

梯级坝群系统服役风险评估与调控研究现状与展望

苏怀智^{1,2}, 高建新^{1,2}, 傅志敏², 毛延翩³, 远 近^{2,3}, 齐智勇^{2,3}, 都旭煌^{2,3}

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 江苏 南京 210098; 3. 中国长江电力股份有限公司, 湖北 武汉 430014)

摘要:梯级坝群作为流域水资源统一调配和水电能源开发的重要工程体系,其运行过程呈现多源风险叠加、传递与放大的复杂系统特征。随着国家对流域梯级开发的大力推进以及大坝安全风险管理体系建设的日益加强,梯级坝群系统的风险管理问题已成为水利工程安全领域的研究重点。本文围绕梯级坝群系统的风险传递效应,系统梳理了梯级坝群系统风险概率计算、损失评估、风险等级划分及协同调控等关键环节的研究现状,指出今后应加强梯级坝群系统溃坝洪水演进精细模拟、多源风险耦合分析、风险评估体系完善、多维协同调控策略制定以及流域智能管理平台构建等方面的研究,以期系统提升梯级坝群的风险防控能力与调控水平。

关键词:梯级坝群系统; 风险传递; 风险评估; 风险调控

中图分类号:TV642

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2025)05-0001-12

Research status and prospects of service risk assessment and regulation for cascade dam systems//SU Huaizhi^{1,2}, GAO Jianxin^{1,2}, FU Zhimin², MAO Yanpian³, YUAN Jin^{2,3}, QI Zhiyong^{2,3}, DU Xuhuang^{2,3} (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Nanjing 210098, China; 3. China Yangtze Power Co., Ltd., Wuhan 430014, China)

Abstract: As an important engineering system for integrated allocation of water resources and hydroelectric energy development in river basins, cascade dam systems exhibit complex systematic characteristics characterized by the superposition, transmission and amplification of multi-source risks during operation. With China's vigorous promotion of basin cascade development and the continuous strengthening of dam safety risk management system construction, risk management of cascade dam systems has become a research priority in the field of hydraulic engineering safety. Concentrated on the risk transmission effects within cascade dam systems, advances in the aspects of risk probability calculation, loss assessment, risk classification and coordinated regulation were reviewed. It is pointed out that future research should focus on the high-fidelity simulation of dam-break flood propagation in cascade systems, the coupling analysis of multi-source risks, the improvement of risk assessment frameworks, the formulation of multi-dimensional coordinated regulation strategies and the construction of intelligent river basin management platforms, with the aim of systematically enhancing the risk prevention and control capabilities as well as the regulation level of cascade dam systems.

Key words: cascade dam system; risk transmission; risk assessment; risk control

梯级坝群作为支撑流域水资源优化配置、水电能源集约开发及区域防洪减灾的重要工程体系,在助力实现“双碳”战略目标、推动流域综合治理以及构建水安全保障体系等方面扮演着重要角色。根据规划,到2050年,长江、黄河、金沙江、大渡河等流域将逐步形成以梯级开发为特征的系统性水利工程布局^[1-3]。这些流域的梯级坝群不仅具备发电、供水、生态调节等多种功能,还在提升水资源统一调配能

力与系统整体韧性方面发挥着关键作用,尤其在强化极端水情应对能力和保障下游区域运行安全中占据核心地位。然而,在充分发挥综合效益的同时,梯级坝群系统在运行管理中也面临更高的复杂性和风险挑战。与单坝工程相比,坝群系统呈现出更为复杂的空间结构和动态响应特征,表现出风险跨坝传递、时空放大和级联响应等系统性特征,一旦系统中某一座大坝发生故障或溃决,极易引发连锁效

基金项目:水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心开放研究基金项目(GJGCZX-JJ-202428);国家自然科学基金重点项目(52239009)

作者简介:苏怀智(1973—),男,教授,博士,主要从事涉水工程安全防控与提能延寿研究。E-mail:su_huaizhi@hhu.edu.cn

应^[4],造成整个流域范围内的灾难性后果,其严重程度远超单坝事故本身。例如,1975年8月,受台风“Nina”影响,淮河上游突降特大暴雨,导致河南板桥、石漫滩等62座水库发生连锁溃坝,造成逾百亿元的直接经济损失,是迄今为止全球最为严重的溃坝灾害之一^[5]。2020年5月,美国密歇根州Edenville大坝和Sanford大坝^[6]相继发生溃决;2021年2月,印度Chamoli地区因冰川崩塌引发大规模洪水,导致Rishiganga大坝和Tapovan大坝相继溃决^[7];同年7月,受强降雨影响,内蒙古呼伦贝尔市永安水库、新发水库^[8]发生垮坝事故;2023年9月,地中海飓风“丹尼尔”侵袭利比亚,德尔纳河流域遭遇极端强降雨,Abu Mansour大坝与Derna大坝接连溃决,洪水席卷下游历史名城德尔纳^[9]。这些连溃事故均造成了难以估量的经济损失与社会环境影响。

近年来受极端天气事件频发、国际形势越发复杂以及部分大坝逐渐接近设计使用寿命等因素叠加影响,水库大坝安全仍面临巨大的压力^[10]。为有效应对潜在风险,保障工程系统的稳定运行,风险分析理论在大坝安全管理中的应用受到广泛的关注。国内外学者围绕单坝风险管理已开展了大量研究,涵盖风险标准体系构建、风险识别方法、风险评估模型及风险应对策略等多个方面;与此同时,针对群坝系统的风险评估也逐步开展,重点聚焦于风险间的耦合关系、联合调度机制以及级联失效过程的识别与建模。本文旨在系统梳理梯级坝群系统在风险传递机制、风险率计算、损失评估、风险分级与协同调控等方面的研究现状,分析当前研究中存在的不足,并对未来的发展提出一些建议。

1 梯级坝群系统风险传递效应分析

1.1 风险

风险分析技术最早于1974年在美国军工领域得到应用^[11]。20世纪80年代初,美国学者率先将该技术引入水库大坝领域,系统开展了大坝风险分析的理论研究与工程实践,随后,加拿大、澳大利亚以及西欧等国家相继建立了较为完善的大坝风险管理体系。2000年,第20届国际大坝会议在北京召开,大坝风险分析首次被列为大会正式议题,确立了该技术在国际坝工领域的重要地位,会议期间,美国专家Bowles应邀在水利部举办群坝风险分析专题讲座,推动了相关理念在中国的传播与认可;随后,水利部于2002年组织“群坝风险分析培训代表团”赴澳大利亚开展风险评估技术考察,考察报告指出,引入风险评估技术对于提升我国大坝安全管理水平

具有重要的现实意义和迫切性^[12]。

在现代科学体系中,风险通常被定义为不确定性事件发生的可能性与其后果严重程度的函数^[13]。因此,大坝风险评估强调从概率视角刻画不确定性事件发生的可能性,从损失视角评估潜在后果的影响程度,以支持安全设计、运行管理与应急响应的科学决策^[14]。在梯级坝群系统中,由于其结构复杂性、运行联动性及风险耦合性的增强,传统的风险定义逐渐扩展为系统性、动态性和传递性的综合表达,风险评估方法也从单坝静态分析向群坝协同与系统动态建模演进。相关模型和方法的不断发展,为深入揭示风险传递机制、识别级联风险与构造智能调控策略提供了坚实的理论基础。

