

我国安全大坝建设的挑战与科技创新需求

汪小刚^{1,2}, 郑瑾莹^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环与水安全全国重点实验室, 100038, 北京; 2. 中国大坝工程学会, 100038, 北京)

摘要:我国水库大坝数量多,其安全是国家水安全战略的重要组成部分。在全球气候变化导致极端水文事件频发,大坝面临的环境条件更加复杂,以及有效防控风险、提升发展质量要求更加迫切的背景下,水利部部长李国英在国际大坝委员会第28届大会上提出“构建安全大坝、生态大坝、智能大坝”的倡议。为进一步深化对“安全大坝”的认识,在概述我国水库大坝建设情况和大坝安全总体状况基础上,对比传统意义的大坝安全,结合新时代高质量发展要求,辨析了构建安全大坝的内涵,分析了当今大坝安全面临的主要挑战,包括气候变化带来的中低土石坝安全风险、复杂建设条件带来的高坝安全风险以及梯级开发产生的流域系统安全风险,提出建设安全大坝需要依靠科技创新,对中小型水库大坝本质安全提升、特高坝安全保障等技术以及智能大坝建设已取得的创新技术进展进行了阐述,并提出了相关领域进一步进行科技创新和推进技术发展的需求,以期服务安全大坝建设、构建全面完善的大坝安全保障体系提供参考和借鉴。

关键词:安全大坝;全生命周期安全;本质安全;科技创新;理论和技术突破;智能大坝;安全风险

Challenges and technological innovation requirements for building safe dams in China//WANG Xiaogang, ZHENG Cuiying

Abstract: China has a large number of reservoir dams, and their safety constitutes an important component of the national water security strategy. In the context of frequent extreme hydrological events induced by global climate change, increasingly complex environmental conditions faced by dams, and the growing demand for effective risk prevention and quality development, Minister of Water Resources Li Guoying proposed the initiative of “building safe dams, ecological dams and smart dams” at the 28th ICOLD Congress. To further deepen the understanding of “safe dams”, this paper outlines the current status of dam construction and overall dam safety in China. By comparing the traditional concept of dam safety with the requirements of high-quality development in the new era, it clarifies the connotation of constructing safe dams and analyzes the main challenges currently faced, including the safety risks of medium and low-earth-rockfill dams under climate change, the safety risks of high dams under complex construction conditions, and the basin system safety risks arising from cascade development. The paper emphasizes that building safe dams depends on technological innovation, elaborates on technological progress achieved in enhancing the intrinsic safety of small and medium-sized reservoir dams, ensuring the safety of ultra-high dams, and constructing smart dams, and proposes further needs for scientific and technological innovation and technical advancement in related fields. These efforts aim to support the construction of safe dams and the establishment of a comprehensive dam safety assurance system.

Keywords: safe dam; full lifecycle safety; intrinsic safety; technological innovation; theoretical and technical breakthrough; smart dam; safety risk

收稿日期:2025-08-20 修回日期:2025-10-16

作者简介:汪小刚,流域水循环与水安全全国重点实验室副主任,正高级工程师,主要从事水工岩土工程和大坝安全评估咨询方面研究。

基金项目:国家自然科学基金重点项目(52539007);广东省水利科技创新项目(2025-06)。

中图分类号: TV698 文献标识码: A 文章编号: 1000-1123(2025)20-0017-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2025.20.003

一、引言

安全是大坝事业发展的生命线。全球气候变化影响加剧导致的不确定、不稳定因素日益增多,大坝面临的环境条件更加复杂、更趋极端,有效防控风险、提升发展质量的要求更加迫切、更为凸显。习近平总书记指出:现有水库,要坚持安全第一,加强隐患排查预警和清除,确保安然无恙;要全力保障人员安全,保证大中型水库运行安全;要确保重要堤防水库和基础设施安全,坚决避免大江大河堤防决口、大型和重点中型水库垮坝。我国政府高度重视大坝安全,把确保大坝安全作为第一要求,贯穿于大坝建设运行管理全生命周期,致力于系统构建大坝安全保障体系。在四川成都召开的国际大坝委员会第28届大会开幕式上,水利部部长李国英作主旨报告时明确指出我国坝工事业发展的方向 and 目标是安全、生态、智能,提出了“携手构建安全大坝、生态大坝、智能大坝,共同推动坝工事业迈向现代化美好未来”的倡议,获得国际社会广泛响应。基于我国水库大坝安全现状,需要进一步研究探索提升安全大坝建设水平的策略,以高水平安全保障坝工事业高质量发展。这是水利工作者面临的共同任务。

