

DOI: 10.16867/j.issn.1673-9264.2024429

穆杰, 吴滨滨, 王帆, 等. 气候变化下国内外溃坝事件对我国水库安全运行的警示[J]. 中国防汛抗旱, 2024, 34(12): 125-129. MU Jie, WU Binbin, WANG Fan, et al. Warning to the safe operation of reservoirs in China from domestic and international dam break events in the context of climate change[J]. China Flood & Drought Management, 2024, 34(12): 125-129. (in Chinese)

# 气候变化下国内外溃坝事件对我国水库安全运行的警示

穆杰<sup>1,2</sup> 吴滨滨<sup>1,2</sup> 王帆<sup>1,2</sup> 柴福鑫<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038;

2. 水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心(水旱灾害防御中心), 北京 100038;

3. 水利部京津冀水安全保障重点实验室, 北京 100038)

**摘要:** 受全球气候变化影响, 极端天气频发重发, 全球水库漫坝、大坝溃决事件偶有发生, 引起的洪水灾害范围广、影响人口多、经济损失大、敏感性高。基于近年来国内外影响较大的溃坝事件, 从气候变化、运行管护、工程质量、泄流能力、预报预警等方面深入分析溃坝成因及灾害特征, 并从极端天气事件应对能力、高风险水库排查、防洪“四预”能力提升、增强防灾避险意识、加强溃决机理研究等方面提出水库大坝安全管理和防洪度汛方面的启示, 为水库溃坝风险防控提供措施建议。

**关键词:** 溃坝; 案例分析; 溃决原因; 启示; 风险防控

中图分类号: TV122.4

文献标识码: A

文章编号: 1673-9264(2024)12-125-05

## 0 引言

我国中小型水库总量大、历史久、病险多, 溃决风险依然存在。1954—2021年的68年间, 全国共3 558座水库发生溃坝, 多年平均溃坝率为0.53‰, 高于国际公认的低溃坝率水平(0.2‰)。随着水库安全管理水平提高和预报预警能力提升, 近20年间全国年平均溃坝率降至 $0.46 \times 10^{-4}$ , 远低于国际水平<sup>[1]</sup>。伴随着中国经济的高速发展, 社会对风险事故的可接受度发生了巨大变化, 但溃坝事件作为公共安全突发事件, 风险人口众多, 影响程度大、损失重, 社会敏感性极高<sup>[2-4]</sup>。受气候变化影响, 极端天气频发重发, 全球河堤决口、水库漫坝、大坝溃决几乎年年发生, 全球堤坝库群工程安全保障与汛期防汛应急管理面临更严峻的新挑战<sup>[5]</sup>。本文通过分析近年来国内外溃坝事件, 总结溃决原因与特征, 提出溃坝风险应对启示与措施, 为我国水库安全度汛和应急管理提供参考。

## 1 国内外近期溃坝洪水事件

近年来, 全球发生多起溃坝事件, 美国、中国、印度、乌兹别克斯坦、利比亚、老挝、法国等国都发生过水库溃坝事件, 造成了不同程度的人员伤亡和财产损失<sup>[6]</sup>, 对公共安全产生严重影响。本文以美国伊登维尔—桑福德水库连溃、乌兹别克斯坦萨尔多巴水库溃坝, 中国永安—新发水库连溃、利比亚阿尔比拉德—阿布曼苏尔水库连溃事件为典型案例, 剖析近3年国内外水库溃坝原因, 提出应对措施建议, 为我国水库安全运行和风险防控提供参考。

### 1.1 美国伊登维尔—桑福德水库连溃

美国伊登维尔大坝位于密歇根州中部提塔巴瓦西河和托巴克河的交汇处, 桑福德大坝位于伊登维尔大坝下游约11.3 km处。2020年5月19日提塔巴瓦西河进入大洪水期, 当地时间19:30伊登维尔大坝库水位接近坝顶, 大坝发

收稿日期: 2024-11-18

第一作者信息: 穆杰, 女, 高级工程师, E-mail: mujie@iwhr.com。

通信作者信息: 王帆, 男, 高级工程师, E-mail: wangfan@iwhr.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2340225); 中国水科院基本科研业务费专项项目(JZ110145B0062024、JZ0145B042024)。