1.2 风险传递特征

风险并非局限于单坝内部的孤立事件,而是在水文联动、结构耦合与管理协同机制下,可能从局部大坝扩展至整个系统,引发级联失效^[4]。因此,识别风险传递的基本元素、路径与响应模式是理解其演化机理、实现系统性调控的基础。

a. 风险传递基本元素。付焯等^[15]借鉴医学中病毒传播需具备“病毒、易感人群、传播载体(空气等)”等条件,总结风险传递包含3个基本元素:风险源、风险宿和风险传递载体。在梯级坝群系统中,①风险源是风险链的起始单元,通常为优先受到扰动、失效概率高且对下游影响显著的大坝单元,其识别与量化是风险传递建模的前提;②风险宿为风险的承接节点,既承载自身固有风险,又受上游附加风险影响,若其总风险超阈且未被及时干预,可能演化为新的风险源,引发级联失效;③风险传递载体则是上游风险向下游传播的媒介,洪水是最典型的载体^[16],具有突发性、高能量与快速传播等特征,对系统性响应与结构破坏具有关键驱动作用。

b. 风险传递路径。在明确风险传递基本元素的基础上,进一步结合流域内各座大坝的空间布局及其水力耦合关系,可以归纳出如图1所示的风险传递路径^[5]:①链式传递通常发生于沿同一河道布

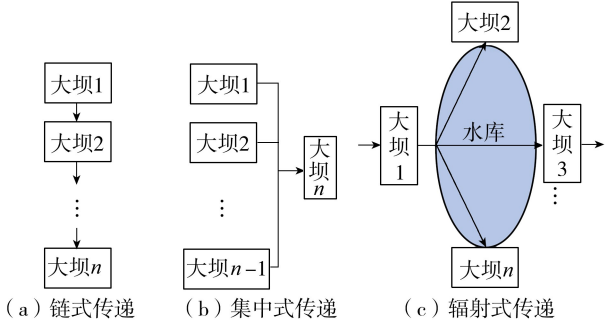


图1 风险传递路径示意图

设、具有连续水力联系且相对高程依次递减的大坝序列中,风险以时间滞后但路径明确的方式逐级向下游扩散;②集中式传递则表现为多个支流上的水库在极端工况下同时释放风险压力,风险集中作用于下游枢纽,显著放大下游大坝的风险承压强度;③位于同一河流上,下游水库存在诸多副坝时,往往呈现风险的辐射式传递。

c. 风险传递响应模式。陈长坤等^[17]从系统脆性^[18]的角度出发,归纳了风险宿的3种典型响应模式:①安全模式。当上游的风险传递至下游大坝时,未达到其风险“临界值”,传递过程随之中断,下游大坝保持相对稳定。②溢流模式。下游大坝具备较高的冗余度,能够吸收部分上游传递的风险,超出“临界值”的风险被削弱后继续向下游传递,表现出风险传递的衰减效应。③溃坝模式。下游大坝本身脆性较高,受到上游风险扰动后,其自身风险被激发,当总风险超过“临界值”时,将导致风险的集中释放,呈现出风险传递的叠加效应。

1.3 风险传递表征

在明晰风险传递特征的基础上,学者们围绕梯级坝群系统的风险传递效应表征展开了持续深入的研究,力图构建能够反映系统内风险传播规律的科学量化框架。现有研究方法主要分为两种:①基于专家知识与系统认知的定性分析方法;②依托数学建模与数据驱动的定量计算方法。

胡雅婷^[19]选取库容、水位及坝型等指标评价风险源的能量,选取河道糙率、长度、宽度及蜿蜒系数等指标评价能量传递沿程损失,运用基于博弈论的组合赋权法和TOPSIS法实现了上下游大坝之间风险传递系数的表征。李存斌^[20]立足于工程项目风险分析,创新性地提出了“风险元传递”理论,同时,为了量化风险元之间的传递关系,提出了风险传递系数计算公式。聂相田等^[21]以大型引水工程为研究对象,采用风险元传递理论对施工风险进行综合评价,基于专家调查法构建了风险评价指标体系,辨识了各风险元对大型引水工程施工风险的影响。风险元传递理论揭示了风险在系统内部微观层级上的传递机制与基本作用单元,而灾害链式理论^[22]则从灾害演化过程的角度刻画了风险在不同单元间逐级扩散的中观传递路径。肖盛燮^[23]针对灾害的链式规律与特性,总结了多种链式类型并提出了相应的理论模型,包括崩裂滑移链、周期循环链、支干流域链、树枝叶脉链、蔓延侵蚀链、冲淤沉积链、波动袭击链和放射杀伤链等,丰富了灾害系统理论体系。基于灾害链式理论,程卫帅等^[24]以堤防为研究对象,考虑洪水此消彼长的特征,研究了堤防工程体系风

险在时间与空间上的变化机制,揭示了堤防系统内的风险转移效应。周婷等^[25]以洪峰流量为媒介,采用 Logistic 曲线拟合了天然洪水频率与洪灾损失的关系,构建了基于“危险性-脆弱性-风险”的洪灾风险链式传递分析模型。Wang 等^[26]根据大坝在风险传递过程中扮演的角色,将大坝分为承灾体和传灾体,采用抽样方法模拟上游溃坝洪水演进过程,并以下游大坝的漫顶条件概率作为风险传递系数,建立了风险传递分析框架,对风险传递效应的量化作出了重要贡献。为更直观展示梯级坝群系统中风险传递的基本要素与结构关系,基于相关研究成果,整合致灾因子、承灾体、传灾体及传递载体等关键元素,给出梯级坝群系统风险分析要素如图2所示。

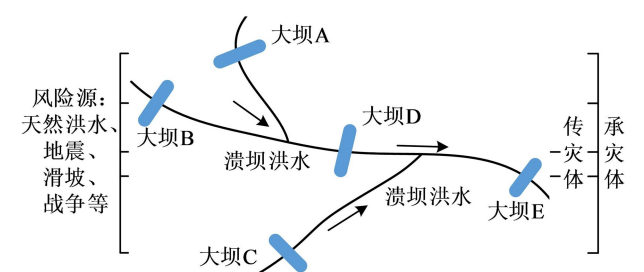


图2 梯级坝群系统风险分析要素示意图

综上所述,传统的梯级坝群系统风险传递效应研究仍以定性分析为主,定量表征方法相对匮乏,且以条件概率表征风险传递效应并不准确。因此,有必要在现有研究的基础上,进一步深化对风险传递机理的系统认识,突破唯“漫顶”判定条件的局限,选取准确合理的量化表征指标,以全面提升梯级坝群系统风险评估的科学性与专业性。

2 梯级坝群系统风险评估研究进展

风险率计算、损失评估与风险等级划分是梯级坝群系统风险评估体系的关键组成部分,现有研究在这些领域均取得了阶段性进展,部分成果已初步引入风险传递效应的影响,试图从风险关联角度提升风险评估的科学性与系统性。

2.1 服役风险率计算

基于单元坝失效风险率的计算结果,结合各单元坝之间的风险传递效应,研究梯级坝群系统的风险率计算方法已成为坝群系统风险评估中的核心内容。

2.1.1 单元坝失效风险率计算

单元坝失效风险率的估算是大坝安全评估与调控的基础,其研究经历了从定性评判向定量建模、再到数据驱动的智能预测的演进。早期研究多依赖于历史案例与专家经验开展定性评估,随着可靠性理论与信息技术的发展,逐步形成了以抽样模拟、代理

建模等为代表的多元化技术体系,表 1 列举了部分典型方法在大坝失效风险率计算领域的应用。

表 1 单元坝失效风险率估算研究成果

手段	适用条件	具体方法	文献
定性分析	资料不足	层次分析法	He 等 ^[27] (2020 年)
抽样分析	高维非线性	重要抽样	Lu 等 ^[28] (2024 年)
代理模型	隐式功能函数	支持向量机	Wang 等 ^[29] (2022 年)
		神经网络	Liu 等 ^[30] (2024 年)
解析近似类	显式功能函数	贝叶斯网络	Guo 等 ^[31] (2013 年)
		一次可靠性	Wang 等 ^[32] (2014 年)
非概率可靠度	参数区间已知	区间分析	Su 等 ^[33] (2016 年)

注:括号中为文献发表年份。下同。

识别与定义单元坝的失效模式是风险率计算的前提,通常依托历史经验或案例分析,利用专家经验进行识别与分类。在明确失效模式后,需构建结构极限状态函数,若为显式表达,可采用直接积分法或依据参数分布选取如表 1 所示的解析法或非概率可靠度方法进行计算。例如:苏怀智等^[34]构建了融合尺寸比例因子的非概率可靠度模型求解心墙堆石坝的失效风险率;郑雪琴^[35]基于极限状态方程,引入证据理论,提出了同时考虑随机性与认知不确定性的风险率分析方法。