二、我国水库大坝安全现状与安全大坝的内涵

1. 我国水库大坝工程概况

我国降雨和水资源时空分布十分不均,同时人口众多、经济规模大、发展速度快,人口、城镇、工业主要分布在江河中下游,对防洪、供水、灌溉、能源的保障要求很高。客观条件决定了我国必须拥有强大的江河调蓄能力,依靠水库大坝保障我国的防洪安全、供水安全、粮食安全和能源安全。我国现有各类水库约9.5万座,是世界上水库大坝最多的国家。从大坝工程技术发展水平来看,1949年以前,我国高于15 m的大坝仅有21座。相比之下,美国、法国、加拿大、西班牙、瑞士等发达国家已经建设了一批100 m以上的水库大坝,其中1936年建成的美国胡佛大坝坝高221 m,总库容373亿 m^3 ,总装机容量2080 MW,凸显出当时发达国家先进的筑坝技术水平。新中国成立以来,我国的坝工事业快速发展,迅速摆脱了落后局面。20世纪60年

代初,以坝高105 m的新安江水电站为标志,我国筑坝技术达到能够建设100 m以上高坝的水平;20世纪90年代初,以坝高240 m的二滩水电站为标志,我国已能够建设200 m以上的高坝;21世纪初,以坝高294.5 m的小湾水电站为标志,我国已能够建设300 m级的高坝;三峡、小浪底等代表性工程以及锦屏一级(305 m)、两河口(303 m)、乌东德(270 m)、白鹤滩(289 m)等一批高坝工程的建设,标志着我国已立于世界筑坝技术之巅。目前,我国大坝类型、大坝数量、高坝数量、水力发电装机规模均位居世界第一。

2. 我国水库大坝的安全现状

大坝安全事关公共安全,一直以来广受关注,党和各级政府高度重视。20世纪80年代以来,随着筑坝技术不断提高、管理不断规范和大规模实施病险水库除险加固,我国水库溃坝数量和溃坝率快速降低,未发生过大型水库大坝溃决;2000年以来年均溃坝率为0.042‰,已进入世界低溃坝率国家行列。2012年,水利部、国家安全生产监督管理总局、国家能源局联合组织全国大型水库水电站大坝安全调研,对大型水库水电站大坝安全的总体状况进行评价。总的来看,我国大型水库水电站建设、运行和监管比较规范,各项管理制度执行良好,工程运行性态基本正常,在设计运用工况下安全状况总体良好。

党的十八大以来,安全责任进一步压实,国家健全了法规制度和技术标准体系,水利部构建现代化水库运行管理矩阵,实施水库全覆盖、全要素、全天候、全周期管理,完善水库管理体制、机制、法治、责任制管理体系,强化预报、预警、预演、预案措施,加强除险、体检、维护、安全管理工作;同时全面整治安全风险,近5年实施了约1.8万座水库除险加固、5.1万座小型水库大坝安全监测设施建设和5.7万座小型水库雨水情测报设施建设,我国水库大坝的安全状况得到进一步提升。

3. 安全大坝的内涵

传统意义上,大坝安全是指大坝在规定的使用期限内,且在设计运用条件下,能够维持其结构完整,保证工程效益和周围环境不受损害。由于大坝安全事关人民群众生命财产安全,保障大坝安全的工作标准不能等同于大坝工程设计标准。设计标准是综合考虑经济、技术、环境等因素确定的一个有限值;而工作标准是即便

