪水发展趋势的目的,给出可能存在风险的防洪点、断面和工程,提前为决策者提供决策依据<sup>[5]</sup>。调度方案制定模块将在Web的方式下,实现对模型大部分参数的实时调整、实时计算并模拟计算结果。同时,在调度方案生成后能够立即看到方案生成结果的展示界面,对生成的调度方案反复进行人工调整,直至满意为止。

#### 2.3.3 调度方案可视化

调度可视化模块将方案通过直观、简明和形象化的信息表达,实现对防洪调度成果的可视化展示。防洪概化图可视化在概化图界面上,针对不同方案防洪

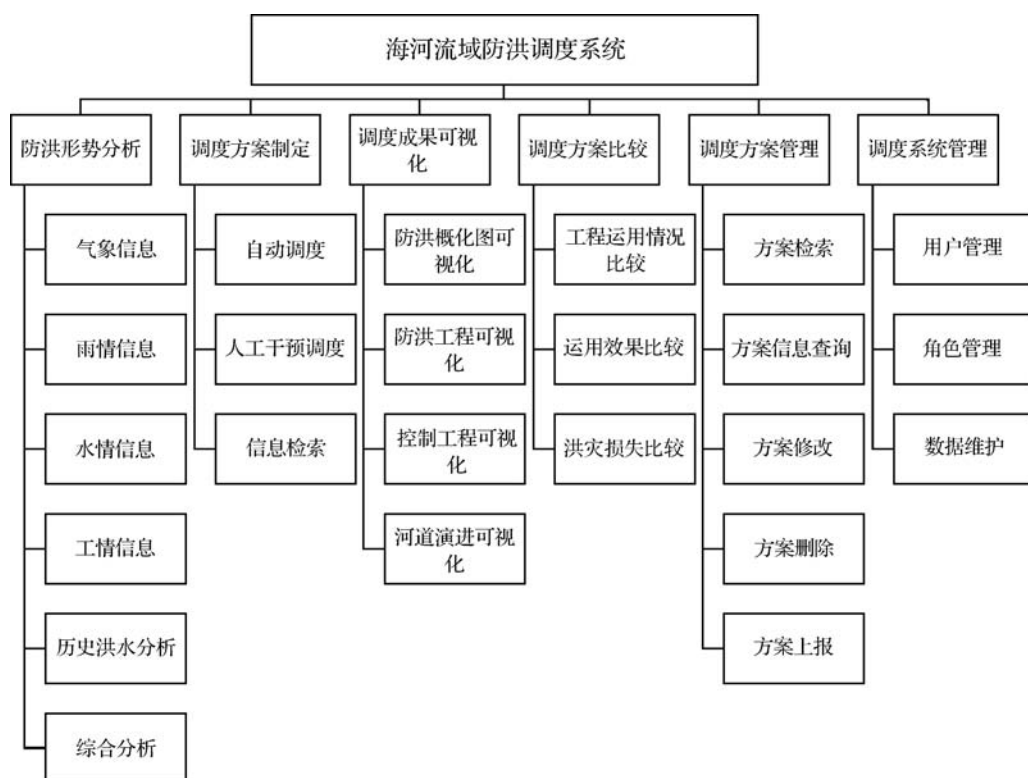


图2 防洪调度系统功能结构

工程的实际应用情况对其进行动态洪水演进仿真,包含河道洪水演进、蓄洪区洪水演进、分洪水道洪水演进和相关工程信息监视<sup>[7]</sup>。控制工程可视化主要是模拟调度成果中的相关控制工程的运行情况,包括水库和蓄滞洪区调度可视化。二维GIS可视化包括缩放、漫游、图层控制等一般功能及地图要素查询功能,可参与查询的图层包括测站、水闸、河流、水库、蓄滞洪区、堤防、险工险段。河道演进可视化是将二维洪水预案结果在GIS上进行动态展示,系统将二维预案结果预处理成洪水淹没水深图片,实时添加到GIS中,形成洪水演进动画。

#### 2.3.4 调度方案比较

调度方案比较实现了对多种方案的工程运用情况、运用效果(调度方案模拟结果)、洪灾损失的对比分析,供决策者选择可行、满意的方案。

#### 2.3.5 调度方案管理

调度方案管理主要是对与调度方案有关的所有数据、调度方案集进行统一、有效的管理,包括调度方案检索、方案信息查询、方案修改、方案删除和方案上报

5项子功能。

#### 2.3.6 调度系统管理

调度系统管理主要负责用户管理、角色管理以及数据维护,其中用户管理和角色管理统一由防指二期实施的防汛抗旱综合信息服务系统实现,数据维护部分主要完成防洪形势综合分析报告、批复的调度方案、历史洪水等相关数据的维护功能。

### 2.4 系统集成方案

海河流域防洪调度系统是对一期防洪调度系统现有成果的补充和完善,通过应用集成、数据集成和环境集成,为海河流域防洪决策提供有力支持。

在应用集成方面,集成一期防洪调度系统中防洪形势分析、调度方案生成与比较等功能;集成洪水动态仿真的Flash组件、二维洪水演进展示功能组件等。

在数据集成方面,集成一期工程所采用的电子地图数据,针对不同比例尺的地图数据,可进行视野范围的调整。

在环境集成方面,集成一期工程的服务器,现有项目系统运行的水利专网、办公网络以及数据库平台、地

图平台等第三方软件平台。

2.5 系统成果展示

海河流域防洪调度系统首页默认展示流域水系概

况、实时汛情、预报汛情、水库水情、防洪形势综合分析等信息,并提供历史洪水、基础信息和其他应用系统的链接。系统首页和永定河模块功能界面见图3、图4。

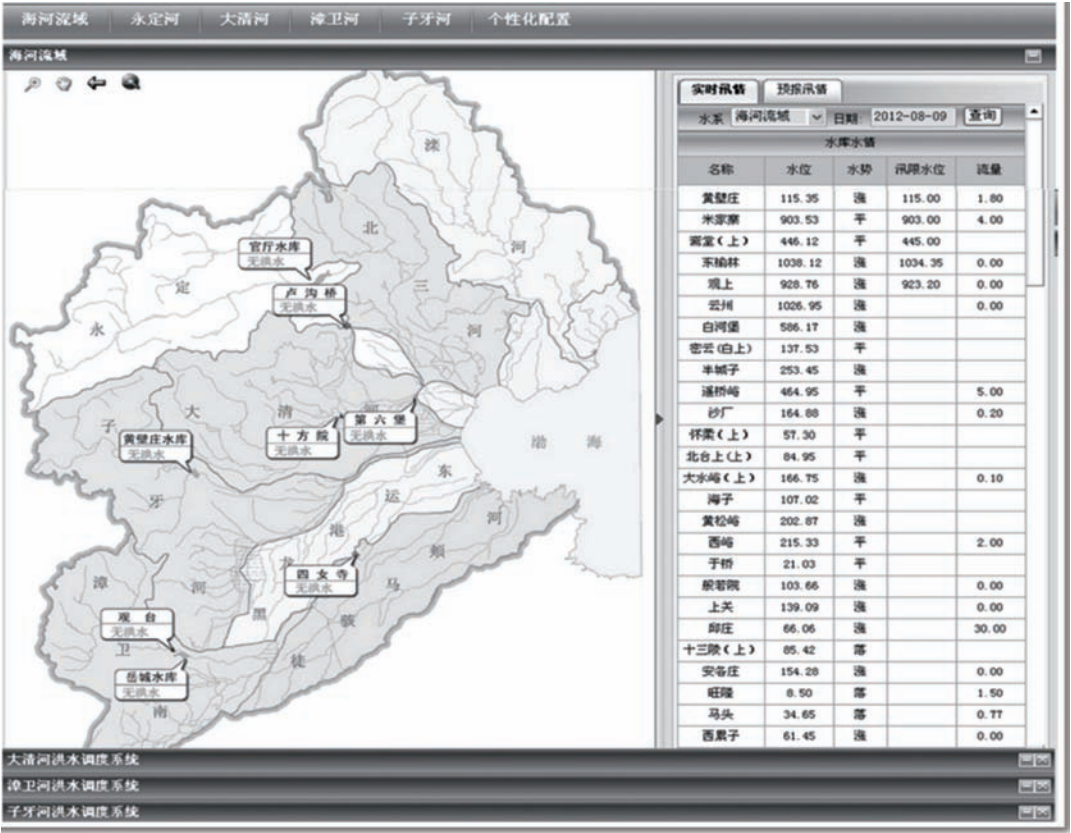


图3 海河流域防洪调度系统首页界面



图4 永定河防洪调度系统界面





### 3 防洪“四预”视域下防洪调度系统发展构想

#### 3.1 基于流域资源整合,加快实现防汛信息共享

面对管理分散、业务分割、资源孤岛等水利信息化制约瓶颈,2013年水利部党组正式启动全国水利信息资源整合共享工作,明确提出由水利部信息中心对资源整合共享工作提出整体思路并加快建设实施<sup>[10]</sup>。海委高度重视,于2020年印发《智慧海河总体方案》和《智慧永定河技术方案》,并提出海委网信基础建设“六大工程”。

海委系统整合项目是“六大工程”的核心工程,是解决海委信息资源分散管理、业务系统各自为政、运行维护工作统筹难的关键举措。目前,项目已经完成合同验收和系统试运行,进入报竣阶段。项目通过适配技术实现了防洪调度系统在国产环境的正常运行,通过海委统一数据库建设实现了防洪调度系统数据库同其他部分数据库的数据汇集,通过新建应用支撑平台实现了防洪调度系统同其他系统的统一用户管理和单点登录等功能<sup>[11]</sup>。

下一步,伴随“六大工程”持续推进,防洪调度系统也将以应用为核心,以创新为动力,以共享为目的,加快实现防汛信息与海委其他数据库的汇集和同步工作,努力为智慧海河建设提供强有力的数据支撑和应用服务。

#### 3.2 基于数字孪生工程,加快实现防洪“四预”

国家“十四五”规划纲要明确提出“构建智慧水利体系,以流域为单元提升水情测报和智能调度能力”。水利部党组高度重视智慧水利建设,提出智慧水利是新阶段水利高质量发展的最显著标志和六条实施路径之一,要加快构建具有“四预”(预警、预报、预演、预案)功能的智慧水利体系。2021年开始,水利部相继出台智慧水利系列重要文件,全面部署智慧水利建设,并将数字孪生流域建设作为构建智慧水利体系、实现“四预”的核心和关键<sup>[12]</sup>。

防洪调度系统作为国家防汛指挥系统二期工程(海河流域部分)重要的单项工程,自2016年建成以来,已成为现阶段海委开展防汛抗旱业务的重要决策

支持,在近年的业务工作中发挥了重要作用。但是对标新时期海河流域智慧水利建设要求,仍然存在一定差距,主要体现在:水文站网密度低,监测能力距智慧感知体系要求差距大;洪水调度与预报结合不充分,缺乏水工程实际联合调度经验;已建应用系统分散布局,缺乏业务协同,流域智慧化洪水治理能力不足。

立足当下,应按照智慧水利总体框架,深度融合物联网、大数据、人工智能、数字孪生等新一代信息技术,以构建数字孪生防汛“四预”智慧化管理平台为发力点,充分利用水文综合业务平台、海委视频监控平台相关资源,改造现有防洪调度系统,扩展定制流域防洪数字化场景,升级完善洪水预报、预警功能,重点构建模拟仿真模块,完善系统防汛“四预”功能建设,加快实现“预报精准化、预警超前化、预演数字化、预案科学化”的防汛调度业务应用,持续推进“十四五”时期流域防汛抗旱信息化能力提升和水利事业高质量发展。◆

#### 参考文献

- [1] 徐和龙. 海河流域防汛抗旱减灾体系建设与成就[J]. 中国防汛抗旱, 2019, 29(10): 61-70.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 曾焱, 程益联, 江志琴, 等. “十四五”智慧水利建设规划关键问题思考[J]. 水利信息化, 2022(1): 1-5.
- [5] 肖雪, 李清清, 许继军, 等. 洪水预报及防洪调度系统的设计与应用[J]. 中国防汛抗旱, 2020, 30(11): 56-60.
- [6] 魏国振. 数据驱动洪水预报及预报调度方式研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [7] 陈瑜彬, 邹冰玉, 牛文静, 等. 流域防洪预报调度一体化系统若干关键技术研究[J]. 人民长江, 2019, 50(7): 223-227.
- [8] 刘海波. 水库防洪调度研究发展趋势[J]. 科技创新与应用, 2017(8): 200.
- [9] 毛慧慧, 张建中. 水库泄洪方式对白洋淀入淀洪水及防洪的影响分析[J]. 水文, 2018, 38(4): 83-86.
- [10] 程晖. 刍议流域水利信息化综合管理信息资源整合与共享[J]. 通讯世界, 2020, 27(4): 29-30.
- [11] 张洋, 乔健, 宗华丽, 等. 海委水利业务系统资源整合与共享研究[C]//大数据时代的信息化建设: 2015(第三届)中国水利信息化与数字水利技术论坛论文集. 2015.
- [12] 陈滢. 新时代防汛抗旱信息化能力提升思考[J]. 中国防汛抗旱, 2020, 30(12): 94-97.

# 马街河水库坝基蚀变花岗岩勘察研究及其处理分析

赵 静<sup>1</sup> 郑培溪<sup>2</sup>

(1. 新疆兵团勘测设计院(集团)有限责任公司云南分院, 云南 昆明 650217;

2. 云南鲁布革顾问有限公司, 云南 昆明 650051)

**【摘 要】** 本文通过物探和地质勘察试验揭示和研究马街河水库坝基蚀变花岗岩的蚀变特征及工程地质特性,进而分析评价水库建坝的主要工程地质问题和处理措施。结果表明:坝基为印支期侵入蚀变花岗岩,全风化岩体呈砂状,力学性质和可灌性差;强—微风化岩体承载力低,岩石饱和单轴抗压强度 5.9~39.0MPa,软化系数 0.34~0.68,完整性系数 0.11~0.69,多属破碎—较破碎岩体;异于同层风化程度的特殊风化体占比较高;岩体渗透性局部不均匀、相对隔水层较深,对坝基稳定和防渗影响较大。依据该结果选择黏土心墙风化料坝、全风化岩体采用孔距加密至 1.0m 的帷幕灌浆方案,同时对心墙范围内坝基进行固结灌浆。本文对下一步工作也提出了粗浅建议,供类似勘察设计类工程参考。

**【关键词】** 马街河水库;蚀变花岗岩;勘察;处理;分析

中图分类号: [TV221.2]

文献标志码: B

文章编号: 2097-0528(2022)11-029-08

## Exploration and treatment analysis of altered granite in dam foundation of Majiehe Reservoir

ZHAO Jing<sup>1</sup>, ZHENG Peixi<sup>2</sup>

(1. Yunnan Branch of XPCC Surveying & Designing Institute (Group) Co., Ltd., Kunming 650217, China;

2. Yunnan Lubuge Consulting Co., Ltd., Kunming 650051, China)

**Abstract:** In this paper, the alteration characteristics and project geological characteristics of the altered granite in the dam foundation of Majiehe Reservoir are revealed and studied through geophysical exploration and geological investigation tests, and then the main project ecological problems and treatment measures of dam construction of the reservoir are analyzed and evaluated. The results show that the dam foundation is Indosinian intrusive altered granite, and the fully weathered rock mass is sandy with poor mechanical properties and groutability. The strongly ~ slightly weathered rock mass has low bearing capacity, with saturated uniaxial compressive strength of 5.9~39.0MPa, softening coefficient of 0.34~0.68 and integrity coefficient of 0.11~0.69, which are mostly broken ~ relatively broken rock mass. The proportion of special weathered bodies which is different from the weathered degree of the same layer is high. The rock mass permeability is not uniform and the relative confining bed is deep, which has great influence on the stability and seepage-proofing of dam foundation. According to the results, the curtain grouting scheme with hole spacing of 1.0m is selected for the weathered material dam

收稿日期: 2022-03-23

作者简介: 赵静(1985—),女,高级工程师,主要从事水利工程设计及咨询工作。



with clay core wall and fully weathered rock mass. At the same time, the consolidation grouting of the dam foundation within the core wall is carried out. This paper also puts forward some suggestions for the next step, which can be used as reference for similar survey and design projects.

**Keywords:** Majiehe Reservoir; altered granite; survey; treatment; analysis

水库大坝蓄水运行后,坝基或两岸岩体承受的荷载迅速增大,岩体稳定性是坝体稳定的关键因素之一。同时,坝基防渗效果亦直接影响水库能否正常蓄水。蚀变花岗岩在水理性质、风化特征、可灌性等方面较为特殊,已有文献<sup>[1-2]</sup>对其力学和湿化性质进行了试验研究,对其可灌性、灌浆方法、浆材选择及灌浆加固体特性等亦有不少研究结论<sup>[3-7]</sup>,表明在全风化花岗岩中适当增加灌浆孔、排距,合理选择灌浆参数等,能较好地形成完整防渗帷幕,这些研究成果为花岗岩地区的水库大坝建设提供了有益的参考。因此,采用多种可靠手段查清蚀变花岗岩的成因、发育规律和特性,相应从坝型选择、地基防渗处理等方面合理设计,能够确保水库正常修建和安全蓄水。

马街河水库坝址区分布印支期( $\gamma_5^1$ )蚀变花岗岩,与三叠系中统忙怀组( $T_2m$ )凝灰岩、晶屑凝灰岩呈侵入接触,岩体受蚀变作用影响,混合岩化强烈,渗透性不均匀,且全风化花岗岩呈细粒土质砂,力学性质差,存在吃水不吃浆等问题。本文对其勘察研究成果及对工程的影响和相应处理方案进行分析与探讨,以期为类似工程提供有益的启示。

## 1 工程概况

马街河水库位于云南省临沧市澜沧江水系一级支流勐麻河支流马街河中游,为Ⅲ等中型水利工程,水库总库容 1194 万  $m^3$ ,黏土心墙风化料坝最大坝高 86.8m,坝顶长 220.0m,坝顶高程 1800.9m。坝址上游约 410m 处左库岸存在一低矮垭口,在垭口处修建高约 13m 的黏土心墙风化料副坝以解决其渗漏问题。水库及枢纽工程区分布蚀变花岗岩。

工程区地处云南省西部横断山脉南段,碧罗雪山南部延伸支脉,属临沧中山区,位于冈底斯-念青-唐古拉褶皱系昌宁-孟连褶皱带临沧-勐海褶皱束内。山顶高程 1500 ~ 2400m,相对高差 500 ~ 700m。河谷多呈陡

峻的“V”形,为强烈切割的侵蚀构造峡谷地貌,两岸坡坡度  $15^\circ \sim 50^\circ$ ,地表植被覆盖较好,基岩少量出露。工程区地震动峰值加速度  $0.20g$ ,反应谱特征周期值  $0.45s$ ,相应地震基本烈度Ⅷ度,属区域构造稳定性较差地区。

## 2 坝址区工程地质条件

坝址区河谷底宽 25 ~ 40m,左岸山脊单薄,呈缓顶梁状,山顶高程 1862.0m,相对高差约 140m,坡度  $15^\circ \sim 45^\circ$ ,局部基岩裸露;右岸山体雄厚,山顶高程 1964.1m,相对高差约 240m,坡度  $20^\circ \sim 50^\circ$ ,局部基岩裸露。

坝址左、右岸坡表层多被第四系全新统残坡积层含砂低液限黏土、黏土质砂覆盖,厚约 1.0m,山顶处略厚;下伏蚀变花岗岩。河床表层为第四系全新统洪坡积层含细粒土砾,厚 0.5 ~ 1.5m;其下为第四系全新统冲洪积层混合土卵石,厚 2.0 ~ 5.0m,粒径最大达 1.0m;下伏蚀变花岗岩。其中全风化蚀变花岗岩呈砂状(见图 1),力学性质差。



图 1 坝址区全风化蚀变花岗岩

坝址区发育 7 条断层(编号  $f_{26} \sim f_{32}$ ),为Ⅲ ~ Ⅳ级构造,倾角  $36^\circ \sim 70^\circ$ ,延伸长度 148 ~ 400m,均为压性或压扭性、中等—陡倾角逆断层,破碎带宽 0.2 ~ 0.8cm,组成物质为碎裂岩、糜棱岩,其中  $f_{29}$  断层斜交并穿过坝基,交角约  $19^\circ$ 。同时还发育四组节理,其产



状见节理走向玫瑰花图(见图2),均为微张—张开,泥、铁锈色物质充填,起伏粗糙,延伸2~10m,发育间距10~80cm。

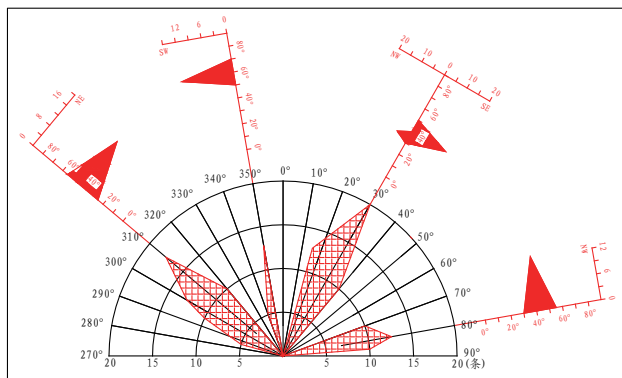


图2 坝址区节理走向玫瑰花图

### 3 花岗岩体蚀变特征

坝址区基岩为印支期侵入蚀变花岗岩、碎裂蚀变花岗岩、蚀变黑云母花岗岩。受区域构造活动、应力演化及岩体风化作用影响,热液交代、动力构造和次生风化蚀变均存在。

#### 3.1 热液交代蚀变

坝址区靠近侵入接触带,热液交代蚀变现象普遍,主要是由岩浆期后热液侵入时热液的交代作用而形成的原生热液蚀变作用,热液蚀变类型主要包括钾长石化、绿帘石化、钠黝帘石化和硅化<sup>[8]</sup>类型,热液来源与坝址区侵入岩体及其邻近岩体形成有关。

#### 3.2 动力构造蚀变

由于区域长期强烈的构造活动,岩体内发生动力构造蚀变作用,形成一系列构造动力蚀变岩。坝址区局部花岗岩受断层及节理控制,动力构造蚀变多沿早期断裂发育,规模较小,主要构造物质为碎裂岩、糜棱岩,规律性不明显。其典型岩芯见图3。

#### 3.3 次生风化蚀变

坝址区花岗岩次生风化蚀变较普遍,长期的隆起剥蚀使花岗岩体接近或暴露于地表,并受多期冷热交替自然气候影响,岩体表层风化严重,部分矿物受表生淋滤水交代而产生次生风化蚀变,主要表现为风化

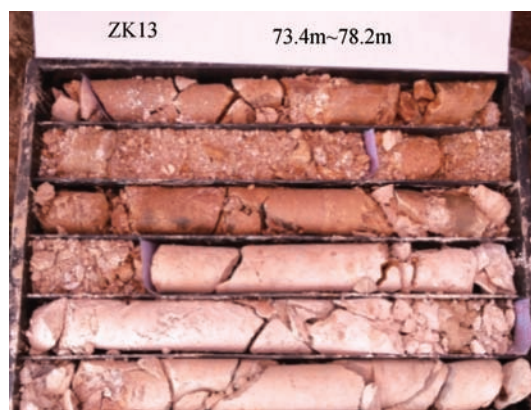


图3 坝址右岸动力构造蚀变花岗岩

隐微裂隙发育和部分矿物蚀变为黏土矿物,如长石类的高岭土化、绢云母化,黑云母的绿泥石化等。风化蚀变强度和空间分布特征与风化营力及其作用通道有关,主要影响全—弱风化带。据钻孔揭露,次生风化蚀变发育最深约90m,位于岸坡。

### 4 蚀变花岗岩矿物组成及工程地质特性

#### 4.1 矿物组成

坝址区分布印支期侵入蚀变花岗岩、碎裂蚀变花岗岩、蚀变黑云母花岗岩,呈灰白、灰黑色,细粒隐晶质结构,具花岗结构,发生动力地质作用后,结构面发育,后期在蚀变及风化作用下,岩石被压碎成碎粒、碎块,沿裂隙分布。主要矿物成分:钾长石,多已发生高岭石化且包裹石英,仅见残留体,可见少量微斜条纹长石;斜长石,半自形板柱状,相对折射率小于石英,钠长石双晶发育,且双晶纹细而密,均已发生绢云母化,仅见残留体;石英,它形粒状,正突起低,正交下具一级黄白干涉色,有的包裹于长石中;黑云母,淡褐—深褐色,片状,一组极完全解理,且解理弯曲,多已发生绿泥石化,正交偏光下干涉色呈异常蓝色,并析出铁质。岩矿鉴定成果见表1。

#### 4.2 水理特性及力学性质

现场浸水试验(见图4)表明:全风化蚀变花岗岩浸水30min后呈散体结构,饱和岩块强度极低;强风化蚀变花岗岩浸水24h后变化较小,饱和岩块强度受蚀变作用影响较小,主要受结构面控制。



表1 岩矿鉴定成果

取样钻孔	定名	矿物成分
左岸 ZK11-1 右岸 ZK13-1	碎裂蚀变 黑云母花岗岩	钾长石:0.4~1.2mm,占26%~30%;斜长石:0.3~1.2mm,占25%~30%;石英:0.1~0.8mm,占22%;黑云母:淡褐—深褐色,片状,占20%;磁铁矿:黑色、不透明,占2%~3%
左岸 ZK11-3 河床 ZK14-1 右岸 ZK13-2	碎裂蚀变 花岗岩	钾长石:0.3~1.0mm,占27%~30%;斜长石:0.3~1.2mm,占27%~30%;石英:0.2~0.9mm,占25%~30%;黑云母:淡褐色,片状,部分已发生绿泥石化后,正交偏光下干涉色呈异常蓝色,并析出少量铁质,占12%~15%;局部含泥质,约占5%;磁铁矿:黑色、不透明,占3%~5%

根据标贯、重型动力触探和岩石室内试验,蚀变花岗岩强度较低,局部不均匀。全风化上、下带承载力特征值分别为241~569kPa、442~830kPa。强、弱、微风化岩石饱和单轴抗压强度分别为5.9~8.6MPa、17.2~26.8MPa、20.0~39.0MPa,软化系数分别为0.34~0.48、0.47~0.62、0.49~0.68。

4.3 岩体风化特征

综合物探及地质钻探表明:坝址区蚀变花岗岩全风化层性状类似细粒土质砂,各风化层界限存在渐变关系,其风化带划分见表2。由表2可见,全、强风化层厚度大,两岸风化厚度大于河床,右岸弱风化底界最深95.3m。分析原因主要是坝址区处于侵入接触带边界,次级构造发育,受结构面控制影响明显。



图4 全风化(左)、强风化(右)蚀变花岗岩浸水试验

表2 风化带划分

风化程度		层厚及埋深					
		左岸		河床段		右岸	
		层厚/m	埋深/m	层厚/m	埋深/m	层厚/m	埋深/m
全风化	上带	0~26.0	1.2~27.0	—	0~46.0	1.4~48.4	
	下带	0~5.0	8.4~29.3	—	0~17.2	5.6~65.6	
强风化		12.0~41.0	21.6~42.0	6.5~14.6	11.0~16.0	16.0~45.5	16.0~88.0
弱风化		26.6~39.6	65.0~72.0	26.0~28.0	37.0~42.0	6.0~31.0	43.5~95.3
微风化		—	65.0~72.0以下	—	37.0~42.0以下	—	43.5~95.3以下

另外,根据岩芯及孔内声波存在异常区分析,坝址区风化花岗岩存在球状、槽状、囊状、带状风化等异于同层风化程度的特殊风化现象,典型强风化层岩芯见图5。其中,全风化层内强风化团块占0~7.3%,强风

化层内全风化团块占7.6%~27.5%,弱风化层内全、强风化团块占11.4%~22.7%。整体而言,风化岩体存在异于同层风化程度的特殊风化体占比在15%~25%之间,比例较高。



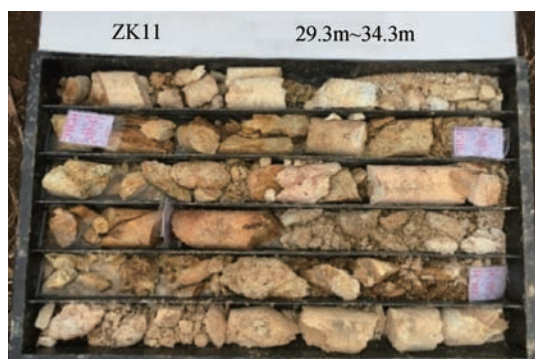


图5 强风化花岗岩中的特殊风化体

#### 4.4 岩体完整性

钻孔声波测试可以较准确地确定岩体完整性系数  $K_v$ <sup>[9]</sup>,本次通过钻孔岩石质量指标 RQD、钻孔声波测试及孔内电视成像综合评价岩体完整性,见表3,典型钻孔全孔壁成像见图6。可见,坝址区花岗岩体纵波波速  $V_p$  随岩体风化分带差异性明显,波速较之新鲜基岩普遍下降明显,且局部不规律。岩体完整性受构造、不均匀风化、蚀变作用影响,节理裂隙发育,裂隙面多张

表3 岩体完整性评价

位置	风化程度		RQD/%	$V_p/(m/s)$	$K_v$	完整性
坝址	全风化	上带	—	1400 ~ 1890	—	—
		下带	—	1610 ~ 2320	—	—
	强风化		0.7 ~ 19.9	1900 ~ 2970	0.11 ~ 0.26	极破碎—较破碎
	弱风化		2.5 ~ 19.1	2260 ~ 3780	0.15 ~ 0.43	破碎—较破碎
	微风化		1.7 ~ 29.1	2590 ~ 4800	0.20 ~ 0.69	破碎—较完整

