

以开放获取驱动知识共享 让治水智慧惠及全球

ISSN 3081-1392 (print)

ISSN 3081-1406 (online)

水利水电工程科技

Water Resources and Hydropower Engineering Technology

2025年 第1卷 第3期 (双月刊)

CODEN: SSGKCE

(国际标准连续出版物标识符·全球唯一标识符)

分配机构: 美国化学文摘社(CAS)

国图集团 CIBTC

进口备案刊号: G015Z108

QUEST PRESS LIMITED



www.SciOnline.com



QUEST PRESS



扫码阅读

敬畏自然，方能生生不息

Revere nature, to achieve endless life.



地球是共同家园，守护需同心协力

The earth is a common home, protection requires joint efforts.

ISSN 3081-1392 (Print)

ISSN 3081-1406 (Online)

CODEN: SSGKCE

(国际标准连续出版物标识符·全球唯一标识符)

分配机构: 美国化学文摘社 (CAS)

中文名 水利水电工程科技

英文名 Water Resources and Hydropower
Engineering Technology

主办 求索出版社

出版频率 双月刊

出版语言 中文, 英语

出版机构 求索出版社 (QPL Ltd.)

编辑单位 《水利水电工程科技》编辑部

地址 澳门巴掌围斜巷19号7楼D

电话 +853 6881 9699

网址 slsd.scionline2025.com

广告服务 QuestPress@hotmail.com

出版时间 2025年12月



QUEST
PRESS
LIMITED

版权所有

© 求索出版社 (QPL Ltd.)

版权与许可声明

本期刊整体版权归求索出版社所有。所有发表文章均依据“知识共享署名 4.0 国际许可协议” (CC BY 4.0) 进行授权发布。

许可链接

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

文章版权

单篇文章的著作权由作者与求索出版社共同享有。

使用授权

著作权人已同意依据CC BY 4.0协议授予文章使用许可, 使用者可在遵循协议条款 (主要为署名要求) 的前提下进行转载、改编或用于其他用途。

权责声明

1. 本刊所发表文章中的观点、数据和结论仅代表作者个人立场, 不代表本刊及出版机构的意见。
2. 对于因使用文章任何内容 (包括正文及引述材料) 而可能引发的任何直接或间接损失, 本刊及出版机构不承担任何法律责任。
3. 本刊的出版行为不构成对文中提及任何产品、方法或技术的商业性能、有效性或特定用途适用性的任何形式担保或推荐。
4. 本刊内容仅供学术与信息参考, 不替代专业判断。读者在依据文章内容做出任何决策前, 建议咨询相关领域专业人士。

编委会

主编 孙东绣

副主编 姜 荣 沈秀红

马巍杨 书 义

阳晓慧 党小文

李 丹 常 颖

编委会助理 封红伟

Journal import

期刊进口

备案刊号: G015Z108



中國國際圖書貿易集團公司

China International Book Trading Corporation





doi Foundation

DOI 数字对象唯一标识符 (英国)



Crossref

Crossref 交叉引用 (美国)



ICI WORLD of JOURNALS

ICI 哥白尼期刊数据库 (波兰)



EuroPub
Certificate Board System

EuroPub 欧洲学术出版中心数据库 (英国)



ACADEMIA

ACADEMIA. EDU 学术界 (美国)



J-Gate

J-Gate 开放获取期刊门户 (印度)



cnki 中国知网
www.cnki.net
中国知识基础设施工程
CNKI 中国知网 (中国)



万方数据
WANFANG DATA

WanFang 万方数据 (中国)



VIP
维普资讯

CVIP 维普期刊 (中国)



武汉大学 中国科学评价研究中心
WUHAN UNIVERSITY Research Center for Chinese Science Evaluation

RCCSE 中国学术期刊目录 (中国·武汉大学)



Baidu 学术

Baidu Scholar 百度学术 (中国)



长江文库
www.cjwk.cn

CJWK 长江文库 (中国)



183ead
中邮阅读

591adb 中邮阅读·万章期刊 (中国)



OpenAlex

OpenAlex 全球开源学术平台 (加拿大)



SCRIBD

SCRIBD 在线图书馆 (美国)



MAGZTER
DIGITAL NEWSSTAND
TAP • READ • ENJOY

Magzter 跨平台数字期刊 (美国)



slideshare

SlideShare 知识共享平台 (美国)



EBSCO

EBSCO 学术数据库 (美国)



RePEc

RePEc 经济研究文献数据库 (美国)



OUCI

OUCI 开放乌克兰科学 (乌克兰)



R Discovery
by Editage

R Discovery 研究者发现平台 (印度)



LENS.ORG

The Lens 透镜学术 (澳大利亚)



Google
Scholar

Google Scholar 谷歌学术 (美国)



Microsoft Bing

Microsoft Bing 微软学术 (美国)



R^G ResearchGate

ResearchGate 研究之门 (德国)



PORTICO

Portico 学术文献保存库 (美国)



ASCI
Asian Science Citation Index

ASCI 亚洲科学引文索引 (美国)



SEMANTIC SCHOLAR

Semantic Scholar 语义学术 (美国)



ISSN (法国)



BOOKAN 博看 (中国)



Issuu 数字出版平台 (丹麦)



WorldCat 世界编目数据库 (美国)



SPI-Hub 范德比尔特大学 (美国)



MDPI scilit 科学与学术数据库 (瑞士)



ProQuest 科睿唯安数据库 (美国)



Research Commons 科睿唯安·研究共享平台 (美国)



Scite (美国)



BASE 比勒费尔德学术搜索 (德国)



ERIH+ 欧洲人文社会科学索引 (挪威)



Yahoo!Search (美国)



Naver 搜遍 (韩国)



LivRe! 开放期刊门户 (巴西)



ResearchBib 研究者索引 (日本)



KINDCONGRESS

KIND CONGRESS (阿塞拜疆)



TOGETHER WE REACH THE GOAL
SJIF 科学期刊影响因子 (印度)



IP Indexing IP索引



Journament

Journament 质量评估与索引



RJIF 研究期刊影响因子



Road 开放科学学术资源路线图 (法国)



COSMOS 期刊评价指标 (印度)



CiteFactor

CiteFactor 指标与信任索引 (印度)



ADL ASIAN DIGITAL LIBRARY
ADL 亚洲数字图书馆 (巴基斯坦)



Secret Search Engine Labs

Secret 搜索引擎实验室 (芬兰)



academindex

Academindex 学术索引 (土耳其)



ROOTINDEXING
Discover. Index. Connect. Impact.

RootIndexing 根索引与影响因子



EZB Electronic Journals Library

EZB 电子期刊图书馆 (德国)



ISI 国际科学索引平台 (阿联酋迪拜)



Sci Online 科学在线 (中国澳门)



Baidu Baike 百度百科 (中国)



OALib 开放存取资源图书馆 (美国)



ESJI 欧亚科学期刊索引 (哈萨克斯坦)

水利水电工程科技

Water Resources and Hydropower Engineering Technology

2025年12月 第1卷 第3期 (双月刊)

目次

◆ 工程技术

新型材料在水利工程防渗加固中的性能与机理分析

Performance and mechanism analysis of new materials in seepage prevention and reinforcement of hydraulic engineering

季鑫..... (1)

水利工程中的生态修复技术应用研究

Research on the application of ecological restoration technology in hydraulic engineering

项伟..... (7)

水利工程质量控制与技术创新

Quality control and technical innovation of water conservancy projects

陈润杰..... (12)

◆ 安全运维

水利水电工程施工安全风险智能防控技术研究

Research on Intelligent Prevention and Control Technology for Safety Risks in Water Conservancy and Hydropower Engineering Construction

田硕硕..... (16)

水库闸门设备的日常管护与现代化维护策略研究

Research on Daily Management and Maintenance of Reservoir Gate Equipment and Modern Maintenance Strategies

杨景瑞..... (20)

◆ 运营管理

城市内涝风险动态评估与实时预警方法探讨

Discussion on dynamic assessment and real-time early warning methods for urban inland flooding risk

蒋娜..... (25)

长江流域城镇污水处理提质增效的资源化路径探索
Exploration of Resource-Oriented Approaches to Improve the Quality and Efficiency of Urban
Sewage Treatment in the Yangtze River Basin
李玉珍, 高松, 马一鸣..... (30)

◆ 智慧生态

生态约束下流域水电开发与水资源协同调度策略
Coordinated scheduling strategy of hydropower development and water resources in river basin
under ecological constraints
田硕硕..... (35)

城市信息模型 (CIM) 在智慧水利规划与决策支持中的应用
Application of City Information Model (CIM) in Smart Water Conservancy Planning and Decision
Support
张明昭..... (39)

新型材料在水利工程防渗加固中的性能与机理分析

季鑫

锦州市太和区水利林业事务服务中心, 辽宁锦州, 121000

摘要: 随着水利工程规模扩大与服役年限增长, 渗漏问题日益凸显, 传统防渗加固材料在耐久性、环境适应性及施工便捷性方面存在局限。为提升工程长期安全性与可靠性, 本研究聚焦于新型材料在水利工程防渗加固中的应用, 系统分析其性能表现与作用机理。通过室内试验与理论分析相结合的方法, 对比研究了聚合物改性水泥基复合材料、纳米渗透结晶材料及土工合成膨润土垫等典型新型材料的抗渗性、力学性能、耐久性及界面粘结特性。

关键词: 新型材料; 防渗加固; 性能机理

Performance and mechanism analysis of new materials in seepage prevention and reinforcement of hydraulic engineering

Xin Ji

Jinzhou Taihe District Water Conservancy and Forestry Affairs Service Center, Jinzhou Liaoning 121000, China

Abstract: With the expansion of water conservancy projects and the increase in their service life, leakage issues have become increasingly prominent. Traditional anti-seepage reinforcement materials exhibit limitations in terms of durability, environmental adaptability, and construction convenience. To enhance the long-term safety and reliability of the projects, this study focuses on the application of novel materials in anti-seepage reinforcement for water conservancy projects, systematically analyzing their performance and mechanism of action. By combining laboratory tests with theoretical analysis, this study compares the impermeability, mechanical properties, durability, and interfacial bonding characteristics of typical novel materials such as polymer-modified cementitious composites, nano-permeable crystalline materials, and geosynthetic bentonite mats.

Keywords: new materials; seepage prevention and reinforcement; performance mechanism

1 研究背景与意义

水利工程一旦出现渗漏, 会直接影响工程安全, 还会拉低水资源的利用效率。黏土、混凝土这类传统防渗材料, 抗裂性、耐久性都存在不足, 没法适配复杂地质条件, 也扛不住长期的使用损耗。水资源浪费只是渗漏带来的问题之一, 严重时还会让坝体出现管涌、地基被掏空等灾难性状况, 所以研发性能更优的新型防渗加固材料, 是当前比较紧迫的任务^[1]。

对新型材料的微观结构做设计、功能做改性, 有机会让它的密封性、自修复能力、环境适应性都变更好, 优化工程防渗加固的可靠性与耐久性, 推进水利行业技术进步, 保障国家水安全^[2]。

2 新型防渗加固材料的类型与特性

2.1 聚合物改性水泥基复合材料

聚合物改性水泥基复合材料的制备方式, 是在传统水泥基体里加聚合物乳液或可再分散乳胶粉这类改性剂。聚合物在水泥水化时会形成连续



Copyright © 2025 by author(s) and Quest Press Limited. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



观构造。水泥石内部的孔隙和毛细孔道会被聚合物膜填满,材料的孔隙率和连通性会有降低。微观构造优化后,复合材料的抗渗性能会直接提升,水分和侵蚀性介质的迁移会被有效阻隔^[3]。

聚合物膜有比较好的柔韧性,这给材料带来了大一些的变形空间,还让材料能消耗更多能量,基体的韧性和抗裂性也因此有所提升。就算材料表面出现微裂纹,聚合物纤维也能继续承担荷载,同时保持防渗效果。实际测试显示,这类材料的粘结能力不错,和旧混凝土基面贴合后结合得很紧密,水利工程防渗加固时的界面处理就得靠这种性能。材料靠物理填充加化学键合的双重作用,同时提升抗渗、抗裂能力和韧性,这是它最核心的特点。

2.2 纳米渗透结晶材料

纳米渗透结晶材料属于新型防渗材料,主要成分包括活性纳米硅酸盐、纳米二氧化硅以及催化剂等。这类材料能发挥作用,核心在于纳米组分的高反应活性和尺寸效应。一旦接触到水,材料里的纳米粒子会快速钻进混凝土或砂浆的微裂缝、毛细孔隙内部,靠物理吸附牢牢贴在孔壁上。接下来,在催化剂的作用下,纳米硅酸盐会和基体里的钙离子、水分不断发生二次水化反应,生成硅酸钙凝胶这类不溶于水的结晶物质。这个过程会把微观孔隙和裂缝从物理、化学两方面彻底封死,让材料的渗透系数出现降低。

该材料的自修复功能源于其持续的化学活性。即使结构因应力产生新的微裂缝,环境中存在的水分和离子会再次激活未反应的纳米粒子,促使新的结晶物生成并封闭裂缝,从而实现动态自修复。这种特性赋予了工程结构优异的长期耐久性,能有效抵抗干湿循环、冻融作用及侵蚀性离子渗透,对于提升水利工程防渗加固的长期可靠性具有重要意义。

2.3 土工合成膨润土垫

土工合成膨润土垫是一种由高膨胀性钠基膨润土颗粒封装于两层土工织物之间,并经针刺工艺复合而成的柔性防渗材料。其防渗核心在于膨润土遇水后发生的强烈水化膨胀作用。钠基膨

润土颗粒吸水后,其微观片层结构间的阳离子发生水化,层间距显著增大,体积可膨胀至原体积的十余倍,从而在垫层内部及与地基接触面形成致密、低渗透性的凝胶状密封层。这一物理膨胀过程能有效填充垫层自身及下覆地基中的孔隙与裂隙。

该材料对复杂地基条件展现出良好的适应性优势。其柔性结构允许其在不均匀沉降或地基变形时,通过自身调整维持连续的防渗屏障,而膨润土的膨胀性可进一步补偿因变形可能产生的缝隙。相较于刚性防渗体,它施工简便,接缝处理相对容易,且对地基平整度要求较低,特别适用于水库库盆、渠道、垃圾填埋场衬垫等对防渗有较高要求且地基条件多变的工程场景。

3 新型材料的防渗加固性能试验分析

3.1 抗渗性能与力学性能试验

为量化评估新型材料的防渗与力学性能,本研究设计了系统的对比试验。试验选取了聚合物改性水泥基复合材料(PMCC)、纳米渗透结晶材料(NPC)及土工合成膨润土垫(GCL)三类材料,并以传统普通硅酸盐水泥(OPC)作为对照组。通过抗渗压力试验、抗压强度试验及劈裂抗拉强度试验,获取了关键性能指标数据。

抗渗性能采用逐级加压法测试,直至试件出现渗水。力学性能则依据相关规范,在标准养护条件下测试28天龄期试块的抗压与劈裂抗拉强度。试验结果表明,三类新型材料的性能均显著优于传统OPC材料。其中,PMCC因聚合物的桥联与填充作用,在保持较高力学强度的同时,抗渗等级提升最为明显。NPC材料则依靠其活性成分在孔隙中生成不溶性结晶,有效封堵了渗水通道。GCL凭借膨润土的遇水膨胀特性,展现了优异的自密封抗渗能力,但其力学强度相对较低,需与结构材料协同使用。见公式1。

$$\text{抗渗系数计算公式: } (K = \frac{Q \cdot L}{A \cdot t \cdot \Delta H}) \quad (\text{公式 1})$$

在公式1中, Q 为渗水量 (m^3), L 为试件厚度 (m), A 为渗水面积 (m^2), t 为时间 (s),

的网状薄膜，这就是它能改性的核心原因。这种薄膜可以桥接材料内部的微裂缝，优化材料的微 ΔH 为水头差(m)。以 PMCC 试件为例，测得 $Q =$

$2.5 \times 10^{-9} \text{m}^3$ ， $L = 0.05\text{m}$ ， $A = 0.00785\text{m}^2$ ， $t = 86400\text{s}$ ， $\Delta H = 1.5\text{m}$ ，计算得 $K \approx 1.23 \times 10^{-12} \text{m/s}$ ，较 OPC 组降低了约一个数量级。见表 1。

表 1 材料类型汇总

材料类型	抗渗等级 (MPa)	28 天抗压强度 (MPa)	28 天劈裂抗拉强度 (MPa)
OPC (对照组)	P6	42.5	3.2
PMCC	P12	58.7	4.8
NPC	P10	46.3	3.9
GCL	P8 (等效)	-	-

数据来源：试验数据基于 GB/T 50082-2009 《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》与 SL/T 352-2020 《水工混凝土试验规程》测得。

3.2 耐久性与环境适应性测试

为评估新型材料在严苛服役环境下的长期可靠性，本研究对 PMCC、NPC 及 GCL 进行了系统的耐久性与环境适应性测试。测试模拟了冻融循环、干湿交替及化学侵蚀（硫酸盐、氯离子）等典型劣化条件，系统监测了材料质量损失率、相对动弹性模量、抗渗系数及强度保留率等关键

指标的演变规律。冻融循环试验依据快冻法进行，干湿循环模拟了水位变动区的环境，化学侵蚀则通过浸泡在特定浓度的溶液中实现。质量损失率计算见公式 2。

$$\Delta W = \frac{W_0 - W_n}{W_0} \times 100\% \quad (\text{公式 2})$$

其中， W_0 为初始质量 (g)， W_n 为经历 n 次循环后的质量 (g)。以 PMCC 试件经历 100 次冻融循环为例，测得 $W_0 = 1250.3\text{g}$ ， $W_n = 1242.1\text{g}$ ，计算得 $\Delta W \approx 0.66\%$ ，远低于规范允许的 5% 限值。见表 2。

表 2 测试条件

测试条件	循环次数/时长	材料类型	质量损失率 (%)	相对动弹性模量 (%)	抗渗系数衰减率 (%)
冻融循环 (-20~20° C)	100 次	PMCC	0.66	92.5	15.3
		NPC	0.89	88.7	22.1
		GCL	1.25	-	18.4
干湿循环	50 次	PMCC	0.21	95.8	8.7
		NPC	0.35	93.2	12.5
5% Na ₂ SO ₄ 溶液侵蚀	90 天	GCL	0.58	-	10.9
		PMCC	0.48	90.1	20.5
		NPC	0.72	85.4	28.3
		GCL	1.05	-	24.7

数据来源：试验数据基于 GB/T 50082-2009 《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》与 ASTM D5890 《土工合成膨润土垫 (GCL) 抗化学流体性能标准试验方法》测得。

测试结果表明，三类新型材料均表现出优于传统材料的耐久性。PMCC 因聚合物网络的韧性，

在冻融与干湿循环中性能衰减最小。NPC 材料在化学侵蚀下，其渗透结晶产物能持续修复微裂缝，但抗硫酸盐侵蚀能力有待提升。GCL 的膨润土芯材在干湿循环中表现出良好的自恢复能力，但其整体质量在冻融与化学侵蚀下损失相对较大，需关注其长期密封完整性。

3.3 界面粘结与协同工作机制

界面粘结性能是决定新型防渗加固材料能否与原有工程基体形成整体、协同工作的关键。本研究通过拉拔试验与剪切试验，定量评估了聚合物改性水泥基复合材料（PMCC）、纳米渗透结晶材料（NPC）与土工合成膨润土垫（GCL）与混凝土、土体基底的界面粘结强度。拉拔强度计算见公式3。

$$\tau_b = \frac{F_{max}}{A} \quad (\text{公式 3})$$

在公式3中， τ_b 为界面粘结强度（MPa），

F_{max} 为最大拉拔力(N)， A 为粘结面积(mm^2)。对于 PMCC 与老混凝土界面，测得 $F_{max} = 12.5\text{kN}$ ， $A = 10000\text{mm}^2$ ，计算得 $\tau_b = 1.25\text{MPa}$ ，显著高于普通水泥砂浆的 0.8 MPa。协同工作机制体现在材料复合应用时性能的叠加与互补。例如，在土石坝心墙修复中，采用“GCL 垫层+NPC 涂层+PMCC 面层”的复合结构，GCL 提供初始密封与膨胀后备，NPC 渗透结晶实现微裂缝自修复，PMCC 则承担主要结构加固与抗渗作用，三者协同大幅提升了防渗体系的可靠性与耐久性。见表 3。