由于大坝失效模式具有高度非线性,其极限状态函数常为复杂显式或隐式形式,传统解析方法难以直接求解,对此,抽样分析方法与代理模型成为主流替代手段。其中,蒙特卡罗法因原理简单、适应性强,已广泛应用于工程实践,为提升其计算效率,研究者提出了多种改进抽样策略,如拉丁超立方抽样与重要抽样(表 1)。当单次抽样模拟计算耗时较长,传统的直接抽样方法难以适用时,可引入高精度代理模型对功能函数进行近似构建,从而在保证计算精度的同时显著提高效率,如 Fu 等^[36]基于拉丁超立方抽样和 Kriging 模型重构功能函数,结合 HL-RF 算法,提出了适用于单坝破坏模式的风险率分析模型,在保证结果精度的前提下,显著提升了计算效率。

近年来,部分学者尝试引入数据驱动方法与人工智能技术,以提升大坝服役风险率估算的实时性与智能化水平。例如:Xu 等^[37]考虑裂缝的影响,构建了位移监控模型,并引入 CNN-LSTM-attention 模型来预测综合位移并可视化影响因素的重要性,最后采用多元 Copula 函数构建联合分布计算大坝总体服役风险率,结果表明,该方法和模型合理可行;Peng 等^[38]通过贝叶斯网络融合大坝参数、两种相关的破坏模式和 3 种类型的监测数据,计算了大坝系统的先验故障概率,并引入时变项量化水位和蠕变的影响,最后利用各种类型的监测数据来更新参数分布,从而得出后验故障概率,结果表明,该方法

有助于加强大坝安全管理。

综上所述,单坝失效风险率的估算已有较为丰富的研究基础,涵盖从理论建模到工程应用的多技术路线。然而,仍需进一步推动多源数据融合、动态更新机制与智能计算方法的集成,以提升模型的适应性与实用性,为系统级安全评估与梯级大坝协同调控提供更可靠的支撑。

2.1.2 梯级坝群系统服役风险率计算

梯级坝群系统服役风险率计算是在单坝失效风险率计算基础上进行的,属于系统可靠性分析范畴,准确识别系统结构特征及可能的失效模式,是进行风险率计算的关键。席秋义^[39]认为梯级坝群系统中任意大坝的失事溃决都是不能接受的,因此将梯级坝群简化为串联系统,基于洪量传递关系,提出了考虑上游影响的系统风险率计算方法。杨印^[40]则从系统性能视角出发,提出采用表决系统结构描述坝群系统,并据此建立了基于 k/N 结构的系统风险率分析方法。

梯级坝群系统中单坝间的相互联系既增强了系统协同调度能力,但也加强了各大坝失效事件之间的关联关系。受特殊地理条件和水力耦合作用影响,单座大坝失效极可能诱发连锁溃决,显著增加系统整体风险。张锐^[41]考虑上游溃坝洪水与区间天然洪水的耦合,通过数值分析和随机模拟方法估算了复杂条件影响下梯级坝群系统联合失事风险率。于子波等^[42]基于贝叶斯网络构建了两级坝群系统连溃模型,以漫顶失效和管涌失效作为此坝群系统的破坏模式,以溃坝事件作为风险扰动,模拟了溃口发展过程与洪水演进过程,推求了水库大坝溃坝概率与连溃风险。林鹏智等^[43]基于贝叶斯网络分析了漫顶失效模式下的大坝连溃,研究了影响水库漫顶的关键因素,以大渡河流域两个相邻大坝(猴子岩和长河坝)为例,开展了不同工况下的溃坝概率计算研究。陈淑婧^[44]考虑溃决洪水的叠加效应,反演分析了溃决流量过程线和水库水位变化情况,模拟了洪水演进过程,提出了梯级土石坝连溃计算模型。

综上所述,现有研究主要聚焦于梯级坝群系统中连溃事件发生概率的计算,或对各大坝失效事件间的相关性进行定性分析以估算系统服役风险率,尚未准确纳入大坝间的水力传递特性、结构耦合关系及潜在的级联失效机制。

2.2 风险损失估算

大坝风险损失估算是风险分析体系中的关键环节,其结果可为风险分级管理、应急响应预案制定与资源优化配置提供定量支撑。风险损失^[45]主要指大坝失效或超标洪水等极端事件发生后,造成的人

员伤亡、经济财产损失、生态环境影响和社会系统扰动等多方面影响。当前的研究逐步从单一经济损失评估向多维度、多要素的综合损失评估转变。

从评估对象来看,大坝风险损失主要包括以下几类:①生命损失^[46],通常采用暴雨洪水淹没模拟与人口分布数据相结合的方法进行估算;②经济损失^[47],包含直接经济损失(如淹没导致的建筑物、农田、交通和工业设施的破坏)和间接经济损失(如生产中断、交通阻断、社会服务体系失灵等次生影响);③社会环境影响^[48],如河流生态系统扰动、水资源系统失衡、公众信任下降等,评估难度相对较大。

在评估方法方面,现有研究主要可分为情景分析法、模型模拟法、统计分析法与指标评判法等4类^[48]。其中,情景分析法基于可能的灾害场景进行定性或半定量评估;模型模拟法通过水动力模型与经济损失模型耦合,量化洪水蔓延与损失影响;统计分析法依托历史灾害数据,建立灾损-水位、灾损-淹没面积等经验回归关系;指标评判法则构建多指标体系,采用层次分析、模糊综合、灰色系统等方法进行综合评价。表2列举了部分学者在大坝风险损失估算领域的研究情况。

表2 大坝风险损失估算研究成果

评估对象	文献	主要成果
生命损失	Brown 等 ^[49] (1988 年)	统计分析+经验公式
	王志军等 ^[50] (2014 年)	深入研究溃坝死亡率
经济损失	Kates ^[51] (1965 年)	首次提出洪灾经济损失模型
	Profeti 等 ^[52] (1997 年)	建立数据库,研究洪灾保险制度
	刘欣欣等 ^[53] (2016 年)	考虑时空演变规律,提出修正率
社会环境影响	Burdge ^[54] (2003 年)	率先开展社会环境影响研究
	胡二邦 ^[55] (2000 年)	选取相关的评价指标
	张莹 ^[56] (2010 年)	结合国情,赋予指标权重

随着计算机技术的飞速发展,通过遥感技术模拟下游地理信息,评估淹没水深和洪水流速对不同区域的影响并进行风险损失估算是现行较为常见的方法。Jonkman 等^[57]开发了一个综合评估框架,结合水动力学方法,进行了洪水特征分析与损失函数的构建,并基于 GIS 平台研究了溃坝损失评估模型。江迎^[58]采用数值模拟技术对溃坝洪水的淹没范围和洪水传播路径进行了分析,利用 GIS 软件功能对洪水淹没区的经济财产损失进行了统计。Qi 等^[59]利用二维溃坝洪水演进模型,在 ArcGIS 框架内开发了一个新的洪水综合管理决策支持系统,以美国佐治亚州辛克莱大坝为研究对象,展示了决策支持系统的损失估算能力。

综上所述,现有损失估算大多集中于单座大坝的生命损失、经济损失和社会环境影响分析,梯级坝群

系统的风险损失估算模型和方法还需进一步研究。

2.3 梯级坝群系统风险等级标准研究

风险作为一种客观存在的现象,早在 20 世纪 70 年代便引起广泛关注。美国核能专家昌西·斯塔尔(Chauncey Starr)1969 年在 *Science* 发表《社会效益与技术风险:我们的社会愿意为安全付出什么?》,首次提出“安全性应达到何种程度”的工程哲学问题^[60],由此拉开了各领域对风险理论系统研究的序幕。在水利工程领域,西方发达国家逐步建立起以年计失效率(F)-溃坝导致死亡人数(N)曲线法为核心的大坝安全评估体系^[61],通过衡量风险事件发生频率与潜在损失后果之间的关系,实现对大坝风险水平的量化判定。