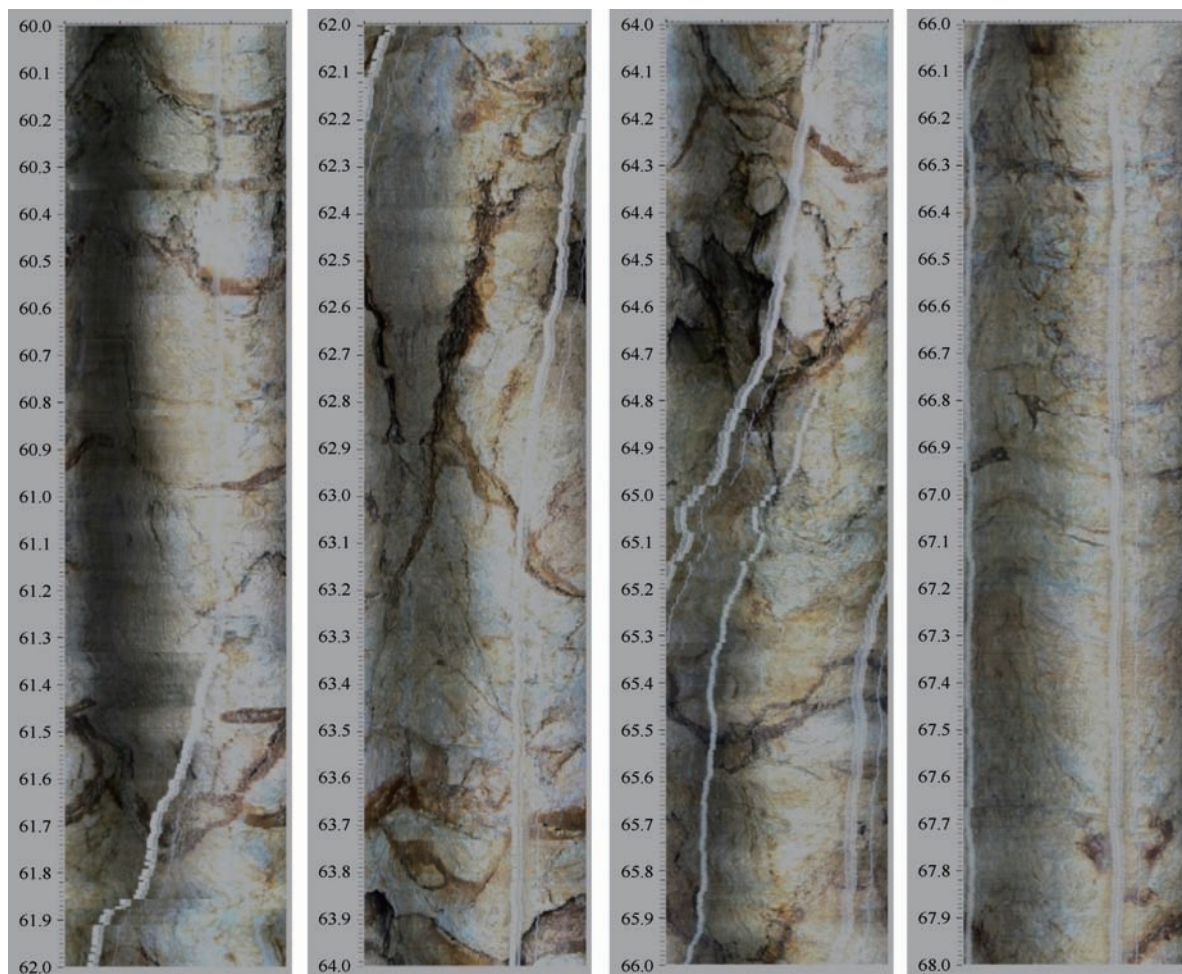


图6 弱~微风化岩体典型钻孔全孔壁成像





开,起伏粗糙,少量钙质薄膜附着,铁锈色氧化程度高。钻孔深度范围内强—弱风化岩体极破碎—较破碎,微风化岩体普遍完整性差,局部较完整。

#### 4.5 岩体渗透性

根据现场单环渗水试验,坝址两岸残坡积层渗透系数  $K = 6.0 \times 10^{-5} \sim 4.0 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ ,为弱—中等透水;河床洪坡积层  $K = 5.0 \times 10^{-3} \sim 3.0 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ ,冲洪积层  $K = 7.5 \times 10^{-3} \sim 1.5 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ ,均为中等—强透水;全风化蚀变花岗岩上、下带  $K = 1.39 \times 10^{-4} \text{ cm/s} \sim 8.22 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ ,为中等透水。根据钻孔压水试验(见表4),坝址强—微风化蚀变花岗岩体透水性规律不明显,局部不均匀,相对隔水层(5Lu)界线埋深为左岸 75 ~ 125m,河床 35 ~ 40m,右岸 65 ~ 80m。

表4 坝址岩体透水率

位置	中等透水带		弱透水带	
	深度/m	透水率/Lu	深度/m	透水率/Lu
左岸	20.0 ~ 105.0	8.9 ~ 35.6	27.0 ~ 122.4	0.5 ~ 9.9
河床	5.0 ~ 20.0	13.1 ~ 59.8	14.0 ~ 97.8	0.8 ~ 15.6
右岸	31.5 ~ 52.0	13.1 ~ 26.2	52.0 ~ 100.2	2.3 ~ 8.8

#### 4.6 小结

坝址区蚀变花岗岩体破碎,声波波速普遍偏低;岩块强度较低,微风化岩石饱和单轴抗压强度最大约 39MPa;岩体渗透性变化规律不明显,相对隔水层埋深较大;且蚀变生成一定量的黏土矿物,弱化了岩体的物理力学、水理性质。可以说,蚀变对花岗岩体的工程特性产生了较大影响。

### 5 对工程的主要影响及处理措施

#### 5.1 坝基稳定

坝址区蚀变花岗岩强度较低,岩体完整性普遍较差。根据规范<sup>[10]</sup>及工程经验,全风化蚀变花岗岩为软质岩 V 类( $C_V$ ),破碎且已失去原岩结构,抗滑、抗变形能力极差,不能作为高混凝土坝地基,不宜作为防渗体地基;强风化蚀变花岗岩为软质岩 V 类( $C_V$ ),破碎—较破碎,强度低,抗滑、抗变形能力差,不宜作为高混凝土坝地基;弱风化蚀变花岗岩为软质岩 IV 类( $C_{IV}$ ),较

破碎,局部完整性差,强度低,抗滑、抗变形性能差,不宜作为高混凝土坝地基;微风化蚀变花岗岩为中硬岩 III 类( $B_{III2}$ ),岩体完整性差,局部较完整,强度较高,抗滑、抗变形性能力在一定程度上受结构面和岩石强度控制。

综合考虑地质条件和料源、投资等,设计选择黏土心墙风化料坝,心墙基础置于强风化层,坝壳料基础置于全风化或强风化层。对于穿过坝基的  $f_{29}$  断层,开挖清理后采用混凝土封堵,开挖底宽  $3B$  ( $B$  为断层破碎带宽),顶宽  $5B$ ,深  $3B$ ,长度等于断层在坝基范围的长度。同时,在心墙范围底部进行固结灌浆以提高地基岩体的整体稳定性。

#### 5.2 岸坡稳定

坝址两岸坡及河床黏土心墙基础开挖段出露全—强风化蚀变花岗岩,通过赤平投影<sup>[11]</sup>(见图7)初步分析岸坡坡面与主要结构面的关系可知:左岸坡整体较稳定,开挖后会形成小规模楔形卸荷体,产生局部掉块,但不会造成整体失稳;右岸坡开挖后易形成潜在楔形卸荷体,但卸荷体规模小,多为掉块、掉渣。

分别采取如下处理措施:坝肩 1810m 高程以下位于强风化层,采用系统砂浆锚杆 ( $L = 4.0\text{m}$ 、 $\phi 25$ 、 $2.0\text{m} \times 2.0\text{m}$ ) 锚固,并挂网 ( $\phi 8 @ 200$ ) 喷 C20 混凝土;1810m 高程以上位于全风化层,采用 C20 钢筋混凝土框格梁,间距  $2.0\text{m} \times 2.0\text{m}$ ,矩形布置。坝体心墙基础开挖临时边坡采用喷 C20 混凝土封闭。

#### 5.3 坝基渗漏

##### 5.3.1 渗漏量估算

河床坝基渗漏量按式(1)估算。因左岸山体单薄,为一缓顶山梁,左岸至上游副坝防渗处理延长线地下水位均低于正常蓄水位,渗漏带宽度不能确定,因此按式(2)估算左岸绕坝渗漏量;右岸绕坝渗漏量按式(3)估算。参数选择及计算结果见表5、表6。

$$q = KH[T/(B + T)]L \quad (1)$$

$$q = KH(h_1 + H_1) \quad (2)$$

$$q = 0.366KH(h_1 + H_1)\lg(B/r_0) \quad (3)$$

式(1)中: $q$  为渗漏量; $K$  为渗透系数,取透水层至相对

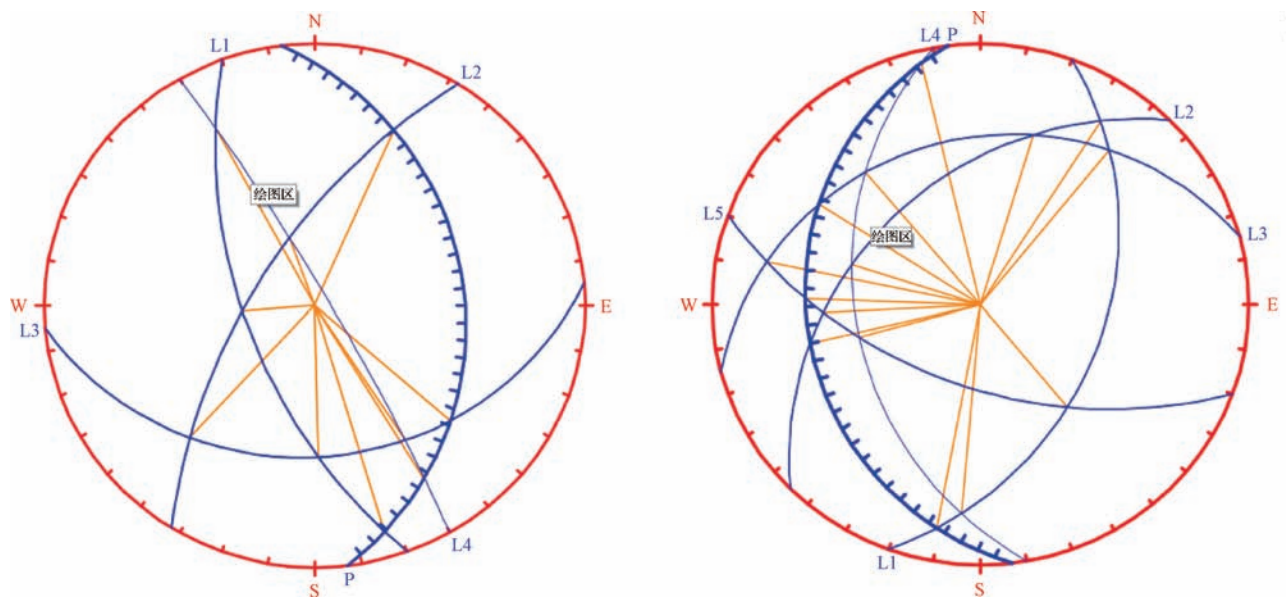


图7 坝址左、右岸坡赤平投影图

隔水层吕荣值大值加权平均值; $H$ 为上、下游水位差; $T$ 为透水岩层平均厚度; $B$ 为坝底宽; $L$ 为坝长。式(2)和式(3)中; $K$ 取坝肩处正常蓄水位至相对隔水层吕荣值大值加权平均值; $H$ 为正常蓄水位与未蓄水时地下水位之差; $B$ 为渗漏带宽度; $h_1$ 为未蓄水时地下水位至相对隔水层厚度; $H_1$ 为正常蓄水位至相对隔水层厚度; $r_0$ 为坝接头处绕渗流线的圆半径。

表5 坝基渗漏量

$K/(m/d)$	$H/m$	$T/m$	$B/m$	$L/m$	$q/(m^3/d)$
0.942	76	74	245	220	3654

表6 绕坝渗漏量

位置	$K/(m/d)$	$H/m$	$h_1/m$	$H_1/m$	$B/m$	$r_0/m$	$q/(m^3/d)$
左岸	0.942	65	35	100	—	5	8266
右岸	0.252	38	43	81	48	5	427

假定按每年渗漏280天估算,则河床坝基渗漏量为102.3万 $m^3$ /年,左、右岸绕坝渗漏量分别为231.4万 $m^3$ /年、12.0万 $m^3$ /年,总渗漏量约345.7万 $m^3$ /年。应采取必要的防渗处理措施。

### 5.3.2 坝基防渗处理

根据勘察资料、已有试验研究成果和工程经验,结合坝址区蚀变花岗岩的工程地质特性,采用水泥灌浆帷幕防渗处理。坝基范围内为强—微风化层,采用双

排孔布置,排距1.2m,孔距1.5m,主、副帷幕深度相等;两岸坝肩及左岸临谷段上部主要为全风化层,采用单排孔布置,孔距加密至1.0m。防渗底界为相对隔水层(5Lu线)以下5m,最大灌浆深度97m。左岸防渗边界从坝轴线左岸绕坝渗漏点折向上游后沿左岸临谷段延伸到副坝左坝肩,右岸防渗边界为正常蓄水位与地下水位相交点。

为防止冒浆和地层抬动,在黏土心墙底浇筑6.0m宽、1.5m厚,与心墙截水槽底宽相当的C25钢筋混凝土压浆盖板。

为保证心墙基础形成完整承载体,避免不均匀沉降造成的应力集中导致心墙开裂,对心墙范围内地基进行固结灌浆,在灌浆帷幕上、下游侧对称布置,孔、排距2m,分Ⅱ序错孔布置,孔深10m。

## 6 结 语

a. 通过物探、区域地质调查、地质钻孔和试验研究等,基本查清了马街河水库坝址区为印支期侵入蚀变花岗岩,其工程地质特性主要表现为:全风化岩体呈砂状,力学性质和可灌性差;强—微风化岩体普遍破碎—较破碎,强度偏低,遇水易软化,岩石饱和单轴抗压强度5.9~39.0MPa,软化系数0.34~0.68,完整性系数0.11~0.69;岩体渗透性不均匀,相对隔水层



(5Lu)界线埋深35~125m。

b. 蚀变花岗岩主要影响坝基稳定和防渗,对两岸坡稳定也有一定影响。设计选择黏土心墙风化料坝以较好地适应坝地质条件;全风化层采用加密孔距至1.0m的水泥灌浆帷幕防渗,心墙范围内坝基进行固结灌浆以增强地基岩体整体性;两岸开挖边坡根据不同风化岩层采用系统砂浆锚杆或钢筋混凝土框格梁等加固措施。

c. 鉴于蚀变花岗岩性质特殊,尤其是全风化层可灌性差,建议在施工前,对灌浆施工方法、灌浆压力、注浆量等,进一步进行试验和研究,据此相应优化调整设计。同时,应重视坝基及岸坡渗流、应力和变形等安全监测设施的布设和数据采集分析,以便及时监控和反馈工程实施效果。◆

#### 参考文献

- [1] 程来,周科平,李杰林. 蚀变花岗岩物理力学特性试验研究[J]. 有色金属工程,2018,8(2):124-128.
- [2] 茆大炜,杜少华,李地元,等. 基于大型三轴试验的蚀变花岗岩力学行为及浸水湿化研究[J]. 岩石力学与工程学报,2020,39(9):1819-1831.
- [3] 洪振国,苟勤章. 花岗岩地质条件下的帷幕灌浆试验研究[J]. 能源与环保,2019,41(1):70-74.
- [4] 蒋煌斌,张贵金,傅小妹,等. 全风化花岗岩地层可灌性浆材试验研究[J]. 铁道科学与工程学报,2018,15(10):2501-2508.
- [5] 罗畅,聂永,党建涛. 变质砂岩地质条件下的帷幕灌浆试验研究[J]. 水利水电技术,2017,48(8):74-80.
- [6] 孔昭荣. 临沧花岗岩岩体全风化的基础防渗处理方案思考[J]. 水利建设与管理,2014,34(4):43-45.
- [7] 刘金泉,陈卫忠,袁敬强. 全风化花岗岩注浆加固体抗冲刷特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(9):1767-1775.
- [8] 苗朝,沈军辉,李文纲,等. 大岗山坝区花岗岩蚀变特征及工程地质特性研究[J]. 人民长江,2013,44(24):23-25,38.
- [9] 原野,王志修,于世波. 基于声波钻孔测试技术的岩体完整性分析[J]. 中国矿业,2019,28(S1):85-87.
- [10] 水利水电工程地质勘察规范:GB 50487—2008[S]. 北京:中国计划出版社,2009.
- [11] 化建新,郑建国,王笃礼,等. 工程地质手册[M]. 5版. 北京:中国建筑工业出版社,2018.

## 水利工程标准化管理工作动态

### 江苏省如皋市焦港水利枢纽管理所:标准化管理提档升级

管理所结合工程实际,按照水利部《水利工程标准化管理评价办法》及其考核标准要求,在2016年创建江苏省一级水利工程管理单位的基础上,以创建国家级工程标准化管理工程为抓手,全面推行工程管理标准化建设,提出了“一流工程,一流设施,一流管理,一流效益”的管理目标。确立了“安全管理强基年”“规范管理提升年”“精细管理创新年”三步走的工作思路,努力打造“安全焦港”“生态焦港”“智慧焦港”“文化焦港”,逐步形成了具有自身特色且行之有效的管理体系,推动工程管理水平显著提高。

管理所积极引进新技术、新材料、新工艺、新设备,开展科研课题研究,提升科学管理水平,不断创新信息化系统,实现工程调度远程控制,管理区、工程管理范围内视频监控全覆盖;建立信息化管理平台、数字孪生平台、防汛信息系统、自动化控制系统、多媒体展示系统、安防系统等;建立数字档案、设备档案、办公局域网。利用一系列信息化技术,为工程管理提供准确、快捷、科学的决策依据。

(来源:如皋市焦港水利枢纽管理所)



# 吹填围垦堆载对临港道路及桥梁地基变形影响研究

笪中明

(江西省德兴市水利局,江西 德兴 334200)

**【摘要】** 吹填围海造地是港口基础建设的重要途径,围垦堆载会对既有结构基础土体产生附加应力,从而影响地基的变形沉降。本文以温州港灵昆作业区吹填围垦陆域建设工程为例,利用 MIDAS/GTS NX 软件模拟分析了围垦堆载对临近省道及水闸大桥桩基变形的影响,获得了省道地基在不同区域不同堆载高度下的变形沉降规律,明晰了围垦堆载对省道地基和大桥桩基变形沉降的贡献程度。本文研究成果可为类似工程地基沉降变形分析提供借鉴。

**【关键词】** 吹填围垦;软土层;MIDAS/GTS NX 软件;变形沉降

中图分类号:TV16

文献标志码:B

文章编号:2097-0528(2022)11-037-09

## Study on the influence of hydraulic reclamation surcharge on the deformation of harbor road and bridge foundation

DA Zhongming

(Jiangxi Dexing Water Conservancy Bureau, Dexing 334200, China)

**Abstract:** Hydraulic reclamation is an important way of port infrastructure construction. The reclamation surcharge will produce additional stress on the existing structural foundation soil, which will affect the deformation and settlement of the foundation. In this paper, taking the Wenzhou Port Lingkun Operation Area Hydraulic Reclamation Land Construction Project as an example, MIDAS/GTS NX software is used to simulate and analyze the influence of reclamation surcharge on the deformation of pile foundation of adjacent provincial road and sluice bridge, and the deformation and settlement law of provincial road foundation under different road heights in different regions is obtained. The contribution degree of reclamation surcharge to the deformation and settlement of provincial road foundation and bridge foundation is clarified. The research results can provide reference for the foundation settlement deformation analysis of similar projects.

**Keywords:** hydraulic reclamation; soft soil layer; MIDAS/GTS NX software; deformation settlement

随着港口建设对土地资源需求的日益迫切,围海造陆逐渐成为解决沿海地区港区基础建设用地的主要途径,吹填围垦则是围海造地的主要方式<sup>[1-5]</sup>。港区吹

填围垦地基为软土层,虽然经过了压实处理,但在自身载荷和交通载荷等作用下会发生沉降,对地基软土层上覆交通设施和建筑物等产生不良影响。若后期因建

收稿日期:2022-04-18

作者简介:笪中明(1978—),男,工程师,主要从事水工设计等方面的工作。



设需求,需在既有交通设施和建筑物附近进行吹填围垦,围垦堆载作用会对既有结构基础下部土体产生附加应力,可能会引起土体或地基的再次变形,使既有结构地基发生不均匀沉降<sup>[6-8]</sup>。当土体或地基的变形过大时,会影响既有结构的正常使用<sup>[9-10]</sup>。因此,研究港区吹填围垦堆载作用对邻近结构地基的变形沉降影响具有重要意义。本文基于温州港灵昆作业区滩涂围垦陆域建设工程,采用数值模拟方法,分析围垦堆载对既有省道路基和水闸大桥桩基的变形影响,为工程安全建设提供保障。

## 1 工程概况

### 1.1 工程介绍

工程地处浙东南沿海岛屿滩涂,由内向外依次为浅滩围垦区、省道和海堤,省道中部为水闸。如图1所示,拟在海堤外侧海域吹填围垦,设计高程5m;以水闸

为界分为西围垦区和东围垦区,其形态均近似矩形,且东围垦区临近大桥区域拟建油库。西围垦区长1455m,宽370~452m,围垦成陆面积0.51km<sup>2</sup>;东围垦区长2460m,宽436m,成陆面积1.11km<sup>2</sup>。采用吹填土料+地基处理的方式,利用绞吸式挖泥船直接将临海进港航道维护工程疏浚土吹填至本范围,再进行地基处理。

既有海堤和省道均坐落于软土地基上,由于本工程建设需要在省道路基边缘左侧10~550m范围内堆载5m高的吹填土,堆载作用会对省道基础下部土体产生附加应力,可能会引起土体或地基的变形,使省道发生不均匀沉降,影响省道的正常使用。此外,也可能对工程区附近的水闸大桥桩基造成影响。因此,有必要开展围垦陆域形成工程建设对省道及水闸大桥桩基的影响研究。

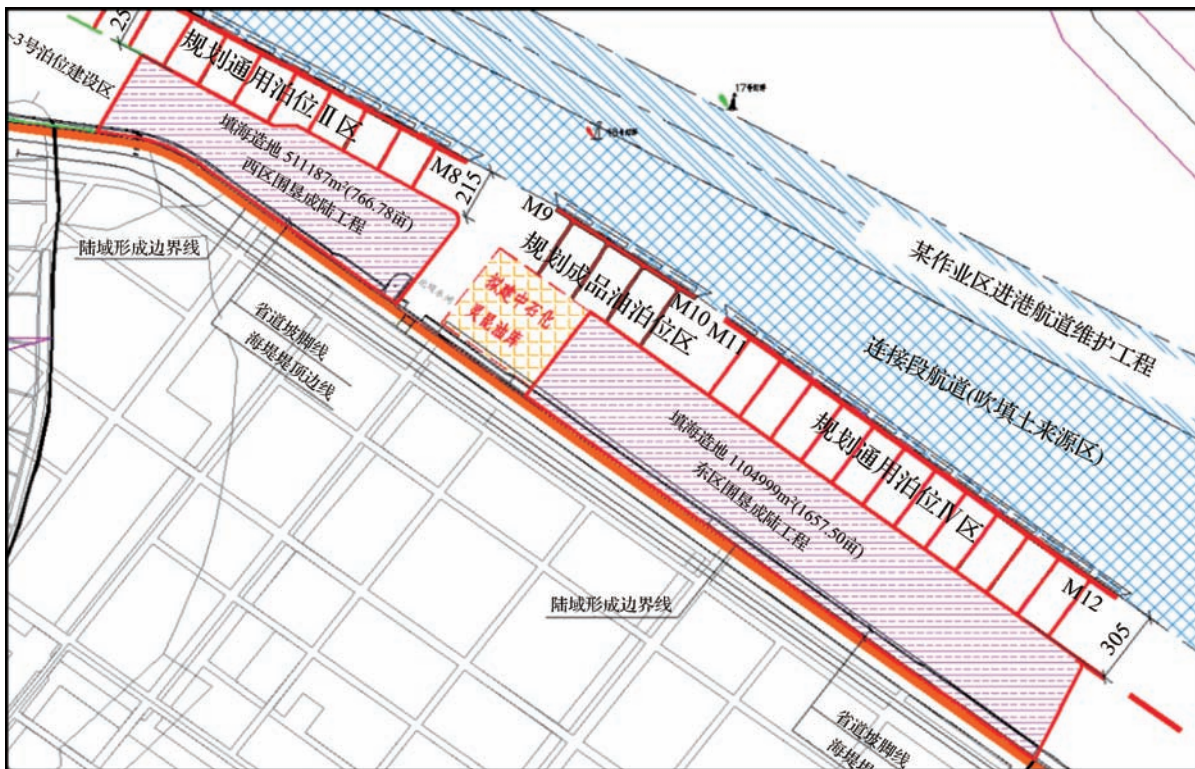


图1 温州港灵昆作业区工程堆载区域示意图

### 1.2 地质条件

根据地质勘探资料,该工程地基土层从上至下分别为含砂淤泥、淤泥夹砂、淤泥1、淤泥2、灰色淤泥质

黏土、灰色黏土、含砂粉质黏土、粉砂、圆砾1和圆砾2等10种土层。由于1~7层为软土层,8~10层为砂砾层,各层性质差异较小。此外,海堤和省道底部地基已

经过一定加固,其刚度明显大于围垦区地基。考虑到计算过程中地基 10 种土层的复杂性,再结合各层特点,将该区域地基参数进行一定的简化,即分为围垦区地基、加固地基和砂砾层;地基上部结构分别为堆载土

层、吹填堤、海堤、省道和反压土体,见图 2。基于土层实测参数,再根据地基的实测沉降数据对土体参数进行反算,得到了上述简化岩土体参数,见表 1。

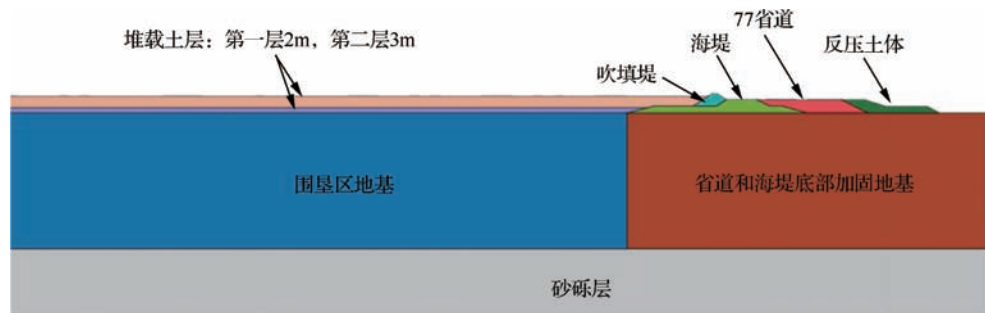


图 2 工程地基岩土层分布

表 1 工程岩土体参数

名 称	弹性模量/ kPa	泊松比	重度/ (kN/m <sup>3</sup> )	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)
堆载砂砾石	20000	0.30	14	0	30
反压土体	4000	0.35	18	7	26
路堤填料	330000	0.25	20	130	35
围垦区地基	2000	0.40	17	5	23
省道区加固地基	5300	0.30	17	10	28
砂砾层	50000	0.28	19	10	35

## 2 数值模型的建立

采用 MIDAS/GTS NX 软件模拟分析东、西围垦区堆载对临近省道及水闸大桥桩基变形的影响。由于水闸大桥桩基受两个围垦区共同作用,建立了包含东、西围垦区,省道,水闸大桥桩基的有限元模型,见图 3。

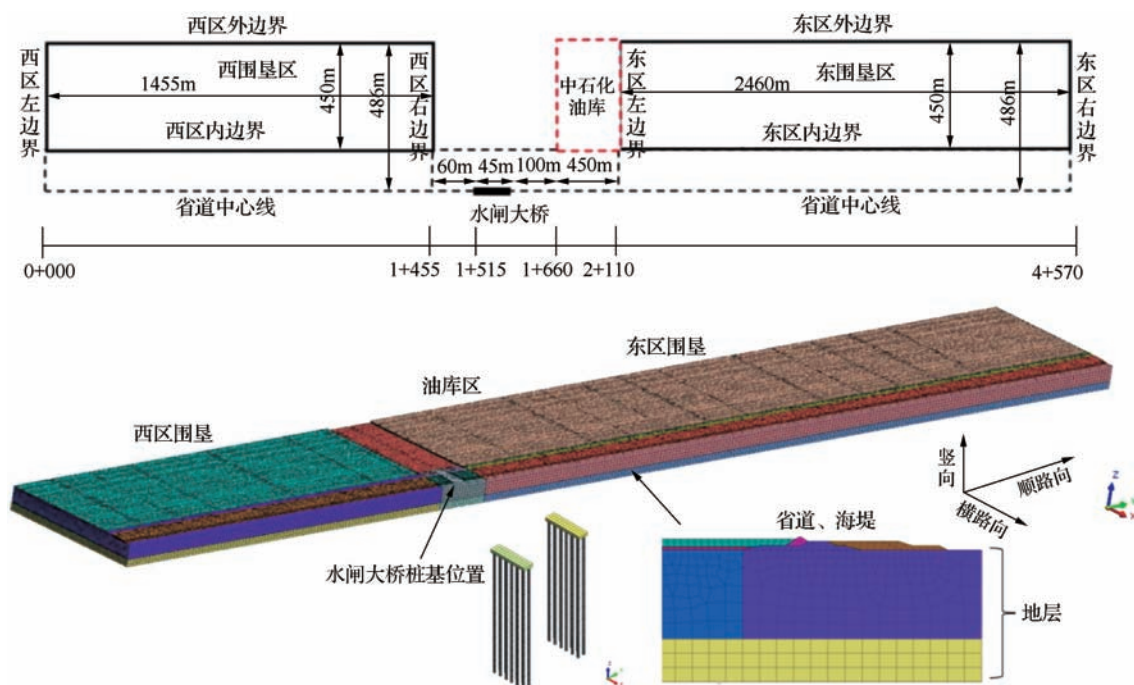


图 3 数值计算模型





## 2.1 网格划分及材料参数

实体单元网格划分采用八节点六面体单元(将2D网格扩展成3D网格),2D四边形单元网格尺寸控制在5~10m,3D六面体单元网格尺寸控制长宽比小于4。实体单元材料的本构模型采用莫尔-库仑模型。由于桥梁已建成,桥板结构自重对桩基产生的变形可以不考虑,仅需要考虑围垦区堆载对桥梁变形、内力的影响。建模时仅建立桩基结构,采用梁单元进行模拟,通过建立桩界面单元来分析桩土相互作用。桩界面单元类似于植入式梁单元形式。桩基采用各向同性线弹性材料参数,弹性模量取21GPa,泊松比取0.2,重度取25kN/m<sup>3</sup>。桩界面参数:剪切刚度模量10526kN/m<sup>3</sup>,法向刚度模量115789kN/m<sup>3</sup>。

所建立的三维有限元模型节点数为376706,单元数为356601。三维建模采用整体坐标系,存在X(横路向)、Y(顺路向)、Z(竖向)三个方向。

## 2.2 边界条件与计算步骤

数值计算模型的边界条件为:底部约束X、Y、Z方向的位移,左右两侧约束X方向位移,前后两侧约束Y方向位移。模拟具体分布步骤如下。第一步:地应力平衡。进行自重条件下初始地应力分析,此阶段需将位移清零,应力保留。第二步:海堤和桥梁桩基施工。激活海堤、省道和水闸大桥桩基单元,每根桩顶施加集中力 $Q$ ,且所有集中力之和为桥板及运行期荷载之

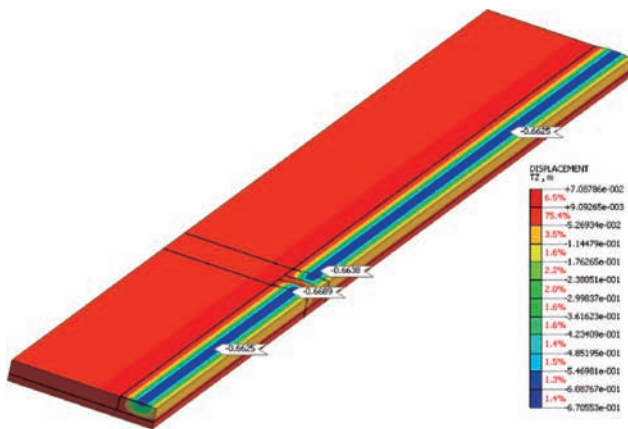
和,取 $Q=600\text{kN}$ 。此阶段需将位移清零,应力保留。第三步:省道和反压土体施工。激活省道和反压土体单元,省道路面考虑10.5kPa的车辆均布荷载。此阶段的位移、应力均不清零。第四步:围垦区堆载。东、西区围垦堆载前,先施工油库,然后进行东、西区围垦施工,具体施工步骤为:吹填隔堤施工→吹填第一层堆载2m→吹填第二层堆载至5m。最后提交计算。