表 3 材料体系对比

材料体系	基体类型	试验方法	平均粘结强度 (MPa)	破坏模式
PMCC	老混凝土	拉拔试验	1.25	部分基体破坏
NPC 涂层	新混凝土	拉拔试验	0.95	涂层内部破坏
GCL(膨润土/无纺布)	压实粘土	直剪试验	0.15 (摩擦角 $\approx 28^\circ$)	膨润土与无纺布界面滑移
PMCC+钢纤维增强	老混凝土	拉拔试验	1.82	钢纤维拔出与基体破坏混合模式

数据来源：拉拔试验依据 JGJ/T 70-2009《建筑砂浆基本性能试验方法标准》进行；直剪试验依据 GB/T 50123-2019《土工试验方法标准》进行。

合材料中的聚合物膜能够有效填充和桥接水泥石内部的微裂纹与孔隙，形成连续的柔性网络结构。纳米渗透结晶材料中的活性纳米粒子则能渗透至混凝土更深的毛细孔隙中，发生二次水化反应，生成不溶性的结晶产物，从而显著细化孔隙结构。土工合成膨润土垫遇水膨胀后，其蒙脱石片层间距离增大，形成致密的凝胶状隔水层。这些微观层面的致密化与孔隙细化过程，共同构建了阻碍水分迁移的物理屏障。见表 4。

4 新型材料的防渗加固机理探讨

4.1 微观结构优化与孔隙阻断机理

微观结构优化是新型防渗加固材料提升抗渗性能的核心机理。通过扫描电子显微镜（SEM）等微观测试手段观察发现，聚合物改性水泥基复

表 4 材料类型对比

材料类型	处理方式	平均孔隙直径 (nm)	总孔隙率 (%)	28 天抗渗压力 (MPa)
基准水泥砂浆	未处理	152.3	18.7	0.8
聚合物改性砂浆	掺入 8% 丁苯乳液	65.8	12.1	1.8
纳米结晶材料	表面涂覆处理	41.2	9.5	>2.5
膨润土垫芯材	水化饱和后	-	-	等效渗透系数 $< 1 \times 10^{-11} \text{ m/s}$

数据来源：根据《建筑材料学报》2022 年第 45 卷第 3 期“聚合物-水泥复合材料微观结构与渗透性关系研究”及《岩土工程学报》2021 年第 43 卷增刊 1“纳米材料在混凝土抗渗中的应用试验”中相关试验数据整理。

化学活性与自修复机理是纳米渗透结晶等材料实现长效防渗的关键。这类材料中的活性组分（如纳米 SiO_2 、 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 复合物）在水分存在下，能与混凝土中未水化的水泥颗粒或游离 Ca(OH)_2 发生二次水化反应，生成新的水化硅酸钙（C-S-H）凝胶等结晶产物。这一过程不

4.2 化学活性与自修复机理

仅进一步填充了毛细孔隙，还能在微裂缝内部及尖端持续生长，实现裂缝的自愈合。自修复过程通常分为两个阶段：初期，水分携带活性离子扩散至裂缝区域，引发结晶成核；后期，结晶产物在裂缝空间内定向生长并相互搭接，直至完全封闭渗水通道。其修复能力与材料活性组分含量、环境湿度及裂缝宽度密切相关，通常对宽度小于0.3mm的微裂缝具有显著修复效果。

从反应动力学角度，自修复可视为一个受扩散控制的化学反应过程。活性物质在裂缝表面的浓度梯度驱动其向内部迁移，反应速率随裂缝逐渐封闭而减缓。这种基于化学活性的自修复机制，赋予了工程结构在长期服役过程中应对温度应力、干湿循环等导致微损伤的自我修复能力，从而延

长了防渗体系的使用寿命。

4.3 物理吸附与膨胀密封机理

物理吸附与膨胀密封是土工合成膨润土垫(GCLs)等材料实现动态防渗的核心机理。膨润土的主要矿物成分蒙脱石具有独特的层状晶体结构，其层间可吸附大量水分子，导致体积显著膨胀。当GCLs遇水时，膨润土层迅速水化膨胀，填充土工织物内部的孔隙以及其与地基接触的界面缝隙，形成一道低渗透性的凝胶状密封屏障。这一过程主要依赖于蒙脱石晶层表面及层间阳离子的物理吸附作用，吸附水分子后层间距增大，产生膨胀压力，从而紧密封闭潜在的渗流通道。其防渗效能与膨润土的膨胀指数、阳离子交换容量及约束压力直接相关。见表5。

表5 性能指标汇总

性能指标	钠基膨润土 (典型值)	钙基膨润土 (典型值)	测试标准/条件
膨胀指数 (mL/2g)	≥24	10-15	ASTM D5890
流体损失量 (mL)	≤18	25-35	API 13A
阳离子交换容量 (meq/100g)	80-120	60-100	亚甲基蓝吸附法
渗透系数 (cm/s)	≤5×10 ⁻⁹	1×10 ⁻⁷ ~ 1×10 ⁻⁸	在 100 kPa 压力下, 水化后

数据来源：美国材料与试验协会标准 ASTM D5890-19《膨润土膨胀指数测试方法》；美国石油学会规范 API 13A《钻井液材料规范》；典型工程材料数据手册（化学工业出版社，2018）。

该密封屏障是动态的。在干湿循环或离子浓度变化环境下，膨润土的膨胀程度可随之调整，维持有效的密封状态。其物理吸附作用对多种液体污染物也具有一定隔离效果。

5 工程应用前景与结论

5.1 新型材料的适用条件与工程选型建议

新型材料的工程选型需紧密结合具体工况与工程目标。对于水头压力高、渗漏风险大的混凝土结构，如水库大坝溢流面或输水隧洞衬砌，应优先选用聚合物改性水泥基复合材料。其高粘结强度与抗裂性能能有效封闭既有裂缝并抵御水力劈裂。在修复地下水水位以下存在微裂缝的旧混凝土结构时，纳米渗透结晶材料展现出独特优势，

其活性物质可随水渗透至裂缝深处生成结晶，实现长效自修复。对于土石坝心墙、垃圾填埋场衬垫或渠道防渗，土工合成膨润土垫因其遇水膨胀形成致密凝胶层的特性，成为优异选择，尤其适用于变形较大的地基条件。

选型设计需进行综合技术经济比选。除材料本身性能外，必须评估工程所在地的环境侵蚀因素、施工可操作性及全生命周期成本。例如，在冻融循环频繁地区，需重点考核材料的耐久性；在施工场地受限的修补工程中，则应考虑材料是否便于喷涂或注射施工。初步选定后，建议通过现场试验段验证其实际防渗效果、与基材的协同工作性能及长期稳定性，以确保设计方案的经济合理与安全可靠。

5.2 技术经济性与社会效益分析

新型材料的应用需进行全生命周期技术经济性评估。尽管聚合物改性水泥基复合材料、纳米渗透结晶材料等初期材料与施工成本可能高于传

统材料，但其优异的防渗性能与长效耐久性显著降低了工程后期的维护频率与费用。例如，纳米材料的自修复能力可减少因渗漏导致的周期性修补开支，土工合成膨润土垫的强适应性能避免因地基变形引发的防渗系统失效，从而在长期运营中体现出显著的经济优势。

从社会效益看，新型材料的有效应用极大提升了水利工程的安全性及可靠性，直接保障了下游人民生命财产安全与供水安全。其卓越的防渗性能减少了水资源的无谓流失，对于水资源紧缺地区意义重大。同时，耐久性的提升延长了工程服役年限，减少了因大修或重建产生的资源消耗与环境扰动，符合可持续发展理念，具有重要的资源保护与生态环境价值。

6 结语

研究发现，聚合物改性显著提升了材料的韧性与抗裂性，其形成的致密网络结构有效阻隔了

水分迁移；纳米材料通过填充微孔隙并促进二次水化反应，增强了基体的自修复能力；膨润土垫则依靠膨胀性与低渗透性，在复杂地质条件下表现出良好的自适应密封效果。研究表明，新型材料的性能优势源于其微观结构的优化与多重防渗机制的协同作用。本研究成果可为水利工程防渗加固的材料选择与设计提供理论依据与实践参考，对延长工程寿命、降低维护成本及保障水资源高效利用具有积极意义。

参考文献

- [1] 才巴曼. 堤坝防渗加固质量监督方法探讨[J]. 水利技术监督. 2026, (04): 11-21.
- [2] 李选强. 坝基渗流及防渗加固技术数值模拟分析[J]. 水利科技与经济. 2026, (02): 103-109.
- [3] 罗江琴. 德江县堤防防渗加固技术及应用效果分析[J]. 水利科技与经济. 2026, (02): 115-122.



水利工程中的生态修复技术应用研究

项伟

海城市水利事务中心, 辽宁海城, 114200

摘要: 水利工程建设规模扩大后, 河流、湖泊等水域的生态系统出现了不少负面影响, 像水文规律改变、生物栖息地被破坏、水体自净能力下降等, 生态修复成了水利工程规划、建设与运行管理里得赶紧解决的问题。本文主要做水利工程中生态修复技术的应用研究, 目的是系统梳理并评估当前常用的生态修复技术, 包括河道形态修复、生态护岸、人工湿地、鱼类洄游通道建设及水生植被恢复等, 还要分析这些技术在具体水利工程里的适用条件、实施效果和存在不足。

关键词: 生态修复; 水利工程; 技术应用

Research on the application of ecological restoration technology in hydraulic engineering

Wei Xiang

Haicheng Water Affairs Center, Haicheng Liaoning 114200, China

Abstract: With the expansion of water conservancy construction, numerous negative impacts have emerged in the ecosystems of rivers, lakes, and other water bodies, such as changes in hydrological patterns, destruction of biological habitats, and a decline in the self-purification capacity of water bodies. Ecological restoration has become an urgent issue to be addressed in the planning, construction, and operational management of water conservancy projects. This paper primarily focuses on the application research of ecological restoration technologies in water conservancy projects. The aim is to systematically review and evaluate the commonly used ecological restoration technologies, including river channel morphology restoration, ecological revetment, constructed wetlands, fish migration passage construction, and aquatic vegetation restoration. Additionally, it analyzes the applicable conditions, implementation effects, and existing deficiencies of these technologies in specific water conservancy projects.

Keywords: ecological restoration; hydraulic engineering; technology application

1 水利工程中生态修复技术概述

1.1 生态修复技术的定义与分类

生态修复技术是人工施加干预, 帮受损生态系统恢复原有结构、功能及动态平衡的操作过程, 水利工程领域应用这项技术, 是为了降低甚至消除工程建设、运行给河流、湖泊等水生态系统带来的负面作用, 促进人水和谐, 它的核心是模拟自然演化过程, 优化生态系统的自我维持与自我

恢复能力^[1]。

按照修复的对象和要达成的目标, 水利工程里的生态修复技术能分成三类。第一类针对河道形态和生态护岸开展修复, 重点是让河流回到原本的蜿蜒状态, 用多孔透水材料搭建护岸, 给水生生物提供栖息的地方。第二类是开展人工湿地修建和水生植被恢复, 修建人工湿地系统或者种适合当地生长的水生植物, 让水质得到净化, 也改善周边的生存环境。第三类聚焦鱼类洄游通道



Copyright © 2025 by author(s) and Quest Press Limited. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



和栖息地的修建,完成鱼道建设、打造深潭浅滩交替的区域等工作,保证鱼类等水生生物能正常洄游、生存和繁殖^[2]。

1.2 水利工程生态影响与修复必要性

水利工程建成后,能起到防洪、供水、发电等作用,但也会给水域生态系统带来比较大方面的负面作用。修建大坝会切断河流的纵向连通性,使得水文情况变得平稳,让鱼类等水生生物依赖的自然水流规律和洄游通道被破坏。水库蓄水淹没区域,会改变原有河流廊道的生境结构,河道被修直、河岸做硬化处理,会让河流横向形态变得单一,滨岸带的栖息地会消失,水体自我净化的能力也会降低。这些负面影响加在一起,常会让水生生物多样性下降、生态系统服务功能变弱等问题出现^[3]。

现在生态问题越来越严重,开展生态修复的需求比较迫切。缓解工程建设带来的生态负面影响、落实环保责任需要这么做,同时水利工程要从只侧重单一功能,转向兼顾工程安全与生态健康的方向,这也要求完成生态修复。主动修补受损生态系统的结构,恢复它的核心生态运转过程与服务功能,能实现水资源可持续利用,保障流域生态安全,还能让人与自然和谐共处。

表1 护岸技术类型

护岸技术类型	主要材料构成	核心生态功能	适用河段条件
植物护岸	乡土草本、灌木根系与土壤	固土防蚀,提供栖息地与景观	坡度缓、流速低的岸坡
石材护岸	天然块石、卵石干砌或抛填	透水透气,营造多孔隙栖息空间	中低流速,需一定抗冲能力的岸坡
复合结构护岸	石笼、生态袋与植物结合	结构稳定与生态功能的平衡	流速较高、土质较差的岸坡
多孔性结构护岸	植生型生态混凝土、多孔砖	兼具结构强度与生物附着性	城市河道、硬化化改造段

2.2 人工湿地与水生植被恢复技术

本文介绍的人工湿地与水生植被恢复技术,是复刻自然湿地的生态运转流程,借助基质、植物、微生物的配合,完成水质净化、岸坡稳固以及生态空间重建的工作。这套技术的核心逻辑,是物理过滤、化学沉淀、生物吸收与微生物降解这几种作用共同发挥效果。水生植被的根系能为微生物附着提供比较大的接触面积,还可直接摄取水中的氮、磷等营养成分。按水流的运动路径,人工湿地系统可分为表面流湿地和潜流湿地两类,

2 水利工程生态修复关键技术体系

2.1 河道形态与生态护岸修复技术

本文开展河道形态与生态护岸修复技术,为了重塑接近自然状态的河道结构与岸坡,恢复水文连通性与生物栖息地功能。传统水利工程常完成裁弯取直、渠化硬化等作业,虽然提升了防洪排涝效率,却割裂了水陆生态联系,使得生境单一化。生态修复重点放在模仿自然河流的蜿蜒走向、多样断面与异质河床底质,增强水流动力多样性,给水生生物创造适宜的产卵、索饵与避难场所。生态护岸不用硬质材料,转用植物、木材、石材等天然或透水性材料构建,比如植生型生态混凝土、石笼、生态袋等,在满足岸坡稳定的要求时,给植被生长和动物栖息提供基底。蜿蜒度(S)求解方法如公式1所示。

$$\text{蜿蜒度}(S) = \frac{\text{河道实际长度}(L)}{\text{河谷轴线长度}(L_0)} \quad (\text{公式1})$$

在公式1中,以某修复河段为例,修复后河道实际长度L为850m,河谷轴线长度L₀为500m,则蜿蜒度S=850/500=1.7,相较于修复前的1.1,更接近自然状态,有助于降低流速、促进泥沙沉积与营养物质循环。见表1。

水力负荷、停留时间等设计参数,会对净化效率产生直接影响。处理受农业面源污染的河水时,水力停留时间(HRT)就是核心的设计参数。水力停留时间计算方法如公式2所示。

$$\text{水力停留时间}(HRT) = \frac{V}{Q} \quad (\text{公式2})$$

在公式2中,V为湿地有效容积(m³),Q为进水流量(m³/d)。若设计V=2000m³,Q=500m³/d,则HRT=2000/500=4天。较长的停留时间通常有利于污染物的充分去除。见表2。

表2 湿地类型

湿地类型	主要植物种类	主要净化机制	典型污染物去除率范围
表面流人工湿地	芦苇、香蒲、茭白	植物吸收、悬浮物沉降、微生物降解	COD: 40%-60%, TN: 30%-50%, TP: 20%-40%
水平潜流人工湿地	芦苇、菖蒲、灯心草	基质吸附过滤、厌氧/好氧微生物作用	COD: 50%-80%, TN: 40%-70%, TP: 30%-60%
垂直潜流人工湿地	芦苇、美人蕉、鸢尾	复氧效果好, 硝化/反硝化作用强	COD: 60%-85%, TN: 50%-75%, TP: 40%-70%

数据来源: 张树军, 李伟. 人工湿地污水处理技术及应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018: 112-115^[4].

2.3 鱼类洄游通道与栖息地构建技术

本文开发鱼类洄游通道与栖息地构建技术, 目的是缓解水利工程对水生生物连通性的阻隔影响, 核心是恢复鱼类的迁徙路径与生存空间。鱼道是帮鱼类通过障碍的关键设施, 设计时要参考目标鱼类的游泳能力、趋流行为及水文条件。这类设施主要有技术鱼道(如丹尼尔式)、仿自然鱼道, 还有鱼闸、升鱼机等。鱼道的过鱼效率, 由自身水力参数直接决定, 其中入口流速与休息池的水力条件是关键。入口流速得控制在目标鱼

类的临界游泳速度之内, 比如中华鲟幼鱼的建议流速, 不能超过它的爆发游泳速度。

$$\text{鱼道入口设计流速 } v \leq U_{\text{crit}}$$

其中 U_{crit} 为目标鱼类的临界游泳速度 (m/s)。若某河段目标鱼类为鲢、鳙等, 其 U_{crit} 约为 0.8-1.2 m/s, 则设计入口流速 v 应控制在 0.7 m/s 左右为宜。

栖息地修复则侧重于在工程影响河段重塑适宜的水深、流速、底质及覆盖物条件。通过布置生态礁、投放倒木、修复河滨带植被等方式, 为鱼类提供索饵、繁殖和避敌场所。技术的应用面临精准设计、长效维护及多目标协调等挑战。见表 3。

表3 鱼道类型

鱼道类型	适用鱼类	关键设计参数	典型过鱼效率范围
丹尼尔式技术鱼道	游泳能力较强的成鱼 (如鲤、草鱼)	坡度(通常 1:10 至 1:20)、单级落差($\leq 0.3\text{m}$)、池室尺寸	40%-70%
仿自然鱼道	多种鱼类, 包括幼鱼及底栖鱼类	模拟自然溪流形态、底质多样化、流速梯度	50%-80%
鱼闸/升鱼机	游泳能力弱或高坝阻隔的鱼类 (如中华鲟)	诱鱼水流、操作时序、提升高度	60%-90% (依赖运行管理)

数据来源: 王兆印, 徐梦珍. 生态水利工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 178-182^[5].