国内对大坝风险标准的研究起步较晚,但经过持续探索与发展,逐步建立了较为完善的单坝风险评估体系^[62-63],在风险分级、失效概率阈值、风险容许度等方面提供了明确的判定依据,为大坝安全管理和工程实践提供了重要支撑。由于梯级坝群系统涉及多坝耦合作用和连锁失效风险,其风险标准研究仍处于探索阶段。彭雪辉等^[64]将大坝风险水平划分为 4 个不同的区域,分别为可接受、可容忍、不可接受与极高风险区,为构建梯级系统的风险管理标准体系提供了理论依据。周建平等^[65]则从系统结构出发,将梯级坝群系统中的大坝划分为“薄弱梯级”“关键梯级”和“控制梯级”3 种类型,并提出了“特级”相关标准,指出梯级坝群系统整体的风险容限通常由控制梯级的大坝所主导,如表 3 所示。

表3 控制梯级设计安全标准

坝型	级别	年失效概率	可靠度指标	抗滑稳定安全系数
土石坝	1 级	1.0×10^{-7}	4.20	1.5
	特级	$(1 \sim 5) \times 10^{-8}$	4.45~4.70	1.6~1.7
重力坝	1 级	1.0×10^{-7}	4.20	3.0
	特级	5×10^{-8}	4.45	3.5
拱坝	1 级	1.0×10^{-7}	4.20	3.5
	特级	5×10^{-8}	4.45	3.5

针对梯级坝群设计标准,周建平等^[61,66-67]分别从理论基础、大坝坝坡稳定安全标准和梯级库群连溃风险三方面进行了深入分析,并结合工程实际进行了验证,为我国现有水电工程设计规范标准的完善提供了技术支持。徐佳成等^[68]研究了单坝现有标准与梯级库群相应标准间的差异,以此为基础,探究了梯级坝群与单座大坝风险分析的差别,进而提出了梯级坝群风险评价方法。综合以上成果,NB/T 10882—2021《梯级水库群安全风险防控导则》规定在流域坝群系统中,沿岸一定数量的群体由于溃坝洪水淹没,导致死亡和溃坝事件发生频率之间的关

系,一般采用 $F-N$ 曲线图表示。总体而言,现行的梯级坝群系统风险标准尚不完善,定量评估不足,且难以为风险协同调控提供有效指导。

3 梯级坝群系统风险调控研究进展

梯级坝群系统风险的科学调控对于保障流域水安全和降低灾害损失至关重要。除险加固优先级排序有助于优化资源配置,提高风险治理效率;库水位调控优化通过联合调度降低洪水风险并提升运行安全性;安全警戒值拟定则为风险预警和应急管理提供科学依据。

3.1 梯级坝群除险加固处置的优先级排序

在流域尺度内,坝群系统普遍存在大坝数量众多、服役时间不一、运行状态差异显著的问题,随着大坝老化与极端气候事件增多,系统性安全隐患日益突出。由于资源有限,难以同时对所有高风险大坝实施加固,如何科学合理地确定坝群中各单坝的除险加固优先顺序,成为流域风险管理的核心问题之一。除险加固排序不仅关系到大坝安全保障的资源配置效率,也直接影响到整个流域系统的风险水平与韧性表现,相关研究已从早期的定性经验判断,逐步发展形成了基于风险量化指标、系统耦合建模与多目标优化策略的综合排序框架。

澳大利亚的坝群管理方法包含严格的工程设计标准、实时监控系统、应急管理措施以及多功能调度方案,每座大坝均进行了全面的风险评估,对于风险等级较高的大坝,建议优先安排维修工作^[69]。Bowles^[70]基于单坝风险分析与流域特征综合评价,提出了大坝加固排序优化方法和资金分配方案。Tosun 等^[71]分别对土耳其境内幼发拉底河流域 32 座大坝和 Kizilirmak 盆地 36 座大坝的风险进行了评估,以此为基础提出了 15 座高风险大坝的除险建议。葡萄牙学者提出了基于综合风险指数进行群坝风险分析的方法,该方法将环境、溃坝损失、工程结构三方面的 11 项风险因素细分为 5 个等级,经专家打分得到大坝的综合风险指数,并建议对风险指数大的大坝优先除险^[72]。

近年来,我国在梯级坝群除险加固排序研究方面亦取得了诸多进展。严祖文等^[73]通过系统性调查研究,从大坝病险判定标准、资金投入机制、加固设计的适用性与实效性等方面入手,深入剖析了我国中小型水库在除险加固过程中所面临的核心问题,并据此提出了针对性较强的安全加固对策。李浩瑾^[74]结合模糊 C 均值算法与人工蜂群优化策略,构建了群坝风险聚类分析模型,并以汶川地震中形成的 22 座堰塞湖与 48 座震损水库为研究对象,完

成了大坝的风险等级划分,为科学制定除险加固策略提供了技术支撑。杨国华等^[75]从工程安全、结构耐久性、失效概率等方面入手,构建了完整的水利工程安全风险评估体系,并以塔里木河流域的水利工程为研究对象,进行了系统评估,并据此制定了配套的应急管理方案。聂学军^[76]认为病险坝失效破坏以及不科学的风险决策措施都可能造成巨大的生命财产损失,这是不可接受的,因此,梯级坝群中单元大坝的维修加固排序及方案选取应在科学评估风险的基础上,综合考虑安全性、经济性和调度效益,并通过专家组决策优化最终方案,以确保系统整体风险最小化和资源配置最优化。

综上可知,现有的除险加固处置优先级排序方法大多未充分考虑梯级坝群系统内部的风险传递效应,本质上仍属于单坝层面的风险排序。

3.2 梯级坝群库水位调控的优化

在梯级坝群系统风险协同调控措施中,与维修加固等工程措施相比,水位调控等非工程措施在成本控制、灵活性、可持续性和应对突发风险等方面具有较大优势。19 世纪末至 20 世纪初,随着各国开始修建大规模水库,水库调度的概念逐渐形成,主要目标是控制洪水和提供灌溉水源,以美国胡佛水坝为例,该工程不仅承担着水力发电任务,还通过科学调度水库水位来满足下游多样化的用水需求。1955 年,伴随线性规划和动态规划等优化技术的逐步成熟,水库调度开始引入数学建模手段,并借助计算机开展优化控制, Little^[77]将马尔可夫过程理论应用于随机动态规划模型的构建,并以此为基础开展水库调度问题研究,标志着该领域系统性研究的开端。此后,随着理论工具的不断丰富,模糊数学方法^[78]、线性规划模型^[79]、迭代策略法^[80]等也被广泛引入水库调度领域。1973 年, Windsor^[81]首次实现了将线性规划方法应用于多库联合防洪调度;1988 年, Foufoula-Georgiou 等^[82]提出了梯度动态规划方法,以缓解水库数量增多带来的“维数灾难”问题,从而显著提升了求解效率。进入 21 世纪,随着信息技术、气象预测、遥感监测及智能控制系统的发展,水库调度逐步向智能化、自动化、实时化方向演进,遗传算法^[83-84]、并行混沌量子粒子群算法^[85]、人工鱼群优化算法^[86]和多目标混合蛙跳差分算法^[87]等智能优化方法的相继提出,为水库(群)调度决策提供了强有力的技术支撑。然而,现有水库调度主要以效益优化为核心目标,侧重于防洪、发电、供水及生态调度等方面,对结构风险的优化调度关注较少,且现有调度方法在进行效益与风险权衡优化时,往往未充分考虑梯级坝群系统中的风险传递效应,难以

