

水利工程溃坝风险预警及应急措施

蔡乃可奈

海南省水利水电勘测设计研究院有限公司 海南 海口 570100

【摘要】水利工程溃坝风险直接关系公共安全与生态稳定，构建科学预警体系并配套高效应急措施是防范风险的核心举措。立足溃坝风险的复杂性与突发性特征，聚焦预警机制构建、应急响应流程优化等关键环节，通过梳理风险演化规律、完善监测防控手段、细化应急处置要点，形成“预警-响应-处置”全链条防控模式，为降低溃坝损失、保障工程安全运行提供实践支撑。

【关键词】水利工程；溃坝风险；预警体系；应急措施；安全防控

DOI:10.12417/2705-0998.25.22.015

引言

溃坝风险是水利工程运行中的重大安全隐患，其爆发可能引发洪水泛滥、基础设施损毁等连锁灾害，对周边群众生命财产安全和区域生态环境造成不可逆转的影响。准确识别风险隐患、及时发出预警信号、快速启动应急处置，是遏制风险扩大、减少灾害损失的关键所在。当前，水利工程面临的水文、地质等外部环境日益复杂，传统防控模式已难以满足精准化、高效化的风险防控需求。基于此，深入剖析溃坝风险的形成机理与演化路径，构建适配工程实际的预警机制，完善针对性强、可操作性高的应急措施，成为水利工程安全管理领域亟待解决的重要课题，对提升工程风险防控能力、保障区域可持续发展具有重要现实意义。

1 水利工程溃坝风险的核心成因解析

1.1 工程建设质量相关风险诱因

水利工程建设涉及设计、施工、材料选用等多个环节，任一环节的质量缺陷都可能成为溃坝风险的潜在诱因。设计阶段若未充分考量区域水文地质条件、极端天气影响等因素，可能导致工程结构布局不合理、承载能力不足，无法抵御正常运行中的各类荷载冲击。施工过程中，若施工工艺不规范、工序衔接不到位，可能造成坝体浇筑不密实、防渗设施铺设缺陷等问题，削弱坝体整体稳定性。材料选用上，若使用不符合标准的建材，如强度不足的混凝土、抗渗性差的防渗材料等，会直接降低工程质量底线，使坝体在长期运行中易出现裂缝、渗漏等病害，逐步累积形成溃坝风险。

1.2 自然环境变化引发的风险因素

自然环境的动态变化是诱发水利工程溃坝的重要外部因素。极端降水天气可能导致流域内水位短时间急剧上涨，超出坝体设计防洪标准，使坝体承受过大水压，引发漫顶、渗漏等险情。地质灾害的发生，如地震、滑坡、泥石流等，可能直接破坏坝体结构，造成坝基失稳、坝体开裂等严重问题，进而诱发溃坝^[1]。长期的气候变迁，如气温波动导致的冻融循环，会对坝体材料产生侵蚀作用，降低其物理力学性能；河流冲刷则可能破坏坝体上下游护坡及坝基，削弱工程抗风险能力，为溃

坝事故埋下隐患。

1.3 运行管理不当导致的风险隐患

水利工程运行管理的规范性直接影响风险防控效果，管理不当极易放大溃坝风险。日常巡查维护不到位，无法及时发现坝体裂缝、渗漏、附属设施损坏等初期隐患，可能导致小问题逐步恶化，发展为重大安全风险。调度运行不合理，如盲目蓄水、泄洪不及时等，会使坝体长期处于超负荷运行状态，加剧结构损耗。缺乏完善的风险管理制度，责任划分不明确、管理流程不规范，可能导致监测数据处理不及时、应急处置指令传达不畅，在风险来临之际无法快速有效响应，进一步提升溃坝事故发生的概率。

2 溃坝风险预警体系的构建框架

2.1 风险监测指标的科学选取

风险监测指标的选取需全面覆盖影响坝体安全的关键因素，确保监测数据的针对性与有效性。水文类指标应包括流域降水量、河流水位、入库流量等，实时反映水资源动态变化对坝体的压力；工程结构类指标需涵盖坝体沉降量、裂缝宽度、渗漏量等，精准捕捉坝体结构状态的细微变化；环境类指标则应纳入气温、风速、地质稳定性等数据，综合考量外部环境对工程的影响^[2]。指标选取需遵循科学性、实用性原则，既保证全面覆盖风险点，又避免冗余指标增加监测成本，同时确保指标数据易于采集、分析，为预警判断提供可靠依据。

2.2 预警信号的分级标准制定

预警信号分级需结合溃坝风险的严重程度与发展趋势，划分出不同等级的预警阈值，为应急响应提供明确指引。一级预警（红色）对应极高溃坝风险，表明坝体已出现严重结构损坏、险情快速恶化，需立即启动最高级别应急响应；二级预警（橙色）对应高风险，意味着坝体出现明显异常，风险呈上升趋势，需迅速采取防控措施；三级预警（黄色）对应中等风险，提示坝体存在潜在隐患，需加强监测与巡查；四级预警（蓝色）对应较低风险，仅出现轻微异常，需持续关注并做好记录。分级标准的制定需结合工程实际情况，参考相关技术规范，确保分级合理、界限清晰，便于操作人员快速识别与响应。如图1：