发生超出设计标准的洪水,也要确保人民群众生命财产安全。近年来,锚定“水库不垮坝”目标,水利部在确保设计运用条件下的安全性基础上,重点关注防范超标洪水,提升水库大坝工程的本质安全。鉴于此,建设安全大坝,其内涵是以保障人民生命财产安全为根本出发点,以设计工况下工程结构稳固可靠、超标准情况下不发生瞬时溃坝给下游带来重大次生灾害为基础,以全生命周期安全为核心,深度融合数字化、智能化技术,构建涵盖工程安全、公共安全、生态安全等多维度的综合性、现代化安全保障体系,以高标准的安全更好地服务于国家水安全、能源安全、粮食安全和生态安全。

三、当今大坝安全面临的挑战

经过大规模病险水库除险加固,我国已进入世界低溃坝率国家行列。然而从高质量发展的要求来看,水库大坝全生命周期的安全性仍然存在薄弱环节和风险,除了运行管理信息化、智能化水平不高,应急管理水平与能力有待提升等管理方面的共性问题外,面临的重大挑战主要包括如下几个方面。

1. 气候变化带来的中低土石坝安全风险

我国80%以上的水库修建于20世纪50—70年代,病险水库多、土石坝多,安全管理任务十分艰巨,同时存在高新技术应用不足,数字化、智能化程度不高等问题。1954—2018年间,全国各类水库发生溃坝事件3541起,绝大部分为中低土石坝,多数是由于特大洪水、设计洪水标准偏低和泄洪设备失灵导致洪水漫顶失事。目前,全球气候变化对我国气象水文状况的影响已经显现,近30年水资源时空分布的差异性更加明显,极端天气事件更加频繁,暴雨洪涝灾害呈现突发性、极端性和不可预见性。一些河流水文序列可能发生明显变化,致使设计洪水标准不能满足现状需求,尤其对于我国中小河流上的水库,由于设计年代已久,缺乏水文资料,原设计标准存在安全上的不确定性,在极端降雨情况下,大坝漫顶甚至溃坝的风险增加。2013年四川特大暴雨中,涪江流域13座水库发生漫坝险情,其中4座溃坝。2018年7月31日,因极端强降雨引发的超标洪水导致新疆哈密市射月沟水库漫顶溃坝。2023年海河流域发生流域性特大洪水,22条河流发生超警以上洪水,6条河流发生超保洪水,8条河流发生有实测记录以来最大洪水,131处水库和堤防发生险情,通过科学精细调度流域防洪工程,整个海河流域155座大中型水库全部投入运用,方才取得水库

无一垮坝的重大成果;其间,北京市门头沟区斋堂水库(黏土斜墙土坝)水位快速升至历史新高461.56 m,超限限水位11.3 m,给大坝安全带来极大风险挑战。

2. 复杂建设条件带来的高坝安全风险

根据国际大坝委员会和中国大坝工程学会2023年统计数据,我国是世界上拥有200 m级以上高坝最多的国家,目前世界建成的200 m级以上高坝77座,我国有20座,占26%;在建的200 m级以上高坝19座,我国有12座,占63%。对于部分特高坝,尤其是300 m级超高坝,已经超出现有工程经验,设计的理论基础还有待完善,例如基于连续介质的设计理论用于不连续的自然介质,相关假定和经验都有一定的适用范围,虽然设计方法中有基于安全系数或可靠度的安全冗余,但安全风险仍然存在。

同时,建设条件越来越复杂。我国200 m级以上的高坝主要集中在高海拔、高地震烈度、高边坡、地质条件极为复杂的西部地区,主要分布在黄河、金沙江、雅砻江、澜沧江、大渡河等水量充沛、水能资源富集的大江大河,大型地下厂房、大流量泄洪、大机组发电、高速水流消能是工程普遍情况,强震的不可预测性、高边坡处理技术的可靠性和耐久性、高寒高海拔地区建筑材料力学性质的稳定性、深厚覆盖层基础处理技术的先进性等,都给工程建设质量和安全带来挑战,而且这种挑战将伴随水库大坝的整个生命周期。部分高混凝土坝发生开裂、水力劈裂破坏,堆石坝发生坝顶裂缝、面板挤压破坏等,给高库大坝带来了安全挑战。

另外,高坝事故应急处理能力仍存在短板。特高坝工程需要在100 m甚至150 m以上水深情况下进行检测、修补和加固,我国现有技术和装备仅能满足60 m以内水深的水下检修要求,主要依靠人工潜水作业,一旦在深水部位发生破损,无法及时予以检测修复。

