

## 我国水库溃坝及其生命损失统计分析

盛金保, 李宏恩, 盛韬桢

### Statistical analysis of dam failure and its loss of life in China

SHENG Jinbao, LI Hongen, SHENG Taozhen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20220919001>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 基于GeoDam-BREACH与Graham法的溃坝生命损失估算

Estimation of life loss by dam-break flood based on GeoDam-BREACH and Graham methods  
水利水电工程学报. 2019(2): 93 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.02.013>

#### 我国水库大坝安全监测现状深度剖析与对策研究

Detailed analysis and countermeasure research on the present situation of reservoir dam safety monitoring in China  
水利水电工程学报. 2021(6): 97 <https://doi.org/10.12170/20210301001>

#### 河道堰塞生命损失评估方法研究

Study on the evaluation method of life loss due to river clogging  
水利水电工程学报. 2021(5): 58 <https://doi.org/10.12170/20200827002>

#### 2000—2018年中国水库溃坝规律分析与对策

Analysis of dam failure trend of China from 2000 to 2018 and improvement suggestions  
水利水电工程学报. 2021(5): 101 <https://doi.org/10.12170/20201119001>

#### 基于浸没边界法的水库变动水面模拟及验证

Simulation and verification of reservoir fluctuating water level based on immersed boundary method  
水利水电工程学报. 2020(1): 66 <https://doi.org/10.12170/20180821001>

#### 水库库区占用定量分析——以东部某省级行政区水库为例

Quantitative analysis of reservoir area occupation—taking reservoirs in an eastern province as examples  
水利水电工程学报. 2019(4): 68 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.04.010>



扫码进入官网, 阅读更多精彩内容



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20220919001

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. (SHENG Jinbao, LI Hongen, SHENG Taozhen. Statistical analysis of dam failure and its loss of life in China[J]. Hydro-Science and Engineering, 2023(1): 1-15. (in Chinese))

# 我国水库溃坝及其生命损失统计分析

盛金保<sup>1,2</sup>, 李宏恩<sup>1,2</sup>, 盛韬桢<sup>3</sup>

(1. 南京水利科学研究所, 江苏 南京 210029; 2. 水利部水库大坝安全重点实验室, 江苏 南京 210029; 3. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 介绍了我国水库溃坝基本情况, 剖析了不同年代的代表性重大溃坝事件。对 1954 年有溃坝纪录迄今所有 3 558 座历史溃坝及其生命损失数据按年代、规模、坝型、坝高、季节、建设与运行期、地理区域等进行了系统统计分析, 揭示了溃坝及其生命损失的时空分布特征与社会属性, 归纳分析了导致溃坝的主要原因, 在此基础上总结了溃坝经验教训, 提出溃坝防范对策。研究成果对进一步健全我国水库溃坝防控体系、严防溃坝事故具有借鉴意义。

**关键词:** 水库; 溃坝; 生命损失; 时空分布特征; 经验教训

**中图分类号:** TV697

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-640X(2023)01-0001-15

溃坝是人类社会和国际坝工界面临的共同挑战, 国内外均有惨痛教训。根据国际大坝委员会(ICOLD)和中国大坝工程学会(ChinCOLD)的溃坝统计资料<sup>[1-3]</sup>, 截至 2020 年底, 全球 57 个国家(不包括中国)共记录有溃坝 2 068 座, 其中美国 1 732 座, 其他国家 336 座, 2021 年国外又有 3 例溃坝事故报导。需要说明的是, ICOLD 定义的“大坝”主要指坝高超过 15 m 的水坝, 和我国“水库大坝”概念并不一致。我国自 1954 年有溃坝记录以来, 共溃坝 3 558 座, 其中坝高 15 m 以上的“大坝”1 691 座, 且绝大多数发生在 20 世纪 80 年代以前。随着经济社会快速发展, 城镇化率不断提高, 水库大坝下游人口稠密、基础设施集聚, 我国单一水库溃坝后果严重程度和影响远超世界其他国家, 特别是近年来, 在变化环境和强人类活动背景下, 极端气候事件发生的频度和强度显著增强, 水库大坝安全度汛面临严峻形势, 预报、预警、预演、预案“四预”措施仍存在薄弱环节, 出险甚至溃坝事故仍偶有发生。

水库溃坝调查分析一直是国际坝工界关注的重点<sup>[1-8]</sup>。我国相关部门和专家也一直在跟踪研究, 1962 年, 当时的水利电力部刊印了《水库失事资料汇编》, 载入 1954—1961 年底的溃坝事故 532 起; 1981 年, 当时的水利部工程管理局在 1962 年资料汇编基础上, 编制了《全国水库垮坝登记册》<sup>[9]</sup>, 收录 1954—1979 年期间溃坝事故 2 914 起; 1993 年, 当时的水利部水利管理司在《全国水库垮坝登记册》中增录了 1981—1990 年的溃坝事故 266 起<sup>[10]</sup>。文献<sup>[11]</sup>对 1954—1990 年的溃坝数据进行了统计分析, 提出了我国水库溃坝的许多重要特征; 周克发等<sup>[12-14]</sup>开展典型水库溃坝生命损失调查, 揭示了溃坝生命损失的分布特征和主要影响因素, 提出了溃坝生命损失评估模型; 解家毕等<sup>[15]</sup>对 1954—2006 年的全国溃坝资料进行了统计分析, 总结了溃坝成因及主要溃决模式; 张建云等<sup>[16-18]</sup>通过对 2006 年以前的溃坝数据分析, 归纳了我国水库溃坝规律, 提出了溃坝防控对策; 水利部大坝安全管理中心<sup>[19]</sup>于 2013 年对我国历史典型溃坝事故进行了现场调研, 收集了 50 余座导致严重人员伤亡溃坝事故的溃坝过程、应急处置、生命损失等宝贵资料; 盛金保等<sup>[20]</sup>对我国病险水库除险加固项目溃坝机理进行了调查分析, 总结了其中经验教训, 提出加强病险

收稿日期: 2022-09-19

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y721001, Y722003)

作者简介: 盛金保(1966—), 男, 安徽青阳人, 正高级工程师, 主要从事大坝安全与风险评估工作。E-mail: jbsheng@nhri.cn

水库除险加固工程建设管理与风险防控对策建议;李宏恩等<sup>[21]</sup>针对2000—2018年发生的84起溃坝事件,分析了进入21世纪以来我国水库溃坝的典型特征;厉丹丹等<sup>[22]</sup>分析归纳了溃坝事故中的人因因素。

前事不忘、后事之师。本文在已有研究工作基础上,对我国1954年有溃坝记录迄今所有3 558座历史溃坝数据进行系统统计分析,对典型溃坝案例进行剖析,进一步揭示溃坝及其生命损失的时空分布特征和社会属性,归纳导致溃坝和生命损失的主要影响因素,总结设计、施工、运行管理和应急处置等大坝全生命周期不同阶段和环节的经验教训,针对性提出溃坝防范策略,对进一步健全我国水库大坝风险防控体系,杜绝溃坝事故发生,具有重要的现实意义。

## 1 我国水库溃坝基本情况和重大溃坝事件

### 1.1 水库大坝概况

新中国成立以来,我国在水库大坝建设与管理方面取得辉煌成就。截至2020年底,全国(不含港、澳、台地区)现有各类水库大坝98 566座,总库容9 306亿 $\text{m}^3$ 。按照规模分类,大型水库774座,占全部水库数量的0.78%;中型水库4 098座,占4.16%;小型水库93 694座,占95.06%,其中小(1)型18 229座、小(2)型75 465座,分别占全部水库数量的18.49%、76.56%。按照坝型分类,土石坝超过9万座,占91.8%,混凝土坝占2.4%,其他坝型占5.8%。按照坝高分类,30 m以下的低坝约9.2万座,占93.4%,其中15 m以下的约6.15万座,15~30 m的3.05万座;30 m以上的6 500余座,其中超过100 m的高坝232座,超过200 m的特高坝23座。按照ICOLD关于“大坝”的定义,我国坝高15 m以上“大坝”3.7万余座,占全部水库大坝数量的37.5%。按照坝龄,87.1%的水库低坝建成于1979年前,其中1969年前建成的约占48%,坝龄超50年。按照地区分布,湖南、江西、广东、四川、湖北、山东、云南、安徽等八省水库数量均在6 000座以上,其中湖南省13 833座,是我国水库大坝数量最多的省份。