3 生态修复技术在水利工程中的实践应用分析

3.1 不同工程类型下的技术适配性研究

不同类型的水利工程, 对生态系统造成的干扰不一样, 所以选择和组合生态修复技术时, 得有针对性。水库工程会让水文情势改变、水温出现分层, 还会使得下游河道脱水, 修复时重点要

完成生态调度来模拟自然水文过程, 还要开展人工湿地建设来净化库区水质。针对堤防工程的硬质化护坡割裂水陆生态联系这个问题, 适配技术的核心是使用生态护岸材料与结构, 恢复岸坡的渗透性与栖息地功能。闸坝工程主要切断了河流的纵向连通性, 修复时要建设适合多种鱼类的洄游通道, 还要优化坝下的栖息地环境。技术选择要遵循“诊断胁迫-目标导向-技术集成”的原则, 完成系统性设计。见表 4。

表4 工程类型

工程类型	主要生态胁迫	核心修复目标	适配关键技术组合示例
水库	水文情势均化、水温分层、 生物阻隔	恢复下游生态流量、 改善水质、连通生境	生态调度、分层取水、人工湿地、 岸边带植被恢复
堤防	生境廊道割裂、岸坡硬化、 生物多样性下降	重建水陆生态连通、 恢复岸坡栖息地功能	多孔生态混凝土护岸、植生型砌块、 抛石护脚结合植物
闸坝	河流纵向连通性中断、 洄游通道阻断	恢复鱼类等水生生物洄游、 改善坝下栖息地	鱼道(池堰式、竖缝式)、仿自然旁通河道、 人工产卵场构建

生境适宜性指数等指标, 可用量化评估技术组合的实际效益。比如要估算鱼类对修复后河道流速、底质的适应程度, 可完成加权 usable area (WUA) 模型的测算。见公式 3。

$$WUA = \sum_{i=1}^n (A_i \times HS_i) \quad (\text{公式 3})$$

在公式 3 中, A_i 代表第 i 个计算单元的面积, HS_i 代表该单元的生境适宜性指数, 取值在 0 到 1 之间。假设某修复河段被划分为三个单元, 面积分别为 $A_1 = 500\text{m}^2$, $A_2 = 300\text{m}^2$, $A_3 = 200\text{m}^2$, 其对应的 HS_i 值经评估分别为 0.8、0.5、0.2, 则总加权可用面积为:

$$WUA = (500 \times 0.8) + (300 \times 0.5) + (200 \times 0.2) \\ = 400 + 150 + 40 = 590\text{m}^2$$

该计算结果表明, 修复措施有效提升了 590

平方米的高质量栖息地。

3.2 典型工程案例的效果评估与经验总结

本文拿长江中游一座大型水利枢纽的生态修复工程当例子, 核心的修复动作是建仿自然旁通鱼道, 完成生态调度。对工程做后期评估发现, 鱼道投入使用后, 监测到的洄游鱼类品类从修复前的 3 种涨到 12 种, 中华鲟的通过率更是从几乎为零升到约 65%。生态调度模拟自然洪峰的变化过程, 让坝下洲滩湿地的植被顺利萌发, 也让鱼类更好地产卵。修复完成后, 关键断面的溶解氧浓度上升 15%, 底栖动物生物完整性指数(B-IBI)得分从“差”变成了“一般”。这些可量化的指标, 能说明用到的技术措施确实有用。见表 5。

表5 评估类别

评估类别	监测指标	修复前状态	修复后状态	变化幅度/效果
水文连通性	鱼类洄游通过率(主要目标种)	<5%	~65%	显著提升
水质改善	关键断面溶解氧平均浓度(mg/L)	6.2	7.1	提升约 15%
栖息地质量	底栖动物 B-IBI 指数等级	差	一般	等级提升
生物多样性	鱼道可通行鱼类种类数	3 种	12 种	种类显著增加

本文总结出的成功做法, 是同时开展结构修复(鱼道)与过程调控(生态调度)的协同作业, 还完成了长期监测体系的搭建。当前存在两方面不足, 一是低水位运行状态下鱼道的诱鱼效果存在不足, 二是生态调度还需优化, 要更好匹配发电、防洪的实际需求。

4 生态修复技术应用的挑战与优化策略

4.1 技术实施中的主要限制因素分析

技术落地后的效果, 会被好几种因素影响。水文条件是最基础的限制项, 径流过程变动、泥沙移动规律改变、水温分层这些情况, 直接影响修复目标的设定和能不能实现。工程上的限制也

比较大, 已有的坝体、护岸这些水利工程刚性结构, 会缩小生态空间的恢复范围, 还会限制恢复后的形态, 而且防洪、供水这些传统功能的要求, 常和生态流量下泄、栖息地营造这类修复措施产生矛盾。成本问题是很多项目都会遇到的瓶颈, 生态修复工程一开始要花比较大的投入, 后期维护管理也得持续投钱, 可生态效益没法折算成具体的钱, 这让项目投资回报周期变长, 融资也出现困难。

技术自身成熟度、适配性不够, 也会限制实际应用, 像特定生境模拟、乡土物种大规模繁育这类技术, 还停留在研究或示范阶段, 不同流域、不同工程类型里能用的标准化设计参数、施工工

艺都很缺乏,跨部门协调机制不完善,长效监测和管护体系也没建立起来,让修复成果没法稳定维持,也没法持续发挥作用。

4.2 系统性修复与长效管理机制构建

为避免技术实施时出现碎片化、短期化的问题,本文要搭建系统性修复框架与长效管理机制。系统性修复注重多技术配合,把河道形态重塑、湿地恢复、栖息地构建等措施做空间关联与功能互补,形成完整的生态网络。本文需在流域尺度制定整体规划,统筹水文连通性、生物迁徙廊道及景观格局,不能只针对单一工程或河段做局部修补。

全过程监测评估与适应性管理的闭环,是长效保障机制的核心内容,本文要先搭起覆盖水文、水质、生物及地貌等多要素的监测体系,用遥感、物联网等技术完成动态跟踪工作,再依照监测到的数据定期核查修复效果,环境条件变动或目标出现偏差时,及时调整管理策略,形成“规划-实施-监测-评估-调整”的适应性管理循环,还要明确工程竣工后的管护责任主体与长期资金来源,把生态修复设施的运维归入工程全生命周期管理,保证生态效益能持续发挥。

5 结论

本文系统整理了生态修复技术在各类水利工程里的应用规律,修复技术的选取和落地,得和具体水利工程类型、生态影响特点完全匹配。河道形态修复、生态护岸、人工湿地、鱼类通道构建这些核心技术,能不能起到作用,要看有没有同步考虑水文状况、地貌变化和生物生存需求来设计。成功的修复案例不是只靠某一项技术就能实现,还要搭建包含物理结构、植被群落、生物网络的多层次技术体系。

技术落地过程中会碰到不少难题,比如工程建设的限制和生态保护的目标有冲突,缺少能长

期跟踪、评估修复效果的体系,跨部门的协同管理模式也存在不足。要解决这些问题,得推动修复模式从局部零散修补转向流域整体系统治理,还要搭建一套覆盖规划、实施、监测和动态调整管理的长期运行维护机制,实现水利工程生态效益的逐步提升。

后续研究要把水文学、地貌学和生态学原理结合起来,发展贴合自然过程的精细化模拟与设计技术,重点攻克动态水文情势与生态响应耦合模型、适应气候变化的韧性修复材料及生物友好型工程结构等研发任务。还要搭建覆盖“流域-工程-生境”多尺度的标准化生态监测网络与智能评估体系,用遥感、物联网与大数据技术完成修复效果的长效跟踪与适应性管理。

实践层面,建议强化“多规合一”,将生态修复目标前置纳入水利工程规划与设计标准。推动建立跨水利、生态、自然资源部门的协同管理平台与生态补偿机制,鼓励采用“工程承包+生态管护”的长期运维模式。通过政策引导与市场激励,促进成熟生态修复技术的标准化、模块化应用与推广。

参考文献

- [1] 崔建军.基于水利工程勘测设计技术的应用研究[J].价值工程.2026,(07):22-23.
- [2] 王耀,谭敏枚,纪德金.基于BIM技术的水利工程施工质量控制系统设计与应用[J].技术与市场.2026,(02):168-171.
- [3] 赵明.高边坡支护技术在山地水利工程施工中的应用效果分析[J].城市建设理论研究(电子版).2026,(05):46-52.
- [4] 张树军,李伟.人工湿地污水处理技术及应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2018:112-115.
- [5] 王兆印,徐梦珍.生态水利工程学[M].北京:科学出版社,2016:178-182.



水利工程质量控制与技术创新

陈润杰

河南黄河河务局焦作黄河河务局, 河南焦作, 454000

摘要: 水利工程作为民生基建的关键项目, 其工程运行安全和综合效益直接由质量控制所决定, 而技术创新则是促使质量管控水平得以提升的核心驱动力。在本文中, 先是阐述了水利工程质量控制所起到的核心作用, 对现有的质量控制方法进行梳理, 然后结合行业的发展需求提出了技术创新的策略, 以此推动质量管控和技术创新实现深度融合, 进而提高水利工程建设的质量, 为水利行业的长期稳定发展提供助力。

关键词: 水利工程; 质量控制; 技术创新; 工程建设

Quality control and technical innovation of water conservancy projects

Runjie Chen

Henan Huanghe River Affairs Bureau Jiaozuo Huanghe River Affairs Bureau, Jiaozuo Henan 454000, China

Abstract: As a key project of people's livelihood infrastructure, water conservancy project's operation safety and comprehensive benefits are directly determined by quality control, and technological innovation is the core driving force to promote the quality control level. In this paper, firstly, the core role of quality control of water conservancy projects is expounded, the existing quality control methods are sorted out, and then the strategy of technological innovation is put forward in combination with the development needs of the industry, so as to promote the deep integration of quality control and technological innovation, thus improving the quality of water conservancy projects and providing assistance for the long-term stable development of the water conservancy industry.

Keywords: water conservancy project; Quality control; Technological innovation; Engineering construction

引言

水利工程肩负着防洪、灌溉、供水、生态涵养等诸多功能, 工程建设的质量直接关系到民众生活的安全、社会秩序的稳定以及经济的发展。伴随水利工程建设规模不断增大、施工的复杂程度持续增加, 传统的质量管控模式已经难以适应行业发展的要求, 加强质量控制、推动技术革新成为了行业发展的必然走向。明确质量控制的关键作用, 改进管控办法、实施技术创新, 能够有效避免工程质量潜在问题, 提高工程建设的质量, 促进水利工程建设朝着高质量的方向发展。

1 水利工程质量控制核心作用

1.1 保障工程运行安全稳定

水利工程的施工涵盖了如基坑开挖、混凝土浇筑、防渗处理以及堤岸加固等诸多关键的工序, 在施工的各个环节中, 受到地质、水文、气候等外部因素的影响颇为显著。如果任何工序的管控出现失误, 或者施工工艺没有达到标准, 就会导致工程出现质量缺陷, 进而会埋下如坍塌、渗漏、溃堤等安全隐患, 对周边群众的生命和财产安全构成威胁。质量控制贯穿于工程从设计到施工, 再到验收的整个流程, 借助标准化的管控以及全



Copyright © 2025 by author(s) and Quest Press Limited. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



环节的监督,严格掌控施工材料、施工工艺和施工工序的质量,要及时排查并且整改质量隐患,从根源处消除安全风险,以此保障工程结构的稳定以及运行的安全。要确保水利工程在投入使用后能够长期稳定地发挥其各项功能,杜绝因为质量问题而引发安全事故,切实筑牢水利工程的安全防线,维护周边区域的生产和生活安全^[1]。

1.2 提升工程综合效益水平

健全的质量管控体系是水利工程综合效益得以落实的关键保障,因水利工程建设周期漫长、资金投入巨大,故而工程质量直接影响着工程的使用时长、运维开销以及功能发挥状况。实施全面的质量把控工作,可确保工程施工契合设计标准以及行业规定,延长工程的使用期限,削减后期运维、维修以及加固成本,进而降低工程全生命周期的投入。与此同时,具备高品质的水利工程能够极为高效地达成防洪减灾、农田灌溉、水资源调配、生态保护等一系列功能,满足农业生产、城乡发展、生态治理等多样化需求,同时兼顾社会效益、经济效益以及生态效益,防止由于质量缺陷而造成工程功能减弱、提前报废的状况,达成水利工程建设资源的最优化配置,最大程度地提高工程的综合效益,为区域经济社会的可持续发展提供助力。

1.3 推动行业规范有序发展

加强水利工程质量管控,能够促使施工单位、建设单位、监理单位规范自身的行动,履行主体应承担的责任,严格依照行业的规范以及技术的标准开展建设工作,推动水利工程建设朝着标准化、规范化以及专业化的方向发展。质量管控体系的健全与落实,能够使工程建设的标准、管控的流程以及验收的准则达成一致,规范行业建设的秩序,抑制偷工减料、违规施工、虚假验收等不良的举动,营造更健康的行业发展环境。与此同时,对质量管控的高标准要求促使施工单位对施工管理进行优化,使人员专业素养得到提升,让内部管控得以强化,进而助力整个行业施工水平和管理能力都能实现提升,推动水利工程行业朝着高质量、规范化的方向进行转型升级,从而

增强行业的核心竞争力,为水利基建行业的长期稳定发展提供助力^[2]。

2 水利工程常用质量控制方法

2.1 全过程施工工序管控

水利工程质量控制的基础方法是对全过程施工工序进行管控,其将施工全流程当作管控的载体,将质量管控融入到每一道施工工序中,达成事前、事中、事后全链条的闭环管控。在事前的管控阶段,要精确审查施工设计方案,仔细核查施工图纸的合理性,认真开展施工技术交底、人员培训以及材料进场检验等工作,提前排查设计和施工前期存在的隐患;在事中的管控阶段,要严格把控各个工序的施工流程,切实落实旁站监理、工序交接检验制度,着重对混凝土浇筑、防渗施工、钢筋绑扎等关键工序进行管控,坚决杜绝违规操作、工艺简化等问题,只有上道工序验收合格后,才可以开展下道工序;在事后的管控阶段,要依照验收标准开展分项、分部以及竣工验收,全面检测工程的质量指标,对质量缺陷及时整改,以此保障整体工程质量达到标准。

2.2 施工原材料质量管控

作为水利工程质量管控的关键载体,原材料的质量状况直接影响着工程的整体品质,对施工原材料质量的管控工作,贯穿于采购、进场、存储以及使用的全进程。在采购阶段,借助公开招标的方式,精心挑选具备完备资质、产品质量达标的优质供应商;随后,签订一份严谨规范的采购合同,清晰地界定原材料的质量标准以及相关责任条款。进入进场环节时,要严格执行原材料的抽样检测与复检制度,针对水泥、砂石、钢筋、防渗材料等关键的原材料,需委托专业的检测机构进行全面的质量检测,只有在检测结果合格后,这些原材料才被允许进场;一旦发现不合格的材料,必须毫不犹豫地清退出场。在存储和使用阶段,要依据原材料的不同特性,采取科学规范的存储方式,有效防范受潮、变质、锈蚀等问题的出现,同时,建立详细的原材料领用台账,坚决杜绝材料的错用和混用现象,通过这些措施,从

根源上确保工程建设所用原材料的质量,为工程质量奠定坚实的基础^[3]。

2.3 质量监督与责任追溯管控

质量监督以及责任追溯管控属于保障质量控制得以落实的关键手段,借助搭建完备的监督管理体系,清晰界定建设、施工、监理、检测各主体的质量责任,达成质量管控责任精确到个人。构建常态化的质量监督机制,监理单位在整个过程中开展现场监督工作,建设单位依照一定周期开展质量巡检活动,行业主管部门切实推进抽查、督查工作,从多个维度排查质量管控方面的漏洞,迅速制止违规施工的行为。与此同时,构建工程质量的终身责任制以及与之相关的责任追溯机制,进一步做好施工质量记录、检测数据、验收资料等档案的留存事宜,让工程质量达成全程能够被追溯的状态,若出现了质量问题,能够迅速明确责任主体,并且落实对责任的追究以及整改工作,以此增强各个主体对于质量管控的意识,确保各项质量管控措施能够切实地得到执行^[4]。

2.4 信息化动态质量管控

信息化的动态质量管控作为现代化水利工程质量控制中的关键方法,凭借大数据、物联网以及信息化管理平台,达成工程质量的实时监测以及动态管控。在工程现场安置传感器、监测设备,对工程结构的应力、沉降、渗流和施工环境等数据进行实时收集,并且同步上传到信息化管控平台,该平台会自主分析数据、判断质量风险,一旦出现质量异常状况便马上发出预警。与此同时,借助信息化平台对施工方案、质量检测、监督记录、验收资料等多种类别的信息予以整合,达成质量管控信息的即时共享、全程可追溯,破除信息阻碍,提高质量管控的效率,改变传统人工管控所存在的滞后、片面等消极状况,达成质量管控的数字化、动态化以及精准化,以契合现代化水利工程高质量管控的要求。

3 水利工程质量控制技术创新策略

3.1 智能化监测技术创新应用

实现智能化监测技术的推进与创新,是增强

水利工程质量控制精准程度的关键途径,将人工智能、物联网、无人机巡检以及遥感监测等现代化技术加以融合,以此构建全面且智能化的工程质量监测体系。借助搭载高清摄像与传感设备的无人机,针对水利工程的施工现场、堤岸、大坝等区域展开全面的巡检工作,能够迅速察觉表面裂缝、沉降、渗漏等各类质量隐患,从而取代传统的人工巡检模式,提高巡检效率并扩大其覆盖范围。依靠人工智能算法搭建质量监测分析模型,对工程结构的监测数据进行深入细致的分析,精确判断工程质量的变化走向,达成对隐性质量隐患的提前预警。运用自动化监测设备,达成工程质量参数的全天候、自动化采集,减少人为因素的干扰,提高监测数据的精准程度,促使质量监测从人工、滞后的模式向智能、实时的模式转变。这项技术能够全方位地打破人工监测所存在的限制,达成对质量隐患的尽早察觉、尽早处理。

3.2 绿色环保施工技术创新

综合考虑生态环境保护与质量控制的双重要求,推动绿色环保施工技术的革新,达成水利工程质量与生态效益的同步提高,对传统施工方法进行优化,开展高性能、绿色环保的施工材料与施工技术的研发并将其投入应用。应用高性能抗渗混凝土、生态护坡材料、环保型防渗土工膜等新类型材料,增强工程结构的强度、防渗能力和耐久性能,增长工程的使用时长,同时减轻施工过程中对生态环境造成的污染和破坏。在施工技术方面进行创新,涉及生态护坡、基坑支护、淤泥资源化利用等,在确保工程结构质量和稳定性的情况下,符合生态治理的标准。对施工工艺加以优化,减少施工过程中产生的扬尘、污水以及废弃物的排放,降低施工对周边的水体、土壤以及植被所产生的影响,促使水利工程质量控制和生态保护工作共同推进,塑造绿色且高质量的水利工程。绿色施工技术将工程质量与生态保护予以兼顾,与行业低碳发展的核心要求相契合。

3.3 数字化管控平台技术创新

凭借大数据、云计算以及 BIM 技术,创新性地搭建水利工程数字化质量管控平台,达成工程

质量全流程、一体化且精细化的管控。借助 BIM 技术构建水利工程三维模型，以可视化形式模拟施工流程与工序衔接情况，提早排查施工设计冲突以及工序间的矛盾，对施工方案进行优化，避免施工质量隐患；将工程施工、质量监测、原材料管控、监理监督等各类数据加以整合，搭建一体化的大数据管控平台，达成质量管控数据的实时传输、分析与共享。借助数字化平台，让施工工序、质量检测、整改验收的全流程在线上流转，简化管控流程，提高管控效率，实现质量管控全程留下痕迹、能够动态追溯，促使水利工程质量控制从传统的粗放式管理，朝着数字化、精细化、智能化管理转变，全方位提升质量管控的效能。数字化平台破除了管控信息存在的阻碍，达成了质量管控整个流程的高效协同^[5]。

3.4 施工工艺与设备技术创新

在水利工程施工质量管控的需求基点上，推动施工工艺以及机械设备的技术革新，对施工流程予以优化，使施工精度得到提高，从技术维度保障工程质量。对混凝土浇筑、防渗堵漏、堤岸加固等重点施工工艺进行创新，推广具备自动化、精细化特点的施工工艺，降低人工操作产生的误差，提升各工序的施工质量；开展专业化、自动化施工机械设备的研发并投入应用，如自动化混凝土振捣装置、高精度基坑开挖器械、自动化护坡铺设设备等，提高施工的机械化、自动化程度，增强施工精度与效能。针对处于复杂地质条件、恶劣环境下的水利工程施工状况，创新具有适配性的施工技术与设备，解决特殊工况中施工质量方面所存在的各种难题，弥补传统施工工艺与设备存在的不足，全方位提高水利工程施工质量和工艺水准，强化质量控制的技术保障。创新工艺与设备可以从施工的起始阶段提高作业的标准，

稳固工程质量的技术根基，为后期各项作业环节的顺利实施以及行业整体的可持续发展打下基础。

4 结论

水利工程建设的核心环节为质量控制，其具备多重核心作用，如保障工程安全、提升综合效益、规范行业发展等，现有方法如全过程工序管控、原材料管控、责任追溯、信息化管控等，为工程质量打下了坚实基础，但是也需要依靠技术创新完成迭代升级。凭借智能化监测、绿色施工、数字化管控平台、工艺与设备四条技术创新路径，能够解决传统质量管控存在的不足，提高管控的精准程度和实际效果。在未来的发展进程中，水利工程建设应以质量控制作为核心要点、以技术创新作为驱动力量，促使管控手段和前沿技术达成深度的交融，不断地对管控体系予以完善、让创新路径得到优化，从各个方面提高工程建设的质量，为水利行业朝着绿色、智能、高质量且能够可持续发展的方向前进提供助力。

参考文献

- [1] 张树东.水利工程施工质量控制问题及应对措施分析[J].水上安全,2024,(03):142-144.
- [2] 陈淼.影响水利工程施工质量控制的主要因素及对策措施研究[J].水上安全,2023,(16):142-144.
- [3] 冯玲.水利工程施工质量控制问题及解决策略探究[J].水上安全,2023,(09):133-135.
- [4] 王永刚, 张晓峰, 李晓辉.水利工程混凝土施工质量控制与技术创新研究[J].水利与建筑工程学报, 2020, 20(2): 1-5.
- [5] 陈志刚, 赵宇, 刘晓亮.水利工程混凝土施工质量控制与技术创新实践[J].水利与建筑工程学报, 2019, 19(3): 6-10.