## 3 围垦区堆载对省道及大桥桩基的影响分析

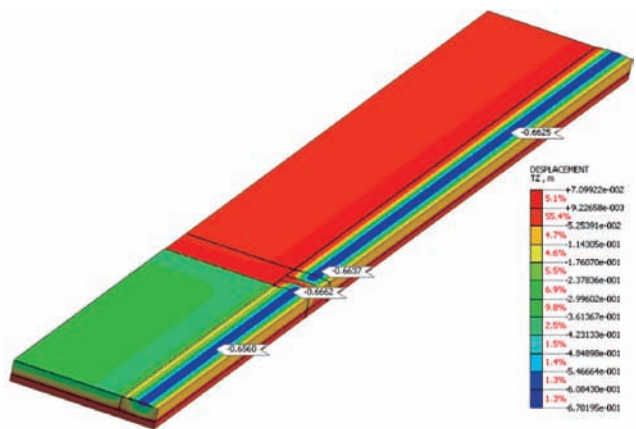
### 3.1 围垦区堆载对省道的影响

#### 3.1.1 沉降变形规律

图4是典型施工步时省道的沉降变形分布情况。以西区临近省道的中部测点为例,省道填筑产生的最终沉降量最大,为66cm左右,而西区堆载第一层和第二层后,沉降量有所减小,分别为65.6cm和62.8cm,说明西区堆载对省道的沉降变形存在抑制作用,但影响量很小,在3cm左右。随着东区堆载结束,西区附近省道的沉降变形并未显著变化,仍保持为62.8cm。同理,以东区临近省道的中部测点为例,省道填筑产生的最终沉降量最大,为66cm左右,西区堆载第一层和第二层后,沉降量仍保持不变,说明西区堆载对东区临近省道不存在显著影响,而随着东区堆载第一层和第二层后,该测点沉降分别为65.6cm、62.8cm,和西区中心测点的大小基本类似。



(a) 省道填筑后



(b) 西区堆载第一层后

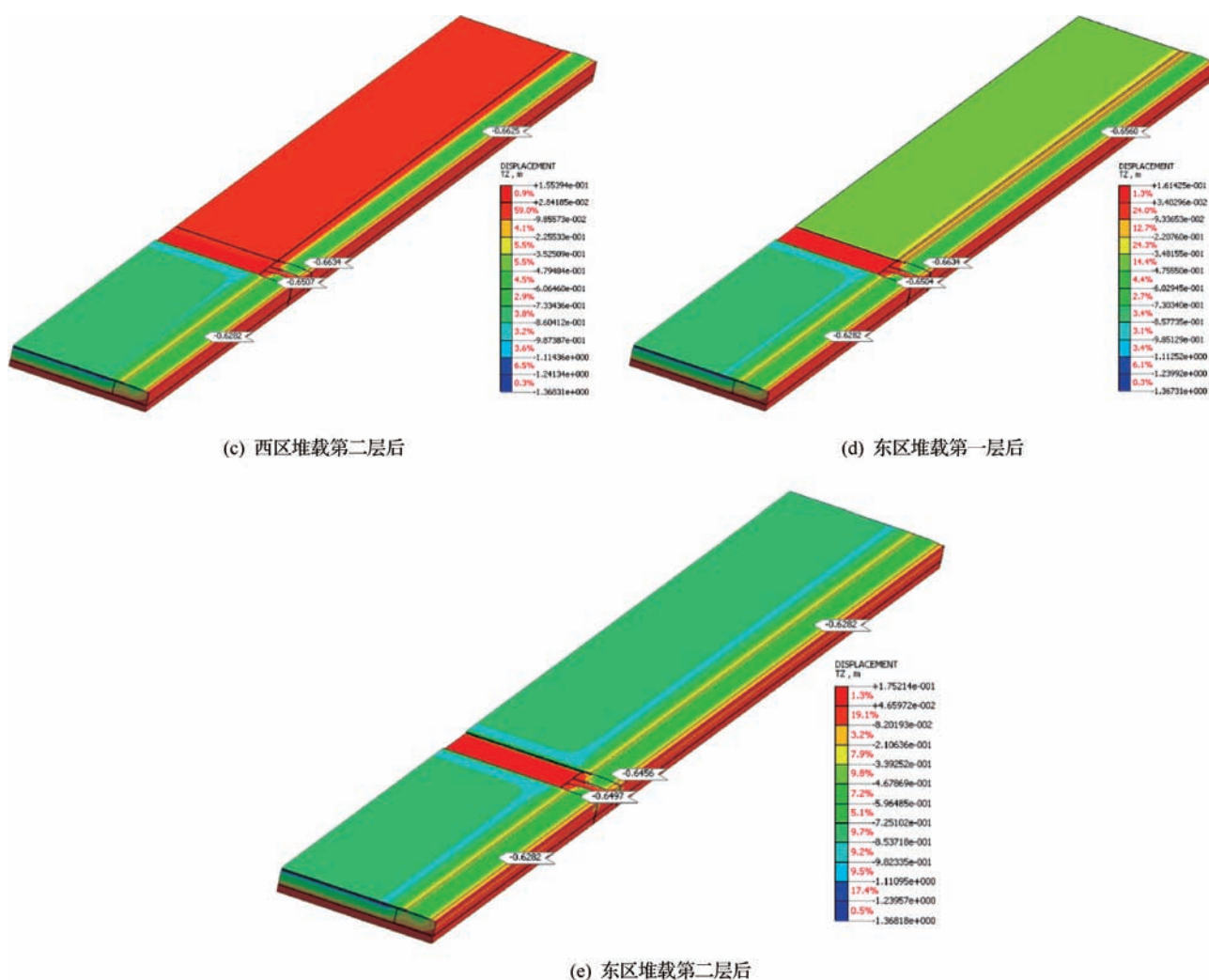


图4 典型施工步时省道的沉降变形分布云图

综上,西、东区堆载会对省道引起向上的竖向变形,大小在3cm左右,而省道填筑引起的地基最终沉降值为66cm左右,远远大于前者。可认为围垦区堆载对省道的沉降变形影响很小,省道目前的变形量主要来源于其自身填筑后引起的地基固结变形。

### 3.1.2 横路向和顺路向水平变形规律

图5为典型施工步时省道顺路向的变形分布。以西区临近省道的中部测点为例,省道填筑引起的横路向水平位移为-4.2cm,西区堆载第一层和第二层后,水平位移分别为-2.15cm、3.20cm,根据差值计算,堆载引起的水平变形量为7.3cm。以东区临近省道的中部测点为例,省道填筑引起的横路向水平位移为-0.005cm,西区堆载对其影响很小,而东区堆载第一

层和第二层后,其水平位移分别为-1.29cm、6.32cm,根据差值计算,堆载引起的水平变形量为6.4cm。此外,从省道顺路向水平变形分布云图可知,堆载对省道的顺路向水平变形不大,可以忽略不计。

### 3.1.3 省道不同桩号沉降变形

上述研究发现,西区、东区的沉降规律基本一致,省道主要受临近围垦区堆载作用的影响。图6给出了西区典型横断面沉降变形分布规律,发现堆载对沉降变形影响较小。为便于观察,给出省道不同桩号的沉降变形规律,见图7。图中差值为堆载引起的变形量,不论是靠海侧、中心线还是靠陆侧监测点,堆载引起的变形量均小于4cm,与省道填筑引起的沉降变形量相比,堆载引起的变形量很小。

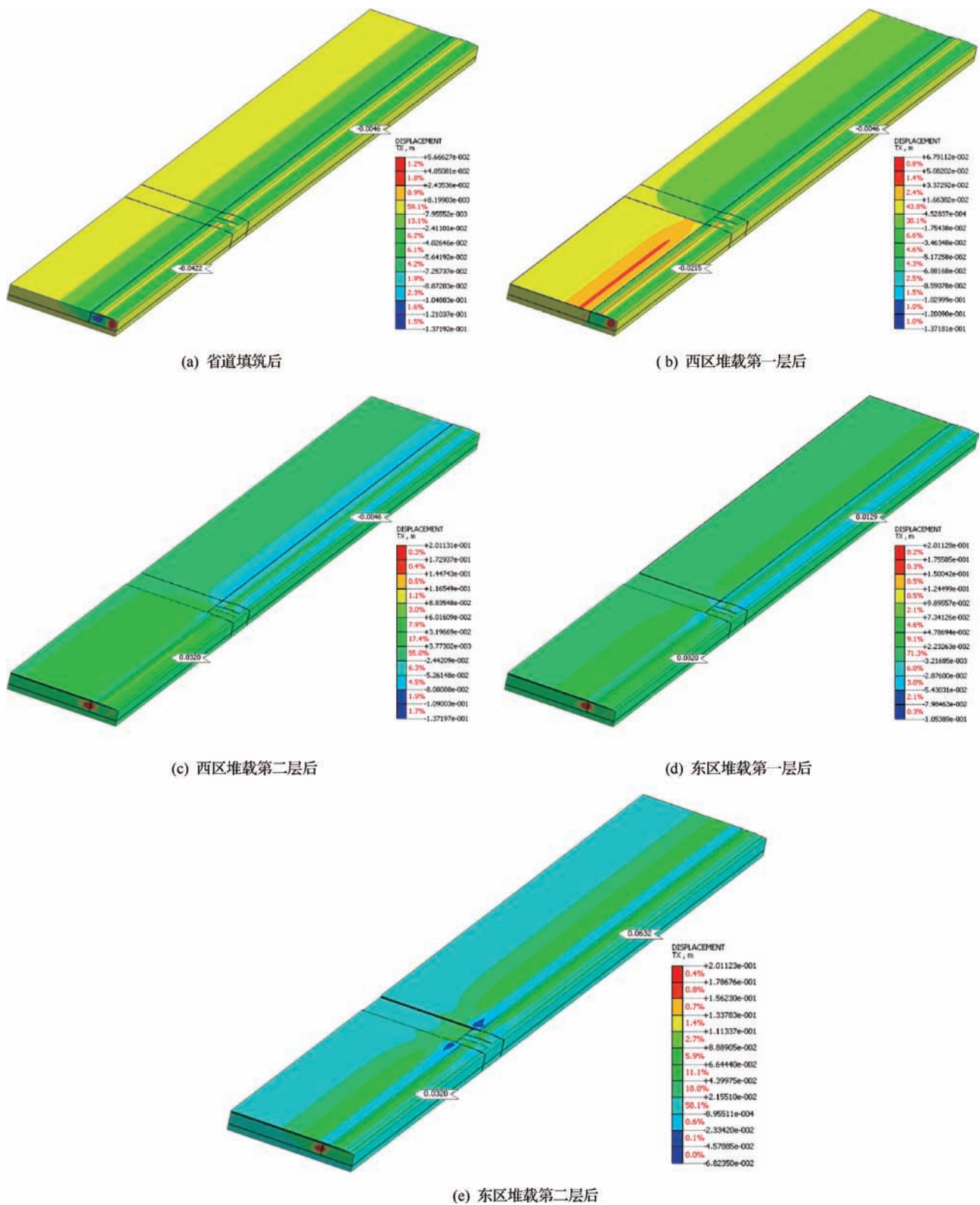


图5 典型施工步时省道横路向的变形分布云图



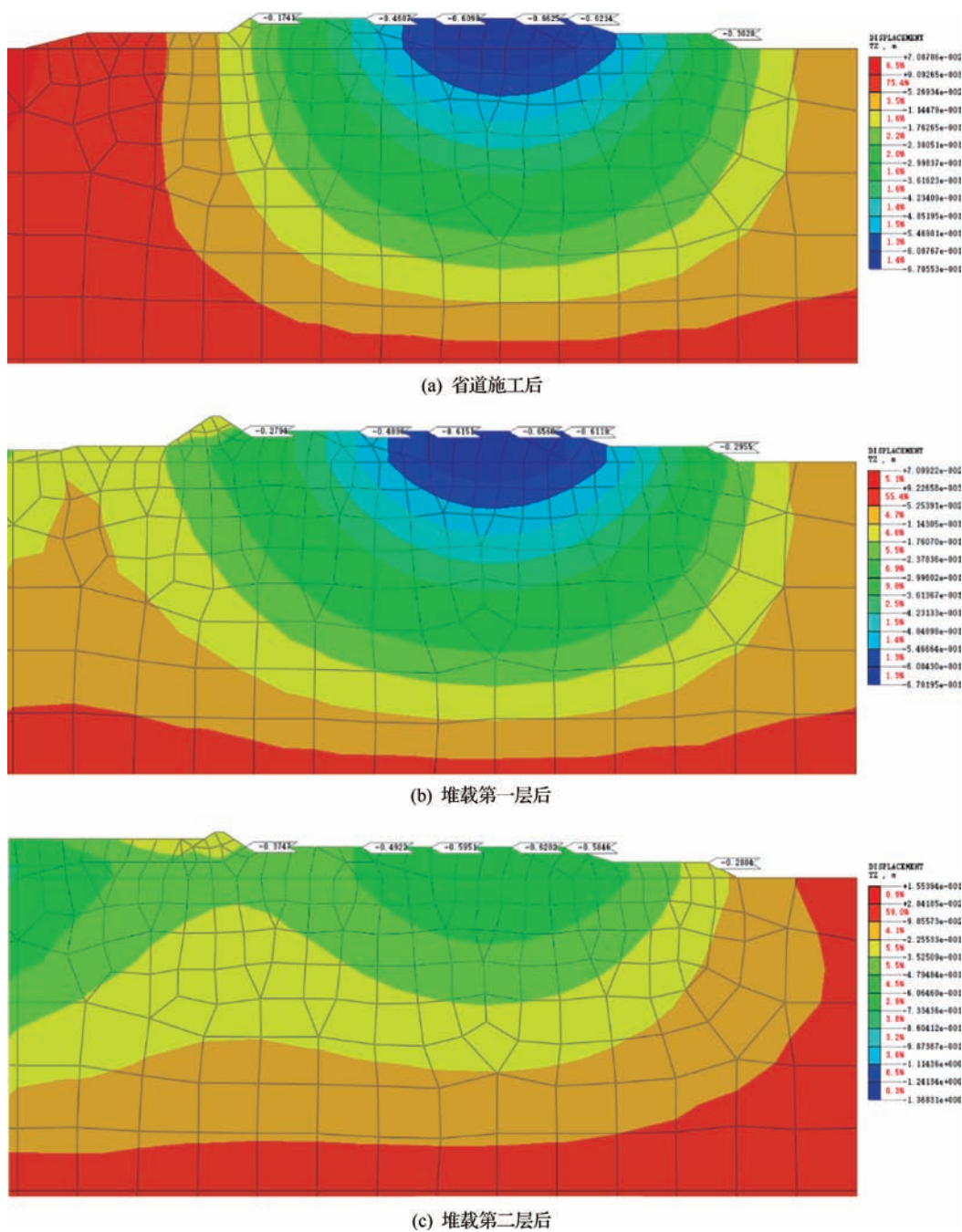


图6 典型横断面沉降变形云图

### 3.1.4 省道最终变形分析

表2给出了省道施工、围垦区堆载后以及围垦区堆载单独引起的变形结果。对于横路向变形,道路两侧变形差值为1.6cm;对于顺路向变形,道路两侧变形差值为0.3cm。综上说明,堆载对道路的变形影响很小,并不存在显著的挤压作用。对于竖向变形,靠海侧主要为沉降变形,靠陆侧主要为隆起变形,但道路两侧

变形差值为7.3cm。由于省道路基平均横坡坡度2%(向路面横断面右侧倾斜),道路宽度24.5m,该倾斜程度可忽略不计,不会影响行车安全和排水。对于整体沉降变形而言,堆载对省道的整体沉降变形有一定抑制作用,但影响量远不如省道引起的地基沉降量。综上,围垦区堆载对省道变形影响较小。

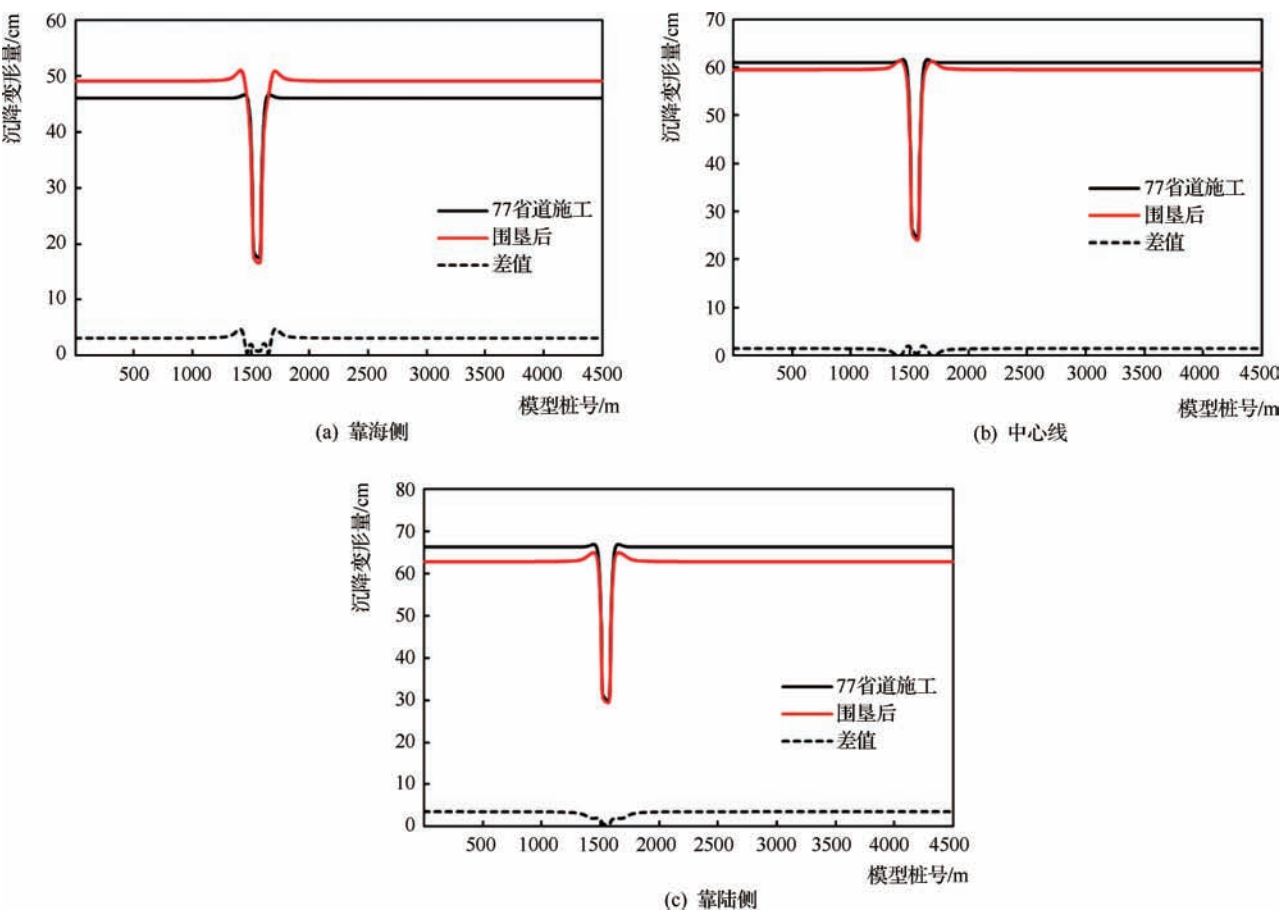


图7 不同桩号沉降变形量

表2 不同载荷作用下省道的变形量

位 置	省道施工后最终变形量/cm			堆载后最终变形量/cm			围垦区堆载引起的变形量/cm		
	横路向	顺路向	沉降	横路向	顺路向	沉降	横路向	顺路向	沉降
靠海侧	0.5	0.4	46	6.3	2.2	49.8	5.8	1.8	3.8
中心线	-1.2	0.6	61	5.8	2.3	59.5	7	1.7	-1.5
靠陆侧	-4.2	0.7	66.3	3.2	2.2	62.8	7.4	1.5	-3.5

3.2 围垦区堆载对水闸大桥桩基的影响

3.2.1 桥台变形分析

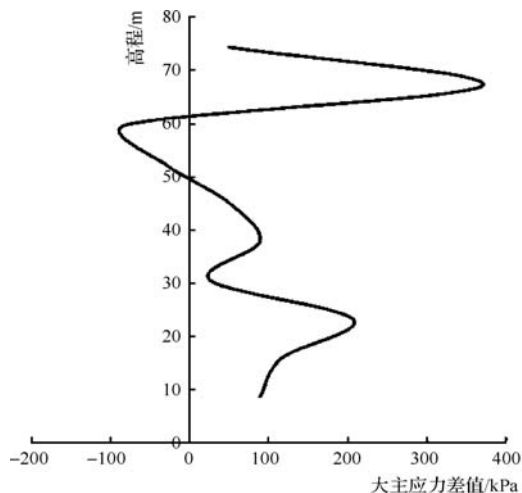
围垦区堆载对水闸大桥桩基的影响主要体现于X和Z向的变形,根据提取的各桩变形量,获得了左、右

桥台变形量以及桥台的差值变形量。对于桥梁而言,主要关注桥台变位情况,从表3可知,在堆载作用下,左右桥台水平变形为0.16cm,竖向变形为0.017cm,说明左右桥台不存在较大变位趋势。对于桩基沉降变形,

表3 桥台变形量 单位:cm

项 目	省道施工	堆载	堆载引起 水平变形	省道施工	堆载	堆载引起 竖向变形
	水平变形	水平变形		竖向变形	竖向变形	
左桥台	-2.527	0.804	3.331	-3.701	-3.660	0.041
右桥台	-2.561	0.604	3.164	-3.822	-3.798	0.024
左右桥台差值	-0.0337	-0.2001	-0.1664	-0.1214	-0.1387	-0.0173

根据《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)与《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTD D63—2007)规定:对于静定结构的桥梁基础,墩台均匀沉降量允许值为40mm,桥梁纵向相邻墩台均匀沉降量之差允许值为20mm。因此,该大桥桩基的变形满足要求。



### 3.2.2 桩基应力分析

堆载引起的桩身应力如图8所示。从中可知,围垦区堆载对应力的改变量较小,最大拉应力约为0.4MPa,最大压应力约为0.3MPa,对桥梁桩基影响较小。

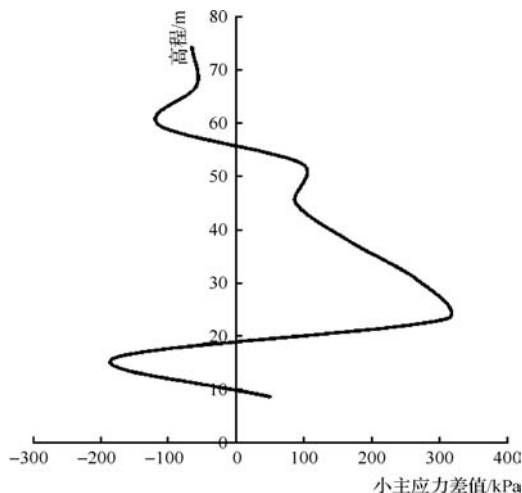


图8 典型桩基主应力与高程的变化曲线(拉正压负)

## 4 结 论

本文基于MIDAS/GTS NX软件分析了吹填围垦堆载对临近省道及水闸大桥桩基变形的影响,获得了不同区域、不同堆载高度条件下省道地基的沉降变形量,阐明了围垦区堆载对省道地基和大桥桩基沉降变形的贡献程度。主要结论如下:

a. 围垦区堆载引起的省道最大横路向变形为7.4cm,最大顺路向变形为1.8cm。对横路向变形和顺路向变形而言,道路两侧变形差值分别为1.6cm和0.3cm,表明堆载对道路水平挤压影响较小。

b. 围垦区堆载引起的省道最大竖向变形为3.8cm,靠海侧主要为沉降变形,靠陆侧主要为隆起变形,道路两侧变形差值为7.3cm。对于整体沉降变形而言,堆载对省道的整体沉降变形具有一定的抑制作用,但影响量远不如省道本身引起的沉降变形量。

c. 围垦区堆载引起的桥梁桩基最大拉应力和最大压应力均小于0.4MPa,左、右桥台的变形差异小于1cm,表明堆载对桥梁桩基的影响较小。

d. 堆载对省道的变形影响整体上较小,目前省道变形主要为其自身施工和交通载荷等引起的地基变

形;堆载对桥梁变形、应力影响较小,不会影响桥梁的正常运行。◆

### 参考文献

- [1] 武启诚,康建华,程传国,等. 东南沿海地区软土路基处理方法浅析[J]. 岩土工程界,2007(2):45-48.
- [2] 彭湘林. 真空联合堆载预压法处理软基的影响深度与沉降预测[D]. 长春:吉林大学,2012.
- [3] 甘甜. 港区吹填软土地基特性与工作区影响深度研究[D]. 武汉:华中科技大学,2014.
- [4] 谢龙,周昌臣,曹高俊. 瓯飞一期围垦工程软弱地基闸底板脱空监测技术[J]. 水利建设与管理,2020,40(12):38-42.
- [5] 谢龙. 瓯飞一期围垦工程典型龙口合龙施工工艺及质量控制[J]. 水利建设与管理,2018,38(1):58-62.
- [6] 邓会元. 滨海吹填围垦区堆载作用下桩基承载特性研究[D]. 南京:东南大学,2021.
- [7] 杨洋,刘辉,李玉桥. 库水位和地下水位作用下岩溶地区水库防渗复合土工膜的应力变形分析[J]. 人民珠江,2021,42(8):62-68.
- [8] 户朝旺,何国柱,远艳鑫. 水泥土搅拌桩复合地基在东厓水闸软基设计中的应用[J]. 人民珠江,2019,40(7):73-78.
- [9] 徐良勇. 基坑降水引起地基沉降计算方法研究[J]. 东北水利水电,2021(9):3-6.
- [10] 梅涛涛,王新,何丽平. 吹填造陆工程砂土地基沉降计算[J]. 水运工程,2018(12):198-201.





# 淤泥质黏土夹层对渗流坝体稳定性 安全评价分析

陈超 王霄 齐春舫

(淮安市水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 淮安 223005)

**【摘要】** 本文以淮安黄河故道沿线堤防坝体为研究对象,探讨淤泥质黏土夹层对渗流坝体稳定性的影响规律,研究基于非匀质体电场分布规律和渗流作用下淤泥质夹层对土石坝稳定性的影响。研究发现,当渗流网不经过坝体中的淤泥质夹层时,土石坝整体稳定;当渗流网的边缘经过坝体淤泥质黏土夹层,但渗流压力较小时,易在淤泥质黏土夹层形成弱渗流通道,土石坝仍可保持稳定;当土体渗流压力较大时,淤泥质黏土夹层所形成的渗流通道使土石坝无法保持稳定。

**【关键词】** 淤泥质黏土夹层; 电法; 渗流; 坝体稳定性

中图分类号: TV223.6

文献标志码: B

文章编号: 2097-0528(2022)11-046-04

## Safety evaluation of the stability of seepage dam with silty clay partings

CHEN Chao, WANG Xiao, QI Chunfang

(Huai'an Water Conservancy Survey and Design Institute Co., Ltd., Huai'an 223005, China)

**Abstract:** In this paper, taking the dike along the former Yellow River in Huai'an, the influence law of silty clay partings on the stability of seepage dam is discussed and the influence of silty partings on the stability of earth-rock dam is studied based on the distribution law of non-homogeneous electric field and seepage action. It is found that the whole dam is stable when the seepage network does not pass through the silty clay partings of the dam body. When the edge of the seepage network passes through the silty clay partings of the dam body with low seepage pressure, the soft seepage channel is easy to form in the silty clay partings, and the earth-rock dam can still maintain stable. When the seepage pressure of soil is high, the seepage channel formed by silty clay partings cannot keep the earth-rock dam stable.