### 1.2 水库溃坝基本情况及重大溃坝事件

1954—2021年,我国水库共溃坝3 558座,年均溃坝52.3座,年均溃坝率5.3/10 000,远超国际坝工界公认的1/10 000可接受年溃坝率水平。不过这些溃坝主要发生在20世纪80年代前(图1),其中1973年溃坝570座,年溃坝率为65.7/10 000,是溃坝数量最多和年溃坝率最高的一年。

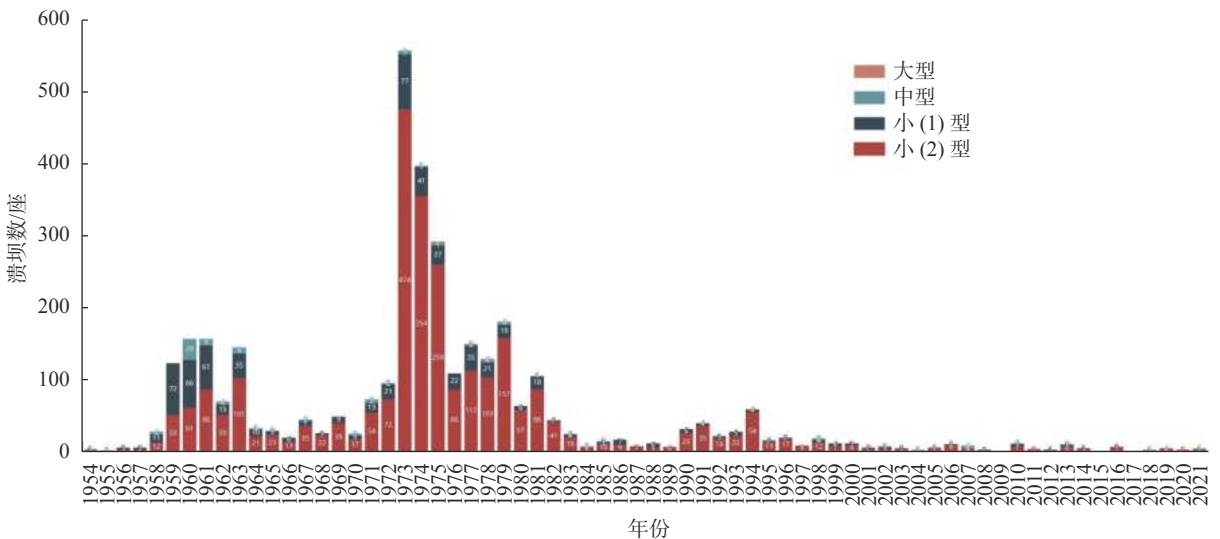


图1 1954—2021年逐年溃坝分布示意

Fig. 1 Number of dam failures in 1954-2021

我国造成重大人员伤亡的30起溃坝事件见表1。下面介绍几起典型的溃坝事件。

表 1 我国导致重大人员伤亡的溃坝事件  
Tab. 1 List of dam failure incidents that caused heavy casualties in China

大坝名称	所在地	溃决日期	坝型	坝高/m	库容/10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	溃坝原因	生命损失/人
板 桥	河南泌阳	1975-08-08	黏土心墙坝	24.5	49 200	洪水漫顶	19 701
石漫滩	河南舞钢	1975-08-08	均质土坝	25.0	9 180	洪水漫顶	2 517
铁佛寺	河南商城	1960-05-17	黏土心墙坝	14.5	2 000	施工期洪水漫顶	898
白果冲	河南固始	1960-05-18	黏土心墙土坝	15.0	700	施工期洪水漫顶	616
滕 口	河南临汝	1961-09-28	黏土斜墙砌石坝	30.0	1 150	洪水漫顶	119
竹 沟	河南确山	1975-08	黏土心墙坝	23.5	1 544	洪水漫顶	248
刘家台	河北易县	1963-08-08	黏土心墙坝	35.9	4 054	洪水漫顶	943
东川口	河北邢台	1963-08-04	堆石坝	31.0	2 700	洪水漫顶	510
龙 屯	辽宁绥中	1959-07-22	黏土斜墙坝	9.5	3 000	施工期洪水漫顶	707
虎 台	辽宁抚顺	1971-07-31	黏土心墙坝	21.5	306	施工期洪水漫顶	512
桥墩门	浙江平阳	1960-08-10	土石混合坝	36.0	4 000	施工期洪水漫顶	291
洞口庙	浙江宁海	1971-06-02	均质土坝	21.5	255	滑坡导致溃坝	186
水口坑	浙江永康	1960-09-12	均质土坝	28.0	100	施工期溢洪道冲毁溃坝	89
宝盖洞	湖南浏阳	1954-07-24	均质土坝	30.0	1 100	洪水漫顶	466
塔 下	湖南彬县	1968-06-17	均质土坝	12.0	16	洪水漫顶	128
马山湖	广东饶平	1960-06-09	均质土坝	26.8	654	滑坡	104
横 江	广东揭西	1970-09-15	均质土坝	48.4	7 879	坝体质量差、管涌	941
龙 川	广东罗田	1973-05-08	均质土坝	24.0	176.8	坝体质量差、管涌	55
春 江	海南儋县	1958-09-12	土石混合坝	15.8	5 600	施工围堰漫顶	62
石 禄	海南东方	1958-09	均质土坝	19.0	3 131	施工期洪水漫顶	65
李家咀	甘肃庄浪	1973-04-29	均质土坝	25.0	114	漫顶溃坝	580
史家沟	甘肃庄浪	1973-08-25	均质土坝	28.6	85.6	滑坡	81
夹河子	新疆玛纳斯	1961-04-10	均质土坝	18.0	8 000	坝身渗漏	80
沟 后	青海共和	1993-08-27	面板砂砾石坝	71.0	330	渗漏导致滑坡溃坝	320
小湄港	湖北通山	1995-07-02	心墙土坝	11.0	14	坝下埋涵渗透变形+洪水漫顶	34
茶山坑	广东恩平	1998-06-26	均质土坝	30.0	597	副坝滑坡溃决	36人死亡或失踪
龙华寺	四川夹江	1961-06-28	均质土坝	22.3	775	洪水漫顶	82
大路沟	四川会理	2001-10-07	壤土均质土坝	44.0	111.5	蚁穴管涌	26人死亡或失踪
大 河	吉林桦甸	2010-07-28	黏土心墙堆石坝	23.0	400	未及时开闸泄洪导致洪水漫顶	38人死亡或失踪
射月沟	新疆哈密	2018-08-01	沥青心墙砂砾石坝	41.0	677.9	洪水漫顶	28

**1.2.1 海河流域“63.8”特大溃坝事件** 1963年8月上旬,海河流域发生全流域特大洪水,导致河北5座中型、17座小(1)型、297座小(2)型总计319座水库大坝相继溃决。其中溃决的5座中型水库均为漫顶溃坝。海河流域“63.8”特大溃坝事件反映了早期修建水库大坝防洪标准偏低、设计洪水偏小、水雨情测报和防汛交通等管理设施缺失、报警时机不当、社会应急处置能力和公众溃坝风险意识薄弱等一系列问题。