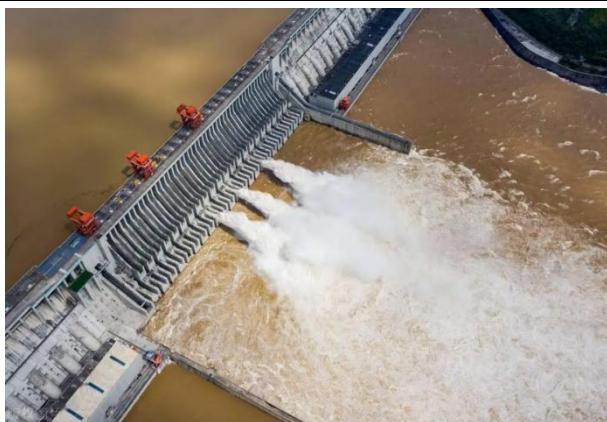


图1 水利枢纽大坝泄洪运行监测场景

2.3 预警信息的高效传递机制

预警信息的快速传递是保障应急处置时效性的关键，需构建多渠道、全方位的信息传递网络。依托物联网、大数据等技术，建立监测数据实时传输平台，实现监测指标数据从采集端到预警中心的无缝对接，确保数据及时汇总与分析。预警信息发布需采用多元化渠道，包括短信、广播、电视、社交媒体、应急预警终端等，覆盖工程管理部门、周边社区、相关救援单位等各类受众，确保预警信息快速触达。明确信息传递的责任主体与流程，建立信息反馈机制，及时确认接收方是否收到预警信息，避免因信息传递不畅导致应急处置延误。

3 溃坝风险应急准备的关键环节

3.1 应急方案的系统化编制

应急方案的编制需立足工程实际，全面考量各类可能发生的溃坝场景，形成针对性强、流程清晰的行动指南。方案应明确应急组织体系与职责分工，界定各部门、各岗位在应急处置中的具体职责，确保指挥有序、协同高效。需详细制定险情评估、人员转移、工程抢险、物资调配等各项工作流程，明确操作步骤、技术要求与时间节点。方案需充分考虑不同溃坝规模、影响范围下的处置措施，制定差异化应对策略，并预留调整空间，确保在实际险情中能够根据现场情况灵活调整，提高方案的可操作性与实用性。

3.2 应急物资与队伍的筹备

应急物资的筹备需围绕溃坝抢险与灾后处置的核心需求，建立全面、充足的物资储备体系。储备物资应包括抢险设备，如抽水机、挖掘机、防渗膜等，用于快速处置坝体渗漏、裂缝等险情；救生器材，如救生衣、冲锋舟、救生绳等，保障受困人员救援；保障物资，如食品、饮用水、帐篷、药品等，满足转移群众的基本生活需求。物资储备需遵循定点存放、专人管理、定期检查更新的原则，确保物资处于良好状态，随时可调用^[3]。组建专业应急救援队伍，吸纳水利工程技术员、抢险施工人员、医疗救援人员等专业力量，加强技能培训，提升队伍在险情评估、工程抢险、人员救援等方面的专业能力，确保

在应急处置中能够高效发挥作用。

3.3 应急演练的常态化开展

应急演练是检验应急方案可行性、提升应急处置能力的重要手段，需建立常态化演练机制。演练内容应涵盖险情报告、指挥调度、人员转移、工程抢险、物资调配等全流程，模拟不同等级、不同类型的溃坝险情，检验各环节工作的衔接配合与应急响应速度。演练组织需注重实战性，严格按照应急方案流程开展，邀请专业技术人员进行指导评估，及时发现方案中存在的漏洞与不足。演练结束后，组织复盘总结，分析演练中出现的问题，针对性地优化应急方案、完善工作流程、提升队伍能力，通过反复演练不断强化各参与方的应急意识与协同配合能力，确保在真实险情中能够从容应对。

4 溃坝事故应急处置的实施路径

4.1 险情快速评估与响应启动

溃坝事故发生后，首要任务是快速开展险情评估，为应急处置提供科学依据。组织专业技术人员利用监测数据、现场勘查等方式，全面评估坝体损坏程度、险情发展趋势、洪水影响范围、受威胁人员与财产数量等关键信息，明确险情等级与处置重点。根据险情评估结果，立即启动相应等级的应急响应，激活应急指挥体系，明确各部门、各队伍的任务分工与行动指令。同步发布应急预警信息，告知周边群众险情情况、避险路线与注意事项，确保群众及时知晓并采取避险措施，为后续处置工作争取时间。

4.2 受影响区域人员转移安置

人员安全是应急处置的核心目标，需快速有序开展受影响区域人员转移安置工作。根据险情评估确定的影响范围与风险等级，划定转移区域与安全避险场所，制定科学合理的转移路线，避免转移过程中发生拥挤、踩踏等次生事故^[4]。组织应急救援队伍、基层工作人员、志愿者等力量，通过上门通知、广播引导、协助转移等方式，确保转移区域内所有人员全部转移至安全场所，做到不落一人、不留死角。在避险场所搭建临时安置设施，配备充足的生活物资与医疗保障资源，安排专人负责安置人员的生活照料与情绪安抚，保障转移群众的基本生活与身心健康。