**Keywords:** silty clay partings; electrical method; seepage; stability of dam body

### 1 概述

由于黄河流域特殊的水文地质条件,黄河中下游地区形成了复杂的故道河流体系,称为黄河故道体系。黄河故道水系因黄河水体中泥沙含量较高的特点,其河床整体较高,水系较为独立。现有的黄河故道体系

中的黄河故道堤坝,大部分是基于黄河夺道后河床逐渐淤积抬高的基础上修建而成的,且由于修筑朝代更迭,土石堤坝本体土层较为复杂,难以进行全面详细的归类。

新中国成立以来,国家投入了极大的成本对黄河及

收稿日期: 2021-11-10

作者简介: 陈超(1985—),男,工程师,主要从事水利规划设计工作。

黄河故道进行了整治,但由于黄河下游自五帝时期河道便开始游荡,故道体系繁杂,且除夺淮夺济外,中小流域夺道情况不胜枚举。在长期历史进程中,黄河故道堤坝均会利用黄河水体附近的淤泥质软土拌和黏土进行修筑。本文通过分析黄河夺淮形成故道所形成的土石坝,分析淤泥质黏土夹层对渗流坝体稳定性的影响。

高密度电法是一种利用不同物体电阻率差异进行电阻率数据采集的方法。通过对特定时间段的电阻率数据进行组合,形成检测物体内部组成的云图,研究人员通过辨别电阻率差值判断物体内部构造。由于该方法对检测物体基本无任何损伤,常被用于地质勘探。土石坝体积较为巨大,但检测面较为规则,本文基于非匀质体电场分布规律,对土石坝内部淤泥质黏土夹层进行研究,得出淤泥质黏土夹层对渗流坝体稳定性的安全评价。

## 2 试验原理

由于黄河故道堤坝的复杂性,为开展土石坝内部淤泥质黏土夹层研究,试验依据《水利水电工程地质勘察规范》(GB 50487—2008)对淮安黄河故道堤坝进行探方巡查,基于探方结果选定淮安咸岔河某处废弃堤坝进行试验。

试验所采用的高密度电阻率法是电阻率成像技术中较为应用成熟的一种方法。该法综合了剖面法与测深法两种检测方法,在野外进行测量时,采用阵列电极对所研究的剖面进行断面宽度与特定深度测量,将所检测的电信号进行反演层析成像,将断面信息形成可视化云图,探测该断面土层概况。

本文通过地勘选定含淤泥质黏土夹层试验剖面,通过对试验剖面不同工况下的高密度电法仪形成的图像进行对比分析,得出淤泥质黏土夹层对坝体渗流影响规律,利用该规律进行淤泥质黏土夹层对坝体稳定性安全影响评价分析。

## 3 试验方案

### 3.1 场地概况

咸岔河河道全长 13.83km,其整体为茭陵一站引河支流,全年断面水位可以由胡庄闸与茭陵一站抽引

控制。咸岔河流域沿线以黏土为主,上部为淤泥及淤泥质黏土,见表 1。

表 1 咸岔河流域土体基本特性

编号	土层描述	比重	含水率/%	塑性指数	液性指数
1	素填土	—	26.1	5.7	1.04
2	重粉质砂土	2.71	29.7	8.3	—
3	淤泥质黏土	2.74	41.3	16.6	1.26
4	粉质黏土	2.74	35.0	17.0	0.84
5	淤泥质黏土	2.74	48.9	18.6	1.41
6	粉质黏土	2.73	35.4	17.1	0.83
7	粉质黏土	2.74	27.9	18.2	0.36
8	重~轻砂土	2.68	22.5	—	—
9	粉质黏土	2.73	27.6	17.0	0.49

由于咸岔河河道全年断面水位可以抽引控制,流域整体水文特征见表 2。

表 2 咸岔河流域水文特征

河流段落	长度/ m	10 年一遇 排涝流量/ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	10 年一遇 抽排模数/ [ $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ ]	排涝面积/ $\text{km}^2$
李码分干渠	4000	—	—	—
抗日沟	845	18.12	0.76	14.38
青莲大沟	3827	26.37	0.76	20.93
沿六河	358	70.87	0.76	57.3
章桥庄东排沟	4800	74.51	0.76	63.73
茭陵一站	—	74.97	0.76	68

### 3.2 试验方法

试验在淮安咸岔河某处废弃堤坝(见图 1)的试验场地依据《水利水电工程地质勘察规范》(GB 50487—2008)进行。



图 1 检测剖面全貌

高密度电阻率法采用岩联技术 YL-EDT 高密度电阻率法测量中使用的  $3\text{m} \times 2\text{m}$  均匀电极网格,供电和测量电极布设在大坝两侧坡面及其延伸方向  $32\text{m}$  的区域(见图2)。试验通过调控坡面水位进行不同工况下的高密度电法检测,在堤坝整体渗流网稳定后进行检测图像与数据的存样采集,断面渗流图像具有鲜明的代表性。

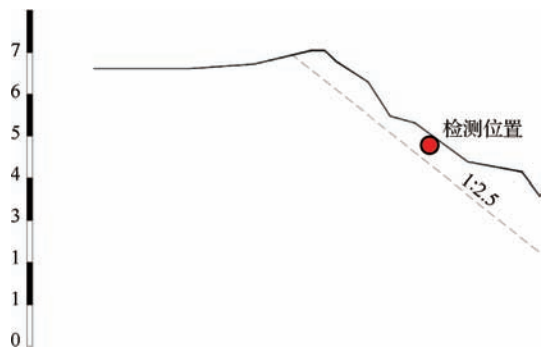


图2 检测坡面形态

## 4 结果分析

### 4.1 枯水位下渗流分析

堤坝枯水位下堤坝电阻率见图3。整体看来电阻率分配较为均匀,电阻率与探方所得边界值较为接近。

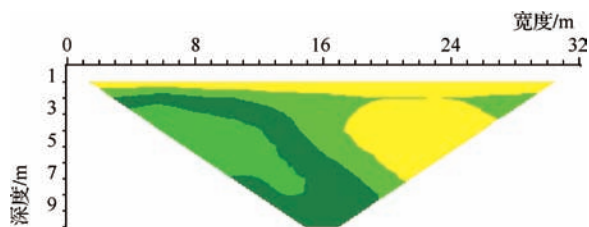


图3 枯水位下坝体电阻率图像

在枯水位下,水位线位于圪工河槽内,土石坝渗流网受周围土体渗流影响较大,通过分析枯水位下坝体电阻率图像可以发现坝体内侧  $16.0 \sim 25.0\text{m}$  范围内出现电阻率异常,与检测前端渐进性变化有较大差异,且其电阻率与堤坝表面较为接近,而堤坝表面薄层为河道历年清淤所残留的淤泥质黏土,通过探方验证了坝体内侧  $16.0 \sim 25.0\text{m}$  的确存在淤泥质黏土夹层,呈现透镜体状态。图中电阻值分布较为舒缓,规律性较强,这说明,当河道水位所形成的渗流网不经过坝体中的淤泥质夹层时,土石坝整体稳定,渗流网平顺。

### 4.2 常水位下渗流分析

堤坝在常水位下的堤坝电阻率见图4。整体看电阻率分配出现较多异常基团,异常基团出现的位置集中在堤坝表面与淤泥质夹层。

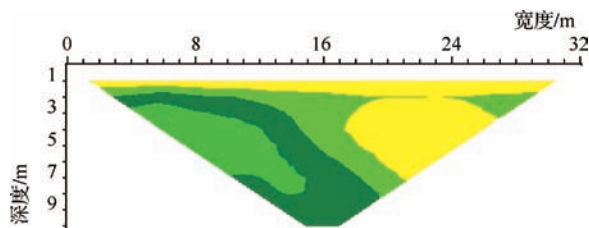


图4 常水位下坝体电阻率图像

在常水位下,水位线位于圪工河槽边缘,土石坝渗流网主要受原周围土体渗流网与坡面-圪工河槽河水渗流压的影响,坝体表层与坝体内部  $3.0 \sim 7.0\text{m}$  范围内出现电阻率异常基团,与枯水位检测有较大差异,可认为当渗流网的边缘经过坝体淤泥质黏土夹层,但在渗流压力较小时,易在淤泥质黏土夹层形成强渗流网,且由于淤泥质土体本身渗透性较差,在不均匀的渗透压作用下,其透镜表面电阻率值与坝体表面电阻率十分接近,容易在其周围形成渗流压力异常通道。

### 4.3 汛期常态水位下渗流分析

汛期常态水位是指流域进入汛期后,为保证黄河故道干流安全对全流域进行水位调控时的水位均值。由于汛期常水位变化较为频繁,汛期常态水位下堤坝电阻率见图5。整体看来电阻率分配出现的异常基团范围较常水位异常电阻率基团更大,渗流通道出现的位置集中在淤泥质夹层表层。

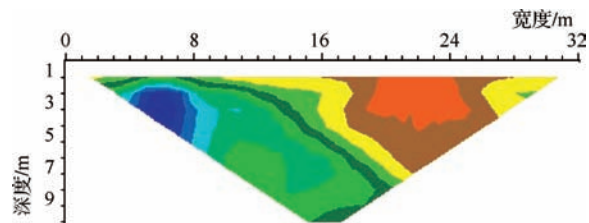


图5 汛期常态水位下坝体电阻率图像

在汛期常态水位下,水位线超过圪工河槽较多,土石坝渗流网主要受坡面-圪工河槽河水渗流压的影响,坝体在  $16.0\text{m}$  处形成较为曲折渗流通道。汛期常态水位下,渗流压力较小易在淤泥质黏土夹层形成弱渗流通道,土石坝仍可保持稳定。



#### 4.4 汛期最高洪水位下渗流分析

流域进入汛期后,由于全流域均处于最高洪水位,水位无法进行主动调控。汛期最高洪水位下堤坝电阻率见图6。

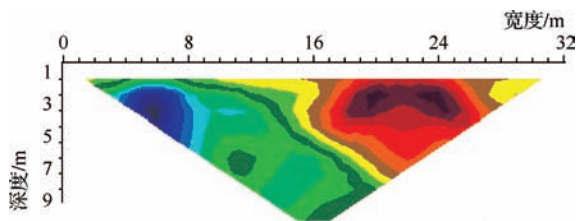


图6 汛期最高洪水位下坝体电阻率图像

从图中可以清晰看出,汛期最高洪水位下其异常集团数量更多,淤泥质黏土夹层整体异常呈现圈层分布,且几乎所有的异常集团均成层形成独立的电阻率层。比较图5与图6,其电阻率圈层性扩展具有极强的关联性,由此可以判断,经过压力较小渗流的长期浸泡,在淤泥质黏土夹层形成了软弱渗流通道,当土体渗流压力未到达极限值时,土石坝仍可保持稳定;当堤坝所处河道长期处于汛期最高洪水位的极限状态时,在淤泥质黏土夹层所形成的渗流通道不断形成稳定通道,堤坝出现明显渗漏,使土石坝无法保持稳定。

#### 5 结论

以淮安黄河故道沿线堤防坝体为研究对象,基于试验段不同工况下的电阻率图像得出以下结论:

a. 当渗流网不经过坝体中的淤泥质夹层时,土石坝整体稳定,土石坝渗流网受周围土体渗流影响较大。

b. 当渗流网的边缘经过坝体淤泥质黏土夹层,且渗流压力较小时,受土体渗流网与坡面-圪工河槽河水渗流压的共同影响,容易在其周围形成渗流压力异常通道,但土石坝仍可保持稳定。

c. 当堤坝所处河道长期处于汛期最高洪水位土体渗流压力较大时,在极限状态下淤泥质黏土夹层所形成的渗流通道不断形成稳定通道,使土石坝无法保持稳定。◆

#### 参考文献

[1] 李宏伟. 基于 COMSOL Multiphysics 的某水库均质坝渗流与稳定性模拟分析研究[J]. 水利科技与经济, 2020, 26(10): 32-36.

[2] 苏正洋, 张志韬, 李汉章. 渗流应力耦合及库水位变动下中小型均质土石坝坝坡稳定分析[J]. 人民珠江, 2020, 41(4): 92-98.

[3] 娄诗建, 贺宏涛. 石坝河水库下游边坡抗滑桩支护加固方案研究[J]. 水利建设与管理, 2020, 40(3): 29-33, 74.

[4] 简鸿福, 罗志雄, 冷美玲. 基于监测资料反演土坝渗流安全分析[J]. 水利建设与管理, 2020, 40(2): 27-31, 22.

[5] 马波, 王文松, 杨永浩, 等. 大沙河尾矿库扩容工程坝体加固设计与稳定性分析[J]. 有色金属工程, 2018, 8(5): 84-88, 97.

[6] 王开拓, 谢利云, 刘辉. 库水位降落作用下均质土石坝渗流场及坝坡稳定性分析[J]. 水电能源科学, 2018, 36(8): 81-84, 51.

[7] 年廷凯, 吴昊, 陈光齐, 等. 堰塞坝稳定性评价方法及灾害链效应研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(8): 1796-1812.

[8] 卢书慧, 张旭东, 张治昊. 黄河泥沙基本特性分析及治理措施建议[J]. 水利建设与管理, 2018, 38(3): 29-32.

[9] 石振明, 张公鼎, 彭铭, 等. 堰塞坝体材料渗透特性及其稳定性研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(5): 1182-1189.

[10] 曹进海, 胡军. 基于渗流与应力耦合的尾矿坝稳定性分析[J]. 矿业研究与开发, 2017, 37(7): 65-72.

[11] 马坤, 倪志刚, 徐利. 帷幕灌浆施工技术在 reservoir 大坝基础防渗加固处理中的应用[J]. 水利建设与管理, 2017, 37(2): 22-25.

[12] 王文松, 尹光志, 魏作安, 等. 高烈度地震区细粒尾矿上游法筑坝动力反应与稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(5): 1201-1214.

[13] 王志强, 朱云江, 刘君建, 等. 碾压式均质土坝坝体渗流分析及稳定性评价[J]. 人民珠江, 2016, 37(10): 55-61.

[14] 石振明, 熊曦, 彭铭, 等. 存在高渗透区域的堰塞坝渗流稳定性分析: 以红石河堰塞坝为例[J]. 水利学报, 2015, 46(10): 1162-1171.

[15] 陈曦, 张训维, 陈佳林, 等. 水位波动下非饱和心墙土坝体的渗流和稳定性[J]. 岩土力学, 2015, 36(S1): 609-613.

[16] 刘娟奇, 王志强, 梁收运. 库水位下降对新集水库均质土坝渗流及稳定性影响分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12(6): 38-43.

[17] 马池香, 秦华礼. 基于渗透稳定性分析的尾矿库坝体稳定性研究[J]. 工业安全与环保, 2008(9): 32-34.

[18] 孙昭华. 水沙变异条件下河流系统调整机理及其功能维持初步研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004.



# 深层透水地基上水闸渗流安全分析与评价

罗居刚

(安徽省(水利部淮河水利委员会)水利科学研究院,安徽 合肥 230088)

**【摘要】** 水闸渗流安全评价是水闸安全鉴定工作中的一项重要内容。本文结合实际水闸工程,针对其地基土体性质和水力条件,分别采用渗径系数法、改进阻力系数法和有限元方法,对该工程在防渗最不利的设计挡水工况下的闸基渗流和闸下深层地基渗流进行了计算分析和安全评价。结果表明:闸基防渗长度、闸基水平段和出口段的水力坡降以及闸下深层地基各点土体的水力坡降值均满足规范要求,综合评定该水闸渗流安全等级为A级。该研究成果对同类工程的安全评价工作具有一定的借鉴意义。

**【关键词】** 水闸;深层透水地基;闸基渗流;安全评价

中图分类号:TV36

文献标志码:A

文章编号:2097-0528(2022)11-050-06

## Seepage safety analysis and evaluation of sluice on deep permeable foundation

LUO Jugang

(Water Resources Research Institute of Anhui Province and Huaihe River Commission, Ministry of Water Resources, Hefei 230088, China)

**Abstract:** The seepage safety evaluation of sluice is an important part of the sluice safety appraisal. Based on the actual sluice project, the seepage of sluice foundation and the seepage of deep foundation under sluice are calculated, analyzed and evaluated through the permeability coefficient method, improved resistance coefficient method and finite element method respectively according to the soil properties and hydraulic conditions of the foundation. The results show that the anti-seepage length of the sluice foundation, the hydraulic slope of the horizontal section and outlet section of the sluice foundation, and the hydraulic slope value of the soil at each point of the deep foundation under the sluice meet the specification requirements, and the seepage safety grade of the sluice is A after comprehensive evaluation. The research results have certain reference significance for the safety evaluation of similar projects.

**Keywords:** sluice; deep permeable foundation; seepage of sluice foundation; safety evaluation

水闸安全的影响因素主要有闸室稳定性、结构强度、渗流安全等。渗流安全问题在很大程度上影响着

水闸的安全指标。闸基土体在渗流作用下会引发流土、管涌、接触冲刷等渗透变形。渗透变形对水闸工程

收稿日期:2022-04-20

作者简介:罗居刚(1976—),男,高级工程师,主要从事水利工程检测及安全评价工作。

安全的影响较大,严重时会引起水闸失稳,特别是建在含有承压水的粉砂层地基上的水闸<sup>[1]</sup>。渗透变形产生的因素主要是土体性质和水力条件。水闸渗流安全评价主要是应用渗流理论并根据闸基地质情况及上下游水位条件等参数进行渗流计算分析,得出闸基地下轮廓线各点土体的渗流压力、水力坡降等,同时结合现行规范,对水闸渗流状况进行综合评价<sup>[2-4]</sup>。对水闸渗流进行科学准确的分析,可为合理选择渗流控制措施、评价水闸的安全性提供可靠依据。在水闸渗流计算分析中,由于渗流场会呈现不同程度的非均质及各向异性,边界条件也较为复杂,因此采用解析求解的方法较为困难,常用的近似解法往往难以得到令人满意的结果,而采用模型实验的方法,在实际操作中又会受到一些条件的限制,因此研究应用先进高效的渗流计算分析方法具有十分重要的现实意义<sup>[5-6]</sup>。近年来,随着有限元法在渗流领域的成功应用,渗流数学模型得到了较大发展,为渗流计算分析提供了有力支撑<sup>[7-8]</sup>。本文以南润段进(退)洪闸工程为水闸渗流分析模型,利用有限元渗流计算软件 AutoBANK,针对其地基土体性质和水力条件,分别采用渗径系数法、改进阻力系数法和有限元方法,对该工程在防渗最不利工况下的闸基渗流和闸下深层地基渗流进行了计算分析和安全评价。

## 1 工程概况

南润段进(退)洪闸工程位于颍上县南润段行洪区原下口门附近,是2007年淮河大水后根据淮河干流蓄滞洪区调整规划实施的淮河流域灾后重建重点建设项目之一。工程为Ⅲ等中型,主要建筑物为3级,设计过闸流量为 $600\text{m}^3/\text{s}$ 。闸室采用钢筋混凝土开敞式结构,共5孔,每孔净宽 $8.00\text{m}$ ,总宽 $47.22\text{m}$ ,顺水流方向长 $15.50\text{m}$ 。闸墩分缝,分二孔一联及三孔一联,底板顶高程 $21.00\text{m}$ ,底板厚 $1.40\text{m}$ ;闸墩顶高程 $29.50\text{m}$ ,中墩厚 $1.20\text{m}$ ,缝墩及边墩厚均为 $0.90\text{m}$ ,岸墙采用钢筋混凝土空箱结构,闸下湖内侧右岸设桥头堡,闸室顶部布置公路桥和工作桥,工作桥上设启闭机房。上下游翼墙采用钢筋混凝土扶壁式及悬臂式结构。闸室上游侧(淮河侧)设 $20.0\text{m}$ 长钢筋混凝土挖深式消力池(兼

做铺盖),池深 $1.50\text{m}$ ,消力池后布置总长 $30.00\text{m}$ 混凝土海漫,后接长 $15.00\text{m}$ 防冲槽。工作闸门采用平面定轮钢闸门,尺寸为 $8.2\text{m} \times 7.5\text{m}$ (宽 $\times$ 高),配 $\text{QP-2} \times 250\text{kN}$ 固定卷扬式启闭机。

## 2 水文地质条件

根据地勘资料,在地面以下 $30\text{m}$ 勘探深度范围内,地下水类型为浅层松散类孔隙水,根据地层岩性和含水层特征可划分出3层含水层和2层隔水层,其中第1含水层为潜水,第2、第3含水层为承压水。各含水层中与工程较密切的为第1、第2含水层,第3含水层埋藏较深,对本工程基本不构成影响。在场区内,潜水主要接受河水及大气降水补给,通过地面蒸发和向淮河排泄,受季节或枯水期、丰水期的影响,与淮河水有密切的水力联系。由于第1、第2含水层之间无相对隔水层,故承压水和潜水在勘察区内相互影响较明显。在勘探深度内自上而下各土层物理力学参数建议值见表1。工程区地震动峰值加速度为 $0.05g$ ,相应地震基本烈度为Ⅵ度,闸址区场地土为中软场地土类型,场地类别为Ⅲ类<sup>[9-10]</sup>。闸基及翼墙基础持力层均位于第1层中粉质壤土层,其具有弱透水性,承载力特征值为 $100\text{kPa}$ 。第2层中、细砂层具有中等透水性,是闸基深层透水层。为提高地基的整体稳定性,闸室、翼墙地基采用水泥土搅拌桩进行处理。

表1 各土层物理力学参数建议值

层序	土层类别	土粒比重 $G$	孔隙比 $e$	渗透系数/ ( $\text{cm/s}$ )	透水性
(1)	中粉质壤土夹粉土	2.70	0.776	$7.0 \times 10^{-5}$	弱等透水
(2)	中、细砂	2.65	0.723	$5.0 \times 10^{-3}$	中等透水
(3)	中粉质壤土夹细砂	2.69	0.743	$8.0 \times 10^{-5}$	弱透水
(4)	中、细砂夹壤土	2.67	0.692	$8.0 \times 10^{-4}$	中等透水
(5)	粉质黏土、重粉质壤土	2.73	0.630	$2.0 \times 10^{-6}$	微透水

## 3 防渗排水体系

由于该进(退)洪闸工程反向挡水时水位差较小,故防渗排水设计采用单向布置形式。闸室前端设置深



11.00m 的垂直防渗墙,闸基防渗由淮河侧消力池、闸基防渗墙及闸底板三部分共同构成。闸基防渗布置轮廓线见图 1,防渗长度约 79m。淮河侧消力池(兼做铺盖)采用钢筋混凝土结构,厚度 0.70m,消力池纵向设缝,并在分缝处及其与闸底板、翼墙底板等接缝处设水平止水。在闸基水平防渗范围内,闸室、岸墙和翼墙等分缝处设垂直与水平止水,以防侧向绕渗。与上述防

渗布置相对应,在湖内侧消力池底板上布置排水孔,排水孔直径 100mm,呈梅花形布置,孔距 2.00m,排水孔下设砂石反滤料。此外,为确保汛期淮河高水位时在砂层承压水的顶托下闸基土层不致发生渗透破坏,在消力池底板下设置直径 200mm 不完全排水减压砂井,井口位于反滤层内,砂井底高程 12.00m,间排距 7m,共 2 排。

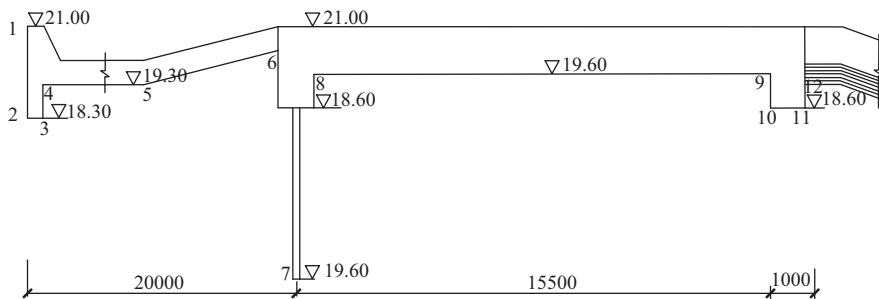


图 1 闸基防渗布置轮廓线(高程单位:m,尺寸单位:mm)

## 4 渗流安全复核计算

### 4.1 计算工况及参数

该工程上下游水头差最大的设计挡水工况,闸上淮河侧水位 27.92m,闸下湖内侧无水(地下水位 20.50m),最大水位差为 7.42m。在勘探期间内,测得闸基第二含水层承压水位为 20.50m,承压水头高度为 6.5~7.0m。因此,该工程防渗最不利工况为上下游水头差最大的设计挡水工况,最大水位差取 7.42m。渗流计算中,考虑防渗墙不透水,计算参数见表 1 和图 1,据此分别计算该工况下水闸的闸基渗流、深层地基渗流的安全性。

### 4.2 闸基渗流复核计算

#### 4.2.1 闸基防渗长度复核

根据《水闸设计规范》(SL 265—2016)<sup>[2]</sup>,土基上的闸基防渗长度计算可采用渗径系数法,防渗长度应满足下式:

$$L \geq C \Delta H \quad (1)$$

式中: $L$ 为闸基防渗长度,即闸基防渗轮廓线水平段和垂直段长度总和,m; $C$ 为允许渗径系数,闸基为中粉质壤土取 7; $\Delta H$ 为计算水头,m。

根据水闸运行条件,设计挡水工况最大水头差 7.42m,该工况对抗渗稳定最为不利,按式(1)计算所需防渗长度为 51.94m。水闸闸基实际防渗长度约为 69m,大于计算所需防渗长度,因此闸基防渗长度满足要求。

#### 4.2.2 闸基抗渗稳定验算

根据《水闸设计规范》(SL 265—2016)<sup>[2]</sup>,土基上的闸基抗渗稳定计算可采用改进阻力系数法,闸基地下轮廓线见图 1。根据该水闸地基土类别,水平段水力坡降允许值可取 0.15,出口段水力坡降允许值为 0.40~0.50。考虑到该工程出口设置反滤层,允许水力坡降值可加大 30%,调整后的水平段和出口段,水力坡降允许值分别为 0.19 和 0.52~0.65。

##### 4.2.2.1 地基有效深度 $T_e$ 计算

地下轮廓的水平投影长度  $L_0 = 35.5$ m,垂直投影长度  $S_0 = 12.5$ m,  $L_0/S_0 < 5$ ,地基为深层透水地基,经计算,地基有效深度  $T_e$  为 17.5m。

##### 4.2.2.2 分段阻力系数计算

###### a. 进、出口段

$$\xi_0 = 1.5 \left( \frac{S}{T} \right)^{\frac{3}{2}} + 0.441 \quad (2)$$

式中:  $\xi_0$  为进、出口段的阻力系数;  $S$  为板桩或者齿墙的入土深度;  $T$  为地基透水层深度。

b. 内部垂直段:

$$\xi_y = \frac{2}{\pi} \ln \cot \left[ \frac{\pi}{4} \left( 1 - \frac{S}{T} \right) \right] \quad (3)$$

式中:  $\xi_y$  为垂直段的阻力系数。

c. 水平段

$$\xi_x = \frac{L_x - 0.7(S_1 + S_2)}{T} \quad (4)$$

式中:  $\xi_x$  为水平段的阻力系数;  $L_x$  为水平段长度;  $S_1$ 、 $S_2$  分别为进、出口段板桩或者齿墙的入土深度。

#### 4.2.2.3 分段水头损失计算

各分段水头损失值按下式计算:

$$h_i = \xi_i \frac{\Delta H}{\sum_{i=1}^n \xi_i} \quad (5)$$

式中:  $\Delta H$  为上、下游水位差, m;  $h_i$  为各分段的水头损失值, m;  $\xi_i$  为各分段的阻力系数;  $n$  为总分段数。

#### 4.2.2.4 进、出口段修正

进、出口段修正后的水头损失值按下式计算:

$$h'_0 = \beta' h_0 \quad (6)$$

其中

$$\beta' = 1.21 - \frac{1}{\left[ 12 \left( \frac{T'}{T} \right)^2 + 2 \right] \left( \frac{S'}{T} + 0.059 \right)} \quad (7)$$

式中:  $h_0$  为进、出口段的水头损失值, m;  $h'_0$  为修正后的水头损失值, m;  $\beta'$  为阻力修正系数, 当计算的  $\beta' < 1.0$  时, 才进行修正;  $S'$  为底板埋深与板桩入土深度之和, m;  $T'$  为板桩另一侧地基透水层深度, m。

修正后水头损失的减少值  $\Delta h$  按下式计算:

$$\Delta h = (1 - \beta') h_0 \quad (8)$$

#### 4.2.2.5 抗渗稳定性复核结果

根据《水闸设计规范》(SL 265—2016) 表 6.0.4<sup>[2]</sup>, 水平段和出口段的水力坡降值须小于规定的允许水力坡降值, 底板水平段和出口段的水力坡降按下式计算:

$$J = \frac{h'_0}{s'} \quad (9)$$

式中:  $h'_0$ 、 $s'_0$  分别为水头损失值和底板水平段长度或出口段垂直长度, m。

按照上述公式进行计算, 闸基底板水平段和出口段水力坡降计算结果及相应允许水力坡降见表 2。经复核计算, 闸基水平段和出口段的水力坡降值均小于规范允许水力坡降值, 闸基抗渗稳定满足规范要求。

表 2 闸基底板水平段和出口段出逸坡降及相应允许水力坡降值

计算对象	水平坡降		出口坡降	
	计算值	允许值 $[J]$	计算值	允许值 $[J]$
计算结果	0.09	0.19	0.42	0.52 ~ 0.65

#### 4.3 深层地基渗流复核计算

闸底板底高程为 19.60m, 根据地质勘察报告, 闸底板下第 2 层中、细砂呈中等透水性, 渗透系数  $5.0 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ , 层底高程 9.30 ~ 10.80m, 为闸基深层透水层, 对闸基抗渗稳定不利。采用有限元法对水闸深层地基渗流稳定进行计算, 计算工况取水头差最大的设计挡水工况, 闸基各土层渗透系数见表 1。有限元建模及渗流计算结果见图 2 ~ 图 4。

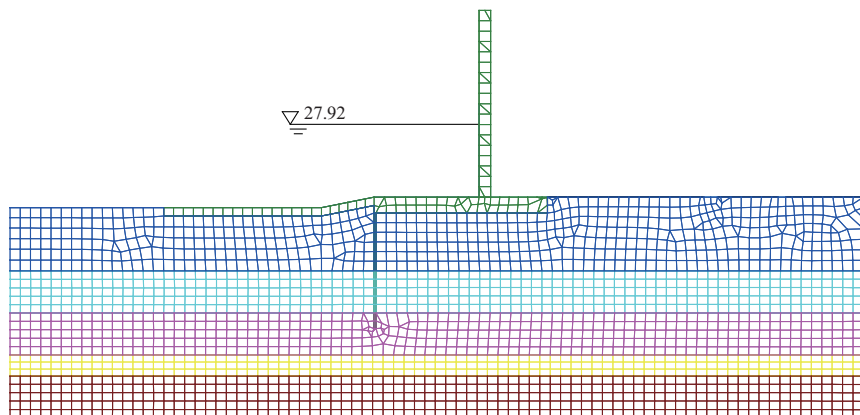


图 2 有限元网格

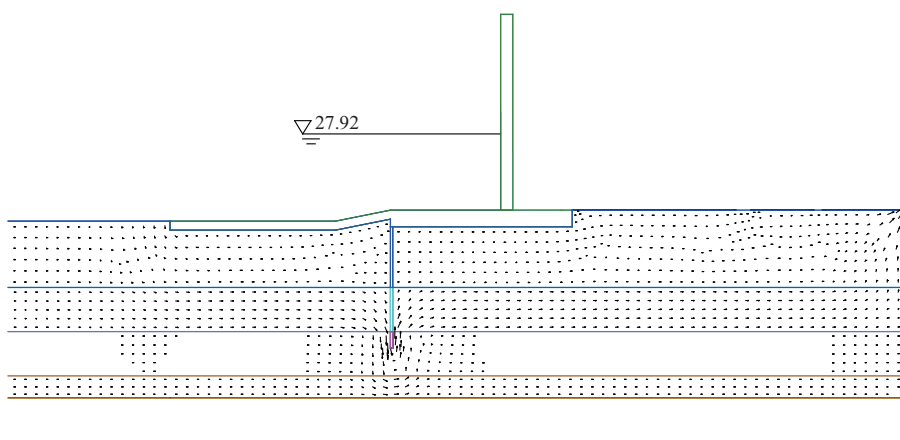


图 3 流速矢量图

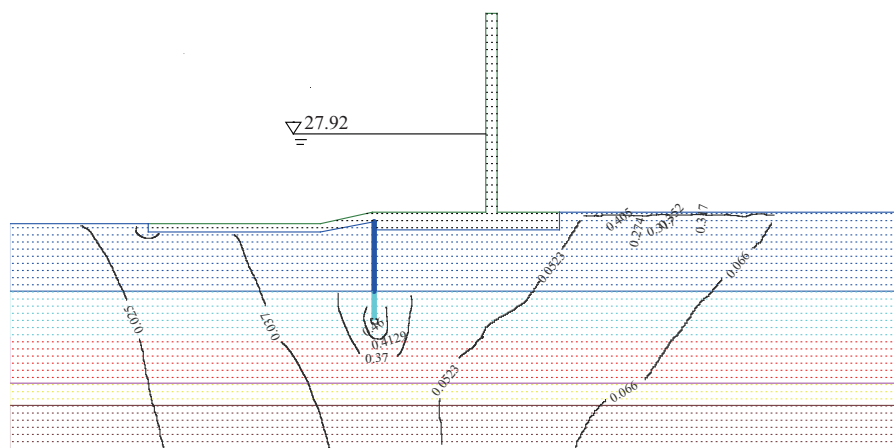


图4 水力坡降等值线图

根据《水力发电工程地质勘察规范》(GB 50287—2016)<sup>[10]</sup>,该闸基土体主要为壤土、粉质壤土和砂土,流土为主要的渗透破坏形式。流土允许水力坡降值为临界水力坡降与安全系数  $K$  的比值, $K$  取 1.5 ~ 2.0,临界水力坡降计算式为

$$J_{\text{cr}} = (G_s - 1) - (e + 1) \quad (10)$$

式中:  $J_{\text{cr}}$  为土的临界水力坡降;  $G_s$  为土粒密度与水密度之比;  $e$  为土的孔隙比。

根据表 1 中各土层参数值,临界水力坡降和允许水力坡降值计算结果见表 3。从图 4 可知,水闸深层地基各点水力坡降值为 0.02 ~ 0.46,均小于允许水力坡降值,因此,水闸深层地基渗流安全满足规范要求。