**1.2.2 河南驻马店“75.8”特大溃坝事件** 1975年8月2—7日,受3号台风袭击,河南驻马店地区普降大雨,出现历史罕见大洪水,8月8日,板桥、石漫滩、竹沟、田岗等4座大中型水库和58座小型水库总计62座水库相继溃坝,导致2.6万余人死亡,1100万人受灾,京广铁路102 km中断16天,是迄今世界上最为惨痛的溃坝事件。河南驻马店“75.8”特大溃坝事件凸显了建国初期兴建的大型水库防洪标准严重不足;水库水雨情测报、报警、电力等应急设施缺失;对旱涝急转情况下的度汛风险认识不足,重蓄水兴利,轻风险防范和危机管理;水库主管部门和管理单位安全和风险意识淡薄,应急准备不充分,决策犹豫;溃坝风险人口转移避险应急组织和动员不力等一系列问题。

**1.2.3 1993年青海沟后水库溃坝事件** 1993年8月27日,青海省海南州共和县沟后小(1)型水库溃坝,由于缺乏报警设施,无法通知下游人员转移,导致下游13 km的州府所在地恰卜恰镇320人死亡,是20世纪80年代改革开放后生命损失最为严重的溃坝事件,也是我国迄今溃决的最高大坝(71 m)。沟后水库溃坝事件暴露出小型水库管理和应急设施不完善、管理能力不足,以及对“高坝小库”风险认识不足、现行水库大坝分类标准存在缺陷等一系列问题。

**1.2.4 2013年春节前后连续3起溃坝事件** 2013年春节前后15天之内连续发生3起溃坝事故,分别为2月1日溃决的黑龙江海伦农场星火小(1)水库、2月2日溃决的新疆乌鲁木齐市米东区联丰小(2)型水库、2月16日溃决的山西省洪洞县曲亭中型水库。这3起溃坝事故有4个共同特点:都是除险加固工程、都是晴天溃坝、都是穿坝建筑物接触渗漏破坏、都不是管理人员第一时间发现溃坝征兆。特别是曲亭水库作为全国防汛重点的中型水库,溃坝正值春运期间,导致下游南同蒲铁路受损停运,造成重大社会影响。这3起溃坝事件,一方面反映病险水库除险加固工程在安全鉴定、除险加固工程设计与审查、施工质量控制、隐蔽工程和穿坝建筑物隐患处置、验收等各个环节仍然存在薄弱环节;另一方面说明中小型水库巡视检查、调度运用、应急值守等运行管理制度存在执行不到位等问题。

**1.2.5 2018年新疆射月沟水库溃坝事件** 2018年8月1日,新疆哈密市伊州区射月沟小(1)型水库遭遇超标准洪水漫顶溃坝,造成28人死亡,这是进入“统筹发展与安全”高质量发展阶段以来,生命损失最为严重的溃坝事件。射月沟水库溃坝事件说明当前极端天气频发对水库大坝安全度汛的不利影响,也反映出小型水库防汛三个责任人和3个重点环节落实不到位、公众避险意识不强等问题。

## 2 溃坝及其生命损失统计分析

### 2.1 按年代统计分析

按不同阶段、不同年代、不同规模统计的我国水库溃坝结果见表2。20世纪50—70年代,由于国家经济技术基础薄弱,水库大坝工程建设先天不足、安全管理薄弱,为溃坝高发时期。1954—1979年共溃坝2914座,占迄今溃坝总数(3558座)的81.90%,年均112.08座,年均溃坝率13.43/10 000,20世纪70年代年均溃坝率更是达到惊人的25.27/10 000。20世纪80年代后,随着经济社会发展,水库大坝安全法规与规章制度逐步建立,溃坝事故大幅度下降,1980—1999年共溃坝545座,占迄今溃坝总数的15.32%,年均27.25座,年均溃坝率3.20/10 000,仍超过当时国际坝工界2/10 000的可接受年溃坝率水平。进入21世纪后,通过大力推进水管体制改革和依法依规管理、大规模实施病险水库除险加固工程建设、强化应急管理等一系列举措,溃坝事故显著下降,2000—2021年共溃坝99座,占迄今溃坝总数的2.78%,年均4.5座,年均溃坝率0.46/10 000,已进入世界低溃坝率国家行列,溃坝生命损失也大幅度下降。

30座导致重大人员伤亡的溃坝事件中(表1),1954—1979年有24座,占30座的80%,占这阶段溃坝总数(2914座)的0.82%,平均死亡人数为1249人;1980—1999年有3座,占30座的10%,占这阶段溃坝总数(545座)的0.55%,平均死亡人数大幅度下降,为130人;2000—2021年有3座,占30座的10%,占这阶段溃坝总数(99座)的3.03%,平均死亡人数进一步下降,约为31人。需要引起关注的是,虽然随着经济社

会发展和水库大坝安全保障体系不断健全,水库年均溃坝率和溃坝生命损失大幅度下降,但导致严重人员伤亡的溃坝事故比例近年来不降反升,这与近年来极端气候影响加剧、城镇化发展有关,也反映了在水库溃坝突发事件监测预警、人员应急转移、公众风险意识、应急预案科学性等方面仍需要大力改进。

表2 按不同阶段、不同年代、不同规模统计的溃坝结果

Tab. 2 Statistics of annual dam failure rates by the stages, ages and reservoir scales

按阶段统计				按年代统计							
阶段	溃坝数/座	占比/%	年均溃坝率/ 10 <sup>-4</sup>	年代	不同规模水库溃坝数/座					占比/%	年均溃坝率/ 10 000
					大型	中型	小(1)	小(2)	合计		
溃坝高发阶段	2 914	81.90	13.43	1954—1960		64	156	129	349	9.81	5.74
				1961—1970		27	156	407	590	16.58	6.79
				1971—1979	1	27	276	1 671	1 975	55.51	25.27
显著下降阶段	545	15.32	3.20	1980—1990		4	52	271	327	9.19	3.57
				1991—1999		2	28	188	218	6.13	2.85
趋于稳定阶段	99	2.78	0.46	2000—2009	1	5	12	35	53	1.49	0.60
				2010—2021		4	11	31	46	1.29	0.39
总计	3 558	100	5.31		2	133	691	2 732	3 558	100	5.31

注:年均溃坝率=该阶段年均溃坝座数/该阶段水库建设总数,其中每一阶段水库总数取值为该阶段最后一年水库总数,分别为:86 822座(1954—1980年)、83 387座(1981—1990年)、85 119座(1991—1999年)、87 151座(2000—2009年)及98 566座(2010—2021年)。

## 2.2 按规模统计分析

大(1)型水库无溃坝记录,大(2)型水库溃坝2座,占全部溃坝数量的0.06%,远低于其在全部水库数量中的占比0.79%,其中一座为“75.8”特大洪水中溃决的河南驻马店地区板桥水库,当时总库容4.92亿m<sup>3</sup>,另一座为2002年3月3日溃决的新疆伽师西克尔水库,总库容1.00亿m<sup>3</sup>;中型水库溃坝133座,占全部溃坝数量的3.74%,低于其在水库数量中的占比4.16%;小型水库溃坝3 423座,占全部溃坝数量的96.21%,高于其在水库数量中的占比95.06%。小型水库中,小(1)型水库溃坝691座、小(2)型水库溃坝2 732座,分别占全部溃坝数量的19.42%、76.78%,均高于其在水库数量中的占比18.49%、76.56%。水库规模越大,设计和建设标准越高,工程质量越好,运行管理越规范,溃坝占比越低。

30座导致重大人员伤亡的溃坝事件中,大型水库1座,为板桥水库,导致19 701人死亡,是人类坝工史上死亡人数最多的溃坝事件,占大型水库溃坝总数的一半;中型水库13座,占其溃坝总数的9.99%;小(1)型水库13座,占其溃坝总数的1.88%;小(2)型水库3座,占其溃坝总数的0.11%。总体趋势是,库容越大,溃坝流量越大,溃坝洪水严重性越高,导致严重人员伤亡的溃坝事件占比越高,人员伤亡越严重,这也是要严防大中型水库溃坝的重要原因之一。