3. 梯级开发产生的流域系统性安全风险

我国梯级开发的江河众多,在规划阶段大多没有从流域安全角度充分考虑各级水库大坝的坝型和库容,工程设计上没有充分考虑单个工程防洪标准和梯级水库群防洪安全的系统协调,没有充分考虑溃坝产生的流域安全风险传播和风险阻断,一旦一座水库或水电站因超标洪水、超设防地震或重大隐患造成溃决,梯级风险的传递、叠加、放大效应将导致重大公共灾难。

1954年至今我国水库连溃事件共发生130余起,给下游带来了严重后果。2021年7月,内蒙古自治区呼伦贝尔市遭遇强降雨,导致永安水库(小型)土坝

发生溃决,引起下游新发水库(中型)发生漫坝溃决。2018年11月,金沙江上游山体滑坡形成白格堰塞湖,对下游沿江区域人民生命财产和梯级水库安全带来巨大风险;通过人工开挖泄洪槽,堰塞湖库容(7.7亿 m^3)减少了2亿 m^3 ,同时拆除距离堰塞湖最近的在建工程苏洼龙水电站土石围堰,避免梯级连溃风险,并利用梨园、阿海等下游梯级电站腾库调蓄洪水,减轻下游防洪压力,成功解除险情,最大限度降低了损失。梨园水电站为距离白格堰塞湖最近(约670 m)的运行水电站,挡水建筑物为面板堆石坝,堰塞体开挖过流后,梨园水电站入库流量峰值7200 m^3/s ,洪水抵达梨园断面后24 h水位上涨23 m,对面板堆石坝和岸坡岩体的稳定性带来严峻考验。如果山体滑坡发生在偏远区域,无法进行人工干预排险、减少溃决洪峰流量,或者溃决不受控发生、下游水库未能提前腾库,或者下游水库调蓄能力不够、水位陡降陡升导致工程破坏,都可能导致漫坝、溃坝带来流域系统性安全风险。

四、以科技创新支撑安全大坝建设

构建安全大坝,需坚持安全第一,建立健全大坝全生命周期安全保障体系,多管齐下、综合施策,全面管控致险、承险、防险要素,提升大坝本质安全,核心需要在科技创新上下功夫。

1. 通过技术创新提升中小型水库大坝的本质安全

针对气候变化导致的中小型水库大坝的安全风险,需要从气象水文预测、水库调度运行、工程结构改造与加固等方面,运用创新思维和新技术来确保安全。

小流域暴雨洪水准确预报对于中低土石坝安全非常重要,针对水文站点有限、资料短缺的情况,充分利用遥感技术进行了基于高分辨率遥感影像和激光雷达数据的水文要素提取,针对小流域微地形、地貌特征对资料短缺小流域洪水响应机理的影响进行辨识,提出了资料短缺小流域的时空变源混合产流模型理论方法,揭示了短历时降雨条件下小流域产流时空演变规律和产流非线性机理,小流域暴雨洪水预报精度提高30%以上。

鉴于中小型水库大坝绝大部分为土石坝,土石材料是散粒体,遭遇洪水漫顶和渗透水流时,会发生侵蚀、冲刷导致塌陷而快速溃决,提出了胶结坝新坝型和已建土石坝的表层胶结加固结构,即在当地材料中加入少量水泥、粉煤灰等胶凝材料,形成具有一定抗剪强度、抗冲蚀能力的胶结材料,用于筑坝或对已建土石坝下游面进行保护,可以实现漫顶不溃,同时具有经济、

施工快捷、环境友好等特点。在实验室开展漫顶冲刷模型试验,胶结坝和土坝表层胶结加固后,在最大流速4.7 m/s 的漫顶水流冲刷下50 h不溃决。目前国内外已建40多座胶结坝工程,多座工程经历了漫顶洪水的考验,其中福建洪口水电站胶结砂砾石过洪44 h,最大漫顶水头8 m,最大洪峰流量5500 m^3/s ,未发生溃决;四川犍为胶结砂砾石防护堤成功防御了2021年超标准洪水,而其他堤段的面板堆石坝发生溃决。