生渗流破坏,进而失稳溃决;受溃决洪水冲击影响,下游桑福德大坝于当日20:49发生了漫顶溃决。两座大坝连溃后提塔巴瓦西河水位继续上涨,20日下午水位达到最高值10.68 m,超当地历史最高水位10.33 m(1986年)。溃坝发生后,密歇根州政府通过手机、网站等及时发布了溃坝信息,对1万多人进行了疏散。由于联邦政府发布了各标准的河道洪水风险图和溃坝洪水风险图,加之预警发布及时,大坝连溃并未造成人员伤亡<sup>[7-9]</sup>。

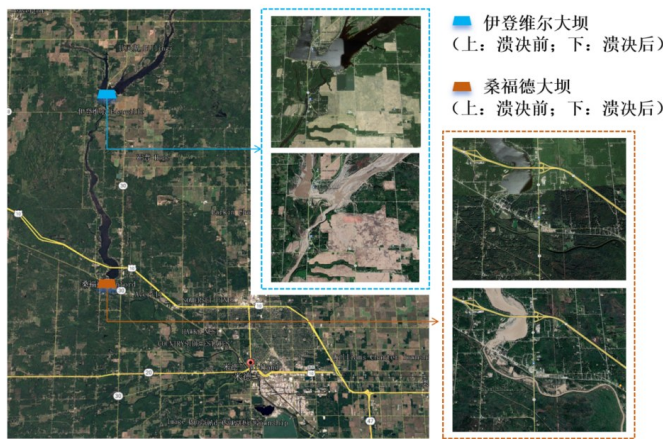


图1 美国伊登维尔—桑福德大坝位置示意图

### 1.2 乌兹别克斯坦萨尔多巴水库溃坝

萨尔多巴水库位于乌兹别克斯坦锡尔河州锡尔河上,为平原型水库,2017年建成,坝高29 m,最大库容9.22亿 $m^3$ ,主要用于农田灌溉。2020年5月1日在经历暴风雨后于5:55发生溃坝,经分析,溃坝主要由涵管裂缝漏水导致部分坝体倒塌,溃坝洪水喷涌冲向附近村庄,导致下游6人死亡,50多人受伤,7万多人被迫紧急转移。



图2 乌兹别克斯坦萨尔多巴水库溃坝位置示意图

### 1.3 中国永安—新发水库连溃

永安水库位于内蒙古莫力达瓦达斡尔族自治县境内诺敏河二级支流西瓦尔图河中游,控制流域面积203 $km^2$ ,总库容800万 $m^3$ ,水库设计标准为50年一遇,校核标准为500年一遇。新发水库位于永安水库下游13 km处,控制流域面积698 $km^2$ ,总库容3 808万 $m^3$ ,设计标准为50年一遇,校核标准为300年一遇。2座水库均为开敞式溢洪道。2021年7月18日12时,受高空低涡引发的强降雨影响,永安水库发生漫顶溃坝,靠近溢洪道的一侧发生局部决口,溃决洪水沿西瓦尔图河涌向下游新发水库。14时,下游新发水库洪水漫坝,防浪墙全线溢流,洪水漫顶后下游坝体被快速淘刷,15时大坝左岸发生溃坝。按照预案当地政府迅速转移4 175人,未造成人员伤亡。

根据实测,永安水库上游的西瓦尔图农场站24 h降雨量为251.8 mm,查算重现期为800 a;新发水库坝址以上流域最大24 h雨量为226.9 mm,查算重现期为450 a。

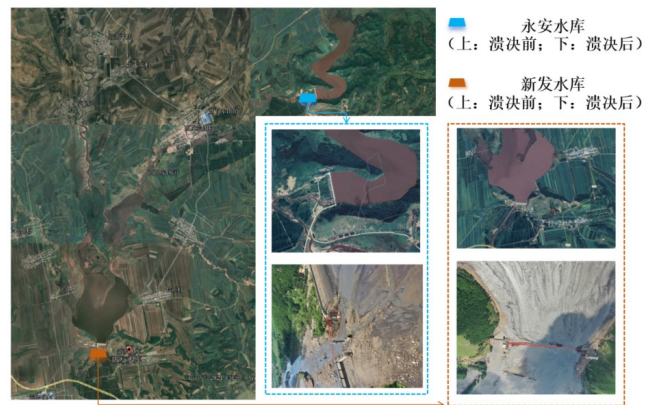


图3 中国永安—新发水库溃坝位置示意图

### 1.4 利比亚阿尔比拉德—阿布曼苏尔水库连溃

利比亚地处非洲北部,全境95%以上地区为沙漠和半沙漠,内陆地区属热带沙漠气候,干热少雨。阿尔比拉德水库、阿布曼苏尔水库位于利比亚东北部德尔纳市瓦迪德纳河,相距12 km,受地中海超强热带飓风“丹尼尔”引发的强降雨影响,2023年9月11日凌晨相继发生垮坝事故,造成下游德尔纳市11 300人死亡、10 100人失踪,市内25%的区域受洪水侵袭,大批道路、桥梁及沿河建筑物等基础设施被冲毁,电力和通信完全中断。