## 2.3 按坝型统计分析

按不同坝型统计分析溃坝结果见表3。迄今土石坝(含面板堆石坝)共溃坝3 356座,占溃坝总数的94.32%,超过其在大坝总数中的占比91.80%,主要是由于土石坝不能像刚性坝(混凝土坝和砌石坝)那样抵御洪水漫顶。20世纪50—70年代,土石坝作为当地材料坝,可以就地取材,施工较为方便,对技术要求不高,适合当地群众投工投劳土法施工,被大规模使用;由于工程建设先天不足和不能抵御洪水漫顶,该阶段土石坝溃坝占比更高,为95.44%。1980—1999年,土石坝溃坝占比明显下降,占88.99%,低于其在大坝总数中的占比,说明坝型不是影响溃坝的绝对因素,设计标准、工程建设质量和运行管理水平才是影响溃坝的决定性因素。2000年至今,土石坝溃坝占比约为90.91%,与前一阶段相比略有上升,这与当前极端气候事件发生的频度和强度明显增强有关,对土石坝安全的影响更加显著。

表 3 按坝型统计分析的溃坝结果  
Tab. 3 Statistics of dam failures by the dam types

序号	一级分类	1954—1979年		1980—1999年		2000—2021年	
		溃坝数/座	占比/%	溃坝数/座	占比/%	溃坝数/座	占比/%
1	土石坝	2 781	95.44	485	88.99	90	90.91
2	刚性坝	28	0.96	17	3.12	7	7.07
3	其他	12	0.41	1	0.18		
4	不详	93	3.19	42	7.71	2	2.02
	合计	2 914	100	545	100	99	100

30 座导致重大人员伤亡的溃坝事件全部为土石坝, 主要是因为刚性坝溃决的以小型工程居多, 溃坝洪水严重性较低。

## 2.4 按坝高统计分析

按坝高统计分析的溃坝结果见表 4。坝高小于 30 m 的低坝溃决 3 136 座, 占 88.14%, 低于其在所有水库中的占比 93.4%。超高 30 m 的中高坝溃决 422 座, 占 11.86%, 超过其在所有水库中的占比 6.40%。分析原因, 尽管中高坝建设标准和管理水平普遍高于低坝, 但其挡水高度较高, 漫顶洪水冲刷能力强, 一旦漫顶抢险难度大, 易溃坝; 同时上下游水头差大, 渗透坡降也大, 更易发生渗透破坏溃坝。

表 4 按坝高统计分析的溃坝结果  
Tab. 4 Statistics of dam failures by the dam heights

坝高/m	1954—1979年		1980—1999年		2000—2021年		合计(1954—2021年)	
	溃坝数/座	占比/%	溃坝数/座	占比/%	溃坝数/座	占比/%	溃坝数/座	占比/%
$H < 15$	1 492	51.20	323	59.48	52	52.52	1 867	52.47
$15 \leq H < 30$	1 052	36.10	181	33.15	36	36.36	1 269	35.67
$30 \leq H < 70$	94	3.23	17	3.13	6	6.06	117	3.29
$70 \leq H < 100$	0	0	1	0.18	0	0	1	0.03
$H \geq 100$	0	0	0	0	0	0	0	0
不详	276	9.47	23	4.05	5	5.05	304	8.54
合计	2 914	100	545	100	99	100	3 558	100

进一步分析坝高小于 30 m 的溃坝数据, 低于 15 m 的 1 867 座, 占 52.47%, 低于其在所有水库中的占比 62.50%, 坝高越低, 水头越小, 漫顶洪水冲刷能力相对较弱, 适当防护甚至可以做到“漫而不溃”; 同时, 水头越小, 渗透坡降也越小, 渗透破坏也不易发生。坝高 15~30 m 的 1 269 座, 占 35.67%, 高于其在所有水库中的占比 30.90%, 主要原因是这些大坝建设标准和管理水平相对中高坝低, 但水头又相对较高, 比低于 15 m 的大坝更易发生洪水漫顶和渗透破坏溃坝。

30 座导致重大人员伤亡的溃坝事件中, 坝高超过 30 m 的 8 座, 占 30 座的 26.67%, 远超过其在所有水库中的占比 6.40%(4 倍以上), 占全部坝高 30 m 以上溃坝数量 422 座的 1.90%; 15~30 m 的 18 座, 占 30 座的 60.00%, 也远高于其在所有水库中的占比 30.90%(接近 2 倍), 占全部坝高 15~30 m 溃坝数量 1 269 座的 1.42%; 低于 15 m 的 4 座, 占 30 座的 13.33%, 低于其在所有水库中的占比 30.90%(约 1/3), 占全部坝高 15 m 以下溃坝数量 1 867 座的 0.21%。总体趋势是坝高越高, 溃坝生命损失越严重, 这与坝高越高, 溃坝洪

水严重性越高、溃坝洪水演进速度越快有关。但如果溃坝前没有撤离警报,或风险人口对溃坝洪水严重性认知不足,低坝溃决同样会造成严重人员伤亡,如1959年7月22日溃决的辽宁绥中龙屯水库(高9.5 m、库容3 000万 $\text{m}^3$ )、1961年5月17日溃决的河南商城铁佛寺水库(高14.5 m、库容2 000万 $\text{m}^3$ )、1968年6月17日溃决的湖南彬县塔下水库(高12.0 m、库容16万 $\text{m}^3$ )、1995年7月2日溃决的湖北通山小湄港水库(高11.0 m、库容14万 $\text{m}^3$ ),分别导致797、898、128和34人死亡。

## 2.5 按建设和运行期统计分析

按大坝建设和运行期统计分析结果见表5。所有溃坝事件中,22.20%发生在建设期,77.80%发生在运行期。随着经济社会发展,建设期溃坝占比逐渐下降。1954—1979年建设期溃坝765座,同期占比26.22%,这一阶段有近1/3水库在建设过程中溃坝,主要由于当时冬季农闲季节大兴水利工程建设,且主要由当地群众投工投劳修建,审批不严,轻率上马,缺乏科学合理的工期安排和安全度汛措施,很多水库在第二年汛期来临前达不到安全度汛高程,遭遇洪水而漫顶溃坝,1973年溃决的570座水库相当一部分属于这种情况。

表5 按施工和运行期统计分析的溃坝结果  
Tab. 5 Statistics of dam failures by construction period and operation period

溃坝发生阶段	1954—2021年		1954—1979年		1980—1999年		2000—2021年	
	溃坝数/座	占比/%	溃坝数/座	占比/%	溃坝数/座	占比/%	溃坝数/座	占比/%
在建	790	22.2	765	26.22	22	4.04	3	3.03
运行	2 768	77.8	2 149	73.78	523	95.96	96	96.97

20世纪80年代后,水库大坝工程建设程序不断规范,设计、施工、验收各个环节层层把关,施工期溃坝事故比例显著下降。1980—1999年建设期溃坝22座,同期占比4.04%;2000年后建设期溃坝3座,同期占比3.03%。

30座导致重大人员伤亡的溃坝事件中,发生在施工期的有8座,占26.67%,全部发生于20世纪80年代前,与当时建设期溃坝占比相当,其中4座溃坝伤亡人员中包括大量施工人员。1958年9月12日,海南儋州春江水库施工围堰漫顶溃决,死亡的62人全部为施工人员;1958年9月12日,海南东方石碌水库施工期漫顶溃坝,造成65人死亡,其中64人为住在大坝下游的施工人员;1960年5月18日,河南固始白果冲水库施工期漫顶溃坝,造成623人死亡与失踪,其中616人为住在大坝下游的施工人员;1960年8月10日,浙江平阳桥墩门水库施工期漫顶溃坝,造成291人死亡,其中79人为住在大坝下游河床的抢险施工人员。这不仅反映早期水库大坝建设安全度汛意识和措施不到位,也反映当时的安全生产和人员避险意识薄弱。