表3 各土层水力坡降计算

土 层 类 别	临界水力坡降 $J_{cr}$	允许水力坡降 $J_{cr}/(1.5 \sim 2.0)$
中粉质壤土夹粉土	0.96	0.48 ~ 0.64
中、细砂	0.96	0.48 ~ 0.64
中粉质壤土夹细砂	0.97	0.48 ~ 0.65
中、细砂夹壤土	0.99	0.49 ~ 0.66
粉质黏土、重粉质壤土	1.06	0.53 ~ 0.71

#### 4.4 渗流安全评价

根据以上复核计算结果,在工程防渗最不利的设计挡水工况下,水闸闸基实际防渗长度大于规范要求的防渗长度,闸基防渗长度满足要求;闸基水平段和出口段的水力坡降值均小于规范允许水力坡降值,闸基抗渗稳定满足规范要求;闸下地基各点水力坡降值均



小于规范允许水力坡降值,且闸基渗流场分布符合一般规律,水闸深层地基渗流安全满足规范要求。综上,根据《水闸安全评价导则》(SL 214—2015)<sup>[3]</sup>,综合评定该水闸渗流安全等级为A级。

## 5 结 语

a. 本文结合颍上县南润段进(退)洪闸工程,分别采用渗径系数法、改进阻力系数法和有限元方法,复核计算了该工程防渗最不利的设计挡水工况下水闸的闸基防渗长度、闸基水平段和出口段的水力坡降以及闸下深层地基各点土体的水力坡降值,计算结果均满足规范要求,闸基土体不易产生渗透破坏,综合评定该水闸渗流安全等级为A级。

b. 对于含砂性土透水层的水闸地基,通常需在闸室前端设置垂直防渗墙,这是深层透水地基防渗处理的一种有效措施。该类闸基土体渗流介质和边界条件较为复杂,利用渗流计算软件 AutoBANK,针对其地基土体性质和水力条件建立了有限元模型,进行渗流场有限元计算分析,计算结果较之通常的近似解法更精确、可靠。

c. 运用有限元方法可以通过有限单元的精细划分实现对渗流场的精确模拟分析,能计算出渗流场内任一点的渗压水头和渗透坡降值,相比改进阻力系数法只能计算出地下轮廓线上各角隅点上的相应值,有限元方法具有明显的优势,因此被越来越多地应用到

渗流计算领域。但目前开发应用的有限元渗流计算软件基于的都是达西定律理论框架,对于在非达西渗流场中的应用,尚需进一步研究。◆

## 参考文献

- [1] 陈宝华,张世儒. 水闸[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003.
- [2] 水闸设计规范:SL 265—2016[S]. 北京:中国水利水电出版社,2016.
- [3] 水闸安全评价导则:SL 214—2015[S]. 北京:中国水利水电出版社,2015.
- [4] 孙永波. 黄河张庄闸水力学复核分析[C]//中国水利学会. 中国水利学会2018学术年会会议论文集,第三分册. 北京:中国水利水电出版社,2018,216-222.
- [5] 陈辉,孙洁莹. 韩腰楼节制闸整体稳定及渗流稳定计算与分析[J]. 安徽水利水电职业技术学院学报,2020,20(2): 6-9.
- [6] 李海洋. 基于 AutoBANK 软件的闸基渗流分析[D]. 青岛:中国海洋大学,2015.
- [7] 黄向阳. 乌溪水库工程地下水渗流场数值模拟研究[J]. 水利建设与管理,2020,40(6):20-24.
- [8] 张庆,姜鹏. 有限元渗流分析法在顶管穿堤施工质量控制中的应用[J]. 水利建设与管理,2020,40(12):43-47.
- [9] 水工建筑物抗震设计标准:GB 51247—2018[S]. 北京:中国计划出版社,2018.
- [10] 水力发电工程地质勘察规范:GB 50287—2016[S]. 北京:中国计划出版社,2017.
- [10] 王海滨,吴庆霞,刘兆辉,等. 雷诺护垫与格宾石笼在河道整治工程中的应用[J]. 人民黄河,2021,43(S1):23-26.
- [11] 何先贵. 雷诺护垫的护坡优势和施工要点[J]. 珠江水运,2020(19):45-46.
- [12] 堤防工程设计规范:GB 50286—2013[S]. 北京:中国计划出版社出版,2013.
- [13] 王俊玮,王立志,王洪波. 基于雷诺护垫护坡的计算理论[J]. 黑龙江水利科技,2009,37(2):30-32.
- [14] 马海彦. 堤防工程基础冲刷深度计算问题[J]. 中国水利,2012(12):26-27,64.
- [15] 生态格网结构技术规程:CECS 353—2013[S]. 北京:中国计划出版社出版,2013.

(上接第17页)

- [6] 简鸿福,郭珺,吕辉,等. 生态景观挡墙在江西省八角亭水岸坡防护中的运用[J]. 中国防汛抗旱,2019,29(11):62-66,71.
- [7] 江辉,刘青,黄宝强,等. 农村小河流生态固岸新模式探讨[J]. 中国农村水利水电,2014(12):56-59.
- [8] 沈婷,李国英,张幸农. 水流冲刷过程中河岸崩塌问题研究[J]. 岩土力学,2005(S1):260-263.
- [9] 朱相丞,陆凤,刘孟洲,等. 网兜抛石在河道整治工程中的应用及优势分析[J]. 中国水运(下半月),2017,17(2):158-160,163.



# 汭河袁家庵站测验方式优化可行性分析

蒙雅雯 崔建和

(黄河水利委员会西峰水文水资源勘测局, 甘肃 庆阳 745000)

**【摘要】** 为了减少在站驻测成本、解放人力、提高生产效率,本文采用袁家庵站历年实测流量、实测输沙率资料,分析了袁家庵站断面冲淤变化规律、水位流量关系、单断沙关系特性及变化规律,并优化水位、流量、泥沙等测验项目的测验方式。结果表明:站断面冲淤变化较小,历年平均河底高程最大变幅为0.82m,基本稳定;对该站洪水期所定4个单一的水位流量关系曲线分别进行符号检验、适线检验、偏离数值检验,均符合要求,可以应用于生产实际。本文的研究成果可以作为该站和同类站在实行水文巡测时的数据支撑。

**【关键词】** 优化;检验;巡测

中图分类号: [TV123]

文献标志码: A

文章编号: 2097-0528(2022)11-056-06

## Feasibility analysis of test method optimization of Yuanjia'an Station in Ruihe River

MENG Yawen, CUI Jianhe

(Xifeng Bureau of Hydrology and Water Resources Survey, YRCC, Qingyang 745000, China)

**Abstract:** In order to reduce the cost in station monitoring, liberate human labor and improve the efficiency of production, based on the measured flow and measured data of sediment discharge of Yuanjia'an Station, the variation law of erosion and silting, the relationship between water level and flow, and the relationship between single fault and sediment in the section of Yuanjia'an Station are analyzed, and the test method for water level, flow, sediment and other test items is optimized. The results show that the erosion and silting of the station section have little variation, and the maximum variation of the average river bottom elevation over the years is 0.82m, which is basically stable. Four single relationship curves of water level and flow in the flood period of this station are tested by sign test, fit line test and deviation numerical test respectively, which all meet the requirements and could be applied to production practice. The results of this study can be used as the data support of this station and similar stations in the implementation of hydrological survey.

**Keywords:** optimization; test; survey

长期在站驻测是水文监测延续了几十年的传统模式。随着社会发展、技术进步以及先进测报仪器的应用,这种模式在一些偏远测站已不适应。这些测站经过多年大量的资料积累,人们对测站特性更加了解。通过对测站特性的分析,采用现代化的测报技术,为水

位、雨量、蒸发的数据采集和自动传输,流量、泥沙的自动化或半自动化监测,提高测站现代化水平等提供了技术支持。适时开展测验方式优化分析工作,在条件具备的测站采用现代化的测报技术,从而逐步实现水文资料的自动采集和传输。水文站测验方式优化的目

收稿日期: 2022-03-11

作者简介: 蒙雅雯(1986—),女,工程师,主要从事水文测验工作。

的是提高水文监测工作效率,为最终实现水文信息自动化监测夯实基础。牛亚豪<sup>[1]</sup>研究认为人类活动对天然河道的水沙特性造成了极大的破坏,导致水文要素急剧变化,测验条件变差,工作量逐年增加,水文测验工作在未来会向在线化、应急化、现代化方向发展。田峰等<sup>[2]</sup>从测站建设、巡测方式、测验手段、技术支撑等多方面进行了分析探讨,对水文巡测方案进行了优化,收到很好的效果。陈晨等<sup>[3]</sup>首次将无人机测流系统应用于黑龙江中游的流量监测上,对无人机测验系统在使用过程中常见问题进行了细致的分析,并提出相应的解决方法,对无人机测流的使用起到一定的推动作用。邱洋<sup>[4]</sup>对流量测验垂线进行多次试验精简,通过实践证明,三条垂线可以控制整个断面的流量,精简方式下的流量测验精度可满足水文测验规范要求,以此寻求测验方式改革,研究结果对同类水文站在测压方式改革方面具有很好的参考价值。随着社会经济的发展,水文测站巡测势在必行,测验方式改革是一种必然形势。最近几年,大量学者<sup>[5-12]</sup>对水文巡测、测验方式等进行了大量研究与优化,旨在解放人力、减少投入成本、提高生产效率。但在水文巡测实践中,发现大量存在的问题。王颖<sup>[13]</sup>认为如何解决好这些潜在的问题,将是水文巡测能否成功的关键。而测验方式的优化是水文测站能否巡测的基础与技术支持,在巡测前开展测验方式的优化是重中之重。在西北内陆中小河流上寻求测验方式优化办法同样存在诸多问题,如何解决好这些问题,需要更进一步的分析,翻阅大量文献<sup>[14-18]</sup>发现,针对西北干旱区中小河流水文巡测方面的研究较少。本文对内河袁家庵站的实测资料进行分析,在前述学者研究的基础上,对该站测验方式进行优化,提出新的测验方案,为今后水文巡测做铺垫,同时研究成果也可作为同类站在测验方式改革方面的数据支撑。

## 1 基本概况

### 1.1 测站概况

袁家庵站位于甘肃省平凉市泾川县城关镇延丰村,位于黄河流域泾河水系一级支流内河下游<sup>[19-24]</sup>,为流量测验三类精度站,集水面积 1658 km<sup>2</sup>,地理坐标为东经 107°20'35",北纬 35°19'30",至河口距离 1.8 km。测验河段顺直长约 600 m,右岸为混凝土护岸,左岸为砂石土坡,中高水控制较好。河床由卵石淤泥组成,有冲淤变化。基下 265 m 处有一弯道,基下 1110 m 的右岸有支流何子沟汇入,基下 1501 m 处有内河大桥,基下 1805 m 处是泾内河汇合口,泾河发生大洪水时有回水顶托影响。基下 1385 m 处有一座橡胶坝,对测验河段水流影响较小。

### 1.2 水沙特性

洪水主要来源于内河安口以上,区间来水较少。水系形状窄长,属山溪性河流,纵比降较大,暴雨洪水汇流快,流域内植被较好。洪水过程均为暴雨形成,多发生在 7—8 月。多年平均 7—10 月径流量占年径流量的 61.3%,90.3% 的泥沙来自 6—9 月。洪水涨落急剧且漂浮物较多,沙峰滞后于水峰,中高水受河槽控制,断面有冲淤。水位流量关系曲线主要受冲淤影响,较为复杂。

含沙量横向分布均匀,垂向变化很小近似直线。单断沙关系为历年综合线,系数为 1.00。多年平均径流量为 1.761 亿 m<sup>3</sup>,其中 5—10 月径流量占年径流量的 74.8%;近 12 年平均输沙量为 94.65 万 t,其中 7—9 月输沙量占年量的 95.9%,选取 2009—2020 年含沙量资料统计进行年内分配计算,见表 1。

表 1 多年平均水沙量年内分配

项 目	月 份												年
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
径流量/亿 m <sup>3</sup>	0.063	0.052	0.055	0.070	0.096	0.091	0.297	0.294	0.348	0.191	0.113	0.091	1.761
占年/%	3.60	2.96	3.11	3.97	5.43	5.19	16.9	16.7	19.8	10.8	6.39	5.15	100
输沙量/万 t				0.52	1.38	1.66	62.7	17.1	11.0	0.29			94.65
占年/%				0.55	1.46	1.75	66.2	18.1	11.6	0.31			100





## 2 资料及研究方法

根据《水文站网规划技术导则》(SL 34—2013)<sup>[25]</sup>要求,选用该站 2009 年迁站以来至 2020 年期间发生的洪水实测资料。对选定的流量资料进行一致性分析,保证集水区域内下垫面、人类活动对河道断面的影响、测站控制条件等基本一致。同时,进行流量资料可靠性分析,所使用资料均为经过水文资料整编刊印的资料,资料系列 12 年,具有一定的代表性。对该站测验设施设备现状、水位流量关系规律、单断沙关系进行分析,找到水文规律、符合规范优化条件的测验项目采用优化测验方式,对无条件的测验项目以配备先进仪器方式改进测验工作,制定优化测验实施方案。

## 3 测验方式优化研究

### 3.1 水位划分

该站历年最高水位 1030.84m,最低水位 1027.15m。最大流量 750m<sup>3</sup>/s。按历年最高、最低水位差作为计算变幅,按《水文站网规划技术导则》(SL 34—2013)<sup>[25]</sup>规定,最高水位以下历年实测最大水位变幅 25% 以上为高水位,最低水位以上历年实测水位变幅 25% 以下为低水位级,其余的为中水位级。可以划分为:高水: $H \geq 1029.92\text{m}$ ;中水: $1028.07\text{m} \leq H \leq 1029.92\text{m}$ ;低水: $H \leq 1028.07\text{m}$ 。

### 3.2 断面冲淤变化分析

根据该站历年实测大断面资料点绘断面图,见图 1。计算其同水位(1029.00m)的面积及平均河底高程,见表 2。可以看出,2012 年、2019 年、2020 年左岸变化较大。经调查知,2012 年是受修建河堤影响,2019 年是受修建

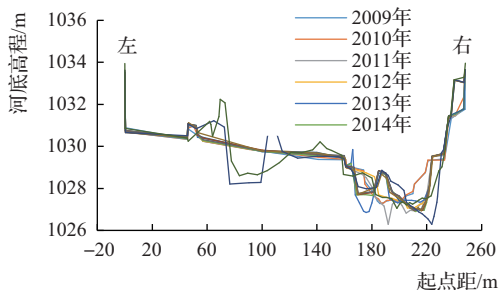


图1 历年实测大断面套绘图

河堤及基下 260m 滨河路向河道内拓宽影响,2020 年是受工程建设后续影响所致。历年同水位面积最大为 98.2m<sup>2</sup>,最小为 56.4m<sup>2</sup>,最大变幅为 41.8m<sup>2</sup>;历年平均河底高程最高为 1028.44m,最低为 1027.62m,最大变幅为 0.82m。由此可见,该站大断面年际冲淤变化较小。

表2 历年同水位面积及平均河底高程变化

年份	同水位面积/m <sup>2</sup>	平均水深/m	河底高程/m
2009	56.4	0.97	1028.03
2010	56.4	0.97	1028.03
2011	81.3	1.33	1027.67
2012	66.3	1.11	1027.89
2013	78.0	1.38	1027.62
2014	73.8	1.28	1027.72
2015	71.0	1.22	1027.78
2016	69.3	1.21	1027.79
2017	68.1	1.09	1027.91
2018	72.8	1.17	1027.83
2019	98.2	0.64	1028.36
2020	85.1	0.56	1028.44
平均	73.1	1.08	1027.92

### 3.3 洪水期水位流量关系分析

收集该站 2009 年以来实测流量资料,点绘历年洪水期水位流量关系曲线,见图 2,从图中可以看出历年洪水期水位流量关系呈现一个较宽的带状范围。因此,经过多次绘图和检验比较,将该站洪水期水位流量关系确定为四条线比较合理。

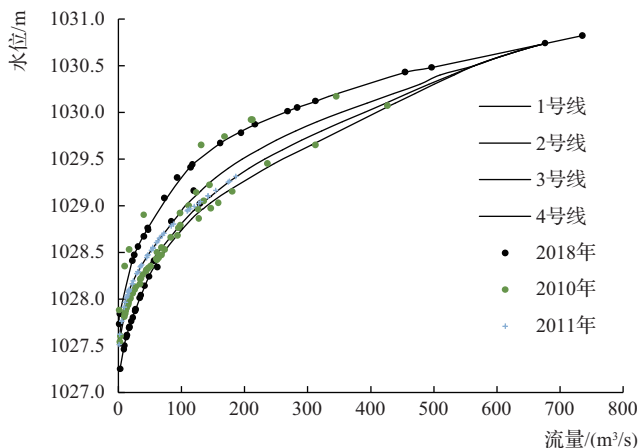


图2 历年洪水期综合水位流量关系曲线

### 3.4 水位流量关系误差分析

依据《水文资料整编规范》(SL/T 247—2020)<sup>[26]</sup>对该站历年洪水期综合水位流量关系曲线1、2、3、4号线分别进行符号检验、适线检验、偏离数值检验、不确定度计算。结果如下。

#### 3.4.1 符号检验

对1、2、3、4号水位流量关系曲线符号进行检验计算,计算结果分别是: $\mu_1 = 0.417$ ,查得 $\mu_{11-\alpha/2} = 1.15$ , $\mu_1 < \mu_{11-\alpha/2}$ ;  $\mu_2 = 0.676$ ,查得 $\mu_{21-\alpha/2} = 1.15$ , $\mu_2 < \mu_{21-\alpha/2}$ ;  $\mu_3 = 1.078$ ,查得 $\mu_{31-\alpha/2} = 1.15$ , $\mu_3 < \mu_{31-\alpha/2}$ ;  $\mu_4 = 0.204$ ,查得 $\mu_{41-\alpha/2} = 1.15$ , $\mu_4 < \mu_{41-\alpha/2}$ 。从以上检验结果可以看出,水位流量关系两侧点数分配均衡合理,关系曲线符号检验合格。

#### 3.4.2 适线检验

对1、2、3、4号线分别进行适线检验计算,变换符号次数分别为: $k = 17 \geq 0.5 \times (23 - 1)$ , $k = 24 \geq 0.5 (35 - 1)$ , $k = 16 \geq 0.5 \times (31 - 1)$ , $u_2 = 0$ ,查得 $\mu_{2(1-\alpha)} = 1.28$ , $\mu_2 < \mu_{2(1-\alpha)}$ ,则不做此项检验,说明定线无明显系统偏离,关系曲线适线检验合格。

#### 3.4.3 偏离数值检验

对1、2、3、4号线进行偏离数值检验,检验结果分别为: $t_1 = 1.073$ , $a = 0.20$ ;  $t_2 = 1.156$ , $a = 0.20$ ;  $t_3 = 0.931$ , $a = 0.20$ ;  $t_4 = 0.931$ , $a = 0.20$ 。查表得: $t_{11-\alpha/2} = 1.31$ , $t_1 < t_{11-\alpha/2}$ ;  $t_{21-\alpha/2} = 1.30$ , $t_2 < t_{21-\alpha/2}$ ;  $t_{31-\alpha/2} = 1.30$ , $t_3 < t_{31-\alpha/2}$ ;  $t_{41-\alpha/2} = 1.31$ , $t_4 < t_{41-\alpha/2}$ 。关系曲线偏离数值检验合格。

#### 3.4.4 不确定度计算

该站历年洪水期综合水位流量关系曲线1、2、3、4号线三项检验均符合要求,对曲线分别进行系统误差、标准差、不确定度统计,各项限差符合《水文资料整编规范》(SL/T 247—2020)要求。检验结果见表3。

表3 历年洪水期综合水位流量关系曲线误差统计

关系线	系统误差/%	允许系统误差/%	标准差/%	不确定度/%	允许不确定度/%
1号线	0.9	$\pm 2.0$	4.2	8.4	20.0
2号线	0.4	$\pm 2.0$	2.4	4.8	20.0
3号线	0.8	$\pm 2.0$	2.7	5.4	20.0
3号线	1.5	$\pm 2.0$	8.1	16.2	20.0

#### 3.4.5 检验结论

根据《水文巡测规范》(SL 195—2015)<sup>[27]</sup>中定线允许系统误差不超过 $\pm 2\%$ 、不确定度小于20%的规定,袁家庵站历年洪水期综合水位流量关系曲线系统误差、不确定度均在允许范围之内。历年洪水期综合水位流量关系曲线符号检验、适线检验、偏离数值检验均符合要求。结果说明:该站历年洪水期综合水位流量关系曲线符合规范要求,可以应用于生产实际。

### 3.5 非洪水畅流期水位流量关系分析

非洪水畅流期主要包括洪水期和凌汛期(定日型测流期间)以外的平水期及流量在 $20.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 以下的时期。从每年平水期或者一次洪峰过程流量小于 $20.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 的实测流量中摘取实测点,点绘水位流量关系图(见图3)。

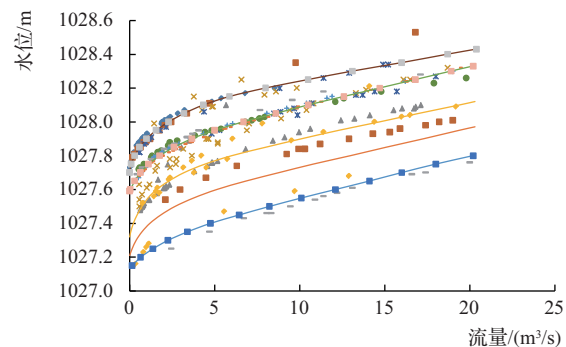


图3 非洪水期水位流量关系

从图3分析,非洪水畅流期低水水位流量关系散乱,无法定综合单一线,根据低水实测点的走势及点带分布宽度将其概化为5条线。

### 3.6 泥沙测验优化分析

袁家庵站没有输沙率测验项目,仅有单沙测验,故未作单断沙关系分析。该站多年输沙量年内分配见表4。该站多年平均输沙量为335.7万t,其中7—8月输沙量占年量的84.2%,7—9月输沙量占年量的95.9%。根据《水文站网规划技术导则》(SL 34—2013)要求:“实行巡测的二、三类精度的泥沙(流量)站,当每年低、枯水期和汛期的平水期输沙量小于多年平均输沙量的5%时,可以停测泥沙,停测期间的含沙量作零处理。”据此,每年的1—6月、10—12月均可停测单沙。



表4 多年平均输沙量年内分配

项 目	4	5	6	7	8	9	10	年
输沙量/万 t	0.52	1.38	1.66	62.7	17.1	11.06	0.29	94.73
占年/%	0.55	1.46	1.75	66.2	18.1	11.6	0.31	100

## 4 测验方式优化实施方案

### 4.1 流量测验

1—3月和11—12月,仍按规定采用定日型测流;4—10月测验停测流量,通过水位观测,洪水期 $Q > 20.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 时选用历年洪水期综合水位流量关系线推流报汛或整编;畅流期 $Q \leq 20 \text{ m}^3/\text{s}$ 时利用非洪水畅流期概化水位流量关系线推流。非洪水畅流期水位流量关系概化为5条线。在平水期或洪水落平到 $20 \text{ m}^3/\text{s}$ 以下实测一次流量,点绘在概化线上,若此实测点接近于某条概化线,则使用该线推流,当实测流量关系点位于两线之间,距每条线的相对差达到10%时,则采用内插曲线推流。除定日型测流时段外,任意两次实测流量的时间间隔不超过50天,推流应选用历年综合水位流量关系查算表。

### 4.2 泥沙测验

该站仅测单沙,以近似法推算断沙。实测时段为每年的4—10月,优化后方案可以改为每年的7—9月实测单沙,其他月份停测,停测月份按0处理。如果停测月份出现明显沙峰及含沙量过程,应实测单沙。建议有条件时,可逐步实现在线监测。

## 5 结论与建议

对袁家庵站的测验项目进行优化分析后,主要得出以下结论:

a. 该站断面冲淤变化较小,历年平均河底高程最大变幅为0.82m,基本稳定。

b. 该站洪水期为4个系列的单一曲线,非洪水畅流期概化为5个系列的单一曲线。1—3月和11—12月,仍按规定采用定日型测流;4—10月测验停测流量;洪水期 $Q > 20.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 时采用洪水期综合水位流量关系线推流报汛或整编;畅流期 $Q \leq 20 \text{ m}^3/\text{s}$ 时利用非洪水畅流期概化水位流量关系线推流。在平水期或洪

水落平到 $20 \text{ m}^3/\text{s}$ 以下实测一次流量,若此实测点接近于某条概化线,则使用该线推流,当实测流量关系点位于两线之间,距每条线的相对差达到10%时,则采用内插曲线推流。

c. 每年的7—9月实测单沙,其他月份停测,停测月份按0处理。如果停测月份出现明显沙峰及含沙量过程,应实测单沙。建议有条件时,可逐步实现在线监测。

d. 当预计可能发生大于 $700 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上洪水时,建议及时恢复流量测验,补充高水测点。◆

### 参考文献

- [1] 牛亚豪. 水文现代化建设规划现状及分析[J]. 现代农业研究, 2022, 28(1): 137-139.
- [2] 田峰, 徐勒铭, 孙放鸣. 安勘队水文巡测方案的优化[J]. 长江工程职业技术学院学报, 2011, 28(3): 19-21.
- [3] 陈晨, 荣佳伟, 乔铂纯. 无人机测验系统在水文监测中的应用探索[J]. 东北水利水电, 2021, 39(11): 69-70.
- [4] 邱洋. 冰峪沟水文测站流速测验垂线精简分析研究[J]. 黑龙江水利科技, 2021, 49(11): 4-8, 30.
- [5] 熊文慧. 舞阳水文局水文巡测方案[J]. 河南水利与南水北调, 2021, 50(11): 20-23.
- [6] 李欢丽. 基于小河流域代表站开展水文巡测方案的探讨[J]. 陕西水利, 2021(10): 33-34, 40.
- [7] 张丽花. 水文资料在线整编在水文巡测站的应用[J]. 水利水电快报, 2020, 41(8): 16-20.
- [8] 张松吉, 马松根, 王欢, 等. 浅谈水文巡测工作中存在问题及对策[J]. 治淮, 2020(6): 66-67.
- [9] 陈丰仓, 陈琳. 三门峡水文巡测工作探讨[J]. 河南水利与南水北调, 2019, 48(4): 30-32.
- [10] 金玲, 孙园园, 汪海洋. 驻马店市水文巡测成果分析: 以2016年铜钟、合水站为例[J]. 河南水利与南水北调, 2019, 48(1): 33-35.
- [11] 李鹏德. 彭阳水文站全年巡测方案探讨[J]. 水利科技与经济, 2018, 24(9): 77-80.
- [12] 谢文奇. 论水文巡测工作中水文遥测水位系统的运用[J]. 湖南水利水电, 2017(2): 53-55.
- [13] 王颖. 中小河流水文监测系统水文站巡测方案探讨[J]. 黑龙江水利科技, 2016, 44(7): 94-96.
- [14] 吕兰军. 设立水文巡测中心提高基层水文服务能力[J]. 水利发展研究, 2016, 16(5): 58-61.



- [15] 黄铁英. 浅谈水文巡测工作中存在的问题及对策[J]. 河南水利与南水北调, 2016(4): 32-33.
- [16] 刘红波. 设立涉县水文巡测基地可行性分析[J]. 河北水利, 2016(1): 31.
- [17] 柯斌樑, 劳国民. 杭嘉湖地区水文巡测工作探讨[J]. 浙江水利水电学院学报, 2014, 26(2): 45-49.
- [18] 何隆邦, 淳永旭, 裴生山, 等. 青海省尕日得水文站实行水文巡测的可行性分析[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(3): 172-175.
- [19] 周腾飞. 内河流域径流空间分布及时序变化分析[J]. 甘肃水利水电技术, 2020, 56(2): 9-11, 20.
- [20] 蒋丽君. 近 50 年内河径流特性及多年变化情况研究[J]. 甘肃水利水电技术, 2021, 57(9): 30-33.
- [21] 张娟, 雒仪. 华亭市内河水系“20180711”暴雨洪水调查分析[J]. 甘肃水利水电技术, 2020, 56(11): 1-4, 13.
- [22] 雒仪. 内河安口(二)水文站监测方式改革分析探讨[J]. 甘肃水利水电技术, 2020, 56(7): 7-10, 29.
- [23] 袁亚琴. 内河流域水资源合理配置探析[J]. 发展, 2007(11): 114.
- [24] 张淑兰, 吴光, 张海军, 等. 1966—2005 年泾河流域径流系数的变化特征[J]. 水电能源科学, 2021, 39(5): 33-36.
- [25] 水文站网规划技术导则: SL 34—2013[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [26] 水文资料整编规范: SL/T 247—2020[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.
- [27] 水文巡测规范: SL 195—2015[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016.

## 水利工程标准化管理工作动态

### 江苏省灌溉总渠管理处: 以水之担当, 精益求精做好标准化能力提升

江苏省高良涧闸管理所在 2021 年创建江苏省精细化管理单位的基础上, 常态化开展精细化管理工作, 积极谋划开展水利部标准化管理工程创建。管理所积极落实落细岗位责任制, 实施岗位任务清单制管理; 强化工程运行管理, 加强工程巡视检查, 定期开展安全隐患大排查, 保障水利工程运行安全; 及时跟踪维修养护项目实施, 加强工程自动化设施维保, 提升工程信息化水平; 做好工程汛前、汛后检查及问题整改“回头看”等管理工作。目前, 管理制度建立健全, 工程安全状况良好, 安全鉴定为一类水闸, 获评“江苏省安全生产标准化二级单位”; 管理范围内环境优美整洁, 被评为“江苏省水利风景区”; 2022 年积极“迎战”淮河春汛, 工程效益得到充分发挥。

(来源: 江苏省灌溉总渠管理处)

### 江苏省秦淮河水利工程管理处: 数字孪生助力标准化管理

江苏省秦淮河水利工程管理处管理秦淮新河水利枢纽和武定门水利枢纽 2 座秦淮河流域控制性工程, 承担防洪、排涝、灌溉和航运保障等职能。管理处以构建精细孪生模型为目标, 通过对泵站实体的数字化映射、智能化模拟, 形成了物理层面、虚拟层面的“双生”系统。武定门数字泵站搭建了以泵站主体的 BIM 数据、倾斜摄影数据以及 DEM 数据组成的 L2 级、L3 级数据底板; 实时接入泵站管理范围内的水情、工情以及视频监控数据, 孪生系统中的机组运行、水位更迭与物理系统同步, 并加载水质、观测等数据为数字泵站的工程模型、三维水下地形等提供数据支持; 将智能巡检系统、设备管理系统、精细化系统集成入孪生系统, 真实模拟出物理工程的现状及动态, 为实现“四预”奠定基础, 为水利工程安全规范化运行提供科技支撑。

(来源: 江苏省秦淮河水利工程管理处)



# 降水和下垫面对北峪河流域径流影响的定量研究

杨亚军

(甘肃省陇南水文站,甘肃 成县 742500)

**【摘要】** 北峪河流域属于典型的干旱型小流域,为了更加准确地地区分降水量和下垫面对流域径流量的影响程度,本文在收集流域下游马街水文站实测水文资料的基础上,采用GIS软件对流域内平均雨量做了计算。采用线性回归法、时序累积值法、M-K检验法对降水量、径流量的变化趋势及突变点进行识别,以序列突变点以前序列为基准期,采用斜率变化率法对降水量和下垫面对径流量的影响贡献率进行计算。结果表明:降水量、径流量整体上呈逐年递减趋势,径流量减小趋势较降水量显著。径流量在1997年后较平稳,长期处于枯水期。

**【关键词】** 降水;北峪河;径流;影响量

中图分类号:TV121+.2

文献标志码:A

文章编号:2097-0528(2022)11-062-05

## Quantitative study on the influence of precipitation and underlying surface on runoff in Beiyu River Basin

YANG Yajun

(Gansu Longnan Hydrological Station, Chengxian 742500, China)

**Abstract:** Beiyu River Basin is a typical small arid watershed. In order to distinguish more accurately the influence of precipitation and the underlying surface on the runoff of the basin, this paper calculates the average rainfall in the basin by GIS software on the basis of the measured hydrological data collected from Majie Hydrological Station in the lower reaches of the basin. The linear regression method, sequential cumulative value method and M-K test method are used to identify the change trend and abrupt change point of precipitation and runoff. Taking the sequence before the abrupt change point as the base period, the slope change rate method is used to calculate the impact contribution rate of precipitation and underlying surface on the runoff. The results show that precipitation and runoff are decreasing year by year on the whole, and runoff is decreasing more significantly than precipitation. The runoff has been stable since 1997 and has been in dry season for a long time.