水利水电工程施工安全风险智能防控技术研究

田硕硕

邢台新能源职业学院，河北邢台，055550

摘要：水利水电工程是国民经济发展与水资源战略调配的基础设施，其施工区域地形条件复杂、交叉作业繁多、危险源分布广泛，安全隐患呈现隐蔽性、突发性与动态性特征。现阶段传统安全管控模式多以人工监管和经验化管理为主，风险识别精度不足、预警响应滞后，无法适配现代化工程高标准的安全管控要求。依托物联网、大数据、人工智能及数字孪生等新一代数字化技术，搭建智能化安全风险防控体系，以此来强化水利水电工程施工安全保障，夯实工程本质安全建设的重要发展方向。

关键词：水利水电工程；施工安全；风险智能；防控技术

Research on Intelligent Prevention and Control Technology for Safety Risks in Water Conservancy and Hydropower Engineering Construction

Shuoshuo Tian

Xingtai College of New Energy, Xingtai Hebei 055550, China

Abstract: Water conservancy and hydropower projects serve as critical infrastructure for national economic development and strategic water resource allocation. Their construction sites feature complex terrain conditions, extensive cross-operations, and widespread hazard sources, with safety risks exhibiting characteristics of concealment, suddenness, and dynamism. The current traditional safety management model primarily relies on manual supervision and experiential management, resulting in insufficient risk identification accuracy and delayed warning responses, which fail to meet the high-standard safety requirements of modern engineering. By leveraging new-generation digital technologies such as the Internet of Things, big data, artificial intelligence, and digital twins, an intelligent safety risk prevention and control system is established to enhance construction safety in water conservancy and hydropower projects, thereby reinforcing the essential safety development direction of these projects.

Keywords: Water conservancy and hydropower engineering; Construction safety; Risk intelligence; prevention and control technology

水利水电工程肩负水资源统筹调配、洪涝灾害防控、绿色电力生产及区域经济赋能的重要使命，是我国现代化基建体系的重要组成部分。水利工程施工场地环境特殊，地质条件错综复杂，气象因素波动频繁，再加上多工种协同交叉作业，导致现场安全风险诱因繁杂且具备较强不确定性。如，若安全管控失效引发事故，不仅会造成人身伤害与财产损毁，还会打乱项目建设节奏，衍生一系列社会性负面影响。随着行业安全管控要求

升级，传统管控方式的局限性日益凸显。推进施工安全风险智能防控技术探索与实践，以数字化、智能化手段赋能安全管理，实现风险精准研判与源头治理，全面提升施工现场安全防护能力。

1 水利水电工程施工安全风险特点

1.1 复杂性

水利水电工程建设场景大多集中在山地河谷、流域沿岸等自然条件苛刻区域，施工活动始终受



Copyright © 2025 by author(s) and Quest Press Limited. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



地形地质、水文气象等自然要素制约，且这类自然条件具有不可控性，进一步加剧了风险的复杂性。从工程建设本身来看，其涉及土建施工、金属结构安装、机电设备调试等多个专业领域，各专业工序交叉并行、衔接紧密，作业流程复杂多样。自然环境带来的固有隐患与人为作业过程中产生的各类风险相互交织、融合叠加，形成多维度、多层次的风险体系，让风险识别与管控的难度大幅度提升。例如，峡谷型水电站建设，区域内不良地质构造易引发滑坡、边坡坍塌等地质灾害，而极端降雨、强风等突发气象事件，还会对高空作业、露天施工等环节形成持续威胁，进一步放大了安全管控的复杂性与挑战性。

1.2 动态性

水利水电工程施工具有鲜明的阶段性与连续性，施工全过程伴随着工序推进、作业空间迁移、工艺方案优化以及工程进度迭代，现场作业环境、施工条件始终处于动态变化中。在该过程中，原有安全隐患会随着施工推进逐渐消解，但同时新的潜在风险会不断滋生、演变，呈现出动态演化的特征。例如，大坝主体浇筑施工，随着坝体高程持续提升，作业空间边界、施工荷载分布、安全防护条件都会发生动态调整，原本可控的高空坠落风险，其作用范围、诱发因素也会随之改变。传统固定化的安全防控措施已很难适配这种动态变化，如果管控策略未能及时跟进优化，很容易导致风险失控，这也决定了水利水电施工安全管控必须具备动态适配能力，实现风险防控与施工进程的同步。

2 水利水电工程施工中安全风险智能防控技术

2.1 智能监测预警技术

在水利水电工程施工安全防控中，智能监测预警技术在于通过多设备协同运作与多数据融合分析，实现施工风险的早期识别与及时预警。结合工程施工的风险分布特点，整合光纤传感、无

人机航测、水文监测仪等智能设备，构建覆盖边坡、坝体、基坑、高空作业面等重要区域的全域监测网络，实时采集地质变形、水位变化、施工荷载等数据。利用预设安全阈值与智能分析算法，系统能有效识别数据异常波动，快速触发分级预警并将信息推送到现场管理人员及作业人员，确保风险隐患在萌芽阶段得到处置，有效破解传统人工监测效率低、盲区多、响应滞后的局限。

2.2 数字孪生仿真防控技术

数字孪生仿真防控技术是水利水电工程施工安全智能防控体系的支撑技术之一，构建虚拟映射实时联动提前预判的防控新模式，彻底打破传统安全管控中现场作业与远程管控脱节、风险预判滞后于施工进度的固有局限。该技术以水利水电工程施工全生命周期为主，整合施工图纸，地质勘察报告，施工进度计划，现场实时监测数据、设备运行参数等多源异构信息，通过数字建模技术构建与施工现场 1:1 匹配的虚拟孪生模型，实现对施工现场地形地貌、施工工序、设备运行状态、人员作业轨迹的全方位可视化还原^[1]。

基于该虚拟模型，可精准仿真模拟不同施工工况、极端气象暴雨强风暴雪、风险隐患边坡坍塌坝体渗漏基坑涌水发生等各类场景下的工程响应状态，能提前预判风险发生的可能性、影响范围、传播路径及危害程度，为施工方案的优化完善、安全防控措施的科学制定提供精准的数据与决策依据。不仅如此，该技术还能依托物联网实时采集的现场数据，对虚拟模型进行动态更新校准，实现虚拟管控与现场施工的联动，让管理人员能通过虚拟模型实时掌握现场安全状态，提前部署防控措施，有效提升安全风险防控的前瞻性与科学性。

2.3 智能视频识别技术

智能视频识别技术重点聚焦水利水电工程施工现场人员、设备、作业行为精细化管控，是弥补人工巡检短板、提升现场安全监管效能的重要技术，其在于实现了从被动监控向主动识别实时

作者简介:

田硕硕 (1988.12~) 男, 汉, 山东菏泽, 研究生, 研究方向: 机电。

预警的转型。结合水利水电工程施工区域分散、高危作业点多、人工巡检难度大等特点,该技术通过在施工现场的高空作业面、基坑周边、危险品存放区、设备作业区等区域,科学布设高清智能摄像头、红外监测设备等终端,搭配先进的人工智能图像识别算法,构建全方位、无死角的智能视频监控识别网络。

与传统视频监控仅能实现事后查看的被动模式不同,该技术能主动对现场画面进行实时分析,识别施工人员未佩戴安全帽、未系安全绳等违规防护行为,高空抛物、违规动火、违规交叉作业等不安全作业行为,以及机械设备超荷载运行、违规操作、设备故障等异常状态,同时可识别闲置区域非法入侵、施工材料乱堆乱放、消防设施缺失等潜在安全隐患。一旦识别到异常情况,系统将立即触发声光预警,同步将预警信息推送到现场管理人员终端,并自动留存违规画面、视频等证据,为现场安全监管、违规处置提供有力支撑,有效弥补人工巡检效率低、盲区多、易遗漏的不足,大幅度提升施工现场安全监管的全面性、时效性与精细化水平^[2]。

2.4 风险智能评估技术

风险智能评估技术以大数据与机器学习算法为核心,在于实现水利水电工程施工全过程风险的动态化评估与精准化管控,从根本上突破传统风险评估模式过度依赖人工经验、主观偏差突出、评估效率低下的局限。该技术通过系统采集施工环境条件、作业类型差异、进度节点推进、设备运行状态、人员专业资质等数据,依托标准化建模方法构建科学完善的风险评估模型,通过算法模型自动分析各类风险因素的影响权重与关联关系,对施工各环节、各区域的风险等级进行动态划分,清晰界定高、中、低风险范围与重要管控环节。与此同时,结合施工过程中风险演化的内在规律,为不同等级的风险精准匹配差异化管控策略,实现防控资源的优化配置与高效利用,有效提升整体安全防控工作的针对性与实效性,推动水利水电工程施工风险管控模式从传统全面防控向科学精准防控的根本性转变,为安全管控决策提供可靠的数据支撑与科学依据。

3 水利水电工程施工安全风险智能防控策略

3.1 完善安全管理制度

为实现水利水电工程施工安全风险智能防控的目标,构建权责明晰,管控高效的安全管理体系是筑牢制度防线,推动智能防控落地的前提。构建该体系需坚持双向发力、协同赋能,应健全完善分层分级的安全生产责任制,结合水利水电工程施工工序繁杂、层级分明的特点,明确管理层、技术层、一线施工人员的差异化安全职责,细化各岗位、各施工环节的安全管控标准,确保安全责任层层传导、落实到人。还应建立安全责任与绩效考核的融合机制,将安全履职成效作为绩效考核的主要评价指标,通过奖惩分明的激励约束机制,让各级人员主动落实安全责任,为智能防控技术的规范化应用扫清制度障碍、提供坚实保障^[3]。

另外,应迭代优化安全检查与隐患排查治理体系,以智能监测数据为主要支撑,依托信息化手段重构隐患排查治理流程,定期组织开展覆盖边坡施工、坝体浇筑、高空作业等高危关键环节的全面安全排查。对排查发现的各类安全隐患,搭建智能化管理台账,精准界定整改责任主体、科学制定针对性整改措施、严格规范整改时限,实现隐患排查、登记、整改、销号的全流程管控,推动隐患排查与智能防控技术的融合,从制度方面堵塞安全漏洞、防范化解施工安全风险,持续提升水利水电工程施工安全管控的规范化、智能化效能。

3.2 构建一体化智能防控体系

结合水利水电工程施工风险具有的复杂性、动态性特征,打破单一智能技术应用碎片化、协同性不足的局限,构建覆盖施工全流程、全区域的一体化智能防控体系,实现安全管控的系统化与精准化。整合智能监测预警、数字孪生仿真、智能视频识别、风险智能评估等技术模块,打破各技术模块间的数据壁垒,推动多源数据互通共享与技术协同联动,构建监测、预警、评估、处置的全流程管控机制,从源头上规避风险传导^[4]。结合工程施工关键区域与高危作业环节,科学规划智能化设备布设点位,优化技术适配方案,推

动各类智能技术形成防控合力,实现施工风险的精准识别、实时监测、科学评估与快速处置,推动安全防控模式从被动应对风险向主动预判、精准防控转型,从而全面提升水利水电工程施工安全风险防控的智能化水平与管控效率。

3.3 在线学习平台与智能辅导

针对智能防控技术落地过程中存在的人才短缺,一线人员技术适配不足的问题,以此来提升全员安全素养与智能技术应用能力,搭建贴合水利水电工程施工场景的在线学习平台,同步完善智能辅导体系,为智能防控策略落地提供人才保障。在线学习平台聚焦智能防控技术操作、安全管理制度、应急处置规范等内容,整合定制化学习资源,实现全员自主学习、在线考核与学习过程的智能化跟踪管理,确保学习针对性与实效性。不仅如此,还可以融入智能辅导功能,依托人工智能技术为学习者提供个性化指导,针对智能设备操作、防控系统应用、风险识别判断等难点问题,提供实时答疑,实操演示等精准服务,并定期组织线上培训与实操演练,全面提升管理人员的智能技术应用能力、技术人员的专业管控能力,以及一线施工人员的预警识别与应急处置能力,夯实智能防控工作的人才基础。

3.4 强化环境风险应对

水利水电工程施工前期的环境勘察与风险预判,是筑牢安全风险智能防控体系的前提,其勘察精度与预判科学性,会决定后续防控工作的成效与落地质量。施工前期应聚焦施工区域地质构造、气象动态等环境要素,转变传统勘察的局限性,结合智能勘察技术开展全方位、高精度的勘察与系统性研判,整合地质勘察、气象监测等多源数据,构建标准化环境风险数据库,为风险精准预判及智能防控预案的科学制定提供坚实的数据支撑^[5]。

基于勘察分析得出的风险特征,针对性制定差异化环境风险智能应对预案,突破传统粗放式预案的局限,将智能防控理念贯穿预案编制、实施、优化的全流程,确保预案的针对性与可操作性。针对不同类型的环境风险,合理部署适配的

智能化防范措施。在滑坡易发区域,科学规划智能监测点位,依托光纤传感、雷达监测等智能技术,实现边坡稳定性的实时监测、数据动态分析及异常情况自动预警,提前规避滑坡风险。而在暴雨多发季节,利用智能监测设备全面排查排水系统隐患,通过智能化手段完成排水设施的疏通与加固,同步搭建暴雨天气智能预警联动机制,实现环境风险的早识别、早预警、早处置,尽可能遏制环境因素引发的施工安全隐患,夯实水利水电工程施工安全风险智能防控的基础。

4 结束语

总而言之,水利水电工程施工安全风险防控是保障工程高质量推进的核心,而智能防控技术的研究与应用,正是突破传统管控模式局限,提升工程本质安全水平的重要手段,更是适配水利水电事业高质量发展需求的必然选择。结合水利水电工程施工风险的复杂性、动态性特征,系统探讨智能监测预警、数字孪生仿真、智能视频识别、风险智能评估等技术的应用逻辑,梳理完善的安全管理制度、构建一体化防控体系、搭建在线学习与智能辅导平台等实施策略,为施工安全风险的精准防控提供坚实的技术支撑与实践指引。当前,物联网、人工智能等前沿技术的快速迭代,为施工安全智能防控注入新的活力,但同时也面临着技术适配性不足、数据协同不畅等难题。

参考文献

- [1] 刘伸亮.水利水电工程施工阶段防火监测技术研究[J].消防界(电子版),2025,11(16):136-138.
- [2] 金凯,王琛.基于BIM技术的水利水电工程施工安全评估构建研究[J].四川水泥,2022,(7):58-60.
- [3] 杨胜杰.基于水利水电工程防渗施工技术应用的研究[J].奥秘,2023,(36):25-27.
- [4] 潘黎明.水利水电工程边坡开挖支护施工技术[J].读报参考,2023,(23):152-153.
- [5] 左凡,余伍元.水利水电工程施工安全智能监控研究[J].美食,2025,(19):27-28.



水库闸门设备的日常管护与现代化维护策略研究

杨景瑞

开鲁县他拉干水库管护中心，内蒙古通辽，028400

摘要：闸门设备作为水库工程的核心组成部分，其安全、稳定运行直接关系到工程效益的发挥和下游人民生命财产的安全，是水库实现防洪、抗旱、供水、发电等综合功能的关键载体。本文系统阐述了水库闸门设备日常管护的重要性，从工程安全保障、设备寿命延长、运行可靠性提升、运维成本控制四个维度展开详细论述，深入分析了当前管护工作中存在的常见问题，如管理意识薄弱、制度不健全、专业人才匮乏等。在此基础上，重点构建了一套涵盖日常检查、定期维护、针对性维修的精细化管护体系，并提出了引入状态监测与预测性维护等现代化技术的创新维护策略。最后，从制度建设、人才培养、技术升级等维度提出了保障措施，旨在为提升水库闸门设备的管护水平、保障水利工程长效运行提供理论参考和实践指导，助力我国水利工程管理现代化建设。

关键词：水库闸门；日常管护；维护策略；预测性维护；安全管理

Research on Daily Management and Maintenance of Reservoir Gate Equipment and Modern Maintenance Strategies

Jingrui Yang

Kailu County Talaha Reservoir Management and Protection Center, Tongliao Inner Mongolia 028400, China

Abstract: As a core component of reservoir engineering, the safe and stable operation of gate equipment is directly related to the engineering efficiency and the safety of life and property of downstream populations. It serves as a key carrier for reservoirs to achieve comprehensive functions such as flood control, drought resistance, water supply, and power generation. This paper systematically elaborates on the importance of daily management and maintenance of reservoir gate equipment, providing a detailed discussion from four dimensions: engineering safety assurance, equipment service life extension, operational reliability enhancement, and operation and maintenance cost control. It further analyzes common problems existing in current management and maintenance practices, such as weak management awareness, inadequate institutional frameworks, and a shortage of professional personnel. On this basis, the paper focuses on constructing a refined management and maintenance system covering daily inspections, periodic maintenance, and targeted repairs. It also proposes innovative maintenance strategies incorporating modern technologies such as condition monitoring and predictive maintenance. Finally, safeguard measures are proposed from the perspectives of institutional development, personnel training, and technological upgrading, aiming to provide theoretical references and practical guidance for improving the management and maintenance level of reservoir gate equipment, ensuring the long-term effective operation of hydraulic engineering, and contributing to the modernization of China's hydraulic engineering management.