## 2.6 按季节和月份统计

按年内不同季节和月份统计分析结果见图2和图3。从图2可以看出,夏季为主汛期,6—8月这3个月溃坝数量最多,分别为683、825和937座,合计2 445座,占全部溃坝总数的68.72%;春季为前汛期,3—5月这3个月溃坝数量也较多,分别为56、150和303座,合计509座,占全部溃坝总数的14.31%;秋季9月为后汛期,溃坝205座,占全部溃坝总数的5.76%;秋季的10、11月和冬季的12、1、2月为枯水期,溃坝数量较少,10—12月没有溃坝记录,1、2月分别溃坝120和28座,5个月的溃坝合计为148座,占全部溃坝总数的4.16%;尚有约7%的溃坝时间信息不详。溃坝数量的季节和月份分布规律直接反映了溃坝与年内雨情分布及汛期洪水密切相关。我国按季节的不同分为四汛,即凌汛、春汛、伏汛(夏汛)、秋汛,其中以伏汛和秋汛最大,每年5—9月为主汛期,溃坝主要集中在这几个月内,总计2 953座,占全部溃坝总数的83%。非汛期溃坝虽然数量不多、占比不高,但主要集中在1、2月,为春节假日期间,往往思想放松,巡视检查不正常,值班制度执行不到位,险情发现和应急处置不及时。



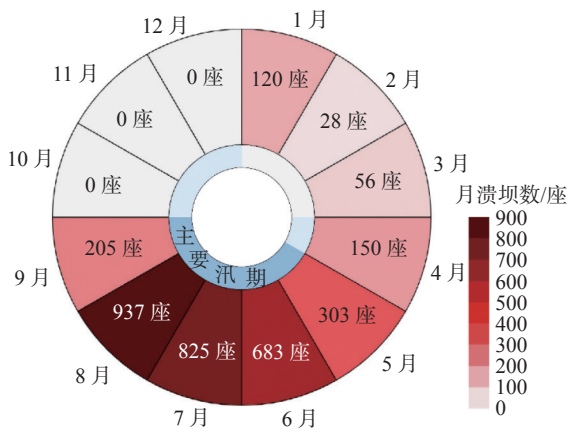


图2 1954—2021年溃坝按月分布

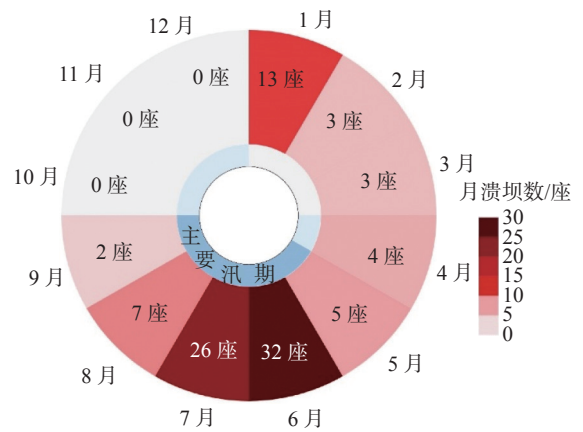


图3 2000—2021年溃坝按月分布

Fig. 2 Distribution of dam failures by the months in 1954-2021 Fig. 3 Distribution of dam failures by the months in 2000-2021

从图3可见,2000年后,虽然溃坝绝对数量显著下降,但非汛期溃坝事故比例明显增加。1、2月各有13和3座水库溃坝,合计16座,占该阶段总溃坝数量的16.16%,最典型的是2013年春节前后相继发生新疆联丰水库、黑龙江星火水库、山西曲亭水库等3起晴天溃坝事件。经过大规模病险水库除险加固工程建设后,水库大坝工程安全状况明显改善、防洪能力显著提升,但疏于管理、违规蓄水、非法侵占等人为因素导致的溃坝事故更加突出,非汛期巡视检查、突发事件应对等大坝安全管理工作同样不可放松。

## 2.7 按地理区域统计分析

按水库所在地理区域统计分析结果见表6和图4。从表6可见,溃坝比例最高的省(市、区)是山西省,为46.83%,近一半的水库建成后溃坝;其他溃坝比例较高的省(市、区)为新疆维吾尔自治区、甘肃省、内蒙古自治区,分别为22.46%、22.34%、20.76%,超过1/5的水库建成后溃坝;溃坝比例超过10%的省(市、区)还有陕西省、宁夏回族自治区、河北省、黑龙江省,分别为15.47%、13.39%、12.42%、11.30%。除山西省外,溃坝比例超过20%的全部为西北地区省(区),说明经济社会发展水平与溃坝事故呈正相关,也说明气候及地形地质条件对溃坝有一定的影响。

按区域统计,东部、中部、西部及东北地区的溃坝比例分别为2.80%、2.78%、5.02%和7.27%,西部、东北明显高于东部和中部地区(约为2倍)。2000年以后,东部、中部、西部及东北地区的溃坝比例分别为0.06%、0.05%、0.20%和0.15%,虽然都比早期大幅度下降,但西部地区溃坝比例上升到约为东、中部地区的4倍,东北地区约为东、中部地区的3倍,经济社会发展水平对溃坝的影响更加明显。

从年均溃坝率(图4,各省年均溃坝率=各省年均溃坝座数/各省水库建设总数)看,2000年以来,西北地区新疆、甘肃、内蒙古、宁夏等四省(区)的年均溃坝率明显偏高,超过3/10 000,其中新疆年均溃坝率高达5.27/10 000,是全国平均水平的13倍。西北、东北地区部分省份溃坝比例和年均溃坝率偏高的主要原因:一是受气候因素影响,西北和东北地区冬季时间长、天气严寒,每年适合施工的时间窗口期短,工程建设进度和填土质量控制难度大,易导致工程质量缺陷,投入运行后的维修养护要求高、难度大;二是西北地区大多地势平坦,泄输水建筑物大多只能穿坝布置,且筑坝材料普遍黏粒含量低、抗渗和抗冲能力差,导致西北地区水库大坝相较东中部地区更容易洪水漫顶、穿坝建筑物接触渗透破坏溃坝;三是受限于经济社会发展水平,西北和东北地区的水库运行管理投入和专业技术力量不足,相对于东中部地区,水库大坝安全管理水平和保障能力相对薄弱。

表 6 按地理区域统计分析的溃坝结果  
Tab. 6 Statistics of dam failures by geographic regions

区域	地区或省份	1954—2021年		1954—1979年		1980—1999年		2000—2021年	
		溃坝数/座	溃坝比例/%	溃坝数/座	溃坝比例/%	溃坝数/座	溃坝比例/%	溃坝数/座	溃坝比例/%
东部	北京	1	1.18	1	1.18				
	天津	2	7.69	2	7.69				
	河北	128	12.42	128	12.42				
	江苏	29	3.11	27	2.90	2	0.21		
	浙江	117	2.72	106	2.46	9	0.21	2	0.05
	福建	73	2.00	59	1.61	14	0.38		
	山东	147	2.50	138	2.34	8	0.14	1	0.02
	广东	194	2.40	161	1.99	26	0.32	7	0.09
	海南	13	1.17			7	0.63	6	0.54
	区域整体		2.80		2.48		0.26		
中部	河南	161	6.35	159	6.27	2	0.08		
	湖北	107	1.55	91	1.32	14	0.20	2	0.03
	湖南	295	2.13	244	1.76	40	0.29	11	0.08
	山西	288	46.83	274	44.55	12	1.95	2	0.33
	江西	178	1.66	156	1.46	14	0.13	7	0.07
	安徽	98	1.65	97	1.64	1	0.02		
	区域整体		2.78		2.52		0.20		
西部	内蒙古	125	20.76	104	17.28	15	2.49	6	1.00
	广西	156	3.44	109	2.41	38	0.84	9	0.20
	重庆								
	四川	406	4.90	268	3.23	128	1.54	10	0.12
	贵州	90	3.39	73	2.75	9	0.34	8	0.30
	云南	236	3.13	159	2.11	70	0.93	7	0.09
	西藏								
	陕西	176	15.47	161	14.15	14	1.23	1	0.09
	甘肃	86	22.34	79	20.52	4	1.04	3	0.78
	青海	13	6.16	7	3.32	5	2.37	1	0.47
	宁夏	45	13.39	25	7.44	17	5.06	3	0.89
	新疆	155	22.46	109	15.80	36	5.22	10	1.45
	区域整体		5.02		3.69		1.13		
东北	辽宁	37	4.71	36	4.59	1	0.13		
	吉林	99	6.21	68	4.27	27	1.69	4	0.25
	黑龙江	104	11.30	73	7.93	30	3.26	1	0.11
	区域整体		7.27		5.37		1.76		