有效识别并控制由上游失稳向下游扩展的潜在结构风险。

3.3 梯级大坝服役安全警戒值的拟定

基于监测数据,结合结构力学、数理统计与系统工程理论,科学设定梯级水库大坝安全警戒值至关重要,这有助于及时识别隐患、防范风险累积与级联失效,从而有效降低坝群系统风险。现有警戒值设定方法主要包括基于数据挖掘的统计分析和基于物理机制的数值模拟两类。

大坝安全监测数据能够全面、实时、动态地反映大坝的运行状态,并可通过数据挖掘、趋势预测等方法,建立科学合理的预警指标体系。其中,典型小概率法^[88]和置信区间法^[89]是当前较为常用的预警阈值设定方法,二者均以数理统计为理论基础,适用条件各有侧重,前者适用于稳定性强、波动小的监测指标,且大坝需经历过完整的工况运行过程,确保数据覆盖所有可能的运行状态;后者在数据具有趋势性变化特征的场景中表现更为稳健。此外,众多学者从不同角度分析了大坝安全监测数据特征,探索了预警指标的拟定。苏怀智等^[90]基于极值理论构建 POT(peaks over threshold)模型,聚焦超限样本,通过大坝失效风险率估算预警指标,提高了指标的工程代表性与客观性。姜振翔等^[91]针对单一模型预警易导致虚假警报的问题,提出多模型联合预警方法,利用 Copula 函数拟合联合残差分布,显著提升了预警准确性。Su 等^[92]采用核主成分分析方法识别重力坝监测点间的内在关联,提出了空间预警域划定流程,借助多点监测数据构建了大坝安全的空间预警区域。

大坝受力状态由外部荷载(如水压力、渗流力、地震等)与内部结构特性(如材料强度、坝基条件)共同决定。基于力学分析与数值模拟,可评估坝体在不同工况下的受力、变形与稳定性,进而确定监测指标(如位移、应力等)的临界值,设定安全警戒值。Su 等^[93]通过模拟拱坝破坏过程并结合小波多分辨率分析方法,提出了变形多级控制指标制定方案。顾冲时等^[94]以龙羊峡拱坝为例,基于坝体强度和稳定性的定量分析,采用有限元技术拟定了三级监控指标。基于结构分析的方法具有物理约束明确的优势,但难以准确描述长期运行趋势及材料劣化过程;而基于数据挖掘的方法可有效提取监测数据的变化规律,适用于长期趋势分析,但物理机制不够清晰。为此,学者们发展了物理模型与统计模型相结合的混合建模方法。魏博文等^[95]基于粗糙集理论反演不利参数组合,构建了混凝土坝位移监控混合模型。李家田等^[96]利用响应面法建立水压与滑动破坏风

险率的关系,提出了重力坝变形警戒值确定方法。Zhan 等^[97]结合原型监测、统计建模与三维有限元分析,提出了兼顾结构状态与变形机制的混凝土坝预警指标,可为加固后的大坝运行管理提供参考。

梯级水库大坝作为互联互通的复合系统,其安全警戒值的设定不仅需考虑单坝结构状态与运行行为,更需统筹上下游坝间的风险传递、响应协同与时间延迟等因素。例如,上游大坝变形异常或渗压激增可能对下游蓄水调度产生直接影响,从而放大整个系统的失稳风险。因此,相较于单坝,梯级系统中的警戒值设定更需考虑空间耦合效应、预警传导路径、区域联动策略与系统总风险可控性等综合因素。目前,绝大多数预警指标与警戒值的设定仍集中于单坝层面,尚未形成系统化的协同预警框架。尽管已有部分研究^[98-99]尝试从系统视角出发,构建梯级坝群的多坝协同预警机制,但整体仍处于探索阶段,尚缺乏成熟的理论体系与广泛的工程应用实践。

4 未来研究重点

尽管梯级坝群系统风险评估与调控研究已取得了一批有价值的成果,但仍有以下几个方面的问题值得进一步探讨:

a. 溃坝洪水演进是风险传递分析的重要前提。未来研究需进一步聚焦多工况下溃坝洪水演进的快速、精确模拟,尤其加强溃坝机理与动力学过程的理论研究,发展考虑堆积物冲刷、结构物冲毁等多物理场耦合效应的高保真三维数值模型,同时,应充分利用高分辨率地形数据、遥感影像及现场监测信息,提升数值模型的边界条件与参数识别精度。在此基础上,可探索基于数值模拟与机器学习融合的洪水演进快速计算方法,构建数据驱动的预测模型,实现对多工况下溃坝过程的快速响应与实时评估。

b. 多源风险耦合是风险演化过程的驱动机制。梯级坝群系统面临的致灾因子具有显著的多源性与复杂交互特性,涵盖地震、强降雨、滑坡、设备故障等多类自然与人为风险源,并在时空维度上易形成叠加共振和链式放大效应。其中,上游溃坝洪水对下游大坝造成的强冲击载荷和水动力扰动,是引发级联失效的关键动力机制之一。未来亟须加强多源耦合机制的系统建模,构建融合自然环境、工程结构与管理响应的复合风险框架,结合贝叶斯网络、系统动力学与复杂网络理论,识别致灾因子的触发条件、时序依赖与协同效应,定量刻画风险传播路径与强度演化特征,提升对风险演化关键环节的识别与干预能力。

c. 完善系统风险评估体系是亟须突破的难题。现有评估方法要么覆盖所有失效路径但忽略了风险

传递效应,要么聚焦于连溃路径中的传递分析却难以全面涵盖系统失效情形。未来研究应引入基于树状图的系统失效路径识别方法,构建融合风险传递效应的概率与损失快速计算模型,兼顾失效路径全面性与传递效应的精准刻画,在此基础上,应进一步发展系统总风险率与总损失的定量评估技术,同步推进风险分级标准的量化研究,建立不同规模坝群系统的分级准则,为梯级坝群系统运行维护、风险预警与资源调度提供量化、可操作的决策支持。

d. 多维协同调控优化是提升管理水平的重点。梯级坝群系统运行涉及调度、应急响应、预警等多个环节,当前多以静态预案为主,难以应对动态演化过程下的风险联动。因此,未来应强化风险调控的协同性与智能化,设计涵盖空间维度(坝群、流域)、时间维度(演化过程、响应窗口)与决策维度(调度、应急、资源配置)在内的多维协同调控策略体系,可引入多目标优化、博弈论、强化学习等智能优化方法,构建面向不同风险场景的动态决策模型,实现调控策略的自适应更新与风险防控能力的整体提升。

e. 流域管理平台构建是智能管理的关键支撑。面对复杂多变的风险态势,构建集监测、预警、评估、调控于一体的流域智能管理平台是未来发展的方向。该平台应集成遥感监测、大数据处理、物联网感知、数字孪生建模等前沿技术,建立坝群系统运行的实时数字映射与风险态势分析系统,强化对流域内关键节点与边界条件的智能感知与调度响应能力,平台建设可采用模块化架构,支持多源数据接入、模型动态耦合及多用户协同决策,服务于流域风险治理和韧性提升。

5 结 语

梯级坝群系统作为流域治理与水资源调控的重要基础设施,其安全稳定运行对区域防洪减灾、水资源配置及生态环境保护具有重要意义。本文围绕梯级坝群系统的风险评估与调控问题,系统梳理了风险传递效应的理论基础与研究进展,探讨了风险概率计算、损失评估、等级划分、协同调控等关键问题。尽管我国在该领域已取得一定成果,但梯级坝群系统风险管理工作仍需不断完善与创新,为进一步提升梯级坝群系统的韧性与安全水平、保障流域综合治理与可持续发展提供有力支撑。

参考文献:

[1] ZHAO Wanjie, LI Donglin, WANG Yuanjian, et al. A multifunctional synergy development evaluation model of the impact of the cascade reservoir construction sequence

on basins[J]. Ecological Indicators, 2024, 158: 111547.