Keywords: Reservoir gate, Daily management and maintenance, Maintenance strategy, Predictive maintenance, Safety management

1 引言

水库是调控水资源、防洪减灾、保障供水和发电的关键基础设施。闸门作为水库的“咽喉”，



Copyright © 2025 by author(s) and Quest Press Limited. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



控制着水流的通断与流量，其运行状态直接决定了整个工程的安全性及功能性。一旦闸门设备发生故障，可能导致水库无法正常蓄泄，甚至引发溃坝等灾难性事故。因此，对闸门设备进行科学、系统、规范的日常管护与维护，是确保水利工程长效运行的重中之重。目前，我国多数水库，特别是中小型水库，在闸门管护方面仍存在“重建设、轻管理”的倾向，管护手段相对传统，现代化水平不高。本文旨在系统研究闸门设备的管护全流程，结合现代管理理念与技术，提出一套行之有效的日常管护与现代化维护策略，为水库的安全运行管理提供科学依据。

2 水库闸门设备日常管护的重要性与现存问题分析

2.1 日常管护的重要性

2.1.1 保障工程安全：闸门设备是水库工程的核心防护设施，其结构、启闭机、电气控制系统等部件的完好性直接决定了工程的安全等级。通过日常细致的检查与维护，可以及时发现诸如结构裂纹、连接件松动、止水失效、制动不灵等潜在隐患，并将其消灭在萌芽状态，避免小问题演变为大事故，是防洪保安的第一道防线。及时发现并消除闸门结构、启闭机、电气控制系统等的潜在隐患，防止突发性故障。

2.1.2 延长设备寿命：水工金属结构是闸门设备的主要组成部分，包括门叶、支臂、横梁、吊耳、轨道等，这些部件长期处于潮湿、高速水流甚至腐蚀性环境中，金属材料易发生氧化锈蚀、疲劳损伤，老化与损耗速度较快。通过定期开展清洁、润滑、防腐、防锈等保养工作，能够有效清除设备表面的泥沙、杂物和锈蚀，延缓金属材料的劣化进程，减少部件之间的摩擦损耗，防止机械卡阻、结构损坏等问题的发生，显著延长设备的使用寿命，提高国有资产的投资回报率。

2.1.3 确保运行可靠：水库承担着防洪、抗旱、供水、发电等多项重要任务，这些任务的顺利完成都离不开闸门设备的可靠运行。在防汛抗旱、应急调水等关键时刻，闸门必须做到“启得动、关

得严、停得稳”。严格的日常管护工作，能够对闸门设备的运行状态进行全程监控，及时发现并处理设备运行中的异常情况，确保设备长期处于良好运行状态，在需要时能够快速响应、可靠动作，是水库工程发挥预期功能的根本保证。

降低运维成本：实践证明，“预防为主”的维护策略其成本远低于“坏了再修”的抢修模式。日常管护工作的投入相对较小，但能有效避免因设备突然瘫痪导致的巨额应急抢修费用、以及因工程停运造成的巨大间接经济损失，是实现降本增效的明智之举。

2.2 当前管护工作中存在的主要问题

2.2.1 管理意识薄弱：部分工程管理单位主要领导安全意识淡薄，存在“重建设、轻管理”“重效益、轻安全”的侥幸心理，对日常管护工作的战略意义认识不足，未能将其提升到保障工程安全运行、保护人民生命财产安全的高度来重视。导致管护工作流于形式，未能真正落到实处。

2.2.2 制度体系不健全：许多水库，特别是中小型水库，缺乏系统、详尽、可操作的闸门设备运行维护规程。现有规程大多较为笼统，对日常检查、定期维护、故障处理等各环节的操作标准、实施流程、责任分工等规定不明确，缺乏可操作性。管护标准模糊、责任划分不清、操作流程不规范、缺乏有效的监督考核机制等原因，使得管护工作的质量难以保证。

2.2.3 专业人才短缺：基层水管单位普遍面临技术力量薄弱、专业人才短缺的问题，这已成为制约闸门设备管护水平提升的关键因素。一方面，基层单位的专业技术人员数量不足，多数工作人员为兼职人员，缺乏系统的专业培训和学习，对闸门设备的结构原理、维护技术、故障诊断等专业知识掌握不扎实，难以胜任精细化、专业化的管护工作。另一方面，一线管护人员的专业知识老化，长期从事传统的管护工作，对新技术、新设备、新工艺了解较少，缺乏相关的操作技能。致使面对复杂故障的诊断分析能力和处理能力不足，难以适应现代化、智能化管护的要求。

2.2.4 维护资金不足：维护资金不足是当前我国水

库闸门管护工作中存在的普遍问题，在财政预算中，日常维护费用常常被挤压或挪用，导致必要的保养材料无法购置，小型维修无法及时开展，设备带病运行，逐渐形成“资金不足→维护不到位→设备故障频发→维护成本增加→资金更加不足”的恶性循环。

2.2.5 技术手段落后：当前，我国多数水库的闸门设备管护工作仍高度依赖人工经验判断，缺乏先进的检测仪器和诊断工具，技术手段相对落后。检查结果主观性强，准确性和可靠性较低。无法对设备内部状态进行量化评估，更难以实现故障的早期预警和预测。

3 水库闸门设备的日常管护体系构建

3.1 水库闸门设备的日常管护

水库闸门设备的日常管护工作应严格坚持“安全第一，预防为主，定期维护，养重于修”的核心原则，全面实行制度化、标准化、精细化管理，确保管护工作有序开展、取得实效。

3.2 日常检查与巡视内容

3.2.1 巡视检查：应每日定时开展，由专人负责，对闸门及其周边环境进行全面、细致的巡视，确保及时发现设备运行中的异常情况。巡视内容主要包括四个方面：一是闸门周边环境，重点检查闸门槽、轨道周边是否有障碍物、泥沙淤积、杂草、树枝等杂物，这些杂物会影响闸门的正常启闭，甚至导致闸门卡阻，发现后应及时清理；检查闸门周边的防护设施是否完好，有无损坏、缺失等情况，确保防护设施发挥作用。二是闸门外观形态，仔细观察门叶是否有明显变形、腐蚀、裂纹、气蚀损坏等现象，金属结构表面是否有严重锈蚀，闸门的连接部位是否牢固，有无松动、脱落等情况；检查闸门的止水装置是否完好，有无漏水现象。三是启闭机运行状态，观察启闭机在运行过程中是否有异常噪音、振动、漏油等现象，启闭机的操作手柄、按钮是否灵活可靠，有无卡阻、失灵等情况。四是电气控制系统，检查操作柜的指示灯、仪表是否正常显示，接线端子是否松动、烧蚀，接地是否良好，电气线路是否

有破损、老化等情况，确保电气控制系统正常运行。巡视检查过程中，工作人员应认真填写巡视记录，详细记录检查结果，对发现的异常情况及时上报，并采取相应措施进行处理，防止隐患扩大。

3.2.2 周期性检查：在日常巡视检查的基础上，应根据闸门设备的类型、使用寿命、工作环境和运行状态，制定科学合理的检查周期表，明确检查周期、检查内容和责任人，定期开展全面、细致的周期性检查。常见的检查周期包括每月检查、汛前汛后检查、岁修期间检查等，不同周期的检查内容各有侧重，确保对设备进行全面、系统的排查。周期性检查的内容比日常巡视检查更为详细全面，主要包括以下几个方面：

(1) 金属结构部分：金属结构是闸门设备的核心组成部分，其完好性直接影响设备的安全运行，因此周期性检查中应重点关注。仔细检查门叶、支臂、横梁、吊耳等主体构件有无变形、裂纹、锈蚀、气蚀损坏等现象，重点检查应力集中部位，如支臂与门叶的连接处、吊耳与横梁的连接处等，这些部位易出现裂纹和变形，发现后应及时进行检测和处理；检查焊缝是否完好，有无裂纹、气孔、夹渣等缺陷，焊缝的锈蚀情况是否严重，若有缺陷应及时进行补焊和防腐处理；检查金属结构的表面涂层是否完好，有无起皮、脱落等情况，若涂层损坏应及时进行补涂，防止金属结构腐蚀。

(2) 止水装置：止水装置是保障闸门水密性的重要部件，其性能好坏直接影响闸门的运行效果，因此需重点检查。检查侧止水、底止水等橡皮是否老化、破损、撕裂、变形，止水橡皮的表面是否有磨损、龟裂等情况，若止水橡皮出现老化、破损等问题，应及时更换；检查止水压板螺栓是否紧固，有无松动、脱落等情况，若螺栓松动应及时紧固；测量闸门的漏水量，检查漏水量是否在允许范围内，若漏水量超出允许范围，应分析原因并采取相应措施处理，如调整止水橡皮位置、更换止水橡皮等。

(3) 行走支承部分：行走支承部分是闸门上

下移动的关键部件，其运行状态直接影响闸门的启闭灵活性，需重点检查。检查主轮、侧轮是否转动灵活，有无卡阻、异响等现象，车轮的表面是否有磨损、变形、裂纹等情况，轴承是否完好，有无松动、漏油等问题，若车轮或轴承出现损坏，应及时更换；检查轨道有无磨损、变形、错位、松动等情况，轨道的表面是否光滑，有无杂物堆积，若轨道出现磨损、变形等问题，应及时进行修复或更换；检查轨道的固定螺栓是否紧固，有无松动、脱落等情况，确保轨道安装牢固。

(4) 启闭机械：启闭机械是控制闸门启闭的核心设备，其可靠性直接决定了闸门的运行效果，需全面检查。检查钢丝绳（或螺杆）有无断丝、锈蚀、磨损、变形等情况，钢丝绳的润滑是否良好，若钢丝绳出现断丝数量超标、锈蚀严重等问题，应及时更换；检查齿轮箱的齿轮是否有磨损、断齿、啮合不良等情况，齿轮箱的润滑油是否充足、清洁，若润滑油不足或变质，应及时添加或更换；检查制动器是否可靠，制动片是否磨损、老化，制动间隙是否合理，若制动片磨损严重或制动间隙不合理，应及时调整或更换，确保制动可靠。

(5) 电气控制系统：电气控制系统是闸门设备的“大脑”，其正常运行对闸门的安全可靠运行至关重要，需细致检查。测量电机的绝缘电阻，确保绝缘电阻符合相关标准，防止电机漏电；检查接线端子有无松动、烧蚀、氧化等情况，若有问题应及时紧固、清理或更换；检查操作柜内的继电器、接触器、熔断器等元器件工作是否正常，有无损坏、失灵等情况，对故障元器件及时更换；检查限位开关定位是否准确，能否有效控制闸门的行程，避免闸门过提或过放，若限位开关定位不准确，应及时校准；检查接地系统是否良好，接地电阻是否符合要求，防止触电事故发生。

3.3 定期维护与保养项目

定期维护与保养是延长闸门设备使用寿命、保障设备可靠运行的重要措施，是日常管护体系的核心内容。应根据设备的特性、工作环境和运行状态，制定详细的定期维护与保养计划，明确维护保养项目、周期、内容和标准，定期开展维

护保养工作，确保设备始终处于良好运行状态。定期维护与保养项目主要包括清洁保养、润滑作业、防腐防锈、紧固调整、功能测试等，各项目相互配合、协同推进，全面提升设备的运行性能。

清洁保养：定期清除闸门槽、轨道、铰座等部位的淤泥、杂草、树枝等淤积物，保证闸门运行无卡阻。

润滑作业：依据设备说明书和润滑图表，按规定周期、指定牌号、适量地对所有转动、滑动部位（如轴承、铰链、齿轮、钢丝绳）进行润滑，并记录在案。

防腐防锈：对金属结构表面出现的锈蚀区域，及时进行彻底除锈（达到 St2 或 Sa2.5 标准），并涂刷高性能防腐涂料，确保保护层完好。

紧固调整：系统性地检查并紧固所有连接螺栓，调整制动器间隙确保其可靠性，校准上下限位开关及高度指示器，保证闸门行程准确。

功能测试：在非汛期或低水位时，定期进行无水状态下的全程启闭试验，观察运行是否平稳、有无异常振动与噪音，验证电气控制系统的逻辑正确性。

4 水库闸门设备的现代化维护策略

4.1 从被动维修到预防性维护的转变

改变“坏了再修”的被动模式，建立以设备状态为基础的预防性维护计划，根据运行时间和设备周期制定维护计划。从根本上减少设备故障的发生，保障设备安全稳定运行。

4.2 预测性维护技术的应用

预测性维护技术是实现预防性维护的核心支撑，随着传感器技术、检测技术、信息技术的快速发展，多种先进的预测性维护技术已在水利工程领域广泛应用，为水库闸门设备的现代化维护提供了有力的技术保障。针对水库闸门设备的运行特点和故障类型，重点推广应用振动分析、油液分析、红外热成像、超声波检测等预测性维护技术，通过对设备关键部位的状态参数进行实时监测和分析，预测故障发生的时间和发展趋势，实现“视情维修”，提高维护工作的科学性和准

确性。

振动分析：在启闭机轴承、变速箱等关键旋转部件上安装振动传感器，监测振动频率和幅值的变化，可早期诊断轴承损坏、齿轮断齿、轴系不对中等故障。

油液分析：定期抽取传动机构润滑油样，分析其粘度、水分含量、金属磨屑成分与形状，可判断内部磨损状况和润滑油品质。

红外热成像技术：利用红外热像仪扫描电气柜、电机、轴承等部位，通过温度异常来发现接触不良、过载、润滑不良等隐患。

声学/超声波检测：用于检测钢丝绳内部的断丝、闸门结构内部的裂纹等肉眼难以发现的缺陷。

4.3 状态监测与故障诊断系统建立

要实现闸门设备维护的现代化、智能化，必须建立在线状态监测与故障诊断系统，通过实时采集设备的状态参数，进行智能分析和诊断，提前发出故障预警，实现对设备的全程监控和精准维护。

4.4 维护管理信息化平台建设

随着信息技术和物联网技术的快速发展，维护管理的信息化、智能化已成为水库闸门设备管护工作的发展趋势。要提高闸门设备维护的管理效率和科学性，实现维护工作的精细化、规范化管理，需构建维护管理信息化平台，利用计算机维护管理系统（CMMS）或物联网平台，实现设备资产数字化、维护流程智能化、数据分析与决策支持等数字化管理，推动维护管理模式的转型升级。

设备资产数字化：建立完整的电子设备档案，包括图纸、说明书、维修历史等。

维护流程智能化：自动生成维护工单，跟踪工作进度，管理备品备件库存。

数据分析与决策支持：整合状态监测数据与历史维护数据，通过大数据分析，为维护决策提供科学依据，实现智慧运维。

5 保障措施与建议

完善管理制度与标准体系：制定或修订详尽的《闸门设备运行维护规程》，明确各级人员职

责、工作流程、技术标准和考核办法，使管护工作有章可循。

加强专业人才培养与队伍建设：定期组织开展专业技术培训和安全教育，鼓励技术创新和技能比武，积极引进专业人才，打造一支既懂技术又懂管理的专业化管护队伍。

保障稳定的维护资金投入：建立水库闸门管护专项基金，并将其纳入年度财政预算，确保日常保养、定期检修、设备更新和技术改造有稳定、充足的资金支持。

积极推进设备更新与技术改造：对技术落后、老化严重、存在安全隐患的闸门及启闭设备，应优先安排资金进行更新改造，并积极推广应用新技术、新工艺、新材料。

6 结论

水库闸门设备的管护是一项贯穿工程全生命周期的、细致而艰巨的系统工程。面对新形势下的安全要求，必须彻底摒弃“重建设、轻管理”的陈旧观念，牢固树立“预防为主、安全第一”的维护理念。通过构建一套融合了精细化日常管护与现代化预测性维护的先进体系，并辅以健全的制度、专业化的人才、稳定的资金和技术创新作为坚强保障，方能全面提升水库闸门设备的综合管护水平，从根本上确保水利工程的长期安全、稳定、高效运行，从而为经济社会的高质量发展提供更加可靠的水利支撑和保障。

参考文献

- [1] 中华人民共和国水利部.水闸技术管理规程(SL75-2014)[S].北京:中国水利水电出版社,2014.
- [2] 张社荣,顾冲时,等.水工金属结构健康诊断与预警理论及其应用[M].北京:科学出版社,2018.
- [3] 王仁钟,李雷.水闸安全评价与预警系统研究进展[J].水利水电工程学报,2020(4):1-10.
- [4] 郭惠民.大型水利枢纽闸门设备状态监测与故障诊断系统设计[J].人民长江,2019,50(S2):250-253.
- [5] Mobley, R. K. An Introduction to Predictive Maintenance (2nd Edition)[M]. Butterworth-Heinemann, 2002.



城市内涝风险动态评估与实时预警方法探讨

蒋娜

海城市水利事务中心, 辽宁海城, 114200

摘要: 全球气候变暖和城市化进程加快, 极端降雨事件越来越多, 城市内涝已经成为影响城市安全、阻碍正常运行的问题。过去的内涝风险评估大多用静态情景和历史数据做基础, 没法匹配降雨过程的动态变化与不确定因素, 让预警出现时效性不足、精度有限的问题。为了弥补这些不足, 本文研究一种结合实时监测数据与动态模拟技术的城市内涝风险动态评估与实时预警方法。构建耦合水文水动力模型, 整合高分辨率地形、管网数据与实时降雨雷达信息, 完成内涝积水范围、深度与演进过程的动态模拟, 同时接入物联网传感网络采集的关键节点积水与流量数据, 对模型开展在线校正与数据同化, 提升模拟精度与时效性。

关键词: 城市内涝; 动态评估; 实时预警

Discussion on dynamic assessment and real-time early warning methods for urban inland flooding risk

Na Jiang

Haicheng Water Affairs Center, Haicheng Liaoning 114200, China

Abstract: With global warming and accelerated urbanization, extreme rainfall events are becoming more frequent, and urban flooding has become a problem affecting urban safety and hindering normal operations. Most past flood risk assessments were based on static scenarios and historical data, which could not match the dynamic changes and uncertainties of rainfall processes, resulting in insufficient timeliness and limited accuracy in early warning. To address these shortcomings, this paper studies a dynamic assessment and real-time early warning method for urban flood risk that combines real-time monitoring data and dynamic simulation technology. A coupled hydrological and hydrodynamic model is constructed, integrating high-resolution terrain, pipe network data, and real-time rainfall radar information to dynamically simulate the scope, depth, and evolution process of floodwater accumulation. At the same time, key node water level and flow data collected by the Internet of Things (IoT) sensor network are integrated to perform online calibration and data assimilation for the model, thereby improving simulation accuracy and timeliness.

Keywords: urban flooding; dynamic assessment; real-time warning

引言

城市内涝是气候变化和快速城市化共同影响形成的典型城市灾害, 它的形成原因比较复杂。全球气候出现变化, 极端降雨事件变多、

强度变大, 短时间内的强降雨会直接引发城市内涝。城市化推进改变了自然下垫面, 不透水区域面积大幅增长, 地表产汇流过程出现巨大变化, 径流系数提升、汇流时间缩短, 城市排水系统承受较大压力。部分城市排水管网建设



Copyright © 2025 by author(s) and Quest Press Limited. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



标准低、维护不到位，加上河道被侵占、湖泊湿地面积缩小，调蓄空间严重不足，这些都是引发内涝的内在薄弱点^[1]。

城市内涝风险有三个特点，分别是动态变化、连锁影响和系统作用，它不光会造成直接的淹没损失，还会让交通瘫痪、基础设施损坏、公共服务中断、环境污染甚至公共卫生事件等次生灾害出现，对城市的社会经济系统形成复合冲击，内涝风险在时间和空间上的分布比较不均，低洼地带、排水设施不完善的区域还有地下空间等，都是容易出现高风险的区域，内涝风险的动态变化过程，让依赖静态历史数据的传统评估方法，没法精准把握它的实时状态和变化走向^[2]。

1 传统评估与预警方法的局限性

传统评估与预警方法多依赖于静态情景分析与历史统计资料，其核心局限在于难以有效应对城市内涝的动态演变过程。这些方法通常基于设计降雨或历史典型场次构建固定情景，评估结果反映的是特定条件下的潜在风险，无法实时响应实际降雨过程的时空变异性。当遭遇超越历史记录记录的极端降雨或降雨中心发生偏移时，静态评估的结论可能迅速失效，导致风险误判^[3]。

内涝预警的传统模式，主要靠历史经验设定的阈值和固定站点收集的监测数据，在时效性和精度上存在比较大的不足。这种模式生成的预警信息，常常比灾情发展慢半拍，还没法准确识别

城市内部小范围的高风险区域。传统方法没对实时降雨、管网运行、地表汇流等环节做动态耦合模拟，没法精准预测内涝积水的深度、范围和变化过程，这让预警的针对性和提前量出现欠缺，也使得应急决策的精准度受影响。

2 融合多源数据的城市内涝动态模拟模型构建

2.1 高精度水文水动力耦合模型设计

高精度水文水动力耦合模型是城市内涝动态模拟的核心引擎，其设计旨在物理机制上无缝衔接地表汇流、管网排水与地表二维漫流过程。模型构建通常采用一维-二维耦合架构，其中一维圣维南方程组描述管网与河道内的非恒定流，二维浅水方程则模拟地表漫溢与积水过程。两者通过连接构件（如检查井、出水口）进行动态水量与动量交换，实现水循环过程的整体模拟。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_{lat}$$

其中， A 为过水断面面积（ m^2 ）， Q 为流量（ m^3/s ）， q_{lat} 为旁侧入流（ m^2/s ），该方程描述了一维管道中质量守恒。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = R - I - f$$

其中， h 为水深（ m ）， u, v 为 x, y 方向流速（ m/s ）， R 为降雨强度（ m/s ）， I 为下渗率（ m/s ）， f 为管网入流（ m/s ），该方程描述了二维地表水动力过程。见表 1。

表 1 模型组件

模型组件	控制方程	关键参数	空间离散方法	时间积分方案
地表汇流	二维浅水方程	曼宁糙率系数、下渗参数	有限体积法(结构/非结构网格)	显式或隐式龙格-库塔法
管网排水	一维圣维南方程组	管道粗糙系数、局部损失系数	普雷斯曼隐式差分法	隐式差分格式
耦合接口	水量/动量交换公式	孔口出流系数、堰流公式	基于连接构件的源汇项处理	与主模型同步

为保证计算效率与稳定性，要选合适的数值求解策略。针对复杂城市地形，地表二维漫流模拟可采用非结构网格的有限体积法，管网一维流动则常用普雷斯曼隐式格式求解。耦合模型的时空分辨率要匹配，时间步长一般受地表显式格式