4.3 工程抢险与灾害控制措施

针对溃坝险情采取针对性的工程抢险措施，全力遏制险情扩大，控制灾害影响范围。对于坝体裂缝、渗漏等险情，采用灌浆封堵、铺设防渗膜、沙袋压堵等方式进行紧急处理，防止险情进一步恶化；对于坝体失稳等严重险情，可采取开挖泄洪通道、降低库水位等措施，减轻坝体压力。在抢险过程中，严格遵循安全操作规程，配备必要的安全防护设备，确保抢险人员安全。加强对洪水流动路线的监测与引导，采取修筑临时堤坝、疏通排水通道等措施，防止洪水蔓延至更多区域，减少对

周边基础设施、农田、居民区等的破坏。如图 2:



图 2 溃坝险情下河道应急抢险作业现场

5 风险防控与应急能力的提升策略

5.1 工程设施的常态化维护加固

常态化的维护加固是提升水利工程抗风险能力的基础,需建立全生命周期的工程养护机制。定期对坝体结构、防渗系统、泄洪设施、监测设备等进行全面检查与维护,及时发现并修复各类缺陷与损坏,确保工程设施始终处于良好运行状态。针对老旧工程、高风险区域工程,制定专项加固改造方案,采用先进的加固技术与材料,提升工程结构稳定性与防洪能力。加强对工程周边生态环境的保护与修复,种植水土保持植物、加固河岸边坡等,减少水土流失与地质灾害对工程的影响,从源头上降低溃坝风险。

5.2 预警与应急技术的创新应用

技术创新是提升风险防控与应急处置效率的核心支撑,更是破解传统防控模式局限性的关键路径,需主动引入前沿技术手段对预警与应急体系进行全方位优化升级。在预警环节,无人机巡查可突破地形限制,对坝体隐蔽部位开展高频次、全覆盖巡检,结合卫星遥感监测的大范围数据采集能力,精准捕捉流域水文、地质环境的动态变化;传感器网络则实现对坝体应

力、渗漏量等关键指标的实时感知与数据传输,三者协同发力大幅提升监测数据的精准度与时效性,为风险早期识别、精准研判提供技术保障^[5]。在应急处置阶段,依托大数据与人工智能技术构建的险情模拟分析模型,能够快速推演险情发展态势,为应急方案制定、资源最优调配提供科学依据;物联网技术贯穿应急物资存储、状态监测、调度配送全流程,实现物资管理智能化与高效化;信息化指挥平台整合各类数据资源,打造可视化、扁平化指挥模式,打破部门间信息壁垒,显著提升指挥决策效率与跨领域协同作战能力。

5.3 防控管理体系的持续优化

完善的管理体系是保障风险防控与应急处置工作有序开展的制度保障,需持续优化管理流程与机制。建立健全风险防控责任制,明确各级管理部门、工程运营单位的职责分工,将风险防控责任落实到每个岗位、每个环节,形成层层抓落实的工作格局。完善风险监测预警管理制度,规范监测数据采集、分析、上报流程,确保预警信息及时准确传递。优化应急管理考核评价机制,将应急准备、演练成效、处置效率等纳入考核指标,强化各相关单位的责任意识与执行力。加强风险防控与应急管理领域的培训交流,组织相关人员学习先进经验与技术,提升专业管理水平,推动防控管理体系不断完善。

6 结语

本文围绕水利工程溃坝风险预警及应急措施展开系统探讨,从风险成因解析、预警体系构建、应急准备、应急处置到能力提升,形成了全链条的防控思路与实践路径。水利工程溃坝风险防控是一项长期且复杂的系统工程,需始终坚持问题导向与底线思维,持续优化预警机制与应急措施。未来,应进一步强化技术创新与管理升级的融合,不断提升风险识别的精准度、预警响应的时效性、应急处置的高效性,为水利工程安全运行筑牢防线,切实保障公共安全与区域可持续发展。

参考文献:

- [1] 程井,向思瑶,周伟,等.基于组合赋权—云模型的溃坝生命损失风险评价[J/OL].河海大学学报(自然科学版),1-10[2025-12-15].
- [2] 张进朝,刘正坤.AI 技术在水利工程运行管理中的创新探索与实践应用[J].水利建设与管理,2025,45(08):17-22.
- [3] 蒋正淳,陈小康,杜镇瀚,等.土石坝溃坝洪水模拟与损失评估[J/OL].水利水运工程学报,1-14[2025-12-15].
- [4] 余再康,程井,余雷,等.基于遥感影像的溃坝风险人口估算模型研究[J].人民黄河,2025,47(04):44-50.
- [5] 洪慧,张强,汪洋,等.基于健康风险评价的溃坝区土壤重金属污染损害评估[J].有色金属(中英文),2025,15(03):514-524.