**Keywords:** precipitation; Beiyu River; runoff; impact amount

### 1 研究背景

气候变化在过去几十年内对我国水文水资源产生

了很大影响,近50年来甘肃省平均气温升高了1.1℃,河东地区平均升高了0.9℃,河西平均升高了1.4℃,升温幅度高于全国平均水平;甘肃省降水量逐年减少,

收稿日期:2022-03-11

作者简介:杨亚军(1973—),男,工程师,主要从事水文水资源勘测工作。

平均每 10 年减少 5.7mm<sup>[1]</sup>。王玉洁等<sup>[2]</sup>、李紫妍<sup>[3]</sup>、王少丽等<sup>[4]</sup>的研究表明,气候变化和人类活动是影响流域水文循环过程和水资源演变规律的驱动因素,其带来的水文效应受到各国学者<sup>[5-6]</sup>的广泛关注。在西北内陆,远离海洋,处于干旱半干旱季风气候区,降水径流在逐年减少,尤其一些中小河流,由于年内降水不均匀,导致河流断流的情况经常发生,给水文监测及资料序列连续性等带来诸多挑战。近几年,社会经济的快速发展,基础设施的大力建设,给流域产汇流造成很大的影响,很多河流径流量已经不是天然径流量,含有诸多影响因素。李彤等<sup>[7]</sup>的研究表明人类活动已经成为影响河川径流的主要驱动因素。北峪河属于西北半干旱区典型的小流域,地质条件差,植被稀少,流域内人类活动较频繁,几十年来,下垫面条件发生很大变化,对流域水文特性造成很大影响,主要表现在径流量、输沙量的变化方面,从而影响流域水资源规划与管理。杨环等<sup>[8]</sup>采用小波分析、累积距平曲线与 Mann-Kendall 法对降水与径流序列进行趋势分析,并对其影响因素采用双累积曲线法和敏感性系数法作了定量分析。沙作菊等<sup>[9]</sup>根据北峪河流域的实测水文资料,分析了流域水沙的年内和年际变化规律,结果表明:降水量、径流量呈逐年减少趋势,年内分配极不均匀,主要集中在 5—10 月。哈文舸<sup>[10]</sup>通过分析计算北峪河流域水沙变化特征,为流域水土保持提供了重要的技术指导,对当地在防洪减灾方面发挥了巨大作用。曹红武<sup>[11]</sup>利用水文、水利、气象、水保、环保、经济、人口等统计资料,科学分析了北峪河小流域水资源特点。对北峪河流域水文特征变化研究的学者较多,在流域径流影响成因上有很多研究,但多数学者在因素定量分析方面稍有欠缺,为了能更加准确地掌握气候变化、人类活动对流域径流量的影响,本文在前述学者研究的基础上,采用北峪河马街站的实测水文资料,分析降水量和下垫面变化对流域径流量的影响。为当地在掌握河流特性、河湖管理、水资源优化配置及监管方面提供有力的数据支持及技术指导,也为以后水文测验工作提供主要的参考依据,对当地经济社会发展、水利工程建设,具有重要意义。

## 2 区域概况

北峪河位于甘肃省陇南市武都区境内,属白龙江一级支流,嘉陵江二级支流,发源于武都区鱼龙镇境内的米仓山,源地海拔 3100m,流域总面积 432km<sup>2</sup>;干流长 29km,流域平均比降 18‰,于武都区西南汇入白龙江,流域平均宽度 9.8km,属山区性地貌。平均气温 14.5℃,年均无霜期 200 天,年均降水量 450mm。流域内植被覆盖率低,地质多为黄土或砂土,水土流失严重<sup>[12-20]</sup>。北峪河流域气候属副热带气候区,降水分布极不均匀,多集中在 5—10 月。北峪河下游设有马街水文站,位于东经 104°57′22″,北纬 33°27′53″,距离河口 13km,积水面积 278km<sup>2</sup>,占流域面积的 65%,基本能控制流域水文情势的变化。测验项目有水位、流量、悬移质泥沙、降水、蒸发等。

## 3 资料及方法

本次研究采用流域内马街水文站的实测降水量、径流量等长系列资料,资料系列为 1956—2016 年,资料系列有展延,资料在全国第三次水资源评价中得到很大程度的应用,可靠度较高。资料系列包括流域内安坪、马街、安化及周边雨量站甘泉、申家集的年降水资料;马街站实测径流资料。采用 GIS 软件对降水量站资料做泰森多边形计算,按照雨量站面积权重得出流域内平均雨量,采用线性回归法、时序累积值法(双累积曲线)、Mann-Kendall 秩次相关法(M-K)法对降水量、径流量的变化趋势及突变点进行识别,以序列突变点以前序列为基准期,采用斜率变化率法<sup>[21]</sup>对降水量和下垫面条件对径流量的影响贡献率进行计算。

### 3.1 GIS 泰森多边形构建方法

在地图上将雨量站互相关联,构成  $n$  个三角形,形成边长重合的三角网,然后对每个三角形各边做垂直平分线,用这些垂直平分线构成以每个雨量站为中心的多边形<sup>[22]</sup>。在此假设每个雨量站控制面积为多边形的面积,则有面雨量计算公式:

$$P = (a_1p_1 + a_2p_2 + \cdots + a_n p_n) / A \quad (1)$$





式中:  $a_1, a_2, \dots, a_n$  为每一个雨量站的控制面积,  $\text{km}^2$ ;  $p_1, p_2, \dots, p_n$  为个雨量站的同期降水量,  $\text{mm}$ ;  $A$  为流域总面积,  $\text{km}^2$ ;  $P$  为流域平均降水量,  $\text{mm}$ 。也可以将式(1)换算为

$$P = w_1 p_1 + w_2 p_2 + \dots + w_n p_n \quad (2)$$

式中:  $w_i = a_i/A$  为各雨量站控制面积与流域总面积的比值, 又称为各雨量站的权重系数。

### 3.2 Mann-Kendall 检验法

Mann-Kendall 检验法简称 M-K 检验法, 是一种非参数统计检验方法<sup>[22-23]</sup>, 对于具有样本容量的时间序列, 构造秩序列<sup>[1]</sup>, 公式如下:

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k = 2, 3, 4, \dots, n) \quad (3)$$

计算时假设时间序列独立, 构造统计量:

$$UF_k = \frac{[S_k - E(S_k)]}{\sqrt{\text{Var}(S_k)}} \quad (k = 2, 3, 4, \dots, n) \quad (4)$$

式中:  $UF_1 = 0$ ;  $E(S_k)$  是  $S_k$  的均值,  $\text{Var}(S_k)$  是方差, 假设  $x_1, x_2, \dots, x_n$  连续分布且相互独立, 构造统计量:

$$E(S_k) = \frac{n(n+1)}{4} \quad (5)$$

$$\text{Var}(S_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (6)$$

分析给出的  $UF_k$  和  $UB_k$  曲线图, 若  $UF_k$  或  $UB_k > 0$ , 则表明需序列呈上升趋势, 反之, 则趋势下降, 超过临界值时, 趋势显著。当超过显著性临界值时, 说明序列发生了突变。

### 3.3 累积斜率变化率法

王随继等<sup>[24]</sup>提出了累积斜率变化率法, 在气候变化、人类活动对水文序列影响的定量分析中得到广泛应用。该法可用于定量评估人类活动与气候变化对河川径流的贡献程度, 计算原理是以序列突变前的水文序列为基准期, 将序列划分为几个突变后的序列, 计算降水及人类活动对径流的贡献量, 构造统计量:

$$(S_{Ra} - S_{Rb}) / |S_{Rb}| \quad (7)$$

$$(S_{pa} - S_{pb}) / |S_{pb}| \quad (8)$$

$$C_p = \frac{(S_{pa} - S_{pb})}{|S_{pb}|} \times 100 / [(S_{Ra} - S_{Rb}) / |S_{Rb}|] \quad (9)$$

$$C_H = 100 - C_p \quad (10)$$

式中,  $S_{Ra}$  为径流量基准期斜率;  $S_{Rb}$  为径流发生突变后的斜率;  $S_{pa}$  为降水量基准期斜率;  $S_{pb}$  为出现突变后序列的斜率。

## 4 流域降水量及径流量变化特征

采用前述提到的 GIS 构建泰森多边形, 采用式(1)计算流域多年平均降水量, 得到 1956—2016 年的流域平均降水量序列, 多年平均降水量为 452mm, 多年平均径流深为 63.58mm。用 GIS 计算的各雨量站控制面积及所占比例见表 1。

表 1 流域及周边雨量站控制面积统计

序号	1	2	3	4	5
站名	安坪	马街	安化	甘泉	申家集
面积/ $\text{km}^2$	4.7	24.7	191.2	49.5	2.1
比例	0.020	0.090	0.700	0.180	0.007

点绘降水量及径流深的年际变化曲线, 见图 1 和图 2。从图中看出, 流域平均降水量、天然径流深均呈逐年减少趋势。天然径流深的减少趋势较降水量大。从图 2 可以看出, 1997 年以后, 径流深处于较稳定状态, 该流域处于枯水期, 流量较平稳。1993 年以后径流深的减少趋势比 1992 年以前明显。为了分析降水量、径流量的趋势显著性, 进一步使用 M-K 检验得知, 降水量  $U$  值为 2.87, 大于  $\alpha = 0.05$  显著性水平的界值 1.96, 减少趋势显著; 径流量统计量  $U$  值为 3.89, 大于  $\alpha = 0.05$  显著性水平的界值 1.96, 说明减少趋势显著。

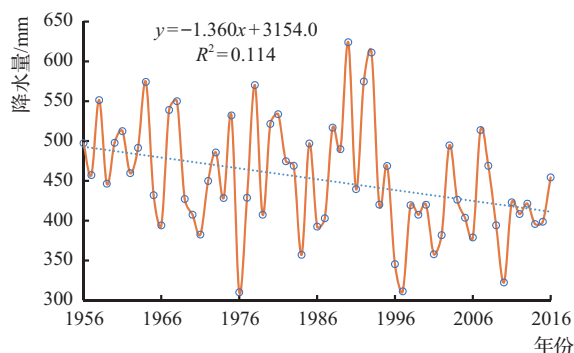


图 1 流域平均降水量变化曲线

气候变化、下垫面条件的改变, 导致径流序列严重

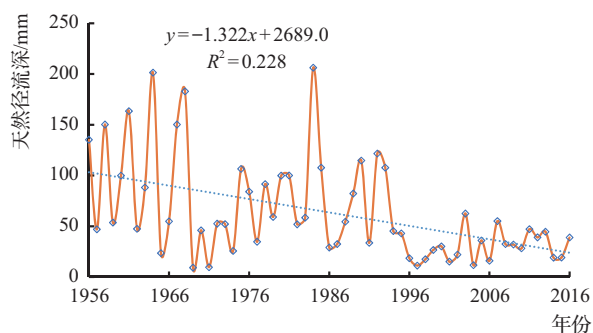


图2 流域天然径流深变化曲线

失真。继续对上述序列采用 M-K 法进行序列突变检验,其统计结果见图3~图4。从图3看出,降水量  $UF$  值在 1956—1993 年、2002—2005 年、2007 年、2011 年均小于 0,且在 1956—1965 年、1968 年、1973 年、1978 年、1981 年  $UF$  值均低于  $\alpha = 0.05$  显著性水平的界值 1.96,在这些时间段降水量出现显著性减少趋势。降水量序列在 1976 年、1984 年、1986 年、1987 年、1993 年等年份出现突变。

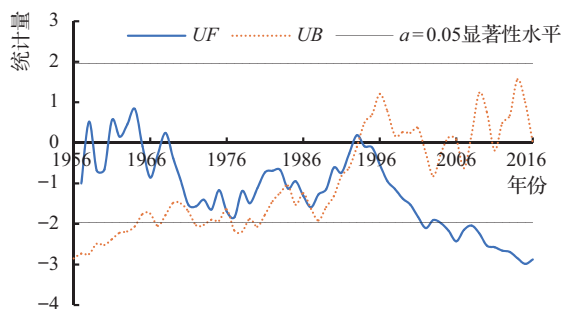


图3 降水量 M-K 法检验统计曲线

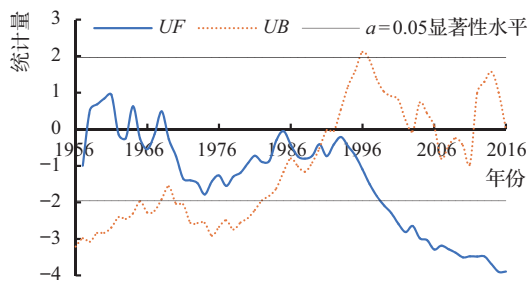


图4 径流量 M-K 法检验统计曲线

从图4得知,1956—1993年、2006—2012年径流量  $UF$  值长期低于 0,且在 1956—1969 年、1971—1982 年  $UF$  值低于  $\alpha = 0.05$  显著性水平下的 1.96,但在降水量序列发生突变的 1976 年、1984 年、1986 年、1987

年,对径流量序列未显示出影响。不论是降水量还是径流量,在 1996 年之前均显示出上升趋势。其中降水量在 1956—1970 年、1981—1984 年、1989—1996 年、2007—2009 年、2011—2014 年出现了上升趋势,表明这些时间段内,降水量由少变多;径流量在 1960—1969 年、1976—1996 年、2011—2017 年出现上升趋势,说明径流量呈增加趋势。可以看出,降水量与径流量之间影响关系并不是很明显,这就间接证明了下垫面条件变化对径流量造成影响。

## 5 降水量和下垫面变化对径流的影响分析

下垫面条件的变化程度表征着人类活动的频繁与否,大量学者<sup>[26-31]</sup>的研究表明,经济建设的加快,导致下垫面条件大面积改变,主要发生在 20 世纪 80 年代初。对于西北地区落后山区,虽然在这一时期有些滞后,但在后期,人类活动逐年加剧,对径流量的影响还是很大。采用 M-K 法检验,发现径流在 1993 年出现转折点。从《甘肃省第三次水资源评价成果》<sup>[25]</sup>来看,甘肃省大部分河川径流转折出现在 1993 年。这间接证明了甘肃省下垫面条件变化起步于 1993 年前后。点绘降水量、径流量双累积曲线,见图5。从图5中可知,序列在 1993 年出现明显的突变点,1956—1992 年间降水径流的相关性较 1993 年后弱,但不是很明显。将 1993 年后的降水量累积值代入 1992 年前的双累积线性回归方程中,重新计算出 1993 年后的径流序列,对 1993 年后的径流还原,序列值定义为  $R_{\text{计算}}$ 。点还原后的降水-径流量双累积曲线见图6。用还原后的径流量  $R_{\text{计算}}$  减去还原前的径流量  $R_{\text{实测}}$ ,就是降水和下垫面条

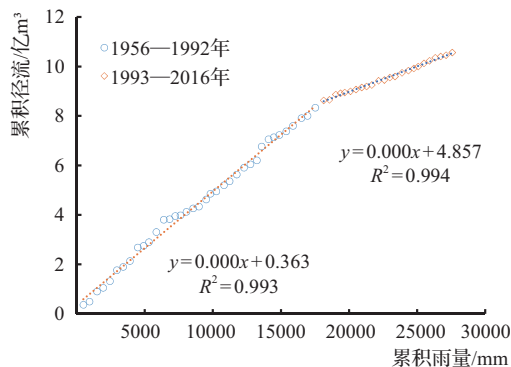


图5 降水-径流量双累积曲线

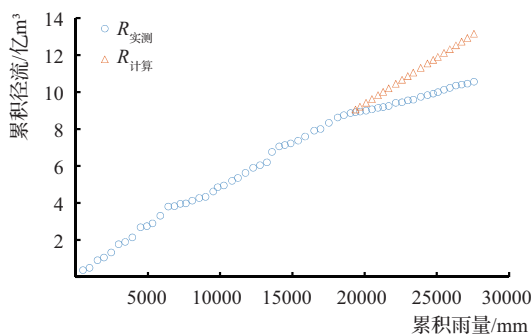


图6 点还原后的降水-径流量双累积曲线

件影响的径流量。经计算,在1993—2016年,径流量累积变化了29.5亿 $\text{m}^3$ ,平均每年减小1.4亿 $\text{m}^3$ ,这个变化幅度对于西北干旱半干旱区中小河流是相当大的,对当地水资源量造成很大影响。

为了进一步定量分析降水量、下垫面变化对径流量影响贡献率,利用式(7)~式(10)计算。以1992年前的降水量、径流量为基准期,计算得累积降水量斜率变化率为0.129,累积径流量斜率变化率为1.542,则降水量对径流的影响贡献率 $C_p$ 值为8.36%,下垫面对径流的影响贡献率 $C_H$ 值为91.64%。按照前面计算的累积变化量,计算出降水量对径流量的影响量为2.46亿 $\text{m}^3$ ,下垫面的影响量为27.03亿 $\text{m}^3$ 。

## 6 结 语

本文通过采用GIS构建泰森多边形的方法,对北峪河流域年平均雨量做了加权计算,采用线性回归法、时序累积值法(双累积曲线法)、M-K检验法对降水量、径流量的变化趋势及突变点进行识别,采用累积斜率变化率法对降水量和下垫面对径流的影响作了定量研究,主要得出以下结论:

a. 北峪河流域降水量、径流量整体上呈逐年递减趋势,径流量减小趋势较降水量显著。径流量在1997年后较平稳,长期处于枯水期。

b. 以1956—1992年为基准期,计算了1993年后降水量、下垫面对径流量的影响程度。1993年后,该流域径流量累计减少29.5亿 $\text{m}^3$ ,平均每年减少1.4亿 $\text{m}^3$ 。其中,降水量对径流量的影响贡献率为8.36%,影响量为2.46亿 $\text{m}^3$ ;下垫面对径流量的影响贡献率

为91.64%,影响量为27.03亿 $\text{m}^3$ 。

c. 受限于资料系列、方法的不足,本文在定量分析方面还稍有欠缺。建议在以后的水文测验中,增加输沙量测验等对径流有影响的项目,再继续加以分析。◇

## 参考文献

- [1] 牛最荣. 气候变化对祁连山区水文循环的影响研究[M]. 兰州:甘肃人民出版社,2013.
- [2] 王玉洁,秦大河. 气候变化及人类活动对西北干旱区水资源影响研究综述[J]. 气候变化研究进展,2017,13(5):483-493.
- [3] 李紫妍. 汉江上游水文气象时空变异和水文模拟的不确定性评估[D]. 西安:西安理工大学,2019.
- [4] 王少丽,臧敏,王亚娟,等. 降水和下垫面对流域径流量影响的定量研究[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(6):1-5.
- [5] AHN K H, MERWADE V. Quantifying the relative impact of climate and human activities on streamflow[J]. Journal of hydrology,2014(7):257-266.
- [6] PIAO SH L, CIAISP, HUANG Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China[J]. Nature,2010,467(7311):43-51.
- [7] 李彤,胡国华,顾庆福,等. 近55年来降水及人类活动对资水流域径流的影响[J]. 水文,2018,38(6):54-58,88.
- [8] 杨环,李晓婧,韩守富,等. 北峪河流域径流变化及影响因素分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2020,56(1):65-70,80.
- [9] 沙作菊,黄维东,王毓森,等. 白龙江北峪河小流域水沙演变规律分析[J]. 甘肃水利水电技术,2017,53(8):1-4,43.
- [10] 哈文舸. 从北峪河水沙变化看流域水土保持综合治理成效[J]. 甘肃科技,2013,29(23):32-34,68.
- [11] 曹红武. 北峪河小流域水资源及优化配置研究[J]. 甘肃科技,2011,27(12):36-39,78.
- [12] 舒和平,齐识,宁娜,等. 甘肃省南部武都区泥石流灾害风险评价研究[J]. 自然灾害学报,2016,25(6):34-41.
- [13] 杨成有,刘进琪. 甘肃江河地理名录[M]. 兰州:甘肃人民出版社,2014.
- [14] 北峪河大桥施工过程及承载能力验算分析[D]. 兰州:兰州交通大学,2015.

(下转第82页)



# 改进可公度法的丰满流域极端径流年预报

班友康<sup>1</sup> 梁 云<sup>1</sup> 雷冠军<sup>2</sup>

(1. 中水三立数据技术股份有限公司, 安徽 合肥 230000;  
2. 华北水利水电大学, 河南 郑州 450045)

**【摘 要】** 可公度信息预报技术是一种自然灾害预报技术,可用于流域极端径流年预报。可公度预报包括三元、五元、七元可公度预报,如何综合多元可公度计算结果确定预报结论值得商榷。本文在点面结合可公度方法计算结果的基础上,引入 Topsis-模糊评判法,综合评价多元可公度特征,以及极端丰水年和极端枯水年可公度特征,提高极端径流年预报的准确率。并以松花江流域为例,进行 2000—2018 年极端径流年预报,结果表明,改进的方法能够提高极端径流年预报的准确率。

**【关键词】** 可公度;径流预报;点面结合法;Topsis-模糊综合评判

中图分类号: TV21

文献标志码: A

文章编号: 2097-0528(2022)11-067-06

## Annual prediction of extreme runoff in Fengman Watershed by improved commensurable method

BAN Youkang<sup>1</sup>, LIANG Yun<sup>1</sup>, LEI Guanjun<sup>2</sup>

(1. ZhongshuiSanli Data Technology Co., Ltd., Hefei 230000, China;  
2. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

**Abstract:** As a natural disaster prediction technology, the commensurable information prediction technology can be used for the annual prediction of extreme runoff in the watershed. The commensurable prediction includes three-, five- and seven-element commensurable prediction, and how to synthesize the results of multiple commensurable calculation to determine the prediction conclusion is worth discussing. Based on the calculation results of the point-plane combination commensurable method, this paper introduces Topsis-fuzzy evaluation method to comprehensively evaluate the characteristics of multiple commensurability, as well as the characteristics of extreme wet year and extreme dry year, so as to improve the accuracy of the annual extreme runoff prediction. Taking Songhuajiang River Watershed as an example, the annual extreme runoff prediction from 2000 to 2018 is carried out. The results show that the improved method can improve the accuracy of the annual extreme runoff prediction.

**Keywords:** commensurability; runoff prediction; point-plane combination method; Topsis-fuzzy comprehensive evaluation

翁文波院士研究指出洪水的发生时间有可公度性,而且可公度性原理可用于旱涝、地震等自然灾害的预报,从而发展成为预测论。可公度方法运用于洪水灾害的预报,主要从两个方面展开:一是基于可公度方

收稿日期: 2022-08-04

作者简介: 班友康(1995—),男,高级工程师,主要从事水利信息化项目实施管理工作。



法寻找序列的周期进行预报;二是基于预报年的可公度数进行预报。周期性分析可运用概周期的特征,构建可公度网络结构对未来进行预报。可公度理论是对数据规律的一种挖掘和表述,至今尚无理论推导和证明。随着数据序列的延长,可公度数会相应增加,如何基于可公度数对事件发生的时间进行预报,是可公度理论的关键问题。基于三元、五元、七元的可公度数信息,进一步挖掘数据中隐藏的规律。彭高辉采用关联规则挖掘的方法对可公度数进行再判定,预报结果的正确率得到较大的提高。李文龙选用东北地区洪灾年份、丰满水库丰水年份为样本,基于可公度方法能够预测出2013年为大洪水年,然而由于所列举的其他未来年份的可公度式与2013年的式子排序接近,对其他年份的判定和选择缺乏可行的方法。彭卓越运用点面结合的方法选用五类不同的样本对松花江流域2017年的大洪水年进行预报,其根据预报年份三元可公度式的个数判定未来易发大洪水的年份<sup>[14]</sup>。

目前,已有的可公度法单纯基于三元可公度数的计算结果进行分析,三元、五元、七元可公度数涉及多元指标,如何基于多元可公度数对极端经流年进行预报,尚未见诸相关研究。本文基于三元、五元、七元点面结合可公度计算结果,引入Topsis-模糊综合评判的方法对预报年份可公度性排序进行分析,综合分析同一事件的多元可公度特征,研究预报年可公度数的规律,提高预报结论的准确率<sup>[5-6]</sup>。

## 1 预报模型

### 1.1 点面结合可公度法

点面结合法基于可公度信息预测基本原理,根据单个站点(点)和流域(面)历史水文数据,分别计算单个站点(点)和流域(面)的可公度性,通过综合分析对流域极端径流年进行预报<sup>[7]</sup>。

可公度信息预报技术基本原理可表达如下:

$$X_s = \sum_{t=1}^l I_t X_t \quad (1)$$

式中:  $\{t\} \not\subset \{s\}$ , 即预报年份不出现在可公度公式;  $I_t$

为整数;  $l$  为构成可公度式的元素个数。

必须有两个及以上的可公度公式来验证可公度公式,上述可公度值排列为一个单调递增的集合:

$$\{X_{s1}, X_{s2}, \dots, X_{sm}\} \quad (2)$$

若是其满足:

$$|X_{sm} - X_{s1}| \leq \varepsilon \quad (3)$$

当  $\varepsilon = 0$  时说明该样本是完全可公度的;若  $\varepsilon > 0$ , 则该  $\Delta X$  为  $[-\varepsilon, \varepsilon]$  区间可公度灰周期。可公度公式个数  $m$  值越大,  $\varepsilon$  值越小, 其预报精度越高。

其中适合外推预报的模型有三种:三元可公度模型、五元可公度模型、七元可公度模型,分别为基于三个、五个、七个样本年中的因子对未来进行预报。

### 1.2 Topsis-模糊综合评判法

Topsis-模糊综合评判法是在Topsis-余弦法的基础上,采用Topsis法确定权重,用模糊综合评判法进行评价的方法<sup>[8]</sup>。Topsis法用是基于归一化后的原始数据矩阵,找出所提出方案中的最优方案与最劣方案,进而计算出所要评价的对象与最优方案和最劣方案间的距离,从而计算出所要评价的对象与最优方案的相对接近程度大小。

简要计算步骤如下:设有  $n$  个评价对象,  $m$  个评价指标,则原有数据形式如下:

$$S = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & \dots & s_{1n} \\ s_{21} & s_{22} & \dots & s_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ s_{m1} & s_{m2} & \dots & s_{mn} \end{pmatrix} \quad (4)$$

a. 指标数据趋同化处理。

b. 趋同化后数据的无量纲化处理与Topsis-余弦法相同,在此只对权重的计算和模糊综合评判进行分析。

c. 构造加权系数矩阵:

$$\bar{s}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m s_{ij}^* \quad (5)$$

$$t_j = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (s_{ij}^* - \bar{s}_j)^2} \quad (6)$$

$$\theta_j = t_j / |\bar{s}_j|, (j = 1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

式中:  $s_{ij}^*$  为趋同化、无量纲化处理后的指标。

确定出各指标的权重  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ , 以它们为主对角元素构造对角矩阵  $\theta$ , 其他元素为 0。则, 加权系数矩阵为

$$\mathbf{Z} = s_{ij}^* \cdot \theta = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ z_{m1} & z_{m2} & \cdots & z_{mn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

d. 确定最优方案和最劣方案。最优方案每列中的最大值组成向量为  $z^+$ , 最劣方案每列中的最小值组成向量为  $z^-$ 。

e. 正负理想解分别作归一化处理, 确定出各评价指标的权重值。正理想解权重的计算:  $z_j^+ = \max z_j / \sum z^+$ ; 负理想解权重的计算:  $z_j^- = \min z_j / \sum z^-$ 。

f. 利用 Topsis 定权的模糊综合评判模型。将  $\mathbf{Z}$  转置并归一化得到各评价指标的评判矩阵为

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & \cdots & v_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ v_{m1} & v_{m2} & \cdots & v_{mn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

则由正负理想解确定的综合评向量分别为

$$w^+ = z^+ \mathbf{V}, w^- = z^- \mathbf{V} \quad (10)$$

归一化综合评判向量, 得到各向量组合的隶属度, 基于最大隶属度原则, 得到所评价对象的综合排序。

### 1.3 改进的点面结合可公度法

可以全流域范围内的大洪水年份和待预报地区临近点的极端径流年为样本, 对流域极端来水年份进行预报。极端径流年有极端丰水年和极端枯水年两类, 极端丰水年的极端枯水特征一定最不显著<sup>[9]</sup>。改进点面结合可公度预报方法思路如下:

a. 在可公度性分析的基础上, 运用 Topsis-模糊综合评判法综合分析各个样本系列的三元、五元、七元可公度数, 确定其相应排序<sup>[10]</sup>。

b. 基于点面结合可公度计算结构, 将点样本和面样本的排序, 运用 Topsis-模糊综合评判法综合分析确

定丰水年的排序。

c. 基于点面结合可公度计算结构, 根据点样本和面样本的排序, 运用 Topsis-模糊综合评判法综合分析确定枯水年的排序。

d. 综合预报站点的极端丰水年排序、极端枯水年排序的补集, 运用 Topsis-模糊综合评判法进行综合评判, 预报极端径流可能发生的年份。

### 1.4 建模步骤

基于改进的点面结合可公度法的计算步骤如下:

a. 首先对样本系列的可公度性进行检验, 分析统计样本年的概周期。

b. 基于可公度性基本原理, 基于所选流域或控制站点的特丰样本、特枯样本计算预报年的三元、五元、七元可公度数。

c. 基于综合评判法分别对特丰水年、特枯水年的可公度数进行综合排序; 对特丰水年排序、样本容量-特枯水年排序进行综合评判, 分析流域极端径流年的综合排序。

## 2 模型应用

收集整理东北地区、丰满水库、白山水库、云峰水库、镜泊湖水库历史径流系列, 得到研究所需样本数据。

### 2.1 可公度性分析

表 1 给出了东北地区、丰满水库、白山水库、云峰水库、镜泊湖水库可公度计算结果。由表可知, 东北地区历史径流序列涉及松花江和辽河流域, 因子特性存在不同的可公度性。东北地区 15 年序列具有 21 年、25 年的概周期。对于 1856 年、1957 年、1962 年、1981 年、1998 年, 与其他因子的组合不存在严格的可公度性。白山水库 11 个样本的极端样本特征显著性好。丰满水库年概周期是 2 年、5 年, 说明挑选的样本存在非单一的概周期值, 需基于多个概周期进行预报。云峰水库具有较好的可公度性, 概周期为 5 年和 2 年。镜泊湖水库具有较好的可公度性, 概周期为 3 年和 2 年。