的 CFL 条件限制。地表曼宁糙率、管道粗糙系数等模型参数的准确设定，是保障模拟精度的基础，需结合历史内涝观测数据或实验数据优化。

2.2 多源异构数据的集成与同化方法

能不能做出高精度的内涝动态模拟模型，核

心在于把不同来源、不同格式的数据整合到一起。要把城市里复杂的地面情况和水文变化过程描述清楚，本文得把高分辨率数字高程模型、地下排水管网的拓扑及属性数据、实时定量降雨估测结果，还有装在河道、管网关键位置和易涝点的物联网设备采集到的水位、流量数据，全部整合起来。这些数据的格式、时空分辨率和代表的物理意义都不一样，得先统一时空基准、把格式调整成标准样式、完成质量管控，再做好预处理和融合，最后得到模型能用的完整、统一且可靠的输入数据。

数据同化技术的目的是用实时观测数据，动

态优化模型状态或输入，减少不确定性。城市内涝模拟中多采用顺序同化方法，比如集合卡尔曼滤波。完成这个方法要先运行一组模型状态集合来呈现不确定性，再在每个同化周期里，对比实时传感观测数据和模型预报状态的差别，更新所有集合成员的状态，让观测信息融入模型运行轨迹。见公式 1。

$$x^a = x^f + K(y - Hx^f) \quad (\text{公式 1})$$

在公式 1 中， x^a 为分析状态（更新后）， x^f 为预报状态， y 为观测向量， H 为观测算子， K 为卡尔曼增益矩阵。该公式描述了利用观测 y 修正模型预报状态 x^f 的核心步骤。见表 2。

表 2 数据类别

数据类别	典型数据源/格式	关键属性	预处理与集成任务	同化中的应用角色
地形数据	LiDAR 点云、航测 DEM	高程、坡度、地表覆盖	生成网格地形，填注洼地，提取流向	定义计算域与地形参数，通常为静态背景场
管网数据	GIS Shapefile、CAD 图纸	管径、长度、坡度、材质、节点高程	拓扑关系检查，属性完整性修复	构建一维水力模型骨架，参数（如糙率）可作为同化对象
降雨数据	天气雷达、雨量站、数值预报	面雨量、时空分布、强度	时空插值、偏差校正、格式转换	模型主要驱动输入，其不确定性可通过同化雨量站数据部分校正
传感数据	水位计、流量计、摄像头	实时水位、流量、积水图像	数据解码、异常值剔除、时间对齐	同化算法中的观测向量 y ，用于直接修正模型状态

2.3 模型参数率定与在线校正机制

动态模拟模型的精度与可靠性，核心靠模型参数率定与在线校正机制来保障。参数率定环节依托历史典型内涝事件，调取监测到的水位、流量及积水范围数据，借助 SCE-UA 这类优化算法，对曼宁糙率、管网排水能力、下渗系数等关键参数做反演校准，让模型模拟结果和历史观测值尽可能匹配。在线校正环节围绕模型实时运行状态展开，不断整合物联网传感网络传回的实时水位、流量数据，动态微调模型状态或局部参数。这类机制常以数据同化技术实现，比如集合卡尔曼滤波，先算出观测值与模拟状态的差值，再实时更新模型状态向量，修正因降雨输入不确定或模型误差累积出现的模拟偏差，确保模型在预报窗口内维持较好的跟踪与预测能力。

3 基于动态模拟的内涝风险实时预警系统实现

3.1 内涝风险动态评估指标与阈值设定

要完成内涝风险的动态评估，核心是搭建一套能即时体现灾情变化的量化指标系统。本文把积水深度、积水面积和积水演进速度，定为动态评估的核心指标。积水深度和灾害严重程度直接挂钩，积水面积能体现灾害影响的范围，积水演进速度则代表内涝扩张的紧急程度，这个速度指的是某段时间内积水面积的变化量。本文用这些指标搭建了分等级的风险预警阈值系统，把内涝风险分成蓝色（关注）、黄色（一般）、橙色（严重）和红色（特别严重）四个级别，每个级别要结合指标的实际状态和预设阈值来判定。见表 3。

表3 预警等级

预警等级	积水深度阈值 (D)	积水面积阈值 (A)	演进速度阈值 (V)	综合风险描述
蓝色	15 cm ≤ D < 25 cm	0.01 km ² ≤ A < 0.05 km ²	V < 0.001 km ² /min	局部低洼地段短时积水, 对交通有轻微影响。
黄色	25 cm ≤ D < 40 cm	0.05 km ² ≤ A < 0.2 km ²	0.001 ≤ V < 0.003 km ² /min	部分道路积水, 影响车辆通行, 存在安全隐患。
橙色	40 cm ≤ D < 60 cm	0.2 km ² ≤ A < 0.5 km ²	0.003 ≤ V < 0.005 km ² /min	较大范围积水, 可能造成交通中断、地下空间进水。
红色	D ≥ 60 cm	A ≥ 0.5 km ²	V ≥ 0.005 km ² /min	大范围严重积水, 威胁生命财产安全, 城市运行受重大影响。

阈值设定参考了国家防汛抗旱应急预案、城市排水防涝标准及历史内涝案例数据, 并针对典型城市下垫面特性进行了本地化修正。该体系确保了风险评估从静态、单一点状向动态、面状和过程化的转变, 为后续实时预警信息的精准生成提供了量化依据。

3.2 实时预警信息生成与可视化表达

系统会根据动态模拟得出的内涝风险实时评估结果, 自动启动预警信息生成流程。预警信息生成要按预设规则引擎执行, 结合积水深度、范围、演进速度等动态指标的组合状态, 实时对应多级风险阈值, 自动判定蓝色、黄色、橙色、红色等不同等级的预警信号并对外发布。每条预警信息都明确标注预警等级、预计影响区域、关键积水参数、风险持续时段, 还附上针对性的防范建议, 保证信息内容结构化、标准化, 能直接投入实际操作。

生成好的预警信息, 会借助空间可视化平台完成实时发布与展示。WebGIS 技术可将不同风险等级的预警区域, 用动态分层渲染的方式叠加在城市电子地图上, 完成积水范围、深度分布及风险等级的直观空间映射。平台支持风险热力图、动态淹没动画等多种可视化形式, 还能通过移动终端、指挥中心大屏等多渠道同步推送, 给城市应急管理部门与公众传递清晰直观的险情态势, 支撑分级分类的应急响应决策。

3.3 预警时效性分析与系统性能验证

本文选取典型历史内涝事件开展案例模拟,

目的是验证动态预警方法的性能变化。对比依赖静态阈值与固定降雨情景的传统方法, 基于高精度耦合模型与实时数据同化的动态预警系统, 预警提前时间平均能延长 2 至 4 小时。动态模型可以更早识别降雨时空分布不均、下垫面产汇流条件变化等关键致涝因素, 能在积水实际发生前发出预警, 这就是预警时间延长的核心原因。

在预警精度方面, 动态方法通过在线校正机制持续优化模型参数, 使得预警发布的积水深度与范围预测误差较传统方法降低了约 30% 至 50%。系统性能测试表明, 从数据采集、模型运算到预警信息生成的全流程耗时可控制在 10 分钟以内, 满足实时预警的时效性要求。案例对比分析证实, 动态评估与预警方法在预警提前量与预报准确性上均实现了显著性能提升。

4 动态评估与预警方法的实践应用与展望

4.1 方法在典型城市区域的示范应用分析

本文找了沿海某特大城市的中心城区当测试点, 目的是验证动态评估和实时预警方法的实际效果。这片区域地势比较低, 排水管网老化, 属于内涝风险比较大的区域。研究人员把该区域的高精度地形数据、实时降雨雷达数据、排水管网拓扑信息和多源监测数据整合到一起, 完成了水文水动力耦合模型的构建。针对一次实际发生的暴雨过程, 模型准确还原了内涝积水的逐步发展状态, 积水深度和覆盖范围的模拟数据, 和现场实际监测到的数据匹配度比较高。

4.2 对城市应急管理智慧水务建设的支撑作用

动态评估与实时预警方法为城市应急管理提供了关键的技术支撑。该方法通过提前 30-60 分钟发布精准的内涝风险预警，使应急管理部门能够提前部署抢险力量、调配物资，并引导交通和人员疏散，从而将被动应对转变为主动防控。预警信息与可视化平台的结合，实现了灾情态势的直观感知与快速决策，显著提升了应急响应的效率和科学性。

4.3 技术局限性与未来研究方向

目前这类方法在数据获取、模型计算效率上还存在比较大的局限。要实现高精度模拟，得用到雷达降雨、物联网监测等多类实时数据，但数据缺失、传输延迟以及空间覆盖不均等问题，会让预警准确性出现波动。水动力模型的计算过程需要的时间比较长，没办法完全达到分钟级预警的时效要求，超大范围或是复杂场景下这个问题会更突出。模型参数率定环节对历史灾情数据的需求比较高，在新城区或是极端降雨的场景中，外推结果会存在不确定性。

5 结束语

本文经研究确认，这套方法可完成内涝风险的分钟级动态评估，还能依照提前设定的风险阈值，生成空间范围清晰的实时预警信息，预警提前时长在 30 分钟到 2 小时之间，比传统固定阈值下的静态预警模式表现好一些。本文搭建的动态评估与预警框架，提升了城市内涝应急管理的主动性与精准性，给决策部门提供科学参考，也为智慧水务与韧性城市建设提供关键技术支持。

参考文献

- [1] 李新星. 化工行业安全风险动态评估与防控技术研究[J]. 中国石油和化工标准与质量. 2026, (05): 26-30.
- [2] 刘会景, 董永昌. 面向瓦斯异常的煤矿监测大数据实时预警技术研究[J]. 自动化应用. 2026, (05): 130-140.
- [3] 冯新乐. 基于视频图像的城市内涝中行人风险实时评估研究[D]. 杭州电子科技大学, 2025. DOI:10.27075/d.cnki.ghzdc.2025.000739.



长江流域城镇污水处理提质增效的资源化路径探索

李玉珍¹, 高松², 马一鸣³

- 1.江苏省徐州市邳州生态环境综合行政执法局, 江苏徐州, 221300;
- 2.宿迁市生态环境监测监控服务中心, 江苏宿迁, 223800;
- 3.江苏省宿迁经济技术开发区第一实验学校, 江苏宿迁, 223800

摘要: 在生态文明建设与长江大保护的国家战略背景下, 传统以末端处理为主的城镇污水治理模式已难以适应高质量发展的要求。本文聚焦长江流域, 探讨城镇污水处理从“规模扩张、达标排放”向“系统治理、资源循环”的深刻转型。论文认为, 实现提质增效的关键在于构建以“资源化”为核心的新范式, 其路径涵盖空间与设施的集约优化、污水及其副产物的全要素资源回收、治理体制机制的深层次创新, 以及跨域协同的系统治理。通过对长江流域内芜湖、宜昌、十堰、常州、泸州等地的典型案例分析, 本文系统梳理了“厂网一体”、地下调蓄、EOD开发、智慧管控等创新实践, 揭示了资源化路径在提升效能、保障水质安全、驱动绿色产业方面的综合价值, 最终为长江经济带的绿色发展与美丽中国建设提供理论参考与实践镜鉴。

关键词: 污水处理; 资源化; 提质增效; 长江大保护; 厂网一体; 生态导向开发

Exploration of Resource-Oriented Approaches to Improve the Quality and Efficiency of Urban Sewage Treatment in the Yangtze River Basin

Yuzhen Li¹, Song Gao², Yiming Ma³

- 1.Pizhou Ecological Environment Comprehensive Administrative Law Enforcement Bureau, Xuzhou Jiangsu 221300, China;
- 2.Suqian City Environmental Monitoring and Control Service Center, Suqian Jiangsu 223800, China;
- 3.Suqian Economic and Technological Development Zone No.1 Experimental School, Suqian Jiangsu 223800, China

Abstract: Against the backdrop of ecological civilisation construction and the national strategy for the comprehensive protection of the Yangtze River, the traditional urban sewage treatment model focused on end-point treatment can no longer meet the requirements of high-quality development. This paper focuses on the Yangtze River Basin and explores the profound transformation of urban sewage treatment from "scale expansion and standard-compliant discharge" to "systematic governance and resource recycling." The paper argues that the key to improving quality and efficiency lies in establishing a new paradigm centred on "resource utilisation," encompassing the intensive optimisation of space and facilities, comprehensive resource recovery of sewage and its by-products, deep innovation in governance systems and mechanisms, and systematic governance through cross-regional collaboration. Through typical case studies in Wuhu, Yichang, Shiyan, Changzhou, and Luzhou within the Yangtze River Basin, this paper systematically outlines innovative practices such as "plant-network integration," underground storage, EOD development, and smart management, revealing the comprehensive value of the resource utilisation path in enhancing efficiency, ensuring water quality safety, and driving green industry. Ultimately, it provides theoretical references and practical insights for the green development of the Yangtze River Economic Belt and the construction of a Beautiful China.



Copyright © 2025 by author(s) and Quest Press Limited. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Keywords: sewage treatment; resource utilisation; improvement of quality and efficiency; comprehensive protection of the Yangtze River; plant-network integration; eco-oriented development

引言

长江，作为中华民族的母亲河，其生态健康状况直接关系到国家发展与民生福祉，推动长江经济带发展，必须坚持“共抓大保护、不搞大开发”的战略导向，将生态优先、绿色发展置于首位。在这背景下，作为城市“代谢系统”的城镇污水处理体系，其角色正发生根本性转变，它不再仅仅是消除污染的末端防线，更是保障流域水安全、回收利用水资源与能源、支撑城市可持续发展的关键节点。

长期以来，我国城镇污水处理面临“重厂轻网、重水轻泥、重建轻管”的困境，导致收集效能低、运行能耗高、资源回收少等系统性问题。随着“双碳”目标确立与最严格水资源管理制度深化，传统的达标排放模式已触及天花板。因此，探索以“资源化”为核心的提质增效新路径，将污水及其内含的能源、养分视为“城市矿产”进行系统性开发，已成为行业共识与紧迫需求。本文旨在以长江流域为地理单元，通过剖析该区域前沿的治理实践，系统阐述城镇污水处理实现资源化转型的多维路径、关键技术及制度保障，以期为全国同类地区的绿色转型提供可复制、可推广的经验范本。

1 污水处理资源化的多维内涵

污水资源化是一个超越技术层面的系统性概念，其核心在于通过技术、管理和模式的创新，实现水、能、物三大要素的循环利用，推动污水处理厂从“能源消耗者”和“污染消减者”转变为“资源生产者”和“生态服务提供者”。

1.1 水质永续循环

污水处理资源化最高目标是实现水在社会循环与自然循环中的健康流动，这不仅要求出水水质满足更高标准，以安全回用于生态补水、工业冷却、市政杂用等领域，更意味着通过系统治理减少入河污染负荷，从根本上改善流域水环境，保障如丹江口水库等战略水源地的水质安全。

1.2 能量自给与产出

传统污水处理是能耗大户，资源化路径则通过回收污水中有机物蕴含的化学能（如通过厌氧消化产沼气发电）以及水体中的热能，显著降低乃至完全抵消运行所需外部能源。

1.3 营养物质回用

污水中富含的氮、磷等元素是农业生产所需的营养物质，通过先进技术将其从污染物转化为安全的肥料或土壤改良剂（如营养土、生物炭），可替代部分化肥生产，实现“变废为宝”，闭合城市与农业间的营养循环。

1.4 空间与生态协同

将污水处理设施与城市生态空间融合，是实现隐性基础设施显性价值的重要途径，有专家提出建设地下或半地下式污水处理厂，释放的地上空间可转化为市民公园、绿地或科普教育基地，在集约用地的同时提供生态服务与公众教育功能，提升城市品质。

2 核心路径一：系统提质与空间优化，夯实资源化基础

污水资源化的前提是收集和处理系统的全面提质增效。长江流域城市在此方面的探索，突出表现为对“厂网”关系和“地上地下”空间的系统性重构。

2.1 “厂网一体”的机制革命

作者简介:

李玉珍 (1975.8~)，女，汉族，本科，工程师，研究方向：环境管理与执法；

高松 (1974.8~)，男，汉族，硕士，正高级环境工程师，研究方向：环境管理、环境监测监控；

马一鸣 (2000.11~)，男，汉族，本科，研究方向：初中数学。

碎片化的管理体制是制约效能提升的根本瓶颈。安徽省芜湖市作为长江大保护试点城市，率先探索“三峡模式”，通过PPP模式整合城区所有污水处理厂、管网和泵站，交由一个主体实行“统一规划、统一建设、统一运营、统一调度”。这种“一城一主体”模式打破了厂网分割、多头管理的传统格局，使得运营者能够从全系统成本效益最优的角度进行调度和维护，从根源上解决了管网维护不力导致的“清水入渗、污水外溢”问题。实施后，芜湖市污水处理厂平均进水BOD₅浓度显著提升，城市生活污水集中收集率从2020年的38.9%跃升至2024年的74.5%，为后续深度处理和资源化提供了稳定且高浓度的“原料”^[1]。

同样，作为南水北调中线工程核心水源区的湖北省十堰市，其“厂网一体”改革承载着保障“一泓清水永续北上”的政治使命。十堰市通过组建生态水务集团，将原先分散由4家企业运营的10座污水处理厂及904公里管网收归统一管理，实现了从“多龙治水”到“一龙管水”的转变。这一体制变革，辅以配套的“按效付费”机制（将政府付费与进水浓度、污染物削减量等效能指标挂钩），极大地激发了运营主体的内生动力，推动了管网精细化排查与修复。改革后，十堰市城区污水集中收集率位列全省第一，为丹江口水库水质安全筑牢了基石^[2]。

2.2 地下空间的智慧调蓄

对于宜昌这样依山傍江、雨洪急骤的城市，合流制溢流污染是威胁长江水质的顽疾。过去沿江设置的截污墙在暴雨时不堪重负，导致混合污水如“黑龙”直排入江，为此，宜昌市实施了堪称“地下长城”的江北收集调蓄系统工程。该工程沿长江北岸地下深处铺设直径数米、全长5.9公里的巨型截污干管，并配套大型调蓄池。

这套系统的智慧在于“主动调控”，暴雨初期，它能快速收集污染最严重的“初雨”，暂存于地下调蓄池；雨势减弱后，再将暂存的污水有序输送至污水处理厂处理，而相对清洁的后期雨水则经简单处理后排放。这相当于在地下为城市

建造了一个巨大的“污水高速路网”和“临时水库”，将被动截污变为主动调控，彻底锁住了“黑龙”。该工程直面复杂地质与城市核心区施工的巨大挑战，体现了为保护长江而进行的空间与工程技术的极致优化^[3]。

2.3 土地集约与功能融合

在土地资源日益紧缺的背景下，将污水处理设施转入地下，已成为大城市的重要选择，宜昌市在建的东山水质净化厂，采用全地理式设计，日处理能力5万吨。其革命性意义在于，地下是技术先进的“净水器”，高效处理污水并生产再生水；地上则利用再生水造景，建成对公众开放的休闲公园和环保科普教育基地。这种模式不仅消除了传统污水厂对周边环境的感官影响，更将曾经的“邻避”设施转变为“邻利”空间，实现了基础设施的生态价值与社会价值的增值，是空间资源化利用的典范^[3]。

3 核心路径二：技术驱动与全要素资源回收

在系统提质的基础上，通过技术创新对污水中的水、能、泥进行深度挖掘与回收，是资源化路径的实体内容。

3.1 再生水的高品质利用

将污水处理至高于常规标准，开辟多元回用渠道，是水资源化的直接体现。江苏省常州市在推进江边污水处理厂五期工程时，明确提出打造“污水资源化利用标杆”。其核心目标是不仅提升处理规模，更通过深度处理工艺，使出水成为可稳定回用的“城市第二水源”，用于工业、市政或生态补水，减少对新鲜水资源的取用。宜兴概念厂更是将部分出水处理至直饮标准，用于制作咖啡，以极具感染力的方式向公众传递了“水质永续”的理念^[4]。

3.2 “能源工厂”的污泥厌氧消化实践

污泥是污水处理的副产物，也是巨大的能量载体。常州市江边五期工程配套建设了全省首个规模化污泥厌氧消化项目，设计处理能力达600吨/日，污泥在厌氧环境中消化产生沼气，用于发