研发了柔性溢洪道快速构建技术,具有抗冲蚀与变形协调能力,经多座试验坝的极限测试,最大承受100 cm漫溢水头和6.9 m/s 流速,持续72 h未损坏,糙面消能率高达80%。通过研发经济实用、漫顶不溃坝的新型筑坝技术和筑坝材料,提升了土石坝工程抗漫顶洪水的本质安全。

另外,依托大数据、移动互联网等信息技术,不断研发适用于面广量大的中小型水库大坝安全运行智能化监控新技术,针对中小型水库大坝出险概率大的病害,研发水库大坝病险快速检测识别和快速加固处置新结构、新材料和新技术。这些技术创新为有效提升中小型水库大坝的安全性提供了支撑,但还需要在实践的基础上持续创新,进一步提升大坝本质安全。

2. 聚焦理论和技术突破,提升特高坝的安全性

我国坝高200 m以上特高坝的大规模建设始于21世纪初,如此密集地建设一批特高坝,且坝高不断突破纪录,这在世界筑坝史上前所未有,许多特高坝勘测、设计、建设中的技术难题可能是第一次遇到。面对前人从未遇到的技术挑战,除了科学严谨的态度、深入细致的论证,还必须要有创新意识,敢于突破既有经验,在筑坝理论和技术方面不断追求科技进步。

伴随技术发展,充分利用现代强大的实验技术和云计算平台、并行计算、百万自由度等计算手段,创建了集坝址地震动输入、坝体混凝土动态性能、大坝地震损伤破坏机理、抗震安全定量评价准则于一体的高坝抗震安全评价理论和处置关键技术体系;提出了大体积混凝土智能温控方法和架构,建立了智能温控模型系统,并研制了配套设备;发展了高土石坝坝料特性实验设备和大坝性态分析方法,构建了室内实验、现场测试相结合确定土体动静力特性参数的方法和反映非线性、压硬性、滞变性、累积性与颗粒破碎等影响的土体本构模型;研发了具有防渗、抗冲磨、抗冻融、抗冰拔防护功能的新型聚脲基复合防渗防护体系,防护混凝土在3 MPa水压作用下开裂不漏水;研发了适用于高

坝和大泄量的宽尾墩、窄缝新型消能工(消能率提高60%),以及高内水、高外水、高地应力、高地温“四高”复杂环境隧洞自适应新型衬砌结构等新型结构。通过系列理论研究、理论突破,不断提升高坝设计的理论基础,同时通过新方法、新结构、新材料、新技术,解决复杂和恶劣建设环境下特高坝安全建设中的各种挑战性问题,支撑了世界上同类坝型中最高锦屏一级拱坝、两河口心墙堆石坝、水布垭混凝土面板堆石坝、黄登碾压混凝土坝等工程成功建成投运。

同时关注工程的安全运行,围绕系统性的大坝监测观测、精细化的预警预报、科学合理的实时调度,开展了众多研发工作,依托无人机、声呐、摄影测量、水下机器人等尖端技术,研究大坝的智能检测技术及装备。开发了基于三位激光扫描、实时动态定位(GNSS RTK)和数字图像处理的表面缺陷定量评估技术;基于弹性波CT技术、最大测试深度达50 m的混凝土内部缺陷定位和定量分析技术、全景微结构定量分析的混凝土健康诊断技术以及水下声呐渗漏检测技术等,推动了深水大粒径清淤和水下加固修复等核心技术突破。

我国还有大量高坝工程在建、拟建,工程地质条件更加复杂,同时众多特高坝工程的安全运行维护需求逐步凸显,这些都需要科技工作者不断追求科技进步,聚焦理论和技术突破,提升高坝安全性。

3. 建设智能大坝,保障大坝全生命周期安全和流域安全

随着互联网、移动通信技术的发展,以及大数据、人工智能、机器学习、深度学习等技术的不断突破和成熟,信息获取、存储、传输和处理变得前所未有的高效和便捷,这不仅推动了信息产业的蓬勃发展,也促进了其他产业包括水利行业的数字化转型和向数字智能时代转变。通过全面透彻感知、全面互联互通、数据广泛共享、信息深度整合、智慧普遍应用,实现了科学决策、精细管理、协同调度、快速响应,且更高效、更集约、更智能。