图4 利比亚阿尔比拉德—阿布曼苏尔水库溃坝位置示意图

### 1.5 印度锡金南洛纳克湖和琼塘大坝溃坝

南洛纳克湖是由洛纳克冰川融雪形成的冰碛湖,位于印度锡金西北地区,海拔5 200 m,1977—2008年期间,湖泊水面面积增加了4倍多,是锡金喜马拉雅地区扩张最快的湖泊之一。受全球气候变暖及暴雨影响,2023年10月3日,南洛纳克湖水位急剧上升,最终冰坝溃决导致湖水下泄,直接冲垮了提斯塔河琼塘大坝,引发该流域洪水灾害。洪水造成至少18人遇难、超过150人失踪,提斯塔河下游两岸受灾严重,电力、通信中断。

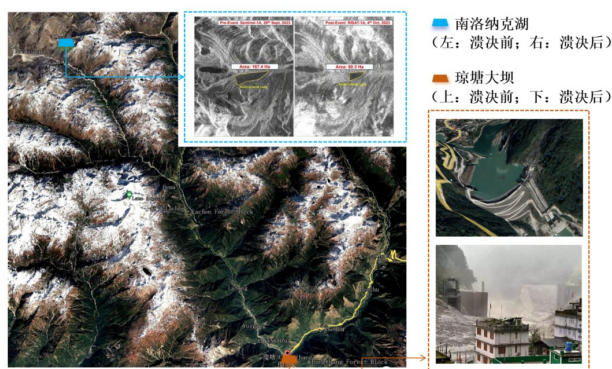


图5 印度锡金南洛纳克湖和琼塘大坝溃坝位置示意图

注:南洛纳克湖溃决前后对比分析来源于新闻报道<https://edition.cnn.com/2023/10/05/india/india-sikkim-floods-search-damage-climate-intl-hnk/index.html>。

## 2 溃坝原因分析

### 2.1 气候变化导致超标准洪水频发

根据联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)发布的第六次评估报告,人类活动使全球平均升温1.1℃,地球气候变化空前<sup>[10]</sup>。极端降水和洪水事件在所有气候区域都有所加剧,气候变化引发的超标准洪水已成为水库漫顶溃决的主要原因。超强台风从秋季前移到夏季,与夏季风导致的

极端暴雨事件遭遇发生复合灾害的风险大幅提升,给现有防灾减灾体系带来巨大挑战。如2020年美国密歇根州水库溃决事件中,密歇根州提塔巴瓦西河流域地区5月以来的降雨量约是往年的2.5倍;2023年利比亚德尔纳市水库溃决事件中,飓风“丹尼尔”带来的极端强降雨,实测最大24 h降雨量414 mm;2021年我国内蒙古永安—新发水库溃决事件中,永安水库上游的西瓦尔图农场站24 h降雨量为251.8 mm,下游兴安站24 h降雨量为226.9 mm,气候变化带来的极端降雨远超水库设计时采用的重现期降雨标准,导致入库洪水超过水库设计和校核洪水标准,加之应急泄流能力不足,从而引发溃坝。综上,要高度警惕极端天气带来的水库运行风险。此外,随着西北太平洋热带气旋达到最大风力时的位置可能进一步北移,在干旱少雨的北方地区,更应高度警惕极端降雨情况下的水库运行安全。

### 2.2 运行管护不到位导致水库风险增大

自密歇根州水库溃决事件后,经调查评估,由于长期管护经费投入不足,美国约2 200座水库存在运行风险,加之下游经济发展、人群聚集,极端气候影响下的人员安全风险急剧增大。利比亚2座连溃水库早在1998年就出现裂缝,当地政府2012年和2013年共划拨超过200万美元用于除险加固工程,但并未施工,且2座水库无溢洪道等可用于应急保坝的设施,在极端暴雨冲击下最终垮塌。我国新发水库虽然经过安全鉴定与除险加固,但并未开展水位库容关系复核,库区泥沙淤积严重,库底高程已非常接近溢洪道堰顶高程,有效防洪库容严重不足,在上游来水加大的情况下,坝前水位迅速升高。