注: 1. 各省溃坝比例=各省溃坝总座数/各省已建水库总数, 区域溃坝比例=各区域溃坝总数/各区域已建水库总数; 2. 东部地区不包括1座台湾地区溃坝(石冈水库)。

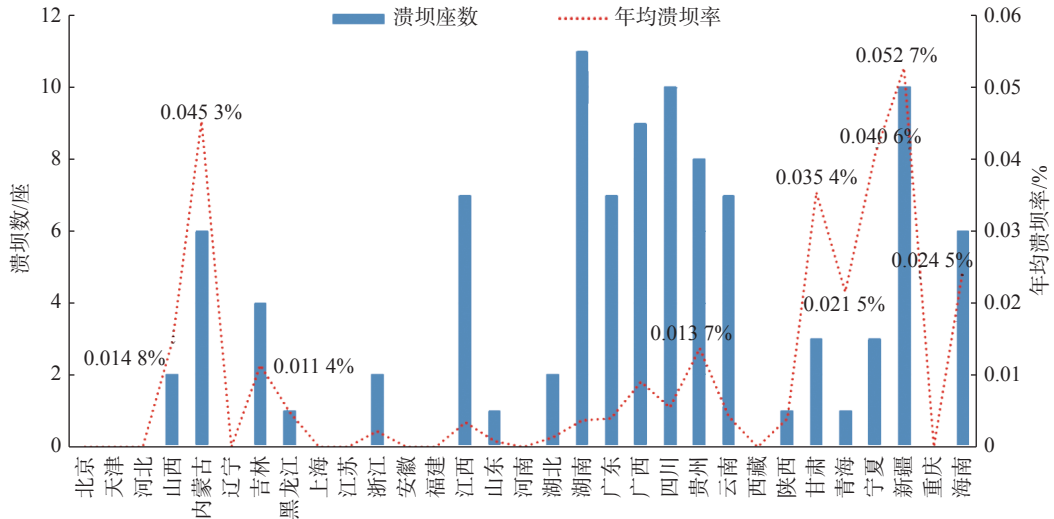


图 4 2000 年以来各省(或市)年均溃坝率统计

Fig. 4 Statistics of dam failures by different provinces since year 2000

### 3 溃坝及其生命损失的时空分布特征与社会属性分析

导致溃坝和生命损失除暴雨洪水、地形地貌、河道比降等自然属性因素,以及坝高、库容、坝体结构等工程属性因素外,与人为及管理社会属性因素也有很大关系,具有典型的时空分布特征。早期工程建设标准低,溃坝事故大量发生,自然属性和工程属性因素是主要原因,由于当时大坝安全管理制度体系尚未建立,溃坝事故原因和经验教训总结往往聚焦于自然属性和工程属性因素,而忽视社会属性的人为和管理因素。随着大规模实施病险水库除险加固工程建设,水库防洪标准得以提高,大坝工程安全状况得到根本性改善,导致溃坝的自然属性和工程属性因素得到有效遏制,溃坝事故与溃坝损失同步大幅度下降。进入 21 世纪以来,虽然我国年均溃坝率已经降到很低水平,但人为和管理等社会属性因素导致的溃坝事故比例相对上升,甚至有一种观点认为“任何溃坝和事故都可归结于人因”<sup>[22]</sup>,强调的也是溃坝及其生命损失的社会属性,这也是未来进一步健全溃坝防控体系的重要方向和着力点。

#### 3.1 年均溃坝率的时空分布特征与社会属性

从时间分布看,根据按年代统计分析的溃坝结果,我国水库年均溃坝率随时代发展呈明显下降趋势,主要得益于随着时代发展,水库大坝建设和管理技术不断进步,管理制度逐步建立健全,运行管理渐趋规范,管理水平不断提高;同时,随着改革开放后经济社会的快速发展,各级政府财力不断增强,水库管理投入不断增加,维修保养得以正常开展,病险水库得到大规模整治,这些都对控制溃坝事故发生发挥了至关重要的作用。根据按季节统计分析的溃坝结果,溃坝事故主要发生在汛期暴雨洪水高水位期间,但非汛期违规蓄水、巡视检查和值班制度执行不到位、险情发现和应急处置不及时等社会属性人为和管理因素同样会导致溃坝事故发生,2000 年以来非汛期溃坝事故比例明显增加的现象值得警醒。

从空间分布看,根据按地区统计分析的溃坝结果,早期为计划经济时代,全国不同地区经济社会发展水平差异不大,水库大坝安全管理均很薄弱,全国范围内每一个地区都是溃坝事故频繁发生,西北、东北地区年均溃坝率高于东中部地区,主要受气候、施工条件和工程地质因素的影响。改革开放以后,西北、东北地区溃坝比例和年均溃坝率高于东中部地区的趋势进一步扩大,主要体现了溃坝事故空间分布特征的社会属性。西北和东北地区经济社会发展水平相对滞后,水库运行管理投入和专业技术力量不足,运行管理和突发事件应急管理相对薄弱,尽管水库大坝数量不多,但溃坝绝对数量和年均溃坝率仍居高不下,要实现“水库不垮坝”的防御目标仍然任重道远。

### 3.2 溃坝生命损失的时空分布特征与社会属性

从时间分布看, 早期社会和公众对溃坝风险的认知程度低, 主动化解和规避溃坝风险的意识淡薄, 突发公共安全事件应急管理体系尚未建立, 应急预案处于空白, 防汛交通、通信和报警等应急设施不完善, 应急组织和应急动员能力弱, 很多溃坝导致严重人员伤亡。2000 年以来, 国家应急管理体系逐步建立, 应急设施不断完善, 每一座水库都需要编制应急预案和做好应急准备, 一旦预警可能发生溃坝, 及时组织水库下游风险人口撤离转移, 溃坝生命损失大幅度下降, 目前大部分溃坝都没有造成人员伤亡。

从空间分布看, 早期全社会的风险意识和应急管理水平都很薄弱, 全国范围内每个地区都有造成严重生命损失的溃坝事故发生。20 世纪 90 年代以来, 造成重大人员伤亡的溃坝事故大多发生在西部和东北地区(表 1), 最严重的是 1993 年 8 月 27 日青海沟后水库溃坝, 导致 320 人死亡, 该溃坝如果发生在人口稠密的中东部地区, 后果将更惨重。2000 年以后造成重大人员伤亡的溃坝事故全部发生在西部和东北地区, 分别为 2001 年四川大路沟水库溃坝, 导致 26 人死亡或失踪; 2010 年吉林大河水库溃坝, 导致 38 人死亡或失踪; 2018 年新疆射月沟水库溃坝, 导致 28 人死亡。溃坝生命损失在地域空间上的分布特征体现了经济社会发展水平对其影响, 反映了其社会属性。经济社会发展水平越高, 应急设施越完善, 应急准备越充分, 应急演练越接近实战, 应急处置越及时, 公众配合程度越高, 溃坝生命损失越少, 反之溃坝生命损失越严重。