目前坝工行业在智慧化建设方面也进行了大量探索,尤其是高坝建设和梯级调度方面,如糯扎渡、溪洛渡、两河口、白鹤滩、乌东德等工程。我国新建的一大批特高坝工程运用智能碾压、智能温控等技术,对施工质量进行全过程控制,大渡河、金沙江等流域梯级水电站群开展智能调度、智能运维等建设,三峡、小浪底、大藤峡等工程开展数字孪生工程建设。但总体上看,坝工行业在新一代信息技术应用方面还处于初级阶段,突出表现在对当前我国约9.5万座水库大坝的全面感知能力

明显不足,绝大多数中小型水库缺少监测数据,更谈不上互联互通和数据共享。水库大坝具有很长的生命周期,从勘测设计、工程建设到运行管理,始终面临着对自然对象认知不足的风险,工程建设中质量隐患的风险,工程运行中地震、气象等自然灾害的风险,工程调度中人为失误的风险等。消除或降低这些风险,不仅要通过新技术、新工艺、新方法解决各类工程难题,还要通过数字化、物联网、人工智能等技术全面感知筑坝质量和大坝运行情况,通过大数据、云计算等技术系统分析大坝可能存在的气象水文安全隐患、质量安全隐患、抗震安全隐患、运行调度安全隐患等。

面对发展的需求,研发了集成人工智能图像识别和物联网等新技术的水库坝前水位非接触式视频测流装备及系统,对坝前水位进行全天候实时在线监测,水位误差范围在 ± 2 cm以内,已在全国9个省份部署600余套。针对极端洪水,尤其是超设计标准洪水,提出了强干扰条件下多目标联合优化的复杂工程群互馈优化洪水调度技术,构建了水工程防洪联合优化调度智能算法集,实现多调度方案智能优选,形成了超标准洪水预报调度一体化技术体系,为降低流域安全风险提供了技术支撑,已在浙江珊溪水库、河北西大洋水库等全国169座大中型水库及漳卫河、大清河等多个流域水工程群中成功应用。以广东省三大暴雨中心之一的永汉河流域为对象,开展智能大坝关键技术的集成应用,汇集流域内9类产汇流特征自然数据,流域社会经济数据,气象卫星、水库雨水情和大坝安全监测数据,建立了完整的数据底板,集成了时空变源分布式水文模型、大坝安全风险智能诊断模型等,并研发了安全矩阵管理平台。构建了“天空地水工”全域立体变形监测技术,以天(Insar+单北斗)+空(无人机)+地(视频)+工(磁栅、MEMS)技术融合,解决时空多尺度融合、精度平衡等技术难题,大坝全域实现变形毫米级实时监测;研发了大坝结构性态高保真模型,实现大规模、高效率、高置信度的大坝形变分析和分钟级响应。

上述都是智能大坝建设的组成部分,通过构建透彻监测感知体系、智能分析预测体系和前瞻决策支持体系,深化对水库大坝性态全要素和运行管理全过程的数字化映射、智能化模拟,达到历史数据积累分析、实时数据同步交互、未来数据预测预演,实现大坝建设运行管理全生命周期和流域系统的数字化、网络化、智能化,以全面提升大坝全生命周期安全性及全流域安全应急管理水平。

五、结 语

大坝安全是国家水安全战略的重要组成部分,安全大坝建设是高质量发展对水库大坝安全提出的新要求。通过面对挑战逐步认识规律、探索规律并勇于创新实践这一过程,我国取得了举世瞩目的筑坝成就,成为世界低溃坝率国家之一。随着经济社会对水安全需求的不断提升,面临气候变化带来的挑战,建设安全大坝是坝工领域的共同关切和追求。从设计运用条件下的大坝安全,到超标准洪水情况下确保大坝安全,安全大坝建设已经取得了初步成效。然而,我国面广量大的中小型水库工程本质安全提升、特高坝建设和梯级流域开发的系统性风险控制仍然面临巨大挑战,需要在大坝安全管理理念的基础上,进一步深化对建设安全大坝内涵的认识,深入融合数字化、智能化技术并促进产业技术迭代升级,构建全面完善的大坝安全保障体系。