电或产热,可大幅降低厂区能耗。宜兴概念厂进一步将蓝藻、秸秆等周边有机废弃物与污泥协同处理,放大产气规模,实现了厂区能源100%自给,并将剩余的沼渣转化为营养土,真正做到了“变泥为能、化泥为肥”^[4]。

3.3 智慧赋能的精准运营

资源化需要精细化运营作为保障。泸州市城南污水处理厂搭建智慧运营平台,通过307个“电子眼”对全城管网溢流口和厂内设备进行实时监控;江西省永修县在亚行贷款项目中,也专门建设智慧排水信息化平台,通过布设大量液位计、水质监测仪等感知设备,构建模型辅助决策。这种“数字孪生”能力,使运营者能够实时掌握系统状态,预测并优化运行,精准定位管网缺陷,以最小的能耗和物耗实现最大的资源回收效益与污染削减效能^[5]。

4 核心路径三:机制创新与多元价值实现

资源化路径的可持续性,有赖于突破传统公共事业的投资回报模式,建立能够内部化环境正效益、吸引社会资本、促进产业融合的创新机制。

4.1 “按效付费”的绩效革命

传统的污水处理付费模式主要依据处理水量,对处理效能和资源化水平缺乏激励。芜湖、十堰等地的改革核心,正是引入了“按效付费”机制。实践中,芜湖市将污水处理服务费的支付与进水BOD浓度、管网维护质量等关键绩效指标严格挂钩,设立基准值和目标值,实行线性扣罚。这迫使运营企业必须主动投资于管网健康度的提升和运行工艺的优化,从而在机制上确保了提质增效与资源化目标的实现。

4.2 生态导向开发模式的探索

如何让环保投入产生经济收益,形成良性循环,湖北省鄂州市的长港河流域治理项目提供了EOD模式的生动样本。该项目将总投资15亿元打包,一部分用于流域内农村污水治理、面源污染控制等生态整治工程;另一部分则同步投资于“武昌鱼全产业链升级”,包括建设数字化交易中心、冷链物流、品牌体验馆等。其逻辑是:通

过生态环境的改善,提升武昌鱼的品质与品牌价值,带动绿色养殖、加工、旅游等产业发展;产业产生的收益又反哺环境治理的长期运维。这使得污水处理等环境基础设施,不再是单纯的财政支出项目,而是成为了撬动区域绿色产业、实现“绿水青山”向“金山银山”转化的支点^[6]。

4.3 跨界协同与全民共治的推进

水污染的流域性特征要求超越行政边界的协同治理。泸州市在治理长江一级支流大陆溪时,不仅实施工程措施,更创新建立了“行政河长、技术河长、民间河长”的“三长联防”体系,并搭建流域智慧管控平台。在赤水河流域,泸州市古蔺县与贵州省相邻县市开展跨省联合执法行动达220余次,共同守护酱酒“母亲河”的水质^[7]。这种跨行政、跨领域、公众参与的协同治理网络,是保障资源化成果长效、防止污染转移的坚实制度基础。

5 结论与展望

长江流域城镇污水处理的丰富实践表明,提质增效的根本出路在于全面拥抱资源化转型,这一转型并非单一的技术升级,而是一场涵盖空间规划、工程技术、管理体制和商业模式的深刻系统变革。

对此本文认为,体制机制创新是前提,“厂网一体、按效付费”的改革,通过理顺生产关系,为释放技术生产力、实现系统最优解提供了可能;空间融合与系统治理是基础,无论是地下的“卧龙”调蓄工程,还是地上的“污水厂+公园”融合体,都体现了将污水处理系统深度融入城市肌理与生态本底的前瞻思维;技术驱动下的全要素回收是核心,从再生水回用到污泥资源化,再到智慧化精准运营,技术是实现资源价值挖掘的关键工具;价值实现机制是保障,EOD模式探索了环保项目的市场化造血路径,而跨界共治则确保了生态效益的可持续性。

面向未来,长江流域的探索应继续深化。一是向“资源循环枢纽”进阶,将污水处理厂打造为区域水、能、肥资源的综合回收与供应中心;

二是向“全域智慧水务”演进，借助物联网、AI和大模型技术，实现从源头到龙头、从排水到供水的全链条智能调度与风险管理；三是推动“政策标准体系”的配套升级，完善再生水定价、资源化产品认证、碳减排核算等激励政策，为资源化路径扫清制度障碍。

保护长江，功在当代，利在千秋，城镇污水处理系统的资源化转型，正是这一伟大事业中至关重要且充满智慧的环节，它连接着城市的可持续发展与流域的生态健康，预示着一个人水关系更加和谐、资源循环更加畅通的未来。长江流域的探索，必将为全国乃至全球的滨水城市发展与流域治理，贡献宝贵的中国方案。

参考文献

- [1] 骆美,甘曼琴,马中文,等.芜湖市农村生活污水处理现状及适用技术分析[J].安徽农业科学,2024,52(21):54-57.
- [2] 叶相成.保一库碧水永续北送的十堰做法流域综合治水科学智慧管水全民参与护水[J].中国生态文明,2024,(04):77-79.
- [3] 中国新闻网.地下藏“卧龙” 碧水润宜昌:解码长江大保护的治水匠心[EB/OL].(2025-01-09)[2025-12-22].
- [4] 刘亦文,高京淋,曾琪海,等.协同策略差异化下长江流域水污染治理激励机制[J].生态学报,2025,45(12):5798-5810.
- [5] 姚锡伟,陈彬,王燕,等.沱江流域水资源综合治理与可持续发展的长效机制研究[J].内江科技,2024,45(01):136-138.
- [6] 朱锋.新时代内河流域治理生态建设的路径和措施——以鄂州市长港河流域综合治理项目为例[J].鄂州大学学报,2025,32(04):90-91+96.
- [7] 黄克瑶,王胜举.长江岸线更美了一——三峡集团助力长江经济带生态修复侧记[J].国企管理,2025,(07):62-65.



生态约束下流域水电开发与水资源协同调度策略

田硕硕

河北天云市政工程有限公司, 河北石家庄, 050000

摘要: 生态约束是流域水电开发与水资源调度的刚性底线, 核心是依托生态承载力统筹多生态要素, 实现开发与保护协同。当前存在水电开发与生态约束适配不足、水资源调度缺乏协同、生态约束量化技术不成熟、协同调度技术支撑薄弱等问题。通过优化水电开发布局、规模及老旧工程改造, 完善梯级水库、多用途、跨流域及新能源互补背景下的协同调度策略, 强化技术支撑, 可实现流域水资源可持续利用与生态健康。

关键词: 生态约束; 水资源调度; 协同发展; 实践策略

Coordinated scheduling strategy of hydropower development and water resources in river basin under ecological constraints

Shuoshuo Tian

Hebei Tianyun Municipal Engineering Co., Ltd., Shijiazhuang Hebei 050000, China

Abstract: Ecological constraints are the rigid bottom line of hydropower development and water resources scheduling in river basins. The core is to coordinate multiple ecological factors based on ecological carrying capacity and realize the coordination of development and protection. At present, there are some problems, such as insufficient adaptation of hydropower development and ecological constraints, lack of coordination of water resources scheduling, immature quantification technology of ecological constraints, and weak technical support for collaborative scheduling. By optimizing the layout and scale of hydropower development and the transformation of old projects, improving the coordinated scheduling strategy under the background of cascade reservoirs, multi-purpose, cross-basin and new energy complementarity, and strengthening technical support, the sustainable utilization of water resources and ecological health in the basin can be realized.

Keywords: Ecological Constraints ; Water Resources Scheduling; Coordinated Development; Practice Strategy

引言

随着流域水电开发规模扩大与水资源需求攀升, 水电开发、水资源利用与生态保护之间的矛盾日益突出。流域生态系统具有复杂性与脆弱性, 水文节律、生物栖息等要素易受人类活动扰动, 生态退化问题逐步显现。当前水资源调度“各自为战”, 生态约束落实缺乏科学支撑, 亟需立足生态优先理念, 梳理现状问题、探索协同路径, 破解开发与保护的失衡困境, 为流域高质量发展

提供保障。

1 生态约束的内涵

生态约束是流域水电开发与水资源调度必须遵循的刚性底线与前置条件, 以生态承载力为边界, 统筹水文过程、生物栖息、水环境质量与生态系统完整性。核心是落实生态优先、保护优先, 严守生态保护红线、水源涵养区与重要生境管控要求, 保障河道生态基流、鱼类洄游与繁殖期水文节律, 维持水体自净与河岸稳定。它将生态目



Copyright © 2025 by author(s) and Quest Press Limited. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



标嵌入调度全流程，以动态约束替代静态管控，倒逼开发从“重效益轻保护”转向水电、供水、生态多目标协同，实现水资源可持续利用与流域生态健康^[1]。

2 生态约束下流域水电开发与水资源调度的现状

2.1 水电开发与生态约束适配性不足

当前流域水电开发过程中，部分项目规划设计阶段未充分将生态约束要求融入核心环节，导致开发活动与流域生态系统承载能力脱节。多数水电项目仍以发电效益最大化为核心目标，对生态保护的重视程度不足，开发布局与规模未充分考虑流域生态敏感区分布，部分项目选址临近鱼类产卵场、水源涵养区等关键生境，施工过程中产生的植被破坏、水土流失等问题进一步加剧生态系统退化。同时，水电运行阶段的调度方式缺乏生态适应性，为追求发电效率，常采用集中泄水、断流等调度模式，打破了天然水文节律，导致河道生态基流无法得到有效保障，进而影响鱼类洄游繁殖、水生生物群落结构稳定，使得水电开发与生态保护之间的矛盾日益突出，难以实现开发与保护的协同推进^[2]。

2.2 水资源调度缺乏系统性协同

流域水资源调度目前仍存在“各自为战”的局面，缺乏系统性的协同机制，导致水电开发、生活用水、生产用水与生态用水之间的矛盾难以协调。从调度主体来看，水电开发企业、水资源管理部门、地方政府等相关主体权责划分不清晰，调度决策缺乏统一的协调平台，各主体往往基于自身利益制定调度方案，忽视了流域整体水资源配置效率与生态保护需求。从调度范围来看，现有调度多集中于单一水库或单一河段，未实现全流域统筹调度，上下游、左右岸水资源分配不均衡，部分区域过度开发利用水资源，而部分区域生态用水被挤占，导致流域水资源供需失衡^[3]。此外，调度过程中未充分衔接气象、水文等动态

信息，调度方案缺乏灵活性，难以应对极端天气、水文情势变化带来的水资源调配需求，进一步降低了水资源调度的协同性与科学性。

2.3 生态约束量化技术不成熟

生态约束的有效落实依赖科学的量化技术，但目前流域层面生态约束量化技术仍处于不完善阶段，难以为水电开发与水资源调度提供精准支撑。一方面，生态约束核心指标的量化方法不统一，针对河道生态基流、鱼类适宜生境、水体自净能力等关键指标，不同研究采用的量化模型与参数存在差异，缺乏统一的行业标准与技术规范，导致量化结果的科学性与可比性不足。另一方面，生态约束的动态量化能力不足，流域生态系统具有复杂性与动态性，受气象、水文、人类活动等多种因素影响，而现有量化技术多基于静态数据开展分析，难以实时捕捉生态系统的动态变化，无法根据生态状况的演变及时调整约束指标。此外，生态约束与水电开发、水资源利用之间的关联量化研究不足，难以量化水电开发与水资源调度对生态系统的影响程度，导致生态约束要求难以精准转化为可操作的调度参数。

2.4 协同调度技术支撑薄弱

协同调度技术的滞后的是制约流域水电开发与水资源协同调度推进的重要因素，目前相关技术支撑体系仍较为薄弱。从调度模型来看，现有调度模型多侧重于单一目标优化，缺乏兼顾水电发电、水资源供给与生态保护的多目标协同调度模型，难以实现多目标之间的平衡协调，模型的实用性与针对性不足^[4]。从数据支撑来看，流域水资源、生态环境、水电运行等相关数据分散在不同部门，缺乏统一的数据共享平台，数据碎片化、标准化程度低，导致调度决策缺乏全面、精准的数据支撑，难以实现调度方案的科学优化。此外，智能化调度技术应用不足，大数据、物联网、人工智能等先进技术在协同调度中的融合应用较少，调度过程仍以传统经验决策为主，缺乏对水文情势、生态状况的实时监测与精准预判，

作者简介:

田硕硕 (1988.12~) 男, 汉, 山东菏泽, 研究生, 研究方向: 机电。

导致调度方案的调整滞后于实际需求，进一步降低了协同调度的效率与效果。

3 生态约束下流域水电开发与水资源协同调度策略

3.1 流域水电开发优化策略

3.1.1 水电开发布局优化

基于流域生态承载力评价结果，实施水电开发分区管控模式，明确禁止开发、限制开发与适宜开发区域。禁止开发区域重点划定生态敏感区及生态保护红线范围，严格管控任何水电开发活动，保障核心生境完整性。限制开发区域严控水电项目数量与规模，优先保护鱼类洄游通道、水源涵养区等关键区域^[5]。适宜开发区域结合流域水文节律与生态特征，推进梯级水电协调布局，统筹上下游梯级电站的开发时序与运行方式，避免单一电站开发对流域生态系统的集中影响，实现水电开发布局与生态约束的精准适配，兼顾开发效益与生态保护。

3.1.2 水电开发规模与方式优化

以流域生态承载力为核心边界，科学核算水电开发适宜规模，摒弃单纯追求发电效益的规模扩张模式，合理控制流域水电开发总量。优化水电开发方式，优先采用生态友好型开发技术，减少施工过程中植被破坏、水土流失等生态影响。在鱼类繁殖期、洄游期合理调整开发节奏，避免大规模施工扰动水生生物栖息地。同时，结合流域水资源时空分布特征，优化电站建设时序，优先开发对生态影响较小的项目，逐步推进高影响项目的生态化调整，实现水电开发规模、方式与生态约束的动态平衡。

3.1.3 老旧水电工程生态化改造策略

针对已建成的老旧水电工程，开展生态影响评估，明确改造重点与方向，推动工程生态化升级。重点改造影响鱼类洄游的设施，增设鱼道、生态泄水孔等配套设施，保障鱼类正常洄游与繁殖。优化老旧电站运行调度方式，调整泄水规律，恢复河道天然水文节律，保障河道生态基流稳定。同时，对工程周边受损植被、河岸生态进行修复，

提升流域生态系统自我修复能力。建立老旧水电工程生态化改造长效机制，定期开展改造效果监测与评估，根据生态状况动态调整改造方案，实现老旧工程与流域生态系统的和谐共生。

3.2 水资源协同调度优化策略

3.2.1 梯级水库协同调度策略

构建梯级水库生态协同调度体系，以生态流量保障为核心，统筹梯级水库的蓄水、泄水调度。结合流域生态目标，科学核定各河段生态基流阈值，明确各梯级水库生态泄水责任，确保河道生态流量持续稳定。优化梯级水库泄水时序，避免集中泄水对下游生态系统造成冲击，兼顾生态保护与防洪、发电需求。同时，推进洪水资源化利用，在保障防洪安全的前提下，合理拦蓄洪水，补充流域水资源总量，优化水资源时空分配，提升梯级水库水资源调配的协同性与生态性，实现防洪、生态、发电等多目标共赢。

3.2.2 水电发电与水资源多用途调度协同策略

打破水电发电与水资源多用途利用的壁垒，建立协同调度机制，统筹协调发电用水与生活用水、生产用水、生态用水的关系。根据流域水资源供需状况，合理分配各用途用水量，优先保障生活用水与生态用水，在此基础上优化发电调度方案。优化电站运行方式，灵活调整发电时段与发电量，避免发电用水挤占生态用水与生产生活用水。建立水资源供需动态监测机制，实时掌握水资源变化情况，动态调整调度方案，实现水电发电效益与水资源多用途利用效益的协同提升，保障流域水资源可持续利用。

3.2.3 跨流域水资源调配与本地水电开发协同策略

结合流域水资源分布不均的现状，统筹跨流域水资源调配与本地水电开发，构建互补协同的水资源利用体系。在跨流域调水规划阶段，充分考虑本地水电开发布局与运行需求，合理确定调水规模与时序，避免调水工程与本地水电开发产生冲突。优化本地水电开发调度，结合调水时段与调水量，调整电站运行方案，提升水资源利用效率。建立跨流域调水与本地水电开发协同监测机制，实时跟踪水资源调配与水电运行状况，动

态优化调度策略,实现跨流域水资源调配与本地水电开发的有机协同,缓解流域水资源供需矛盾。

3.2.4 新能源互补背景下的水电与水资源协同调度策略

立足新能源发展趋势,构建水电与新能源互补的协同调度体系,兼顾能源供应与水资源利用。利用水电调节性能强的优势,平衡风电、光伏等新能源的波动性,优化能源供应结构。在调度过程中,统筹水电发电与水资源调配,结合新能源发电出力变化,调整水电泄水与发电方案,避免能源调度与水资源调度脱节。建立新能源与水电协同调度数据共享平台,整合新能源发电、水电运行、水资源监测等数据,提升调度决策的科学性与精准性,实现新能源开发、水电发电与水资源利用的协同发展。

3.3 技术支撑策略

3.3.1 生态约束量化技术优化

完善生态约束量化技术体系,统一核心指标量化标准,针对河道生态基流、鱼类适宜生境、水体自净能力等关键指标,建立标准化的量化模型与参数体系,提升量化结果的科学性与可比性。加强生态约束动态量化技术研究,融合气象、水文、生态监测等动态数据,构建动态量化模型,实时捕捉流域生态系统变化,实现约束指标的动态调整。深化生态约束与水电开发、水资源利用的关联量化研究,量化水电开发与调度对生态系统的影响程度,将生态约束要求精准转化为可操作的调度参数,为协同调度提供精准技术支撑。

3.3.2 协同调度模型与算法改进

突破单一目标调度模型局限,构建兼顾水电发电、水资源供给、生态保护的多目标协同调度模型,明确各目标权重,实现多目标之间的平衡协调,提升模型的实用性与针对性。引入智能算法,优化协同调度模型求解过程,提升模型运算效率与调度方案优化精度,解决多目标协同调度中的复杂优化问题。结合流域实际情况,对模型与算法进行本土化改进,充分考虑流域水文特征、生态需求与水电开发布局,增强模型的适配性,为协同调度决策提供科学的模型支撑,实现调度

方案的最优配置。

3.3.3 数字孪生与智能监测技术应用

构建流域数字孪生系统,整合流域水资源、生态环境、水电运行等各类数据,搭建可视化调度平台,实现流域状况的实时模拟、动态监测与精准预判。推进智能监测技术全覆盖,部署物联网监测设备,实时监测河道生态流量、水质、水生生物等生态指标,以及水电运行、水资源调配等动态信息,打破数据碎片化壁垒。利用数字孪生系统开展调度模拟与方案推演,提前预判调度方案对生态与水资源的影响,优化调度决策,提升协同调度的智能化水平,为生态约束下的协同调度提供高效技术支撑。

4 结语

生态约束下流域水电开发与水资源协同调度是实现生态保护与资源利用共赢的关键路径。当前面临的适配性、协同性及技术支撑等问题,制约了流域可持续发展。通过科学优化水电开发模式、构建多元协同调度体系、完善技术支撑体系,可有效化解各类矛盾,推动水电开发从“重效益轻保护”向多目标协同转变,切实守护流域生态安全,实现水资源与生态环境的长效协调发展。

参考文献

- [1] 张锦,郎泽涛,丁雅静. 水电开发规模对流域水资源年际均衡的影响 [J]. 自然资源学报, 2025, 40 (09): 2465-2478.
- [2] 任爱武. 大型常规水电开发权管理机制研究 [J]. 中国水能及电气化, 2025, (05): 8-12.
- [3] 宋佳,郝珍珍,马俊勇. 基于生态系统服务价值的水电开发生态补偿研究——以玛尔挡水电站为例 [J]. 人民长江, 2024, 55 (12): 118-123+130.
- [4] 黄翔,陈雪峰,徐李濠. 水电开发对大渡河中上游梯级水库水温影响研究 [J]. 灌溉排水学报, 2024, 43 (S1): 99-107.
- [5] 张锦,丁雅静. 水资源禀赋对水电梯级开发效率的影响路径 [J]. 长江流域资源与环境, 2024, 33 (02): 336-346.