溃坝生命损失空间分布还有另一个特征, 即距离大坝越近, 溃坝洪水越严重和越先到达, 给风险人口留下的撤离转移时间短, 往往生命损失越严重。但也有部分溃坝事故由于报警及时, 距离大坝近的风险人口伤亡较少, 反而是距离大坝远、溃坝洪水后到达的下游风险人口死亡惨重<sup>[13]</sup>。1970 年 9 月广东横江水库溃坝时, 下游距离大坝最近的横江村由于溃坝前 15 分钟得到管理人员鸣枪报警, 5 000 人转移及时, 仅 1 人死亡; 大坝下游约 10 km 处的县城河婆镇当时人口约 45 000 人, 由于没有得到溃坝警报, 反而死亡 850 人, 占总死亡人数的 90%。1975 年 8 月河南板桥水库溃坝时, 下游靠近大坝的板桥公社和下游大约 10 km 的沙河镇居民由于溃坝前一天下午得到撤离通知, 溃坝洪水造成的死亡人数相对较少, 为 827 人; 沙河店镇下游文城乡和诸市乡则未接到溃坝警报, 文城乡 36 000 人中死亡 9 600 人, 诸市乡死亡 2 176 人。因此, 溃坝警报对降低溃坝生命损失有极其重要的影响, 巡视检查和监测预警到位, 及时发出溃坝警报, 可以做到溃坝零伤亡, 否则可能造成严重人员伤亡, 这也充分体现了溃坝生命损失的社会属性。

## 4 溃坝成因统计分析

我国水库溃坝成因统计分析结果见表 7, 其中洪水漫顶占 51.04%, 工程质量缺陷占 37.24%, 管理不当占 4.92%, 其他原因占 6.80%, 洪水漫顶、工程质量缺陷和管理不当是导致溃坝的 3 个主要原因, 合计占 93.20%。导致洪水漫顶的主要原因包括遭遇超标准洪水、早期防洪标准偏低、施工度汛措施不当、泄洪能力不足、汛期调度不当等; 工程质量缺陷导致溃坝的主要原因为渗透破坏; 管理不当导致溃坝的主要原因包括违规蓄水、非法超蓄、人为扒口等; 其他原因包括近坝库岸滑坡、上游水库溃坝等。

表 7 水库溃坝成因统计

Tab. 7 Statistical analysis of dam failure reasons

溃坝原因	1954—1999年		2000—2021年		1954—2021年	
	溃坝数/座	占该阶段溃坝总数比例%	溃坝数/座	占该阶段溃坝总数比例%	溃坝数/座	占溃坝总数比例%
洪水漫顶	1 772	51.23	44	44.44	1 816	51.04
工程质量缺陷	1 291	37.32	34	34.34	1 325	37.24
管理不当	168	4.86	7	7.01	175	4.92
其他	228	6.59	14	14.14	242	6.80
合计	3 459	100	99	100	3 558	100

### 4.1 洪水漫顶

由表 7 可见, 超过 50% 的溃坝事故是因洪水漫顶引起的, 这与我国土石坝占比高、早期水库防洪标准

偏低有很大关系。2000 年以后,洪水漫顶溃坝的比例下降,主要由于 1999 年后大规模开展病险水库除险加固工程建设,使得防洪标准不足水库全部防洪达标。表 8 统计了不同时期超标准洪水导致的漫顶溃坝占比。可见,2000 年以后,超标准洪水导致的漫顶溃坝比例大幅度升高,达到 44%,尤其是 2018—2021 年的 11 座溃坝事故中,有 8 座因超标准洪水所致,占 73%,这与当前全球气候变化造成的极端强降雨日益频发直接相关。

表 8 不同历史阶段超标准洪水导致溃坝数量与比例统计

Tab. 8 Number and proportion of dam failures caused by extreme floods in different historical stages

运行阶段	溃坝总数/座	超标准洪水导致的溃坝数/座	超标准洪水导致溃坝比例/%
1954—1979年	2 914	279	9.57
1980—1999年	545	150	27.52
2000—2021年	99	45	45.45
合计	3 558	474	13.32

## 4.2 工程质量缺陷

早期修建的水库大坝很多存在清基不彻底、上坝土料控制不严与压实度不足、防渗体系不完善、结构单薄等先天不足,导致大量水库因工程质量问题溃坝(占 37.35%)。2000 年以后,我国水库建设与管理趋于规范,但因工程质量问题导致的溃坝占比仍高达 33.33%,既与病险水库除险加固设计、施工不当有关,也与大坝工程及其隐蔽工程质量缺陷很难彻底治理有很大关系。

在因工程质量问题导致的土石坝溃坝案例中,以穿坝建筑物(涵管)的接触渗漏问题最为突出,是日常巡视检查和安全监测、除险加固、应急抢险等需要重点关注的关键部位和问题。

## 4.3 管理不当

管理不当一直是引起溃坝的一个不可忽视的重要原因,是导致非汛期溃坝事故发生的主要原因。实际管理不当导致的溃坝事故占比要高于表 7 中的统计数据,因为详细的溃坝调查发现几乎每一起溃坝事故中都有人为因素的影响<sup>[13,19,22]</sup>,很多汛期调度不当、巡视检查不到位、应急处置不及时等人为因素导致的溃坝都统计到洪水漫顶、工程质量缺陷等溃坝事故中了。2000 年以后,违规蓄水、非法超蓄等管理不当导致溃坝占比不降反升,需引起高度重视和反思。

# 5 经验教训与溃坝防控对策

## 5.1 溃坝事故经验教训

(1)坝型不是导致溃坝的决定性因素,工程质量、设计标准、管理水平才是关键。在坝工界的传统认识中,相对刚性坝,土石坝由于难以抵御漫顶洪水,更易溃决。早期土石坝溃坝相对占比的确比刚性坝高,1954—1979 年期间,土石坝溃坝占比为 95.44%,显著高于其在水库大坝总数中的占比 91.8%,主要由于当时土石坝被大规模使用,且由当地群众投工投劳土法施工,建设标准低、工程质量缺陷多,加上其不能抵御洪水漫顶,因此溃坝占比高。随着水库大坝建设和运行管理水平的提高,1980 年后,土石坝溃坝占比明显下降,其中 1980—1999 年为 88.99%,2000—2021 年为 90.91%,均低于土石坝在水库大坝总数中的占比,说明坝型不是影响溃坝的决定性因素,设计标准、建设质量和管理水平才是影响溃坝的关键因素。

(2)合理设计和严格施工质量控制体系是确保水库大坝安全的基础。20 世纪 80 年代前的大量溃坝事故与设计不合理和施工质量差直接相关。该阶段“三无”和“三边”工程多,工程地质勘察深度不足、防洪标准偏低、设计洪水成果不可靠、建筑物布置不合理、防渗体系不完善、结构单薄等各类设计问题多,加之缺乏施工质量控制体系,工程质量无法保证,导致该阶段溃坝事故多发。20 世纪 80 年代后,水库大坝工程建设程序逐渐规范,工程质量控制体系不断完善,“三项制度”得以建立,工程设计和施工质量不断提高,溃坝事故数量大幅度降低。但近年来发生的溃坝事故尤其是除险加固工程溃坝事故中仍有不少与设计

不当、施工质量缺陷等问题直接相关。

(3)必须高度重视施工期安全度汛和初期蓄水安全问题。早期施工期溃坝占比高,与施工导流设计标准明显偏低,或施工导流设施设置不当,或赶工期大坝提前合龙,施工期遭遇暴雨洪水后,由于坝顶未达安全度汛高程,随即漫顶溃决。水库大坝工程建设必须尊重自然,合理安排工期,落实安全度汛措施和应急预案,严禁盲目抢工期、赶进度。在全部溃坝案例中,水库初蓄期或运行期前5年的溃坝事故占据相当比例,因此,新建或除险加固工程初期蓄水计划安排必须慎重,控制水位上升速度,并加强巡视检查和安全监测。