参考文献:

- [1] 李国英.推进安全大坝、生态大坝、智能大坝建设[N].人民日报,2025-06-27(11).
- [2] 李国英.推动水利高质量发展 保障我国水安全[N].人民日报,2025-3-21(12).
- [3] 水利部 安全监督总局 能源局关于全国大型水库水电站大坝安全调研情况的报告(水安监〔2014〕356号)[A].2014.
- [4] 矫勇.推动坝工科技创新 服务国家重大战略[J].中国水利,2023(9):1-3.
- [5] 矫勇.中国大坝70年[M].北京:中国三峡出版社,2021.
- [6] 陈敏.金沙江白格堰塞湖处置中水库应急调度经验与启示[J].人民长江,2019,50(3):10-14.
- [7] 中国水利水电科学研究院.智能大坝理念与实践[M].北京:中国水利水电出版社,2025.
- [8] 张建云,盛金保,金君良,等.全国水库大坝应急管理存在问题和对策建议[J].中国应急管理科学,2022(9):23-30.
- [9] 贾金生.中国水利水电工程发展综述[J].Engineering,2016,2(3):88-109.
- [10] 杨启贵,王秘学.我国水库大坝安全挑战与运维思考[J].中国水利,2024(5):6-10.
- [11] 贾金生,郑瑾莹,王月,等.胶结颗粒料坝筑坝理论探讨与实践进展[J].中国科学:技术科学,2018,48(10):1049-1056.
- [12] 李兆宇,贾金生,苏安双,等.胶结土坝漫顶溃坝模型试验研究[J].河海大学学报(自然科学版),2022,50(5):98-104.
- [13] 于继禄,韩福涛.中小型水库工程除险加固技术研究与应用[M].南京:河海大学出版社,2023.
- [14] 王冠军,戴向前.统筹发展和安全 筑牢水利高质量发展的工程安全根基[J].水利发展研究,2021,21(9):25-27.
- [15] 黄维,彭之辰,杨彦龙,等.水电站大坝运行安全关键技术[M].北京:中国电力出版社,2023.
- [16] 张建云.气候变化对国家水安全的影响及减缓适应策略[J].中国水利,2022(15):3-5+14.
- [17] 杨泽艳,周建平,王富强,等.300 m级高面板堆石坝安全性及关键技术研究综述[J].水力发电,2016,42(9):41-45+63.
- [18] 罗登科,方艺翔,李卓,等.极端气候条件对某土石坝稳定特性的影响研究[J].水电能源科学,2023,41(8):121-125.
- [19] 钟登华,任炳昱,宋文帅,等.高拱坝建设进度与质量智能控制关键技术及其应用研究[J].水利水电技术,2019,50(8):8-17.
- [20] 刘毅,杜雷功,钱文勋,等.高寒区高混凝土坝关键技术难题与解决途径[J].水利水电技术,2020,51(3):45-52.
- [21] 朱迪,周研来,陈华,等.考虑分级防洪目标的梯级水库汛控水位调度模型及应用[J].水利学报,2023,54(4):414-425.
- [22] 陈生水.复杂条件下特高土石坝建设与长期安全保障关键技术研究进展[J].中国科学:技术科学,2018,48(10):1040-1048.
- [23] 蔡跃波,向衍,盛金保,等.重大水利工程大坝深水检测及突发事件监测预警与应急处置研究及应用[J].岩土工程学报,2023,45(3):441-458.
- [24] 中华人民共和国水利部.中国水旱灾害防御公报2024[M].北京:中国水利水电出版社,2025.
- [25] 冶运涛,蒋云钟,梁犁丽,等.数字孪生流域:未来流域治理管理的新基建新范式[J].水科学进展,2022,33(5):683-704.
- [26] 张建伟,李毅男,张龔,等.基于数字孪生的水库大坝安全监测:关键技术与应用[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2025,46(3):1-9.

责任编辑 张瑜洪