### 2.3 工程质量不达标导致溃坝

乌兹别克斯坦萨尔多巴水库建成于2017年,存在设计和施工缺陷问题,如设计坡比、护面和滤水层数据不合理,施工中土质密度低、铺设材料粒径和厚度不满足要求等,导致大坝强度降低。印度琼塘水坝为2017年投产运行,但存在地质环境脆弱、施工质量不达标、坝底缺乏加固等工程质量,导致大坝难以应对流域洪水。

### 2.4 溢洪道过流能力不足

美国大坝安全官员联合会指出,美国现有大坝最常见缺陷之一是溢洪道容量不足。近年来由于气候变化,极端洪水甚至是最大可能洪水(PMF)时有发生,在这些情况下,由于泄洪能力不足(无论是否达到PMF)而导致的漫顶

成为大坝最常见的溃坝模式之一,此类事故约占美国溃坝案例的34%。2021年内蒙古永安水库—新发水库的溃坝事件,在强降雨情况下由于溢洪道过流能力不足,下泄流量远小于上游入库流量,从而导致水库发生全线漫顶溢流,最终引发溃坝。

### 2.5 监测预报预警体系不够完善

利比亚2座连溃水库均无洪水预报预警系统,下游德尔纳市没有应急疏散预案,更无预演方案。我国永安和新发2座水库以上流域无水文监测站点、水雨情观测设施不完善,难以开展洪水预报作业,无法为上下游水库调度提供技术支撑。加上水库水情信息传输能力薄弱,极端天气事件发生后,导致电力、通信中断,上下游预警信息无法及时共享。

### 2.6 下游河道行洪能力不足导致水库调度运行受限

除上述原因外,在实际调度运行中,由于水库常常用于调蓄中小洪水,导致下游河道萎缩,存在下游河道行洪能力不足而导致水库防洪调度运行受限的情况,致使水库保坝难、下游河道堤防及两岸居民风险高。

## 3 启示

虽然我国近年来持续加强水库安全管理水平和预报预警能力建设,但中小型水库仍存在历史欠账多、风险人口数量大、运维经费不足等难题,水库安全度汛风险程度高。通过分析总结近3年国内外溃坝事件,提出了加强水库安全管理的相关启示建议。

### 3.1 高度警惕极端天气事件

全球气候变暖导致极端天气多发,近年来我国突破水文气象极值的极端暴雨事件频繁出现,水库安全运行风险增大,2018年新疆射月沟水库溃坝、2021年郑州郭家咀水库出险、2021年内蒙古永安水库和新发水库溃坝,2023年黑龙江省磨盘山水库和龙凤山水库出险等,都警示我们应高度警惕极端天气引发的水库运行风险。

结合国内外经验,全球变暖可能引发冰湖溃决,进而冲击下游水库大坝,应采取遥感监测等技术加强风险防控;根据溃坝统计数据,在干旱少雨的北方地区,由于风险意识和运维不够,溃坝率较高;此外,利比亚洪灾发生地与“75·8”“7·20”等洪灾发生地纬度接近,且都由台风引起,位于此纬度区域的水库应高度警惕。

### 3.2 加强高风险水库排查

重点排查干旱少雨地区水库、“小库高坝”“头顶库”“糖葫芦串”等溃决后影响较大的水库,检视其在极端降雨条件下的防洪能力,复核防洪库容、设计标准、水位库容曲线、泄流能力、下游河道过流能力等,采取增大泄流能力等保坝措施,提高水库漫而不溃韧性。应持续推进病险水库除险加固工作,汛期病险水库应限制水位运行。

### 3.3 提高防洪“四预”能力

加快构建气象卫星和测雨雷达、雨量站、水文站组成的雨水情监测预报“三道防线”,延长预报预见期。及时发布预警信息,上游水库预警信息及时传达至下游水库及地方政府,并督促采取相应落实措施。

加快数字孪生技术研发,推进防洪“四预”应用。普及应用激光雷达、无人机倾斜摄影等数据采集技术,构建高精度数据底板,夯实算据基础;加紧研究精准高效的产汇流与水动力模型,改进算法模型,优化模型架构,提升模型算力。

### 3.4 加强应急保障能力建设

开展防洪工程体系超标准运用潜力、水工程非常规调度运用方式、运用条件和次序研究,进一步完善水库超标准洪水防御预案和防洪抢险应急预案,提高预案的科学性、实用性和可操作性。