表1 可公度计算结果

	可公度性 1	可公度性 2	可公度性 3
东北地区	$X_1 = 1888, X_2 = 1909, X_3 = 1930, X_2 - X_1 = X_3 - X_2 = 21$	$X_4 = 1911, X_5 = 1932, X_6 = 1953, X_7 = 1995, X_5 - X_4 = X_6 - X_5 = 21, X_7 - X_6 = 21 \times 2$	$X_8 = 1960, X_9 = 1985, X_{10} = 2010; X_9 - X_8 = X_{10} - X_9 = 25$
白山水库	$X_1 = 1960, X_2 = 1982, X_3 = 1986, X_4 = 1994, X_5 = 2010, X_2 - X_1 = 11 \times 2, X_3 - X_2 = 2 \times 2, X_4 - X_3 = 4 \times 2, X_5 - X_4 = 8 \times 2$	$X_6 = 1937, X_7 = 1943, X_8 = 1953, X_9 = 1957, X_{10} = 1975, X_{11} = 1995, X_7 - X_6 = 3 \times 2, X_8 - X_7 = 5 \times 2, X_9 - X_8 = 2 \times 2, X_{10} - X_9 = 9 \times 2, X_{11} - X_{10} = 10 \times 2$	
丰满水库	$X_1 = 1909, X_2 = 1923, X_3 = 1939, X_4 = 1951, X_5 = 1953, X_6 = 1957, X_7 = 1975, X_8 = 1991, X_9 = 1995, X_{10} = 2013; X_2 - X_1 = 7 \times 2, X_3 - X_2 = 8 \times 2, X_4 - X_3 = 6 \times 2, X_5 - X_4 = 2, X_6 - X_5 = 2 \times 2, X_7 - X_6 = 9 \times 2, X_8 - X_7 = 8 \times 2, X_9 - X_8 = 2 \times 2, X_{10} - X_9 = 9 \times 2$	$X_{11} = 1856, X_{12} = 1960, X_{13} = 1964, X_{14} = 2010, X_{12} - X_{11} = 52 \times 2, X_{13} - X_{12} = 2 \times 2, X_{14} - X_{13} = 23 \times 2$	$X_7 = 1975, X_9 = 1995, X_{12} = 1960, X_{14} = 2010, X_7 - X_{12} = 3 \times 5, X_9 - X_7 = 4 \times 5, X_{14} - X_9 = 5 \times 5$
云峰水库	$X_1 = 1929, X_2 = 1934, X_3 = 2004, X_2 - X_1 = 5, X_3 - X_2 = 14 \times 5$	$X_4 = 1935, X_5 = 1960, X_6 = 1995, X_7 = 2005, X_8 = 2010; X_5 - X_4 = 5 \times 5, X_6 - X_5 = 7 \times 5, X_7 - X_6 = 2 \times 5, X_8 - X_7 = 5$	$X_2 = 1934, X_9 = 1942, X_5 = 1960, X_{10} = 1966, X_{11} = 1972, X_{12} = 1986, X_3 = 2004, X_8 = 2010; X_9 - X_2 = 4 \times 2, X_5 - X_9 = 4 \times 2, X_{10} - X_5 = 3 \times 2, X_{11} - X_{10} = 3 \times 2, X_{12} - X_{11} = 7 \times 2, X_3 - X_{12} = 9 \times 2, X_8 - X_3 = 3 \times 2$
镜泊湖水库	$X_1 = 1953, X_2 = 1956, X_3 = 1971, X_4 = 1983, X_5 = 1986, X_2 - X_1 = 3, X_3 - X_2 = 5 \times 3, X_4 - X_3 = 4 \times 3, X_5 - X_4 = 3$	$X_2 = 1956, X_6 = 1960, X_7 = 1964, X_8 = 1972, X_5 = 1986, X_9 = 2002; X_6 - X_2 = 2 \times 2, X_7 - X_6 = 2 \times 2, X_8 - X_7 = 4 \times 2, X_5 - X_8 = 7 \times 2, X_9 - X_5 = 8 \times 2$	$X_1 = 1953, X_{10} = 1957, X_3 = 1971, X_4 = 1983, X_{11} = 1985, X_{12} = 1987, X_{13} = 1991; X_{10} - X_1 = 2 \times 2, X_3 - X_{10} = 7 \times 2, X_4 - X_3 = 6 \times 2, X_{11} - X_4 = 2, X_{12} - X_{11} = 2, X_{13} - X_{12} = 2 \times 2$
丰满水库特枯水年	$X_1 = 1958, X_2 = 1970, X_3 = 1978, X_4 = 1982, X_5 = 1992; X_2 - X_1 = 6 \times 2, X_3 - X_2 = 4 \times 2, X_4 - X_3 = 2 \times 2, X_5 - X_4 = 5 \times 2$		

对东北地区洪灾样本、丰满水库及其邻近流域的4类样本进行分析,可知其来水量的特征值均具有不完全的可公度性,样本可公度性的概周期不唯一。可公度方法是求异方法,单凭样本年份进行加减确定的只能是可能发生的年份,三元、五元、七元可公度数前几位存在不一致的情况,需要综合对多元可公度计算结果进行综合评判。

## 2.2 可公度数计算结果与分析

### 2.2.1 特丰水年可公度数计算结果与分析

根据东北地区、白山水库、丰满水库、云峰水库、镜泊湖水库的样本数据,以2000—2018年为预报年,将

已有的样本年中的2000年后的样本值除去,分别计算出2000—2018年的五个样本中的可公度数,见表2。由表可知,三元可公度数最大值重合的年份只有东北地区的2004年和云峰水库的2004年;最小值重合的年份只有云峰水库的2011年和镜泊湖水库的2011年。东北地区、白山水库、丰满水库、云峰水库以及镜泊湖水库的极丰、丰水年的年份并不一致,不能仅基于三元可公度数进行判别。五元可公度数分析结果表明,最大值年份均不重合,位于2000—2005年区间范围内的年份较多;最小值年份均不重合,位于2016—2018年区间范围内的较多。七元可公度数分析结果

表明,白山水库的可公度数波动较小,其他可公度数变化较大,最大值在 2001 年的概率较大,最小值在 2018 年的概率较大。

### 2.2.2 特枯水年可公度数计算结果与分析

以松花江流域特枯水年为样本,对其可公度性进行分析可知,丰满水库特枯水年的可公度性较好。而对于 1989 年、1997 年,二者缺乏其他由因子共同构成的可公度集合。基于可公度的方法对其预报年的可公

度数进行计算,见表 2。分析可知,可公度数最大值为 2001 年,最小值年为 2015 年,若是由可公度数大的年份其发生极端事件的概率大的原则来判断,2001 年发生特枯水年的概率最大,2015 年发生特枯水年的概率最小。实际径流数据表明松花江流域 2015 年是特枯水年,2001 年是平水年,与可公度方法的计算结果不一致,需要综合三元、五元、七元可公度数综合分析预报极端径流年状况。

表 2 可公度数计算结果特征值

	三元可公度数			五元可公度数			七元可公度数		
	最大值年份	最小值年份	差值	最大值年份	最小值年份	差值	最大值年份	最小值年份	差值
东北特大洪灾	2004、2006	2007	10	2004	2003	150	2004	2003	825
白山水库	2002	2003、2010、2016、2018	3	2002	2016	23	2001	2018	142
丰满水库	2005	2014	6	2005	2014	57	2001	2018	311
云峰水库	2000、2001、2003、2004、2009	2011	3	2000、2003	2017	38	2001	2018	319
镜泊湖水库	2002	2011		2002	2018	16	2002	2018	1024
丰满水库特枯水年	2000、2001、2004、2009	2010、2015、2018		2001	2015		2001	2015	

### 2.3 Topsis-模糊综合评判结果与分析

本次研究选用的站点是松花江流域及主要控制站点,对每个站点进行三元、五元、七元可公度数计算分析,可得其各自对应预报年份的丰枯排序。运用点面结合可公度法,可对五个样本的预报年排序进行综合评判,得到预报年的丰枯排序结果。

若特丰水年发生的概率最大,则其特枯水年发生的概率最小,将特丰水年的排序和特枯水年排序的补集(样本容量-特枯水年排序)进行综合评判,最终排序结果为松花江流域未来发生特丰水年或是大水年的排序,其排序越靠前,则其发生特丰水年可能性越大<sup>[11]</sup>。

由图 1 可知,如果将东北地区、白山水库、丰满水库、云峰水库、镜泊湖水库的可公度计算结果的前五位值作为松花江流域的极端径流年,由于样本的可公度元在二、三、五的较多,越靠前的年份可公度数比越靠后的大,因而无法判别。运用 Topsis-模糊综合评判的方法对三元、五元、七元的可公度数进综合分析,结果见表 3。由表 3 可知,丰水年靠前的年份中只有东北地

区对应的 2013 年、丰满水库对应的 2005 年和镜泊湖水库对应的 2005 年,其余前五位的年份多为枯水年。根据丰满水库特枯水年样本系列,对 2000—2018 年进行预报,其前五位中枯水年有 4 个,也局限于年份靠前的样本中。通过增强样本邻近年份的可公度数进行预报,较远年份的可公度数较小。

对特丰水年、特枯水年排序的补集进行综合评判,能够有效地将离样本年较远且排位靠前的特丰水年的概率进行放大,同时进一步综合检验邻近年是否会发生特丰水年。对于特丰水年排位靠前,且特枯水年排位靠后的年份,发生特丰水和大水年的概率较大,反之亦然。由综合评判分析结果可知,2005 年丰水年得到了保留,同时对 2013 年、2010 年特丰水年的可能性进行了放大,预报结果存在误差使得 2015 年的特枯水年、2002 年的枯水年进入了前五位。2002 年和 2005 年进入前五位,说明该方法对于临近年份的特征能够加以保留;2010 年、2013 年进入前五位,说明该方法对未来年份的特征能够进行放大。其进入前五位的年份



中,包含2个特丰水年,1个丰水年,预报准确率为60%。综合评判方法能够挖掘可公度数中蕴藏的信

息,提高极端径流预报的准确率。

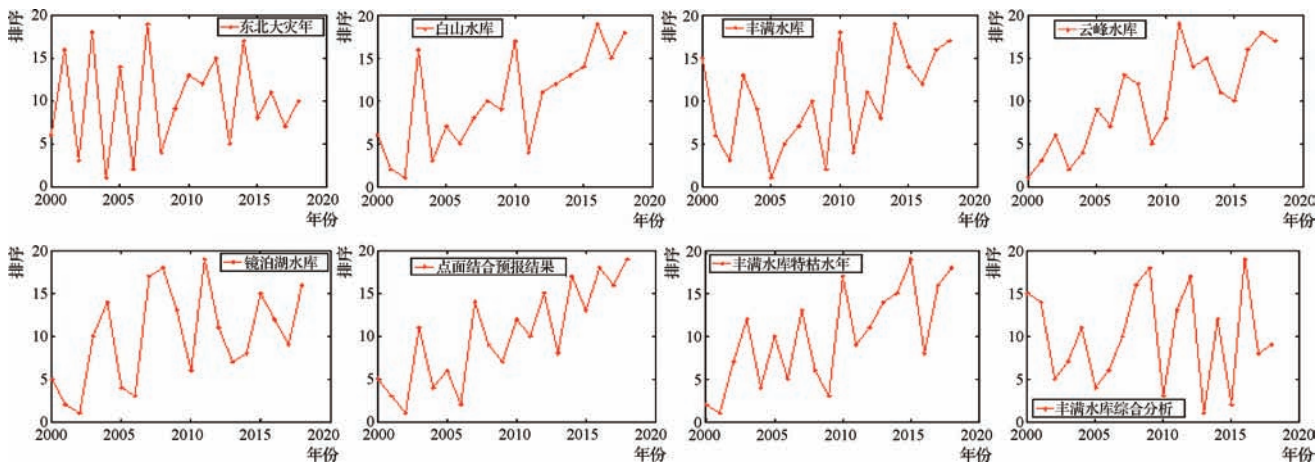


图1 Topsis-模糊综合评价排序结果(排序值越小,排序越靠前)

表3 不同站点的综合排序前五年来水特征

序号	东北大灾年	白山水库	丰满水库	云峰水库	镜泊湖水庫	点面结合结果	丰满水库特枯水年结果	丰满水库综合结果(特丰)
1	2004(偏枯)	2002(枯)	2005(丰水)	2000(枯水)	2002(枯)	2002(枯)	2001(平水)	2013(特丰)
2	2006(枯水)	2001(平水)	2009(枯水)	2003(特枯)	2001(平水)	2000(枯水)	2000(枯水)	2015(特枯)
3	2002(枯)	2004(偏枯)	2002(枯)	2001(平水)	2006(枯水)	2009(枯水)	2009(枯水)	2010(特丰)
4	2008(枯水)	2011(枯水)	2011(枯水)	2004(偏枯)	2005(丰水)	2003(特枯)	2004(偏枯)	2005(丰)
5	2013(特丰)	2006(枯水)	2006(枯水)	2009(枯水)	2000(枯水)	2006(枯水)	2006(枯水)	2002(枯)

## 2.4 分析与讨论

由上述分析可知,仅基于三元、五元、七元可公度数对未来的年份进行预报,其临近年份的可公度数较大。基于极端丰水年和极端枯水年综合评判的方法,对于极端丰水年显著、极端枯水年不显著的特性进行放大,评判出易发生极端径流的年份。从丰满水库综合评判结果来看,2013年、2010年特丰水年排在1、3位,2005年丰水年排在第4位,说明该方法能够对极端丰水年进行有效识别。而2015年为特枯水年排在第2位,2002年为特枯水年排在第5位,说明该方法依然存在虚报现象。

## 3 结语

本文针对如何综合利用多元可公度方法提高极端径流年预报准确率的问题,从预报年可公度数基本规律分析与挖掘的角度,运用Topsis-模糊综合评价法对

点面结合可公度法进行改进,在点面结合可公度数计算的基础上,综合三元、五元、七元可公度数,结合极端丰水特征和极端枯水特征,预报极端径流年。该方法提高了极端径流年预报的准确率,但是依然存在虚报的情况,需要结合其他尺度的预报因子对预报年特征进一步判别。

## 参考文献

- [1] 李国英. 集聚推动新阶段水利高质量发展的奋进力量[J]. 水利建设与管理, 2021, 41(7): 1-4.
- [2] 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.
- [3] 石凝. 可公度信息预报方法用于洪水灾害的试验研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 1995(3): 55-59.
- [4] 位绍文, 刘滨, 赵立波, 等. 基于周期预测的山东旱灾年度分析[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2011, 28(2): 96-98.

(下转第78页)



# 近 50 年乌江流域降雨演变趋势研究

李长江 吴海宽 付 杰

(贵州省水利科学研究院, 贵州 贵阳 550002)

**【摘 要】** 本文选用了乌江流域 32 个气象站 1961—2015 年共 55 年降雨系列资料,采用滑动平均法、Mann-Kendall 检验法、Morlet 小波分析法等对乌江流域降雨特性进行全面分析,揭示乌江流域的降雨特性和演变趋势,为当地经济社会发展、水资源的开发利用等提供决策依据。分析结果表明,近 50 年来乌江流域降雨量有减少趋势,下降幅度为 14.8mm/10 年,下降趋势不明显,同时降雨分别存在 5 年、7 年、18 年、28 年的振荡周期,其中 28 年周期振荡最为强烈。

**【关键词】** 乌江流域;降雨特性;时空分布;演变趋势

中图分类号: TV125

文献标志码: A

文章编号: 2097-0528(2022)11-073-06

## Study on rainfall evolution trend in Wujiang River Basin in recent 50 years

LI Changjiang, WU Haikuan, FU Jie

(Guizhou Provincial Water Conservancy Research Institute, Guiyang 550002, China)

**Abstract:** In this paper, a series of rainfall data from 32 meteorological stations in the Wujiang River Basin for 55 years from 1961 to 2015 are selected, and the moving average method, Mann-Kendall test method, Morlet wavelet analysis method are used to comprehensively analyze the rainfall characteristics in the Wujiang River Basin, so as to reveal the characteristics and evolution trend of rainfall in the Wujiang River Basin and provide decision-making basis for local economic and social development as well as the development and utilization of water resources. The results show that the rainfall in the Wujiang River Basin has a decreasing trend in the past 50 years, with a decreasing range of 14.8mm/10 years, and the decreasing trend is not obvious. At the same time, the rainfall has an oscillating period of 5, 7, 18 and 28 years, and the oscillating period of 28 years is the strongest.

**Keywords:** Wujiang River Basin; rainfall characteristics; temporal-spatial distribution; evolution trend

降水是形成径流的重要环节,长期以来,由于人类的不断活动,自然界原有的平衡被打破,气候变化从局部变化发展到全球变化,引发了全球气温升高、冰川融化、极端天气、水旱灾害频发等系列问题。研究变化条件下区域水资源的基本情况及其演变趋势,及时掌握区

域水资源的变化,对区域水资源合理配置以及防旱抗旱、经济社会发展、水资源安全等具有重要意义。目前,针对降雨趋势和变化、周期分析方面的研究,采用的方法有滑动平均法、回归分析法、Rescaled Range Analysis 分析法、Mann-Kendall 检验法、小波分析法等。

收稿日期: 2022-04-02

基金项目: 贵州省水利厅科技支撑项目(KT201816)

作者简介: 李长江(1983—),男,高级工程师,主要从事水文学与水资源方面研究。

莫崇勋等<sup>[1]</sup>采用 Mann-Kendall 方法对澄碧河流域近 50 年降雨径流变化趋势进行了分析;王孝礼等<sup>[2]</sup>采用 Rescaled Range Analysis 分析法对水文时序趋势和变异点进行了研究,以水库的来水量为例,分析了其变异趋势,并对变异点进行了诊断研究;张平等<sup>[3]</sup>采用 Mann-Kendall 检验法、小波分析法等对淮河蚌埠以上流域近 50 年来降水时空变化特征进行了研究,分析了该地区年径流的演变趋势、突变点和径流演变周期。

乌江流域是贵州省最大的水系,占贵州省面积的 37.5%,对贵州经济社会发展起着至关重要的作用。流域已开发梯级电站 11 座,总装机容量 985 万 kW,流域总面积 9.5 万 km<sup>2</sup>,现有耕地面积 21056.33km<sup>2</sup>,人口 2018.74 万人<sup>[4-5]</sup>。研究乌江流域降雨时空分布及演变趋势,揭示其不同时间尺度上的降雨特性和变化规律,为区域水资源的开发利用、优化调度、防灾减灾等有着重要意义。对于乌江流域的研究,徐成汉等<sup>[6]</sup>采用 Mann-Kendall 法、spearman 秩次检验对乌江流域降水径流响应关系进行了研究,结果表明流域径流深呈现一定的减少趋势,但径流系数变化不明显;王俊超等<sup>[7]</sup>对乌江流域极端降水时空分布特征及重现期进行了分析研究,结果显示流域暴雨等级面雨量、日数和强度随时间变化呈现上升趋势,流域平均年最大日降水量年际变化比较明显,下游和中下游平均极端持续强降水次数趋势增加,上游呈现明显减小趋势;高红

梅等<sup>[8]</sup>根据流域日降雨量资料,分析研究了乌江流域季、主汛期和年降水量,结果显示乌江流域平均降水量有减少趋势,且有明显的季节变化,春秋呈现减少趋势,夏季呈增加趋势。本文选取了乌江流域 32 个气象站点 1961—2015 年的降雨系列资料,采用滑动平均法、Mann-Kendall 非参数检验法、Morlet 小波分析法<sup>[9]</sup>等对流域降雨资料进行全面分析,对流域降雨变化特征和演变规律进行深入研究,掌握其不同时间尺度上的降雨特性和变化规律,以期对区域水资源利用、防洪减灾、经济社会发展等提供决策支持。

## 1 研究资料与方法

### 1.1 研究区概况

乌江发源于贵州省西北面乌蒙山脉东麓羊角山最高峰东北面——威宁县草海镇绿水塘,横贯贵州省,于重庆市的涪陵区汇入长江,干流全长 1044km,天然落差 2391m,平均比降 2.293‰。流域大小支流共 163 条,其中,流域面积在 1000km<sup>2</sup> 以上的一级支流 16 条;大于 10000km<sup>2</sup> 的 1 条;5000~10000km<sup>2</sup> 的 3 条;2500~5000km<sup>2</sup> 的 4 条;1000~2500km<sup>2</sup> 的 8 条<sup>[10]</sup>。1000km<sup>2</sup> 以上的二级支流有 7 条。本文选取了乌江流域 32 个气象站点 1961—2015 年共计 55 年降雨系列资料,对乌江流域近 50 年降雨特性变化进行深入研究。研究区乌江流域水系及气象站地理空间分布见图 1。

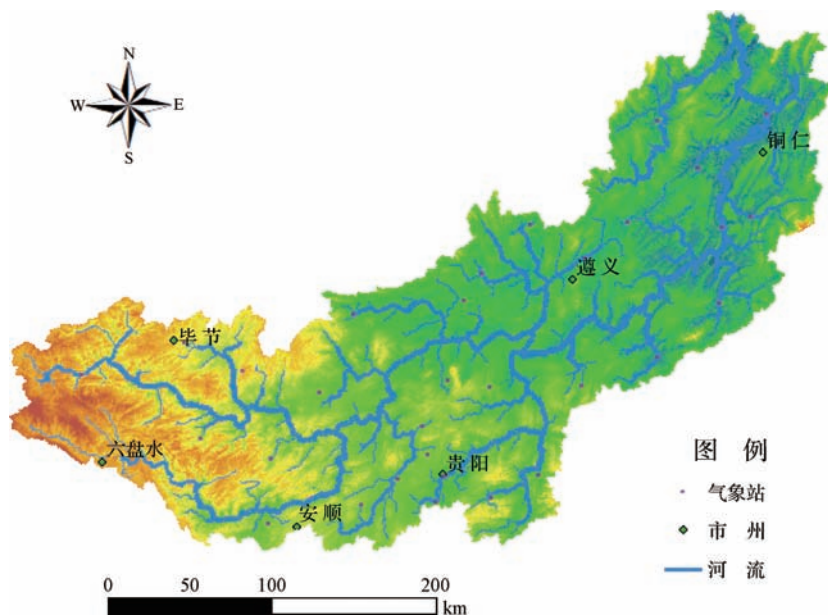


图 1 乌江流域研究区水系及气象站点示意图

## 1.2 滑动平均法

对于序列  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , 改变滑动长度使得序列之间相关度增加, 通过时间序列的平滑值来显示序列的变化趋势, 滑动平均序列表示为

$$\bar{x}_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_{i+j-1} \quad (j = 1, 2, \dots, n-k+1) \quad (1)$$

式中:  $k$  为滑动长度。

## 1.3 Mann-kendall 趋势检验

Mann-Kendall 检验法是一种非参数检查方法<sup>[11-12]</sup>, 广泛应用于时间序列的趋势变化分析中。设时间序列  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , Mann-Kendall 统计检验为

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=i+1}^n \text{sign}(x_k - x_i) \quad (2)$$

其中

$$\text{sign}(\theta) = \begin{cases} 1, & \theta > 0 \\ 0, & \theta = 0 \\ -1, & \theta < 0 \end{cases} \quad (3)$$

统计量:

$$Z_c = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{var}(S) = \frac{[n(n-1)(2n+5)]}{72} \quad (5)$$

$Z_c$  的正负分别代表样本序列变化趋势, 若  $Z_c > 0$ , 则序列呈上升趋势; 若  $Z_c < 0$ , 则序列呈下降趋势; 给定置信区间  $\alpha$  (显著水平), 若  $|Z_c| > Z_{1-\alpha/2}$ , 拒绝原假设  $H_0$ , 表示序列呈明显上升或下降趋势; 若  $|Z_c| < Z_{1-\alpha/2}$ , 原假设  $H_0$  成立, 表示时间序列无明显变化趋势。

指标  $\beta$  表示变化趋势的大小和方向:

$$\beta = \text{median}\left(\frac{x_i - x_j}{i - j}\right) \quad (6)$$

若  $\beta > 0$ , 表示呈上升趋势; 若  $\beta < 0$ , 表示呈下降趋势<sup>[13]</sup>。 $\beta$  数值越大, 表示趋势越显著。

## 1.4 Mann-Kendall 突变检验

对于一个给定的时间序列  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , 共有  $n$  个样本, Mann-Kendall 突变检验<sup>[14]</sup>构造一个序列  $S_k$ :

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k = 2, 3, \dots, n) \quad (7)$$

其中

$$r_i = \begin{cases} 1, & x_i > x_j \\ 0, & x_i \leq x_j \end{cases} \quad (j = 1, 2, \dots, i) \quad (8)$$

定义统计量:

$$UF_k = \frac{[S_k - E(S_k)]}{\sqrt{\text{var}(S_k)}} \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

其中:  $UF_1 = 0$ ,  $E(S_k)$  和  $\text{var}(S_k)$  是累计数  $S_k$  的均值和方差,  $x_1, x_2, \dots, x_n$  相互独立, 且有相同连续分布时, 由下式得出:

$$E(S_k) = \frac{n(n-1)}{4} \quad (10)$$

$$\text{var}(S_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (11)$$

$UF_k$  为标准正态分布, 按时间序列计算, 给定显著性水平  $\alpha$ , 若  $|UF_k| > U_{\alpha/2}$ , 则表明序列存在明显的趋势变化。按逆序列  $x_n, x_{n-1}, \dots, x_1$  重复以上过程, 使  $UF_k = -UB_k$ 。将  $UF_k$  和  $UB_k$  两个统计量曲线和显著性水平线绘制在同一图上,  $UF_k > 0$  表明序列呈上升趋势, 反之呈下降趋势。当超过临界线时, 表明上升或下降趋势明显, 若  $UF_k$  和  $UB_k$  曲线相交, 且交点在上下两条临界线之间, 则交点对应的时刻为突变开始的时间点<sup>[15]</sup>。

## 1.5 Morlet 小波周期性分析

小波分析是一种信号的时间尺度分析方法, 能在时频两域表征信号局部特征, 广泛运用于水文气象等时间序列分析中<sup>[16-18]</sup>。本文采用 Morlet 小波<sup>[19-20]</sup>对时间序列进行连续小波变换, 连续小波变换为

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \bar{\varphi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (12)$$

式中:  $W_f(a, b)$  为小波变换系数;  $f(t)$  为一个信号或平方可积函数;  $a$  为伸缩尺度;  $b$  平移参数;  $\varphi(t)$  为 Morlet 母小波;  $\bar{\varphi}\left(\frac{t-b}{a}\right)$  为  $\varphi\left(\frac{t-b}{a}\right)$  的复共轭函数。

设函数  $f(k\Delta t)$  ( $k = 1, 2, \dots, N$ ;  $\Delta t$  为取样间隔), 则式(12)的离散小波变换形式为

$$w_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Delta t \sum_{k=1}^n f(k\Delta t) \varphi\left(\frac{(k\Delta t - b)}{a}\right) \quad (13)$$



对序列做小波变换后得到的小波系数是序列在不同时间尺度和不同时间位置上的投影,可以用来描述水文序列的组成结构和多时间尺度变化特性。将小波变换系数的平方在  $b$  域上进行积分,得到小波方差  $\text{var}(a)$ , 它能反映信号波动的能量随尺度  $a$  的分布,进而可确定时间序列中存在的主周期<sup>[21]</sup>。

$$\text{var}(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |w_f(a, b)|^2 db \quad (14)$$

## 2 分析结果

### 2.1 降雨时空分析

根据流域内 32 个雨量站 1961—2015 年降雨量资料,采用泰森多边形法推算流域面降雨,得出流域多年降雨量为 1117mm。从图 2 可以看出,丰水年为 1964 年、1967 年、1977 年、1980 年、1996 年、2008 年、2014 年,其中 1977 年降雨量最丰,为 1377mm;枯水年为 1966 年、1981 年、1985—1990 年、2006 年、2009—2011 年、2013 年,其中 2011 年最少,为 805mm。从图 3 可以看出,流域降雨呈现空间分布不均现象,西北为流域降雨量低值区,极小值出现在威宁—赫章一带,降雨量为 800~900mm;西南部为流域降雨量高值区,极大值出现在织金—普定一带,降雨量为 1300~1400mm;中部地区修文、开阳、瓮安、播州等地处于全流域平均水平,降雨量为 1000~1200mm;东部地区思南、沿河、德江、凤冈一带为流域降雨量次高区,降雨量为 1100~1250mm。

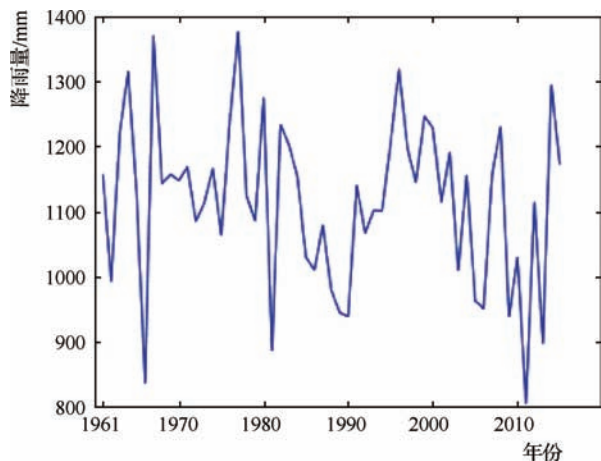


图2 历年降雨量曲线

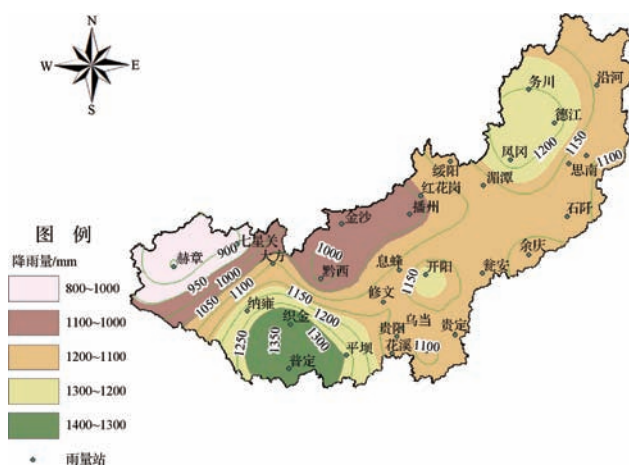


图3 降雨量空间分布情况

### 2.2 降雨演变趋势分析

根据流域 1961—2015 年面降雨序列资料,通过 5 年滑动平均,得流域 5 年滑动平均序列(见图 4),从图中可以看出,流域 1961—1982 年期间丰枯交替较为频繁,变化不明显,1982 年以后,丰枯出现大幅波动变幅,滑动平均序列呈现下降趋势。总体上看,分析时段内降雨量的倾向率为  $-14.8\text{mm}/10$  年,降雨量总体上呈下降趋势。