[2] 李宗坤,王特,葛巍,等. 黄河流域梯级水库大坝风险评估与管控的战略思考[J]. 人民黄河, 2023, 45(7): 1-6. (LI Zongkun, WANG Te, GE Wei, et al. Strategic considerations for risk assessment and control of cascade reservoir dams in the Yellow River Basin [J]. Yellow River, 2023, 45(7): 1-6. (in Chinese))

[3] WANG Yufei, LEI Xiaohui, WEN Xin, et al. Effects of damming and climatic change on the eco-hydrological system: a case study in the Yalong River, Southwest China [J]. Ecological Indicators, 2019, 105: 663-674.

[4] 李炎隆,王胜乐,王琳,等. 流域梯级水库群风险分析研究进展[J]. 中国科学: 技术科学, 2021, 51(11): 1362-1381. (LI Yanlong, WANG Shengle, WANG Lin, et al. Research progress on risk analysis of cascade reservoirs in river basin [J]. Scientia Sinica Technologica, 2021, 51(11): 1362-1381. (in Chinese))

[5] 何启. 基于实测数据的流域坝群风险态势分析及应对决策方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2024.

[6] BABAKI A P, TANNANT D D. Numerical evaluation of static liquefaction-induced flowslide causing the Edenville Dam failure, Michigan [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2024, 150(5): 04024034.

[7] PANDEY P, CHAUHAN P, BHATT C M, et al. Cause and process mechanism of rockslide triggered flood event in Rishiganga and Dhauliganga River Valleys, Chamoli, Uttarakhand, India using satellite remote sensing and in situ observations [J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2021, 49(5): 1011-1024.

[8] 张士辰,李宏恩. 近期我国土石坝溃决或出险事故及其启示 [J]. 水利水运工程学报, 2023 (1): 27-33. (ZHANG Shichen, LI Hongen. Recent earth-filled dam failures or accidents of reservoirs in China and their enlightenment [J]. Hydro-Science and Engineering, 2023 (1): 27-33. (in Chinese))

[9] REFAIY A R, ABLOUATTA N M, GAD M A, et al. Modeling the successive failure of complex dams systems: a necessity in the light of climatic shifts in extreme storms [J]. Ain Shams Engineering Journal, 2024, 15 (11): 103033.

[10] 赵二峰,顾冲时. 碾压混凝土坝安全服役关键技术研究进展 [J]. 水利水电科技进展, 2022, 42 (1): 11-20. (ZHAO Erfeng, GU Chongshi. Review on key technologies for safe operation of roller compacted concrete dams [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(1): 11-20. (in Chinese))

[11] 顾冲时,苏怀智. 混凝土坝工程长效服役与风险评定研究述评 [J]. 水利水电科技进展, 2015, 35 (5): 1-12. (GU Chongshi, SU Huaizhi. Current status and prospects of long-term service and risk assessment of concrete dams [J]. Advances in Science and Technology of Water

- Resources,2015,35(5):1-12. (in Chinese))
- [12] 顾冲时,苏怀智,刘何稚.大坝服役风险分析与管理研究述评[J].水利学报,2018,49(1):26-35. (GU Chongshi,SU Huaizhi,LIU Hezhi. Review on service risk analysis of dam engineering[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2018,49(1):26-35. (in Chinese))
- [13] 向衍,盛金保,刘成栋,等.土石坝长效服役与风险管理研究进展[J].水利水电科技进展,2018,38(5):86-94. (XIANG Yan, SHENG Jinbao, LIU Chengdong, et al. Research progress in long-term service and risk assessment of earth-rockfill dams[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2018,38(5):86-94. (in Chinese))
- [14] 张贵金,罗舸旋子,朱博渊,等.极端条件下堆石坝溃坝风险及应急预案[J].水利水电科技进展,2021,41(2):28-35. (ZHANG Guijin, LUO Gexuanzi, ZHU Boyuan, et al. Dam-break risk and emergency plan of a rockfill dam under extreme conditions[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(2):28-35. (in Chinese))
- [15] 付焯,严余松,郭茜,等.生鲜农产品供应链物流风险传递机理及控制[J].西南交通大学学报,2018,53(3):654-660. (FU Zhuo, YAN Yusong, GUO Qian, et al. Risk transfer mechanism and control in logistics of fresh agriculture product supply chain[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(3):654-660. (in Chinese))
- [16] 姜清辉,胡利民,林海.尾矿库溃坝研究进展[J].水利水电科技进展,2017,37(4):77-86. (JIANG Qinghui, HU Limin, LIN Hai. Advances in research of tailings dam failures[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2017,37(4):77-86. (in Chinese))
- [17] 陈长坤,徐童,姬露露,等.基于条件判断模型的溢流和溃坝模式灾害演化对比研究[J].清华大学学报(自然科学版),2021,61(6):518-526. (CHENG Changkun, XU Tong, JI Lulu, et al. Comparative research on disasters evolution of over-flow and dam-break mode based on conditional judgment model[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2021, 61(6):518-526. (in Chinese))
- [18] 金鸿章,韦琦,郭健.复杂系统的脆性理论及应用[M].西安:西北工业大学出版社,2010.
- [19] 胡雅婷.梯级坝群风险率估算与韧性评价方法研究[D].南京:河海大学,2023.
- [20] 李存斌.项目风险元传递理论与应用[M].北京:中国水利水电出版社,2009.
- [21] 聂相田,秦俊芬,王攀科.基于风险元传递理论的大型引水工程施工风险研究[J].华北水利水电学院学报,2012,33(2):59-61. (NIE Xiangtian, QIN Junfen, WANG Panke. Research on the risk of large-scale water transportation project construction based on the theory of risk element transmission theory[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power,2012,33(2):59-61. (in Chinese))
- [22] ZHAO Xiaoxue, QU Zongxi, ZHANG Junjie, et al. Risk assessment and mitigation strategies for rainstorm-induced disaster chains in Northwest China[J]. Natural Hazards Review,2025,26(1):04024050.
- [23] 肖盛燮.灾变链式理论及应用[M].北京:科学出版社,2006.
- [24] 程卫帅,陈进.基于状态转移分析的堤防体系洪灾风险评估[J].地下空间与工程学报,2012,8(增刊2):1824-1827. (CHENG Weishuai, CHEN Jin. State-transition analysis-based flood risk assessment for dike systems[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2012,8(Sup2):1824-1827. (in Chinese))
- [25] 周婷,林腾,金菊良,等.考虑水库调度效应的洪灾风险链式传递机理研究[J].灾害学,2025,40(2):16-24. (ZHOU Ting, LIN Teng, JIN Juliang, et al. Study on the mechanism of flood risk transmission chain considering the effects of reservoir operation[J]. Journal of Catastrophology,2025,40(2):16-24. (in Chinese))
- [26] WANG Te, LI Zongkun, GE Wei, et al. Calculation of dam risk probability of cascade reservoirs considering risk transmission and superposition[J]. Journal of Hydrology, 2022,609:127768.
- [27] HE Kun, PEI Liang, LU Xiang, et al. Research and application of critical failure paths identification method for dam risk analysis[J]. Mathematical Problems in Engineering,2020,2020(1):4103804.
- [28] LU Yu, WU Zhenyu. A multi-objective-optimization based importance sampling method and its application in seismic stability analysis of gravity dam[J]. Computers and Geotechnics,2024,168:106148.
- [29] WANG Shida, XU Bo, ZHU Zhenhao, et al. Reliability analysis of concrete gravity dams based on least squares support vector machines with an improved particle swarm optimization algorithm[J]. Applied Sciences, 2022, 12(23):12315.
- [30] LIU Hongchen, SU Huaizhi, YANG Jiaquan, et al. Multi-fidelity deep neural network with Monte Carlo dropout technique for uncertainty-aware risk recognition of backward erosion piping in dikes[J]. Applied Soft Computing,2024,166:112165.
- [31] GUO Dongma, HUI Peng, QIANG Qiangjiang, et al. The risk analysis of dam gate based on Bayesian network and hydraulic mechanics[J]. Advanced Materials Research, 2013,848:112-116.
- [32] WANG Chao, ZHANG Sherong, SUN Bo, et al. Methodology for estimating probability of dynamical system's failure for concrete gravity dam[J]. Journal of Central South University,2014,21(2):775-789.