加强防汛料物储备与抢险队伍建设,具有连溃风险的水库应提高料物储备定额,加快装配式子堤筑堤、应急溢洪道构建等新型抢险技术推广。

加强水库主备双通道通信保障。在极端恶劣天气导致通信信号差或网络中断时,启用北斗或微波通信等备用通道,确保上下游雨水工险情与预警信息及时共享。

向基层赋权并向基层赋能,培养基层防洪知识与技能,重点提升其危机感知、临机处置、沟通协调等方面能力,提升基层防洪应对能力。

### 3.5 强化水库运行风险管理

编制高风险水库溃坝洪水风险图,明确区域洪水风险等级、影响范围和应急避险路线,并开展试点公示。

宣传普及水库防洪避险知识、技能,加强人员应急演练,增强公众的风险防范意识和自救互救能力。

### 3.6 加强溃决机理研究

针对不同坝型,基于溃坝过程数学模型和物理模型,研究溃决机理,探究阐述坝体上下游方向、坝轴线方向及

下游坡面的溃口发展规律,分析应急保坝措施成效,从而提出具有针对性的水库安全韧性提升措施,避免水库溃决或减轻溃决洪水损失。

### 参考文献

[1] 盛金保,李宏恩,盛韬桢.我国水库溃坝及其生命损失统计分析[J].水利水运工程学报,2023(1):1-15.

[2] 李宏恩,马桂珍,王芳,等.2000—2018年中国水库溃坝规律分析与对策[J].水利水运工程学报,2021(5):101-111.

[3] 梁哲,许洁虹,李纾,等.突发公共安全事件的风险沟通难题——从心理学角度的观察[J].自然灾害学报,2008,17(2):25-30.

[4] 盛金保,厉丹丹,蔡尊,等.大坝风险评估与管理关键技术研究进展[J].

中国科学:技术科学,2018,48(10):1057-1067.

[5] 周兴波,杨子儒,杜效鹤,等.极端气候下堤坝库群工程安全与应急管理思考[J].水力发电,2023,49(5):4-9.

[6] 周兴波,周建平,杜效鹤.美国奥罗维尔坝溢洪道事故分析与启示[J].水利学报,2019,50(5):650-660.

[7] 张大伟.美国Edenville溃坝事件原因分析与启示[J].中国防汛抗旱,2021,31(2):70-74.

[8] 郭重汕,力刚,张洪斌,等.Carol Freeman:美国密歇根州2020年溃坝事件研究Ⅱ[J].中国防汛抗旱,2020,30(12):23-24.

[9] IPCC.Climate change 2023: Synthesis report[R].2023.

[10]ASDSO. Dam incident and failure investigations[R].2023.

编辑 王伶俐

(上接第25页)精细化预报调度的需求,部分重要水文断面监测站点不足且防洪和测洪标准偏低。此外,流域近年来下垫面条件变化大,实测洪水资料少,预报方案修订更新存在困难。

### 4 下一步工作重点

(1)加快完善流域防洪工程体系。加快推进大清河、永定河、子牙河等防洪控制性水库开工建设,充分挖掘现有水库防洪能力,提升上游水库拦洪削峰能力,保障下游防洪安全。加快实施骨干河道重要堤防达标治理,加快温潮减河、永定河三家店至梁各庄段综合治理等工程建设。督促指导各地做好国债资金支持项目建设管理,跟踪建设进度并督促完善跨汛期施工度汛措施,保证项目度汛安全,确保项目如期完成。

(2)纵深推进河湖“四乱”清理整治常态化规范化。充分发挥联席会议办公室作用,密切与相关省级河长制办公

室统筹协调,加大河湖库违法违规问题排查整治力度;充分发挥卫星遥感技术支撑作用,提升监管效能,指导督促地方开展卫星遥感解译图斑核查及问题清理整治;持续强化水域岸线空间管控,依法开展涉河建设项目许可,加强全过程监管,坚决防止违规审批、未批先建、批建不符等问题。

(3)着力提升流域防洪“四预”能力。加快防洪“四预”系统建设,持续夯实完善基础数据底板,修订相关水系洪水预报方案,开展水文水动力学耦合模型开发建设,推进预报调度一体化,全面提升防洪“四预”能力。加快构建雨水情监测预报“三道防线”建设,在海河流域暴雨洪水集中来源区建设水利测雨雷达,局部加密太行山燕山迎风坡、流域中下游平原、大中型水库库区雨量站布设,推进现有雨量站提档升级,保障极端条件下雨情信息采集和传输的完整性、及时性;补充建设水文站、水位站和视频监控站,完善水文站网,确保极端条件下测得到、测得快、测得准、报得出。

编辑 田亚男