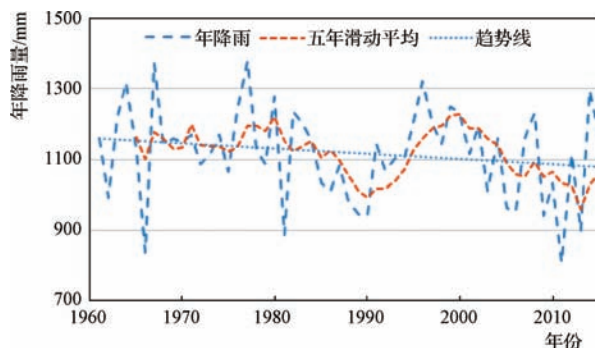


图4 年降雨量趋势及五年滑动平均

根据 Mann-kendall 趋势检验,乌江流域降雨量趋势系数  $Z_c = -1.22 < 0$ , 序列呈下降趋势;但没有超过 95% 的显著性水平  $Z_{\alpha/2} = \pm 1.96$ , 说明流域降雨下降趋势变化不明显,根据计算,  $\beta = -1.49 < 0$ , 反映出流域降雨呈下降趋势。

将流域 1961—2015 年面降雨序列进行 Mann-kendall 突变检验,结果表明(见图 5),在 0.05 的显著性水平下,流域 55 年时间内  $UF$  值大部分年份小于零且总

体有减小的趋势,说明这段时间内,流域降雨呈现减小的趋势,与滑动平均法、Mann-Kendall 统计检验法结果一致。 $UF_k$  值和  $UB_k$  值在分析时段内出现了 6 个交点,分别在 1980—1981 年、1981—1982 年、1984 年、1994—1995 年、2001 年、2002—2003 年。1961—1984 年  $UF_k$  值在零值附近徘徊,说明降雨量趋于平稳,1981—1994 年  $UF_k$  值逐年减小,期间降雨量呈现减少趋势,1994—2003 年  $UF_k$  值逐年增加,降雨量有增加趋势,但没有形成有效突破,2003 年以后,  $UF_k$  值又呈现减少趋势,流域内降雨由增加趋势转为减少趋势。在整个分析时段内,  $UF_k$  值总体处于零值下方,总体上流域降雨呈现减少的趋势。

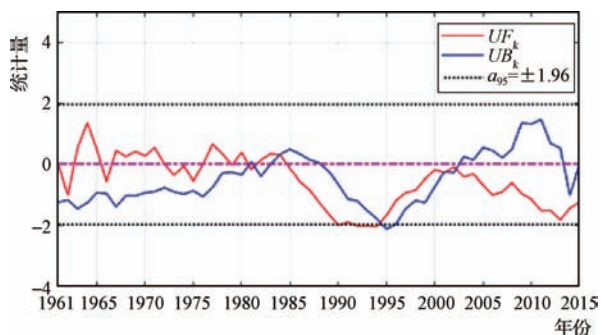


图5 年降雨量 M-K 突变检验曲线

### 2.3 降雨周期分析

将序列资料进行一维连续小波变化,绘制小波系数图(见图6),然后根据小波系数计算小波方差,并绘制相应的小波方差图(见图7)。同一时间尺度下,小波系数正值等值线代表丰水期,负值等值线代表枯水期,零值等值线则代表平水期。根据小波系数实部图,在 55 年时间序列中,降雨量大致存在 3 年、5~7 年、7~10 年、16~18 年、27~30 年几种时间尺度的枯、丰变化振荡周期;根据小波方差图,存在 4 个明显的极值,分别为 5 年、7 年、18 年、28 年,其中 28 年周期振荡最强,说明乌江流域降雨量变化的主周期为 28 年,18 年、7 年、5 年为流域降雨的第二、三、四周期,其中 5 年周期几乎贯穿于整个序列,流域降雨在小尺度 5 年周期内降雨丰、枯交替最为频繁。

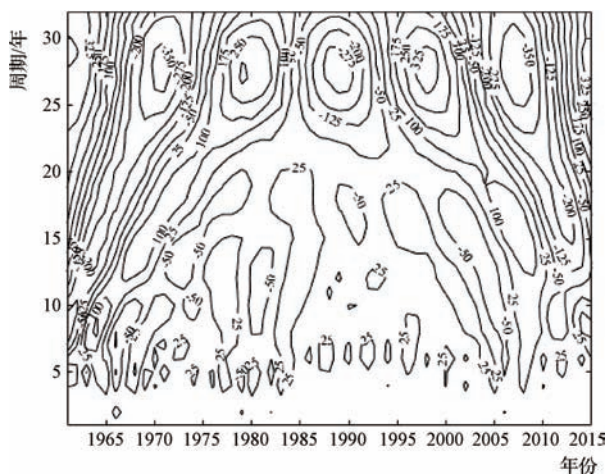


图6 小波系数实部等值线

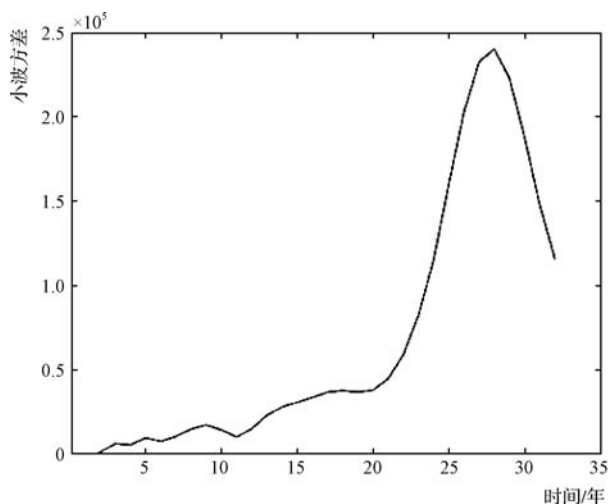


图7 小波方差

## 3 结论与建议

a. 根据对乌江流域 32 个站点 1961—2015 年降雨资料进行分析,流域内中东部降雨处于全流域平均水平,西南面和西北面是流域的降雨极值区,多值中心位于织金—普定一带,少雨区位于西北面的威宁—赫章一带。

b. 采用滑动平均法、M-K 趋势检验法、M-K 突变检验法对乌江流域 1961—2015 年流域面降雨进行分析,  $Z_c = -1.22 < 0$ , 演变趋势不明显。降雨量总体上呈减少趋势,但没通过置信度检验,减少趋势不显著。

c. 运用小波分析,对流域降雨系列进行连续小波变换,结果显示流域降雨呈现 5 年、7 年、18 年、28 年的振荡周期,其中 28 年的振荡周期较为明显,为流域降



雨变化的第一主周期。

d. 根据乌江流域降雨的趋势性和周期性变化规律,在流域水资源开发利用过程中,及时根据流域水资源的变化特点,优化用水结构,提高用水效率,加强节水力度,优化水资源调度,将区域环境变化研究同区域的可持续发展相结合,进一步减少降雨变化对经济、社会、环境、生态等方面造成的影响。◆

#### 参考文献

- [1] 莫崇勋,朱新荣,刘朋,等.近50年澄碧河流域降雨径流变化趋势及成因分析[J].广西大学学报,2019,44(4):1172-1175.
- [2] 王孝礼,胡宝清,夏军.水文时序趋势与变异点的R/S分析法[J].武汉大学学报,2002,35(2):10-12.
- [3] 张平,夏军,邹磊,等.近50年来淮河蚌埠以上流域降水时空变化特征分析[J].中国农村水利水电,2017(3):2-8.
- [4] 刘纯军.贵州乌江流域土地利用变化及其生态环境效应研究[D].贵阳:贵州师范大学,2021.
- [5] 王德怀,李旭东.贵州乌江流域人口与经济发展协调性研究[J].地理科学,2019年,39(3):477-478.
- [6] 徐成汉,唐勇.乌江流域降水径流响应关系研究[J].长江工程职业技术学院学报,2016年,33(4):10-16.
- [7] 王俊超,彭涛,王清.乌江流域极端降水时空分布特征及重现期分析[J].暴雨灾害,2019年,38(3):268-274.
- [8] 高红梅,严小冬,王丽.近50年乌江流域降水气候特性分析[C]//贵州省气象学会2013年学术年会论文集.贵阳:2013:228-233.
- [9] 和吉,吴亚冰,马明卫.辽宁省气温时空变化特征及其对农业的影响[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2021,42(2):86-94.

- [10] 贵州省水利厅.贵州河湖[M].贵阳:贵州省水利厅,2011.
- [11] 章诞武,丛振涛,倪广恒,等.基于中国气象资料的趋势检验方法对比分析[J].水科学进展,2013,24(4):490-491.
- [12] ZHANG Q,LIU CH L,XU CH Y,et al. Observed trends of annual maximum water level and stream flow during past 130 years in the Yangtze River basin, China[J]. Journal of hydrology,2006,324:255-265.
- [13] 彭薇,霍军军,许继军,等.鄱阳湖枯水期入湖径流变化特征分析[J].长江科学院报,2016,33(3):19-20.
- [14] 管晓祥,张建云,鞠琴,等.多种方法在水文关键要素一致性检验中的比较[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2018,39(2):52-34.
- [15] 邹磊,余江游,王飞宇,等.渭河流域极端降水时空演变规律及其对大气环流因子的响应[J].干旱区研究,2021,38(3):767-772.
- [16] 王文圣,丁晶,衡彤,等.水文序列周期成分和突变特征识别的小波分析法[J].工程勘察,2003(1):32-35.
- [17] 谢智博,穆兴民,高鹏,等.基于R/S和morlet小波分析的北洛河上游径流变化特征研究[J].水土保持研究,2022,29(2):3-6.
- [18] 王文圣,丁晶,李跃清.水文小波分析[M].北京:化学工业出版社,2005.
- [19] 韩知明,贾克力,杨芳,等.基于Morlet小波的呼伦湖流域降水多时间尺度分析[J].水土保持研究,2003,25(1):161-163.
- [20] YAO T,ZHAO Q,LI X Y,et al. Spatiotemporal variations of multi-scale drought in Shandong Province from 1961 to 2017[J]. Water supply,2021,21(2):525-531.
- [21] 冯禹昊,朱江玲.基于morlet小波的辽河径流量变化及其成因分析[J].水土保持研究,2019,26(2):210-213.

(上接第72页)

- [5] 王富强,许士国.长江流域洪水的可公度性及其预测研究[J].长江科学院院报,2008,25(6):23-27.
- [6] 门可佩.长江流域大洪水有序网络结构及其预测研究[J].南京信息工程大学学报,2014(2):175-181.
- [7] 夏军.水文灾变事件的一种可公度信息预测方法初探[J].武汉水利电力学院学报,1991,24(3):288-295.
- [8] 彭高辉,马建琴,贺渊博.基于可公度理论的关联规则算法在干旱中的预测研究[J].南水北调与水利科技,2013(2):

151-153.

- [9] 李文龙,李秀斌,王胜民.关于2013年辽河、第二松花江特大洪水的预测[J].水电厂自动化,2012(4):48-53.
- [10] 彭卓越,张丽丽,殷峻暹,等.基于点面结合方法的洪水预测研究[J].水利水电技术,2018,49(2):37-42.
- [11] 雷冠军,殷峻暹,刘惠敏,等.基于TOPSIS-模糊综合评判的模糊推理模型在开河预报中的应用[J].南水北调与水利科技,2017,15(4):7-12.



# 水利团体标准发展策略研究

杨清风 王海燕

(中国水利工程协会,北京 100055)

**【摘要】** 团体标准作为国家标准化体系的重要组成部分,具有不可替代、举足轻重的作用。本文概述了标准的作用及分类,分析了国家标准体系发展现状及存在的不足,论述了水利团体标准发展的必要性及发展水利团体标准的相应对策,可为中国水利工程协会开展水利团体标准制定工作提供参考。

**【关键词】** 水利;团体标准;策略

中图分类号: [TV-9]

文献标志码: B

文章编号: 2097-0528(2022)11-079-04

## Research on development strategy of water conservancy group standards

YANG Qingfeng, WANG Haiyan

(China Water Engineering Association, Beijing 100055, China)

**Abstract:** As an important part of the national standardization system, group standards play an irreplaceable and decisive role. This paper summarizes the function and classification of standards, analyzes the development status and shortcomings of the national standard system, discusses the necessity of the development of water conservancy group standards and the corresponding countermeasures, which can provide reference for China Water Engineering Association to develop water conservancy group standards.

**Keywords:** water conservancy; group standards; strategy

标准是体系、是框架,是按有关规定的一定程序,通过相对标准的流程与活动,并经有关方面共同协商,达成一致意见后,为开展有关活动,达到某种结果,而提供的一种规则或指导、指南,供有关方共同、重复使用的一种文件体系格式。标准化的最终目的是,解决某些现实问题或潜在问题,完成某种目标。实现标准化,要采用最佳、最便捷的程序。标准活动,即是从编制、建立、发布到实施、传播的全过程。

## 1 标准的作用及发展现状

### 1.1 标准的作用及分类

标准根本的作用是它能够实现从方案到现实的转化。标准化活动就是从无序状态中寻找有序秩序从而达到简单化、规范化的一种活动。标准在实施中,通过共同使用和重复使用,使事物形成统一化,规模化,从而达到既定目标。例如按照标准搭建实验室,对数据进行检测等。管理者需要按照产品标准、采购标准、操作规程、人员配备标准等完成实验室搭建,配合技术手

收稿日期: 2022-09-05

作者简介: 杨清风(1983—),女,工程师,主要从事水利行业团体标准管理工作。



段和管理方式进行功能演绎和数据分析,利用标准的系统集成将目标的实现简单化。国家 2017 年修订颁布的《标准化法》中明确规定了标准分类及范围,一是国家标准,二是行业标准,三是地方标准,四是团体标准,五是企业标准。按照国家标准使用性质不同,有强制和推荐之分。强制性标准由国家主导制定,多涉及健康、安全、生态环境等方面。推荐性标准,是基础通用的标准,在行业中,能起到引领、指导作用。按照上述说法,除了国家强制性标准以外的标准均属于推荐性质的标准。

## 1.2 我国标准发展现状

标准是经济活动和社会发展的技术支撑,是国家基础性制度的重要方面。标准化在推进国家治理体系和治理能力现代化中发挥基础性、引领性作用。我国标准体系为增加产品品种、实现专业化生产、提高产品质量、企业科学管理等提供了重要支撑,为国家实现资源合理利用、节约能源等创造了有效途径,为推广新材料、新技术、新产品,实现科技成果转化搭建了桥梁,为我国社会主义现代化建设提供了强有力的支撑。

随着国家经济社会和科学技术的发展,现行标准体系和标准化管理体制已经不能满足市场、科技快速发展的需求。如国家标准体系中的国家标准、行业标准、地方标准制定工作,均由政府部门主导编制并发布,存在制修订周期长、速度慢、标准供给不足的问题,跟不上产业的快速发展,与经济社会不能与时俱进,或者说在某种程度上严重制约了全社会的经济发展和整体进步。

企业标准由企业组织编制,发布范围也仅限于企业内部,或只供企业内部使用。受方方面面的条件限制,企业自身技术力量不足,研制新产品、改进新技术、制定标准,具有一定的局限性;不管企业规模多大,其生产的产品种类也是固定的,不可能做到包罗万象、无所不能,因此,在标准的推广应用上,只能局限在本企业范围内,向企业外推广有一定的难度。

2015 年,国务院印发《深化标准化工作改革方案的通知》,总体上要建立政府主导制定标准和市场自主

制定标准协同发展,协调配套的新型标准体系,提出培训发展团体标准,完善现有标准体系。新时期国家推动高质量发展、全面建设社会主义现代化国家,迫切需进一步加强标准化工作,优化标准化治理结构,增强标准化治理效能,提升标准国际化水平,构建高质量发展的标准体系。

## 2 水利团体标准制定的重要性

国家、行业、地方、企业四类标准,在制定、推广的时效与范围上,均存在一定的局限性,因此,急需推进社会团体标准的培育与发展,来充分激发市场现阶段主体的本能与活力,制定、供给能够满足时代社会发展需要的标准。

### 2.1 国家为团体标准提供了政策保障

国务院在 2015 年颁布的《深化标准化工作改革方案》(国发〔2015〕13 号)中,明确鼓励协会、商会、学会、联合会等具备相关能力的社会组织,参与制定实现社会市场和时代技术创新所急需的各类团体标准,有效增加市场自愿选用的标准供给量。质检总局、国家标准委在 2016 年颁布的《关于培育和发展团体标准的指导意见》(国质检标联〔2016〕109 号)中,要求社会团体充分激发制定、运用标准的活力,按照国务院“放、管、服”有关指示精神,参与制定团体标准,并明确了团体标准制定过程中,采用“自主制定、自由选择、自愿采用”的市场化运作模式。国家标准委、民政部在 2019 年颁布的《团体标准管理规定》中,指明社会团体应在章程规定的业务范围内,多关注新产业、新技术、新模式、新业态及其在社会发展中的状态和趋势,开展团体标准编制工作,填补前沿技术领域标准编制、应用的空白。同时,要求团体标准应高于或相当于国标、行标的相关技术要求,也规范了团体标准的制修订程序等。2021 年 8 月 2 日,中共中央 国务院印发《国家标准化发展纲要》,指明要充分发挥社会化团体组织的技术优势,鼓励其制定原创性、接地气的团体标准。国家标准委等十七部门在 2022 年联合颁布的《关于促进团体标准规范优质发展的意见》,围绕团体标准质量发展提出

了 10 项重要举措,对规范团体标准化工作,促进团体标准优质发展起到重要作用。

## 2.2 水利行业为团体标准提供了发展空间

水利行业技术标准,综合了全国水利行业内的所有水利实践经验和相关科学技术成果,并以此为基础,不断创新、完善,获得最佳秩序,成为水利行业内共同遵守、规范水利行业技术的标准文件。国家标准委在 2015 年启动了团体标准试点工作,中国水利工程协会等社团组织相继加入试点,开展了团体标准制修订管理工作。一方面促进了科技成果的转化,推动了行业科技进步。另一方面,团体标准及时反映行业需求,为水利行业国家标准、行业标准的实施起到了拾遗补阙和有效拓展的作用。2020 年 2 月,水利部印发《关于加强水利团体标准管理工作的意见》,明确提出在遵循开放、透明、公平原则基础上,提高水利团体标准有效供给量,为新时代水利改革发展提供技术支撑。同时,对团体标准的定位提出了明确规定,要求团体标准应适应市场和创新需要,聚焦新技术、新产业、新业态和新模式,填补标准空白,技术要求不得低于强制性国家标准和行业标准的有关要求。所以水利团体标准应是行业标准的查漏和补缺。

## 2.3 工程协会为团体标准提供了制定平台

中国水利工程协会,是全国性行业自律组织,是非营利性社会团体。目前,拥有单位会员 1.6 万余家,个人会员 65 万余人,涵盖水利施工、监理、质量检测、水利管理、勘察设计、咨询、科研等多个领域,而且囊括了其中的专业能人、行业顶尖高手,专家队伍专业能力强,为制定团体标准,提供了人才资源、技术平台及数据支撑。

2016 年以来,中国水利工程协会通过快速、灵活、高效的市场化工作机制,汇集会员自主创新、科技进步等技术成果,在团体标准制度建设、编制、宣贯、实施等方面取得了积极进展。同年,发布了《中国水利工程协会标准管理办法》和《中国水利工程协会标准管理工作细则》(中水协〔2016〕18 号)。几年来,中国水利工程协会遵循绿色可持续发展和高质量发展理念,聚焦

水利工程建设新产品、新工艺、新方法等方面研究,标准类别涵盖了管理类、服务类、评价类、方法类、技术类和产品类,内容突出水利特色,反映技术创新,适应市场需求。截至目前,已发布 17 项团体标准,填补了标准空白,得到了会员单位的广泛应用,取得了良好的实施效果,标准规范了工程施工技术,推动了水利科技进步,为水利改革发展做出了贡献。

## 3 水利团体标准的发展方向

国家团体标准仍处于发展阶段,团体标准工作任务重道远。中国水利工程协会作为水利行业团体标准的制定主体之一,主要任务是协调相关市场主体,制定高于国标和行标技术要求的团体标准,重点从以下几方面做好团体标准化工作。

### 3.1 建立专业队伍

加强标准化人才培养,广泛吸纳生产、经营、管理、建设、消费等一线实用领域的专业人才,汲取实践经验、实际经历,发挥企业作用,为制定水利行业团体标准提供基础类素材;接收检测、认证等质量、安全机构核心人才,为制定水利行业团体标准出谋划策;诚心聘请科研院所、高等学府等高等机构研究专家,行业领军人物,为制定水利行业团体标准指导、把关、定向,充分发挥高端院所的技术优势,为制定水利行业团体标准,提供具有创新性、前瞻性价值的遵循。

### 3.2 切实提高标准编制质量

制定水利行业团体标准是一项系统性工作,需要有一个健康的工作环境,庞大多层次的专家库,多维的制度体系和健全的监督机制。因此,要施行科学化、制度化、程序化、规范化管理,建立健全水利行业团体标准编制制度,明确相关责任人的工作职责,分解、细化水利行业团体标准制定工作,分门别类逐项落实到位,只有这样,编制出来的水利行业团体标准,才能提高标准编制质量,才能达到国家标准。

### 3.3 强化团体标准贯彻落实

一本新的水利行业团体标准出台后,不能束之高阁,闲置不用,要充分发挥它的应用价值,为水利行业





发展服务。应充分利用网络、报纸、杂志等媒介,采用信息化传播手段,利用中国水利工程协会主办的《中国水能及电气化》《水利建设与管理》《水资源开发与治理》三种期刊及水利“云播”平台,讲解水利行业团体标准的实质与内涵,做好团体标准的宣传、贯彻、落实、推广等工作,尽快推动协会标准在全国水利行业落地生根、有效实施与广泛应用。

### 3.4 加强科技成果转化利用

深入水利研发、生产一线,加强水利工程科技成果转化、创新技术交流研讨,鼓励企业将在生产一线中发现、研究、创新的具有应用前景或具有专利的新技术、新材料、新设备、新工艺等进行再巩固、再升华、再提

高,转化为团体标准,进而上升为水利行业标准,推动水利事业向着健康、稳定、快速、高质量的轨道发展,并创造一个又一个辉煌。

## 4 结 语

团体标准作为国家标准化改革发展的重要产物,为市场开辟了新的途径,所谓“一流企业做标准,二流企业做品牌,三流企业做产品”。水利行业团体标准有着很长的路要走,但发展的核心是各水利社团组织的专业能力和核心技术,团体标准供市场主体自愿采纳,在竞争中优胜劣汰,只有提高自身编制质量,才能被市场广泛接纳。◆

(上接第66页)

- [15] 罗鸿东,徐亚杏,王威.武都区北峪河流域泥石流成灾前期有效降雨量研究[J].中国农村水利水电,2014(3):25-27,30.
- [16] 李晶冰,杨海艳,白世彪,等.陇南山区北峪河流域滑坡敏感性制图和土地利用分析[C]//风险分析和危机反应的创新理论和方法:中国灾害防御协会风险分析专业委员会第五届年会论文集.南京:中国灾害防御协会风险分析专业委员会.2012:459-462.
- [17] 李晶冰,白世彪,王建.5·12汶川地震后陇南山区典型滑坡调查分析[J].防灾科技学院学报,2010,12(4):83-89.
- [18] 尚小平.北峪河洪水对钟楼滩新城区的安全威胁与对策[J].农业科技与信息,2009(14):34-35.
- [19] 赵冬至,曾思伟,库志萍.小流域重力地质现象的遥感动态

分析[J].遥感技术与应用,1994(3):6-11.

- [20] 李连第.武都城区“84·8·3”泥石流浅析[J].水土保持通报,1985(2):52-54,50.
- [21] 居金浩,彭亮,那扎凯提·托乎提,等.叶尔羌河流域水沙关系诊断与变异特征分析[J].人民黄河,2021,43(6):33-36,74.
- [22] 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.
- [23] 王文圣,丁晶,金菊良.随机水文学[M].2版.北京:中国水利水电出版社.2008.
- [24] 王随继,李玲,颜明.气候和人类活动对黄河中游区间产流量变化的贡献率[J].地理研究,2013,32(3):395-402.
- [25] 甘肃省第三次水资源评价报告[R].兰州:甘肃省水利厅,2020.

## 水利工程标准化管理工作动态

### 黄委:率先创建水利部标准化管理工程

提早安排,水管单位对照新的评价标准,加大工程维护力度,大幅提升工程面貌。各级主管部门积极参与给予指导帮助。8月,山东局所属3个水管单位32处工程通过水利部评价,成为水利部评价办法实施以来全国首批通过评价工程;9月,河南局所属4个水管单位14处工程通过黄委初评,已上报水利部申请评价。目前,黄委已对近年来申报水利工程标准化管理评价单位做出部署安排和工作计划,全面推进标准化管理工作落实落地。

(来源:黄河水利委员会)

# 水利部调水管理司负责同志解读 《调水工程标准化管理评价标准》

近日，水利部制定出台了《调水工程标准化管理评价标准》（以下简称《评价标准》）。水利部调水管理司负责同志就《评价标准》进行了解读。

## 一、《评价标准》出台的背景是什么？

2022年3月，水利部制定出台的《关于推进水利工程标准化管理的指导意见》（以下简称《指导意见》）和《水利工程标准化管理评价办法》（以下简称《评价办法》）将已建成运行的调水工程纳入适用范围，并明确调水工程评价标准另行制定，为制定《评价标准》及推进调水工程标准化管理提供了制度依据。

党的十九大提出要加快水利基础设施网络建设，十九届五中全会对实施国家水网重大工程作出战略部署。党的二十大提出优化基础设施布局、结构、功能和系统集成，构建现代化基础设施体系。调水工程是国家水网的重要组成部分，提升工程运行管理能力和水平，推进管理规范、智慧化、标准化，对加快构建国家水网、发挥水网运行整体效能意义重大。因此，编制《评价标准》、推进调水工程标准化管理十分必要。

## 二、《评价标准》编制的思路是什么？

作为《指导意见》和《评价办法》的配套措施，编制《评价标准》首先要贯彻落实《指导意见》明确的标准化指导思想、管理目标、管理要求，遵循《评价办法》确定的标准化管理评价的具体范围、程序、条件等，同时要体现调水工程的特点。

（一）落实国家水网建设总体要求。调水工程作

为国家水网的重要一环，应落实“系统完备、安全可靠，集约高效、绿色智能，循环通畅、调控有序”的总体要求，加快推进工程标准化管理工作，确保工程运行安全和效益持续发挥。

（二）体现调水工程特点。调水工程作为组合性、系统性工程，具有线路长、单项工程多（包括水库、水闸、堤防、泵站、渠道、管涵等）、调度管理复杂、影响面广等特点，调水工程标准化管理评价应体现整体性特点，各单项工程标准化管理是进行整体评价的前提。

（三）促进管理水平提高。《评价标准》编制要把握好基本要求和水利部评价标准的衔接协调，把握好专业性和管理性的结合点，兼顾不同层次管理水平，鼓励先进做法，引导促进管理单位不断提升管理水平。

## 三、《评价标准》的主要内容是什么？

根据《评价办法》，评价按照“标准化基本要求”和“水利部评价标准”两个层次确定评价要求，“标准化基本要求”为省级制定标准化评价标准的基本要求，“水利部评价标准”为申报水利部标准化评价的标准，规定了评价内容及要求、标准分和评价指标及赋分。

调水工程标准化管理评价包括整体评价和单项工程评价。在对调水工程整体评价前，工程所含的水库、水闸、堤防、泵站、渠道（渡槽）、管涵（隧洞、倒虹吸）等6类单项工程均应满足单项工程评价标准。《评价标准》对应分为整体评价标准和单项评价标准。考虑水利部已明确水库、水闸、堤防、泵站



4类单项工程评价标准,《评价标准》在提出调水工程整体评价标准的同时,补充编制了渠道(渡槽)及管涵(隧洞、倒虹吸)2类单项工程评价标准,并分别明确“标准化基本要求”和“水利部评价标准”两部分内容。

#### (一) 调水工程整体评价标准

为合理评价调水工程整体运行管理的全过程,特别是体现国家水网建设的要求,调水工程整体评价标准分为系统完备、安全可靠、集约高效、绿色智能及循环通畅调控有序5个类别进行评价,总分1000分。包括:系统完备200分、安全可靠200分、集约高效250分、绿色智能150分、循环通畅调控有序200分。重点突出工程安全、供水安全、水质安全,充分考虑工程统一性、效益可持续性、调度通畅性、信息化赋能等管理需要。此外为体现《标准》的引导性作用,对于标准化先进做法采用设置加分项的方式予以鼓励,在信息化(4分)、工程效益(4分)、管理措施(2分)等方面设置加分项,加分项共计10分。

#### (二) 新增单项工程评价标准

渠道(渡槽)及管涵(隧洞、倒虹吸)2类单项工程评价标准,按照《指导意见》分为工程状况、安全管理、运行管护、管理保障、信息化建设5个类别,总分1000分,包括:工程状况230分、安全管理280分、运行管护210分、管理保障180分、信息化建设100分。

### 四、调水工程标准化评价方式是什么?

调水工程标准化评价方式与《评价办法》保持一致,在所含全部单项工程均满足标准化要求的基础上,整体评价总分达到920分(含)以上,且各类别评价得分不低于该类别总分的85%,可认定为水利部标准化工程。对单项工程,初评方式由负责初评的单位根据工程实际情况确定,可分段分类进行评价;水利部评价选取一定比例的工程进行复核。

考虑调水工程组合性、系统性特点,调水工程标准化评价原则上以工程整体为单元进行评价;涉

及多个水管单位的,也可以按照水管单位分段进行评价。

### 五、调水工程标准化评价流程是什么?

调水工程按照《指导意见》和《评价办法》确定的程序进行申报、评价工作。

(一) 申报。省级水行政主管部门负责本行政区域内所管辖调水工程申报水利部评价的初评、申报工作。流域管理机构负责所属调水工程申报水利部评价的初评、申报工作。跨省调水工程,原则上由统一的水管单位初评后,直接申报水利部评价;涉及多个水管单位的,也可分段由省级水行政主管部门负责申报水利部评价的初评、申报工作。

调水工程通过初评后,可申报水利部评价。

(二) 评价。申报水利部评价的工程,由水利部按照工程所在流域委托相应流域管理机构组织评价。流域管理机构所属或涉及多个流域管理机构的工程,由水利部或其委托的单位组织评价。评价时,主要对调水工程进行整体评价,同时选取部分单项工程进行复核。如一个单项工程复核不满足单项工程评价标准,则调水工程不能认定为水利部标准化工程。

### 六、下一步推进调水工程标准化工作考虑是什么?

按照《指导意见》确定的目标,2025年前大中型调水工程基本实现标准化、2030年前大中小型调水工程全面实现标准化。

下一步,我们要组织流域管理机构、省级水行政主管部门按照《指导意见》确定的工作内容,推进调水工程标准化工作,提升调水工程标准化水平。选取一些管理水平较高、基础条件较好的调水工程先行先试,认定一批水利部和省级标准化工程,积累经验、逐步推广,充分发挥示范带动作用。

(来源:水利部网站,网址:[http://dsgl.mwr.gov.cn/tzgg/202211/t20221109\\_1603954.html](http://dsgl.mwr.gov.cn/tzgg/202211/t20221109_1603954.html),日期:2022年11月4日)