- [33] SU Huaizhi, LI Jinyou, WEN Zhiping, et al. Dynamic non-probabilistic reliability evaluation and service life prediction for arch dams considering time-varying effects [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2016, 40(15/16): 6908-6923.
- [34] 苏怀智, 李家田. 在役心墙堆石坝非概率可靠度评估与预警方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(12): 2526-2534. (SU Huaizhi, LI Jiatian. Non-probabilistic reliability evaluation and safety early warning method for core-wall rockfill dams in service[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(12): 2526-2534. (in Chinese))
- [35] 郑雪琴. 大坝运行风险率分析模型研究[D]. 南京: 河海大学, 2016.
- [36] FU X, GU C, ZHENG X, et al. Kriging risk model of dam failure based on HL-RF algorithm[J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2018, 27(5): 3409-3418.
- [37] XU Bo, CHEN Zeyuan, SU Huaizhi, et al. Measured displacement data-driven efficient interpretation and real-time risk assessment method for the service performance of arch dams with cracks [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2025, 264: 111377.
- [38] PENG Ming, GAN Longhou, ZHONG Qiming, et al. Time-dependent system reliability analysis of a high concrete-faced rockfill dam by integrating multi-source monitoring information[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2025, 262: 111251.
- [39] 席秋义. 水库(群)防洪安全风险率模型和防洪标准研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2006.
- [40] 杨印. 梯级库群系统整体安全风险分析与研究[D]. 南京: 河海大学, 2016.
- [41] 张锐. 梯级水库群漫坝失事风险分析及其应急处置研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- [42] 于子波, 向衍, 孟颖, 等. 梯级水库连溃风险分析及洪水演进模拟[J]. *人民珠江*, 2021, 42(8): 11-16. (YU Zibo, XIANG Yan, MENG Ying, et al. Risk analysis of sequential dam break of cascade reservoirs and simulation of flood routing[J]. *Pearl River*, 2021, 42(8): 11-16. (in Chinese))
- [43] 林鹏智, 陈宇. 基于贝叶斯网络的梯级水库群漫坝风险分析[J]. *工程科学与技术*, 2018, 50(3): 46-53. (LIN Pengzhi, CHEN Yu. Risk analysis of dam overtopping for cascade reservoirs based on Bayesian network [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2018, 50(3): 46-53. (in Chinese))
- [44] 陈淑婧. 梯级土石坝连溃洪水计算模型及小岗剑堰塞湖反演分析[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2018.
- [45] GE Wei, WANG Xiwei, LI Zongkun, et al. Interval analysis of the loss of life caused by dam failure [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2021, 147(1): 04020098.
- [46] GE Wei, QIN Yupan, LI Zongkun, et al. An innovative methodology for establishing societal life risk criteria for dams: a case study to reservoir dam failure events in China [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2020, 49: 101663.
- [47] JI Yanting, CHEN Aijiu, LI Zongkun, et al. A comprehensive evaluation of the consequences of dam failure using improved matter element analysis [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2021, 80(20): 695.
- [48] 李雷. 大坝风险评价与风险管理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [49] BROWN C A, GRAHAM W J. Assessing the threat to life from dam failure [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1988, 24(6): 1303-1309.
- [50] 王志军, 宋文婷. 溃坝生命损失评估模型研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(3): 205-210. (WANG Zhijun, SONG Wenting. Study of estimation model of loss of life caused by dam break [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2014, 42(3): 205-210. (in Chinese))
- [51] KATES R W. Industrial flood losses: damage estimation in the Lehigh Valley [R]. Chicago: The University of Chicago, 1965.
- [52] PROFETI G, MACINTOSH H. Flood management through LANDSAT TM and ERS SAR data: a case study [J]. *Hydrological Processes*, 1997, 11(10): 1397-1408.
- [53] 刘欣欣, 顾圣平, 赵一梦, 等. 修正损失率的溃坝洪水经济损失评估方法研究[J]. *水利经济*, 2016, 34(3): 36-40. (LIU Xinxin, GU Shengping, ZHAO Yimeng, et al. Evaluation methods for economic loss due to dam-break flood using modified loss rate [J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2016, 34(3): 36-40. (in Chinese))
- [54] BURDGE R J. The practice of social impact assessment background [J]. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 2003, 21(2): 84-88.
- [55] 胡二邦. 环境风险评价实用技术和方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2000.
- [56] 张莹. 基于能值足迹法的溃坝环境、生态损失评价[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2010.
- [57] JONKMAN S N, BOCKARJOVA M, KOK M, et al. Integrated hydrodynamic and economic modelling of flood damage in the Netherlands [J]. *Ecological Economics*, 2008, 66(1): 77-90.
- [58] 江迎. 基于云模型和 GIS/RS 的坝堤溃决风险分析及灾害损失评估研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [59] QI Honghai, ALTINAKAR M S. A GIS-based decision support system for integrated flood management under uncertainty with two dimensional numerical simulations [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2011, 26(6): 817-821.

- [60] STARR C. Social benefit versus technological risk: what is our society willing to pay for safety? [J]. Science, 1969, 165(3899): 1232-1238.
- [61] 周建平,王浩,陈祖煜,等. 特高坝及其梯级水库群设计安全标准研究 I: 理论基础和等级标准[J]. 水利学报, 2015, 46(5): 505-514. (ZHOU Jianping, WANG Hao, CHEN Zuyu, et al. Evaluations on the safety design standards for dams with extra height or cascade impacts. Part I: fundamentals and criteria[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(5): 505-514. (in Chinese))
- [62] 中华人民共和国水利部. 水库大坝风险等级划分与评估导则: SL/T 829—2024[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2024.
- [63] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 水利水电工程结构可靠性设计统一标准: GB 50199—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [64] 彭雪辉, 盛金保, 李雷, 等. 我国水库大坝风险标准制定研究[J]. 水利水运工程学报, 2014(4): 7-13. (PENG Xuehui, SHENG Jinbao, LI Lei, et al. Research on dam risk criteria of China[J]. Hydro-Science and Engineering, 2014(4): 7-13. (in Chinese))
- [65] 周建平, 周兴波, 杜效鹄, 等. 梯级水库群大坝风险防控设计研究[J]. 水力发电学报, 2018, 37(1): 1-10. (ZHOU Jianping, ZHOU Xingbo, DU Xiaohu, et al. Research on design of dam-break risks control for cascade reservoirs[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(1): 1-10. (in Chinese))
- [66] 杜效鹄, 李斌, 陈祖煜, 等. 特高坝及其梯级水库群设计安全标准研究 II: 高土石坝坝坡稳定安全系数标准[J]. 水利学报, 2015, 46(6): 640-649. (DU Xiaohu, LI Bin, CHEN Zuyu, et al. Evaluations on the safety design standards for dams with extra height or cascade impacts. Part II: slope stability of embankment dams[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(6): 640-649. (in Chinese))
- [67] 周兴波, 陈祖煜, 黄跃飞, 等. 特高坝及梯级水库群设计安全标准研究 III: 梯级土石坝连溃风险分析[J]. 水利学报, 2015, 46(7): 765-772. (ZHOU Xingbo, CHEN Zuyu, HUANG Yuefei, et al. Evaluations on the safety design standards for dams with extra height or cascade impacts. Part III: risk analysis of embankment break in cascade[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(7): 765-772. (in Chinese))
- [68] 徐佳成, 杜景灿, 周家骢, 等. 现行水电行业标准隐存的梯级水库大坝群风险分析[J]. 水力发电学报, 2014, 33(5): 72-76. (XU Jiacheng, DU Jingcan, ZHOU Jiacong, et al. Risk analysis for dam group of cascade reservoirs based on current hydropower industry standards[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(5): 72-76. (in Chinese))
- [69] 朱延涛. 梯级坝群风险链式效应及失效概率分析方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2021.
- [70] BOWLES D S. Evaluation and use of risk estimates in dam safety decisionmaking [C]//Proceedings of the United Engineering Foundation Conference on Risk-Based Decision-Making in Water Resources IX. Santa Barbara: American Society of Civil Engineers, 2001: 17-32.
- [71] TOSUN H, SEYREK E. Total risk analyses for large dams in Kizilirmak basin, Turkey [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2010, 10(5): 979-987.
- [72] 周庆瑜, 刘岩. 国外水库大坝安全监督管理经验借鉴探讨[J]. 中国水利, 2015(21): 52-54. (ZHOU Qingyu, LIU Yan. Experiences of reservoir dam safety management in other countries [J]. China Water Resources, 2015(21): 52-54. (in Chinese))
- [73] 严祖文, 魏迎奇, 张国栋. 病险水库除险加固现状分析及对策[J]. 水利水电技术, 2010, 41(10): 76-79. (YAN Zuwen, WEI Yingqi, ZHANG Guodong. Status analysis and countermeasures for risk elimination and reinforcement of dangerous reservoir[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2010, 41(10): 76-79. (in Chinese))
- [74] 李浩瑾. 大坝风险分析的若干计算方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- [75] 杨国华, 李江, 王荣鲁, 等. 塔河流域在役大中型水库风险评估研究[J]. 水利规划与设计, 2020(1): 64-68. (YANG Guohua, LI Jiang, WANG Ronglu, et al. Risk assessment study of large and medium-sized operational reservoirs in the Tar River Basin [J]. Water Resources Planning and Design, 2020(1): 64-68. (in Chinese))
- [76] 聂学军. 混凝土病险坝风险决策研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [77] LITTLE J D C. The use of storage water in a hydroelectric system[J]. Journal of the Operations Research Society of America, 1955, 3(2): 187-197.
- [78] CHANG F J, HUI S C, CHEN Y C. Reservoir operation using grey fuzzy stochastic dynamic programming [J]. Hydrological Processes, 2002, 16(12): 2395-2408.
- [79] SEIFI A, HIPEL K W. Interior-point method for reservoir operation with stochastic inflows [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2001, 127(1): 48-57.
- [80] LOUOKS D P, FALKSON L M. A comparison of some dynamic, linear and policy iteration methods for reservoir operation [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1970, 6(3): 384-400.
- [81] WINDSOR J S. Optimization model for operation of flood control systems [J]. Water Resources Research, 1973, 9(5): 1219-1226.
- [82] FOUFOULA-GEORGIOU E, KITANIDIS P K. Gradient dynamic programming for stochastic optimal control of multidimensional water resources systems [J]. Water