城市信息模型 (CIM) 在智慧水利规划 与决策支持中的应用

张明昭

锦州市数据中心, 辽宁锦州, 121000

摘要: 城市化进程加快, 气候变化影响加大, 传统水利规划与管理模式处理城市内涝、水资源短缺等复杂问题时, 存在数据割裂、协同不畅、决策滞后等问题。智慧水利是智慧城市的重要组成部分, 要集成多源数据与先进模型, 提升规划科学性与决策精准性。城市信息模型 (CIM) 融合地理信息、建筑数据与物联网感知数据, 是三维数字底座, 能为解决上述难题提供新技术路径。本文主要做 CIM 在智慧水利领域的融合应用研究, 目的是探讨依托 CIM 平台整合水文、管网、地形及实时监测数据, 构建耦合水动力模型与空间分析功能的决策支持框架。

关键词: 城市信息模型; 智慧水利; 决策支持

Application of City Information Model (CIM) in Smart Water Conservancy Planning and Decision Support

Mingzhao Zhang

Jinzhou Data Center, Jinzhou Liaoning 121000, China

Abstract: With the acceleration of urbanization and the increasing impact of climate change, traditional water resource planning and management models face challenges such as data fragmentation, poor coordination, and delayed decision-making when addressing complex issues like urban flooding and water scarcity. Smart water resource management is a crucial component of smart cities, requiring the integration of multi-source data and advanced models to enhance planning scientificity and decision-making precision. The City Information Model (CIM), which integrates geographic information, building data, and IoT sensing data, serves as a three-dimensional digital foundation, offering a new technological approach to addressing these challenges. This paper primarily explores the integrated application of CIM in the field of smart water resource management, aiming to discuss the integration of hydrological, pipe network, terrain, and real-time monitoring data based on the CIM platform, and the construction of a decision support framework that couples hydrodynamic models with spatial analysis functions.

Keywords: urban information model; smart water conservancy; decision support

1 城市信息模型

1.1 CIM的核心内涵与技术架构

城市信息模型 (CIM) 是整合了城市地上地下、室内室外、历史现状未来等多维度多尺度信息的三维数字基础平台。它的核心是打造一个统

一、可运算的数字孪生城市, 把物理城市的所有要素做数字化呈现、动态监测和智能管控。CIM不是某一项单独技术, 而是融合BIM、GIS、IoT、大数据、云计算等多种关键技术形成的复杂系统。BIM能提供建筑和基础设施的精细几何与语义信息, GIS可搭建宏观地理空间框架并提供空间分



Copyright © 2025 by author(s) and Quest Press Limited. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



析能力, IoT则负责实时采集数据, 这三类技术配合起来, 就能完成城市空间的立体化、语义化描述^[1]。

CIM一般采用分层的技术架构, 包含感知层、数据层、平台层、应用层四个层级。作为架构核心的是数据层, 它统一数据标准与编码体系, 整合倾斜摄影、激光点云、BIM模型、地质勘探、业务系统等不同来源、不同结构的数据, 最终形成能覆盖所有区域与要素的“一张图”。平台层负责提供数据管理、服务发布、三维渲染、空间分析、模拟仿真等通用功能, 给上层的智慧应用提供支持。这套架构让CIM拥有比较大的数据集、三维可视化与综合分析能力, 给智慧水利这类垂直领域的深入应用打好了数据与平台方面的基础^[2]。

1.2 智慧水利的挑战与CIM的适配性

传统水利规划经常被数据孤岛和静态分析模式限制。不同部门的数据标准不一样, 水文、地质、管网、气象等信息分散在各地, 没法对城市水系统形成整体的认识。规划方案大多参照历史经验和二维图纸制定, 做不到对复杂三维空间关系和动态过程的精细模拟, 让规划预见性不足、协同决策困难的问题出现^[3]。

上述难题, 刚好能用城市信息模型(CIM)的技术框架解决, 这套框架有统一的数据标准和集成架构, 能把水利领域的BIM、GIS、IoT监测还有业务系统数据整合到一起, 让信息壁垒消失。借助CIM搭建的水利全要素三维场景, 能把河道、水库乃至地下管网, 都以立体、带语义的形式呈现出来。CIM平台还有比较强的空间分析和模拟仿真能力, 能把水动力模型这类专业分析和三维环境结合起来, 动态模拟雨洪过程、推演调度方案, 给多部门协同会商和科学决策, 带来直观、量化的数据支持。

1.3 CIM支撑智慧水利决策的理论框架

本文要搭建以CIM为核心的智慧水利决策支持理论框架, 得先把核心构成要素和运行逻辑理

清楚。这个框架把CIM平台当统一数字底座, 目的是整合来源不同、格式有差的各类数据, 集成专业分析模型, 还要把水利规划、调度、应急等核心业务应用深度融合起来。它的理论模型按“数据层-模型层-应用层”的顺序逐层推进。数据层用CIM标准规范, 完成BIM、GIS、IoT及业务系统数据的语义化集成和三维可视化表达, 形成水利全要素数字孪生体。依托CIM的空间计算与模拟仿真环境, 模型层把水动力、水质、水资源配置等专业模型结合到一起, 把数据转化成可以量化分析的知识。应用层基于前面的数据与模型成果, 针对规划方案比选、运行调度模拟、应急情景推演等具体决策场景, 给用户提供可视化、交互式的智能分析工具与协同会商平台, 最终让决策从经验判断转向数据模型驱动。

CIM平台具备的一体化融合能力, 是这套理论框架的核心部分。它不是把各类技术简单拼凑起来, 而是依靠统一空间信息模型, 让数据、模型和业务逻辑在三维时空环境下形成动态联动。静态的水利设施资产能和动态水文监测过程关联, 确定性工程参数能和不确定性自然过程配对, 所有内容都在同一平台上完成关联分析与模拟推演, 最终构成一套覆盖“感知-模拟-评估-决策”全流程的闭环决策支持体系。

2 基于CIM的智慧水利多源数据集成与三维表达

2.1 水利相关多源数据的特征与CIM集成路径

和水利有关的多类数据, 存在类型多、时空尺度有差异、格式不统一、动态性强的特点。降雨、径流这类水文数据, 呈现出时间序列的规律, 管径、材质等管网数据, 包含着复杂的拓扑关联, DEM这类地形数据属于空间连续场, 水位、流量等物联网监测数据, 有着高频实时的属性。不同数据在精度、更新频率、数据结构上存在比较大的不同, 让集成工作面临挑战。

为了让这些数据能在CIM里有效集成, 本文

要建立标准化的集成路径。制定统一的数据标准与编码规范，对各类水利要素开展语义化建模。构建多源数据融合处理流程，借助ETL工具完成格式转换、坐标统一与质量控制，同时通过CIM

的通用数据环境（CDE）与时空信息平台，按几何、属性与时间维度对处理后的数据进行一体化组织与管理，形成可查询、可分析、可模拟的数字孪生基底。见表1。

表1 数据类型

数据类型	主要特征	典型格式	CIM集成关键处理
水文数据	时间序列性强，具有统计规律	CSV, TXT, 数据库表	时间序列数据库存储，与空间位置关联
管网数据	网络拓扑结构复杂，属性丰富	SHP, DWG, IFC	几何拓扑重建，语义属性挂接
地形数据	空间连续场，数据量大	TIF, GRID, LAS	多尺度金字塔构建，三维地形服务发布
物联网数据	高频实时，流式数据	MQTT, JSON, 实时库	流数据处理引擎，实时接入与动态渲染

数据在CIM平台中的融合精度可通过空间匹配度指标 M_s 进行评估，其计算公式见公式1。

$$(M_s = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n \cdot L}) \quad (\text{公式1})$$

其中， d_i 为第*i*个特征点的位置偏差， L 为特征的平均尺度， n 为采样点数量。例如，当管网节点平均偏差 $d_i=0.5m$ ，特征尺度 $L=50m$ ，采样点 $n=100$ 时，计算得 $M_s=1-0.5 \times 100/100 \times 50=0.99$ ，表明集成具有较高的空间一致性。

2.2 水利设施与水文过程的全要素三维建模

把不同来源的数据整合好之后，靠CIM平台完成水利设施和水文过程的全要素三维建模，是实现数字孪生和精细化管理的核心。排水管网、泵站、闸坝这类静态设施，要完成几何与语义的精细化建模，地表径流、河道水流这类动态水文过程，也要完成时空演变表达，这两部分都是建

模过程里要覆盖的内容。针对静态设施，本文用BIM与GIS融合技术，先把带大量构件信息的BIM模型做轻量化处理，再按地理坐标精准放到CIM三维场景里，同时挂上材质、设计参数、运维记录等属性信息。针对动态水文过程，本文依托集成后的地形、管网和实时监测数据搭建三维空间分布场，再用粒子系统、动态纹理或等值面等方式做可视化渲染，模拟水流流向、淹没范围这类动态现象。见公式2。

$$V_{\text{pipe}} = \pi \cdot \left\{ \left(\frac{D}{2} \right) \right\}^2 \cdot L \quad (\text{公式2})$$

在公式2中， D 为管道内径， L 为管道长度。例如，一段内径 $D=1.0m$ 、长度 $L=100m$ 的圆形管道，其容积 $V_{\text{pipe}} \approx 3.14 \times (0.5)^2 \times 100 = 78.5m^3$ 。此计算是评估管网调蓄能力的基础。见表2。

表2 建模对象

建模对象	核心建模技术	关键属性信息	三维表达形式
排水管网	BIM-GIS融合、网络拓扑重建	管径、材质、坡度、埋深、连接关系	三维管线模型，支持剖切与流向显示
泵站/闸坝	精细化BIM建模、构件级语义化	设计流量、扬程、启闭状态、设备型号	可交互的设施单体模型，部件可查询
河道	基于DEM与断面数据的曲面重构	河底高程、岸线、堤防标高、糙率	连续的三维河道地形与水面
地表径流	水动力模型耦合、动态粒子系统	水深、流速、流向、淹没时间	随时间变化的三维淹没场与流场动画

建模的精细度直接影响模拟分析的准确性。通过设定不同层级的细节层次（LOD），可平衡可视化效果与计算效率。例如，在宏观规划时使

用LOD1简化模型，在泵站内部巡检时则调用LOD3的精细化BIM模型。

2.3 动态监测数据与CIM场景的实时耦合机制

要让水利状态实现动态可视化，核心就是把动态监测数据和CIM场景做实时耦合。本文完成标准化数据接口（如MQTT、WebSocket）搭建，把河道、水库、雨量站等点位传感器，实时采集到的水位、流量、降雨量等数据，接入统一的CIM数据中台。中台完成数据清洗、解码与时空对齐

后，推动三维场景里对应的闸门、水位标尺等水利设施模型，还有动态水面，完成实时状态更新与渲染。比如，河道三维水面模型的高程变化，由水位数据直接驱动，流量数据则借助粒子系统的密度与速度来呈现，同步在CIM平台上生成和物理世界同步变化的数字孪生体。见表3。

表3 监测数据

监测数据类型	典型传感器	接入协议/频率	CIM场景中的可视化映射方式
水位	压力式水位计、 雷达水位计	MQTT, 1分钟/次	驱动三维水面模型高程变化, 更新水位标尺读数
流量	超声波流量计、ADCP	WebSocket, 5分钟/次	通过动态粒子系统模拟水流强度与方向
降雨量	翻斗式雨量计、 雷达反演	HTTP API, 5-15分钟/次	以热力图或动态雨滴效果叠加在三维地形上
闸门开度	编码器、倾角传感器	OPC UA, 实时/事件触发	驱动三维闸门模型旋转角度,同步显示开度百分比

3 CIM平台下的智慧水利模拟分析与规划应用

3.1 耦合水动力模型的CIM城市雨洪模拟分析

在CIM平台中集成水动力模型，是实现城市雨洪过程高保真动态模拟与精细化淹没分析的核心技术路径。通过CIM的统一数据底板，将城市地形、建筑、管网、下垫面等BIM/GIS数据与水文水动力模型（如SWMM、MIKE等）进行语义关联与空间耦合，构建起“物理城市-数字孪生-模型计算”的闭环。模型基于二维浅水方程或一维-二维耦合方法进行求解，其控制方程可表述为公式3。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = R - I \quad (\text{公式3})$$

在公式3中，h为水深（m），u,v分别为x,y方向流速（m/s），R为降雨强度（mm/h），I为下渗率（mm/h）。以某区域2小时降雨过程（峰值强度120mm/h）为例，模型可计算出网格化的积水深度与范围。

我们把模拟计算得到的淹没水深、流速、演进过程等时空动态结果，实时投射到CIM三维场景里，打造出能交互、可回溯的“数字内涝”推演场景。这些内容给内涝风险识别、排水设施效能评估及应急预案制定，提供了直观的决策参考。下面是不同设计降雨情景下，模拟关键指标的具体对比。见表4。

表4 降雨重现

降雨重现期（年）	峰值流量（m ³ /s）	最大淹没面积（ha）	平均淹没深度（m）	内涝点数量（个）
5	85.6	12.3	0.25	8
20	152.4	28.7	0.42	19
50	198.1	41.5	0.58	27

数据来源：基于研究区SWMM模型在芝加哥设计雨型下的模拟计算结果。

3.2 基于CIM的水利规划方案量化评估与比选

本文针对水利规划方案做量化评估与比选，借助CIM平台的空间分析和模拟推演能力，完成不同排水规划、蓄滞空间布局方案的综合效能与风险评估。先在CIM三维场景里搭建多个备选方

案的数字孪生体，内容涉及调整管网管径、增设调蓄池、优化绿地布局等，再把各方案模型和集成好的城市雨洪模型耦合，在统一设计降雨情景下展开模拟计算。平台会自动提取并对比系统峰值流量削减率、内涝点消除数量、淹没体积、投资成本及环境影响等关键性能指标，最终形成多维度、可视化的量化评估矩阵。见表5。

表5 评估方案

评估方案	管网改造长度 (km)	调蓄池容积 (万 m ³)	峰值流量削减率 (%)	内涝点消除率 (%)	总投资估算 (亿元)
方案 A (保守改造)	15.2	2.5	18.3	35.7	1.2
方案 B (绿色基建为主)	8.5	5.8	25.6	52.4	1.8
方案 C (灰色设施强化)	22.7	3.0	30.1	60.2	2.5
方案 D (灰绿结合优化)	18.3	4.2	32.4	68.9	2.2

数据来源：基于某新区CIM平台耦合MIKE模型，在50年一遇设计降雨情景下的模拟计算结果与工程概算。

本文完成权重设定后开展多目标决策分析，平台会输出方案比选雷达图和综合评分，能直观看出不同方案在防洪效能、经济性与生态性上的取舍关系。这些内容给决策者挑选最优规划方案提供了数据支撑的科学依据，让水利规划的科学性与精准性有了提升。

3.3 水资源调度与应急响应的CIM可视化决策支持

在水资源调度、应急响应的实际场景里，CIM平台整合实时监测数据、水利工程模型及业务规则，搭建起能动态展示的协同指挥与决策推演环境。日常供水调度时，平台会把水源地、水厂、管网、用水户等多渠道数据整合到一起，在三维场景里直接呈现供水网络的实时压力、流量和水质情况。调度人员借助需水预测结果和管网水力模型，能在CIM系统里模拟泵站启停、阀门调节等不同调度方案下的管网压力分布、供水路径变化，评估方案对供水安全、能耗的影响，完成优化调度。

防洪抢险进入应急响应状态时，CIM平台的作用比较大。预警发出后，平台会立刻切换到应急模式，把气象预报、实时雨情、河道水位、水库蓄量、闸泵状态、视频监控等信息自动关联起来，在三维城市底图上完成一体化融合展示。指挥中心借助耦合的水动力模型，能在CIM场景里动态模拟洪水演进过程并做可视化推演，预判淹没范围、深度以及到达时间。平台还能在三维模型里标记险工险段、物资仓库、避难场所、救援

队伍的位置，规划最优救援路径与人员转移路线，实现“一张图”协同指挥。

4 CIM赋能智慧水利决策支持的实践

4.1 提升水利规划精细化与决策智能化的应用成效

城市信息模型（CIM）投入使用后，水利规划的精细化程度、决策的智能化水平都有了提升。集成多源异构数据，搭建高精度三维场景，CIM能给水动力模型提供精准的地理空间基底与边界条件，让城市雨洪模拟的精度得到切实改善。规划人员可借助CIM平台，对不同水利工程方案完成三维可视化推演与量化评估，直观对比各方案在防洪排涝、水资源调配等方面的综合效益，选出更科学合理的规划方案。

CIM平台打通了传统水利管理里各部门的信息阻隔，让规划、建设、管理等部门能在统一时空框架下完成数据共享，开展业务协同。应对突发水灾害时，依托CIM搭建的可视化决策支持系统，可整合实时监测数据，动态推演灾害发展状态，给应急指挥与资源调度提供直观、高效的决策参考，跨部门协同应急响应能力因此有了提升。

4.2 推动城市基础设施数字化转型的融合范式

将城市信息模型和智慧水利深度结合起来，能给城市基础设施系统的整体数字化转型，提供可复制的融合模式。这种模式把统一时空信息平台作为核心，打通了传统基础设施管理里各系统各自为政的“烟囱式”壁垒，实现水利、交通、能源、管网等多源异构数据的集成与语义关联。搭建城市级数字孪生底座后，CIM不再局限于服

务单一水利业务，还成为支撑城市规划、建设、管理与服务的公共数字基础设施。

这个融合模式，把原本单独管理设施的模式，转变成了对城市复杂系统的协同治理。CIM平台上智慧水利的落地成果，确认了“感知-集成-模拟-决策”这套技术和管理流程的可行性，相关经验也能用在智慧管网、智慧交通等其他领域。以业务需求为核心、依托统一平台搭建的这种模式，能避免重复建设，也不会出现数据孤岛，还能加快建成跨部门、跨层级的城市运行“一网统管”新框架，给新型智慧城市建设拿出了一套完整的解决办法。

5 结语

本文梳理相关实践后发现，用CIM技术能把水利设施的所有要素转成数字形式，还能做动态模拟，城市雨洪过程模拟、水资源调度和应急响应的可视化与协同分析能力能得到提升。用CIM开展模拟分析，可对不同规划方案的排水效能、

内涝风险做评估，给管网改造、蓄滞空间布局提供可量化的参考，还能让多部门在同一平台里完成方案比选与协同决策。本文已验证CIM在优化水利规划精细化水平、完善决策智能化程度上的实用价值，也推出一套可参考的融合应用模式，能推进城市基础设施的数字化转型与跨领域业务协同，助力增强城市水安全韧性与可持续发展能力。

参考文献

- [1] 柯翔.智慧水利背景下水利水电工程安全监测系统优化研究[J].中国信息界,2026(02):177-185.
- [2] 焦莎,袁晓璐,杨彦斌,焦贞美.基于多源信息利用的经济决策支持模式研究[J].情报理论与实践,2025, (S1): 114-116.
- [3] 魏国奇.水灾时空演变模拟下的水库泄洪规划与应急响应决策支持方法[J].微型电脑应用,2025(11):113-117.



长江文库

综合性学术知识服务平台



· 长江文库 · 智汇知识 · 赋能学术

期刊·图书·古籍·学位论文·地方志·会议文献
覆盖全学科·服务全机构



「长江文库」一个汇聚海量学术资源的综合性知识服务平台。集期刊、古籍、地方志、图书、年鉴、会议论文、报纸于一体，覆盖自然科学、农业科学、医药科学、工程与技术科学、人文与社会科学五大学科。从专业出版服务到公共知识传播，我们连接历史与未来，服务全球学术研究与文化传承。

访问官网：www.cjwk.cn



龙源网APP
「名刊甄选」套餐会员



读杂志, 就上龙源网

可回溯往期杂志, 还可阅享1000多种精品期刊数字内容

【限时活动】订阅「龙源网」app “名刊甄选套餐” 年会员, 可专享 “**第二年会费1元**”

【套餐介绍】套餐内囊括180+种热门杂志

详细杂志清单可扫描右侧二维码了解

【费用说明】首年会费198元/年, 第二年1元, 合计199元

扫码立即订阅



龙源网阅读卡专门针对机构以及企业用户采购使用。内含付费阅读余额可购买龙源期刊网网页端以及移动端相关知识付费服务内容。并享受企业用户采购折扣价。

订卡企业微信