- Resources Research,1988,24(8):1345-1359.
- [83] BAI Tao, WU Lianzhou, CHANG Jianxia, et al. Multi-objective optimal operation model of cascade reservoirs and its application on water and sediment regulation[J]. Water Resources Management,2015,29(8):2751-2770.
- [84] 黄显峰,王宁,刘志佳,等. 基于改进 NSGA-II 算法的梯级水库多目标优化调度[J]. 水利水电科技进展,2024,44(4):51-58. (HUANG Xianfeng, WANG Ning, LIU Zhijia, et al. Multi-objective optimal operation of cascade reservoirs based on improved NSGA-II algorithm[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024,44(4):51-58. (in Chinese))
- [85] 邹强,王学敏,李安强,等. 基于并行混沌量子粒子群算法的梯级水库群防洪优化调度研究[J]. 水利学报,2016,47(8):967-976. (ZOU Qiang, WANG Xuemin, LI Anqiang, et al. Optimal operation of flood control for cascade reservoirs based on parallel chaotic quantum particle swarm optimization[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2016,47(8):967-976. (in Chinese))
- [86] LIN C J, CHU W L, WANG C C, et al. Diagnosis of ball-bearing faults using support vector machine based on the artificial fish-swarm algorithm[J]. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 2020,39(4):954-967.
- [87] 方国华,林泽昕,付晓敏,等. 梯级水库生态调度多目标混合蛙跳差分算法研究[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(1):69-73. (FANG Guohua, LIN Zexin, FU Xiaomin, et al. Ecological dispatch of cascade reservoir based on multi-objects shuffled frog leaping-difference algorithm[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering,2017,28(1):69-73. (in Chinese))
- [88] JIANG Zhenxiang, HE Jinping. Method of fusion diagnosis for dam service status based on joint distribution function of multiple points[J]. Mathematical Problems in Engineering,2016,2016:9049260.
- [89] CHEN Siyu, GU Chongshi, LIN Chaoning, et al. Multi-kernel optimized relevance vector machine for probabilistic prediction of concrete dam displacement[J]. Engineering with Computers,2021,37(3):1943-1959.
- [90] 苏怀智,王锋,刘红萍. 基于 POT 模型建立大坝服役性态预警指标[J]. 水利学报,2012,43(8):974-978. (SU Huaizhi, WANG Feng, LIU Hongping. Early-warning index for dam service behavior based on POT model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(8):974-978. (in Chinese))
- [91] 姜振翔,陈辉,陈鲁皖. 大坝位移性态的多模型联合预警方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2024,49(2):280-290. (JIANG Zhenxiang, CHEN Hui, CHEN Luwan. A multi-model early warning method for dam displacement behavior[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2024,49(2):280-290. (in Chinese))
- [92] SU Huaizhi, WEN Zhiping, REN Jie. A kernel principal component analysis-based approach for determining the spatial warning domain of dam safety[J]. Soft Computing, 2020,24(19):14921-14931.
- [93] SU Huaizhi, YAN Xiaoqun, LIU Hongping, et al. Integrated multi-level control value and variation trend early-warning approach for deformation safety of arch dam[J]. Water Resources Management,2017,31(6):2025-2045.
- [94] 顾冲时,吴中如,阳武. 用结构分析法拟定混凝土坝变形三级监控指标[J]. 河海大学学报(自然科学版),2000,28(5):7-10. (GU Chongshi, WU Zhongru, YANG Wu. Determining grade three monitoring indicator of dam deformation with structural analysis method[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2000,28(5):7-10. (in Chinese))
- [95] 魏博文,袁冬阳,李火坤,等. 基于参数区间反演修正混合模型的混凝土坝位移监控指标确定方法[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(增刊2):4151-4160. (WEI Bowen, YUAN Dongyang, LI Huokun, et al. Method for determining displacement monitoring index of concrete dam based on the hybrid model considering parameter interval inversion modification[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2018,37(Sup2):4151-4160. (in Chinese))
- [96] 李家田,苏怀智. 重力坝失稳破坏变形表征指标警戒值的拟定[J]. 水利水运工程学报,2023(1):34-42. (LI Jiatian, SU Huaizhi. Anti-sliding stability reliability-based approach determining the early-warning value of deformation safety for gravity dam[J]. Hydro-Science and Engineering,2023(1):34-42. (in Chinese))
- [97] ZHAN Mingqiang, CHEN Bo, WU Zhongru. Deformation warning index for reinforced concrete dam based on structural health monitoring data and numerical simulation[J]. Water Science and Engineering, 2023,16(4):408-418.
- [98] 孟雪姣,畅建霞,王义民,等. 考虑预警的黄河上游梯级水库防洪调度研究[J]. 水力发电学报,2017,36(9):48-59. (MENG Xuejiao, CHANG Jianxia, WANG Yimin, et al. Flood control operation of cascade reservoirs in the upper Yellow River considering early warning[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(9):48-59. (in Chinese))
- [99] 原文林,万芳,黄文政. 梯级水电站合约电量调度风险预警机制研究[J]. 水电能源科学,2016,34(1):57-60. (YUAN Wenlin, WAN Fang, HUANG Wenzheng. Study on early warning mechanism of risk-based contract energy operation of cascade hydropower stations[J]. Water Resources and Power,2016,34(1):57-60. (in Chinese))

(收稿日期:2025-04-27 编辑:熊水斌)