(4)强化监管,确保水库运行各项管理制度落到实处,是保障水库大坝长治久安的关键。早期溃坝事故多发,与当时水库安全法规制度尚未建立健全有很大关系。1991年《水库大坝安全管理条例》颁布实施以后,注册登记、调度运用、检查监测、维修养护、安全鉴定、除险加固、应急管理、降等报废等涵盖水库大坝全生命期的安全管理制度体系先后建立,对控制溃坝事故发生发挥了不可替代的重要作用。但由于监管缺失,现有水库大坝安全管理制度执行仍不到位,地方政府常常不能兑现对水库大坝安全的管理措施,依法依规管理在一定程度上仍流于形式。近年来发生的溃坝事故相当一部分与管理制度落实不到位导致的非法超蓄、违规蓄水、疏于巡视检查和维修养护、不定期开展安全鉴定、病险久拖不治、应急准备不足等问题有关,突出表现在非汛期溃坝事故比例上升。

(5)巡查、及时报警和风险意识对避免溃坝生命损失尤为重要。无论哪种形式的溃坝都有先兆,如能巡查发现及时报警,就能给下游溃坝洪水淹没区的风险人口转移避险赢得足够时间。早期溃坝生命损失大,与当时全社会对溃坝风险的认知程度低、主动规避风险的意识淡薄有关,突出表现为:政府层面的应急管理体系尚未建立,应急准备和应急动员与处置能力不足;水库管理层面缺乏水雨情测报与报警设施,巡查不到位,对溃坝征兆熟视无睹,不能及时发出溃坝警报;施工队伍在大坝下游扎营,管理房设在大坝下游泄洪通道上,一旦溃坝将遭遇灭顶之灾;溃坝洪水淹没区公众不配合转移等。

(6)应以更高的要求 and 更加慎重的态度做好病险水库除险加固和管理工作。2000年以来的99座溃坝事故中,病险水库除险加固工程占有相当比例,还有大量病险水库除险加固工程出险案例,如2021年郑州“7.20”特大暴雨期间出现重大险情的郭家咀、常庄、五星等3座水库均进行过除险加固,2004—2013年期间,甚至出现除险加固工程溃坝率反而高于全国水库综合溃坝率的不正常现象,反映病险水库除险加固决策与实施机制还有待进一步完善,安全诊断(病险认定)技术和标准及加固技术还有待进一步提高。应充分认识病险水库的复杂性,扎实做好大坝安全鉴定与成果核查、除险加固工程设计与审查、除险加固工程建设与验收、初期蓄水等各个环节工作,切不可有麻痹思想,加固后运行管理工作还需要进一步强化。

(7)变化环境下极端气候事件频发给水库大坝安全度汛带来前所未有的挑战。近年来,在全球气候变化和强人类活动背景下,极端天气事件发生的频度和强度显著增强,严重威胁防洪标准偏低的中小型水库安全度汛,导致2000年以来因超标准洪水导致的漫顶溃坝事故比例大幅度升高,达到44%,2018—2021年的11座溃坝事故中有8座因超标准洪水所致,占比73%。

## 5.2 溃坝事故防控对策建议

(1)强化水库管理责任落实,进一步提高水库管理责任主体的风险意识和履职能力。溃坝事故虽然表现为各种不同形式,但很多与水库管理人员风险意识不强、责任落实不到位、履职能力不足有关,应进一步明确和落实责任,强化各级政府行政首长大坝安全责任制,压实水库管理主体责任,同时加强大坝风险宣传及水库运行管理业务培训,汲取历史溃坝事故经验教训,提高水库管理单位和主管部门及相关责任人的风险意识和履职尽责能力。

(2)完善水库大坝综合治理体系,确保大坝设计与施工质量。建立水库大坝安全鉴定和病险水库除险加固长效机制,综合应用除险加固、降等报废、控制运用等措施,及时消除水库大坝安全隐患和风险;强化对工程勘察、设计洪水复核、工程设计与审查、工程施工、检验测试、验收等环节的全过程监督管理,不断完善相关技术标准,确保大坝设计与施工质量,为水库大坝安全运行奠定坚实基础。

(3)强化大坝全生命期运行管理和“四预”措施,进一步健全溃坝风险防控机制。进一步完善水库大

坝安全监管体系,强化依法依规管理,确保各项管理制度执行到位;坚持工程措施与非工程措施并重,严格执行日常巡视检查制度,完善防汛交通、通信及警报等应急设施,提高应急预案编制质量并加强培训和演练,不断强化“四预”措施,进一步提升应对水库突发事件的风险识别、监测预警和应急处置能力;加快构建应急指挥信息和综合监测预警网络体系,加强极端条件应急救援、通信保障能力建设。

(4)加大水库大坝风险及避险常识宣传,主动规避和化解溃坝风险。通过媒体传播、培训、演练等多种途径向社会宣传普及大坝风险理念和避险常识,吸引全社会特别是溃坝洪水淹没区公众广泛参与和主动配合水库突发事件应急处置,这对避免人员伤亡尤为重要。加强溃坝洪水淹没区的风险规划,约束在溃坝洪水淹没范围内的开发和生产经营活动,严禁在面临溃坝洪水直接冲击的高风险区建设管理房、营房、居民点和重要基础设施。

(5)加大科技攻关力度,切实提高溃坝风险预警和应急抢险与避险能力。加强传统水库运行管理与现代信息技术的融合,大力提升水库大坝隐患识别、智能诊断、预测预警能力,为溃坝早期预警与应急决策等提供科技保障。针对水库大坝“有险查不准”“有病治不了”“出险抢不了”的困境,通过科技创新大力研发更加科学高效的隐患探测、突发事件早期预警、安全诊断与除险加固、防汛查险与应急处置等实用技术、材料和装备;总结郭家咀等水库大坝“漫而未溃”经验,针对性开展小型水库土石坝抵御洪水漫顶实用技术研究,为进一步健全溃坝风险防控体系提供科技支撑。

(6)针对极端气候事件频发不利影响,尽快制定适应性对策和实施水库防洪能力提升工程。加强气候变化对水库大坝安全影响的研究,揭示各类极端天气对大坝安全的作用机制与量化影响程度,完善水库设计洪水计算方法,综合工程措施和非工程措施提出适应性对策,同时考虑经济社会快速发展影响,尽快实施潜在高风险水库防洪能力提升工程,提高“高坝小库”和“都市型水库”的安全标准及应急能力。

## 参 考 文 献:

- [1] ICOLD. Lessons from dam incidents[R]. Paris: International Commission on Large Dams( ICOLD), 1974.
- [2] ICOLD. Deterioration of dams and reservoirs[R]. Paris: International Commission on Large Dams (ICOLD), 1983.
- [3] ICOLD. Dam failures statistical analysis[R]. Paris:International Commission on Large Dams ( ICOLD ), 1995.
- [4] USCOLD. Lessons from dam incidents, USA[M]. New York: American Society of Civil Engineerings, 1975.
- [5] USCOLD. Lessons from dam incidents, USA-II[M]. New York: American Society of Civil Engineerings, 1988.
- [6] ANCOLD. Status of dam safety in Australia[J]. ANCOLD Bulletin, 1992(91): 9-29.
- [7] ZHANG L M, XU Y, JIA J S. Analysis of earth dam failures: A database approach[J]. Georisk: Assessment & Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, 2009, 3(3): 184-189.
- [8] FOSTER M, FELL R, SPANNAGLE M. The statistics of embankment dam failures and accidents[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2000, 37(5): 1000-1024.
- [9] 水利部工程管理局. 全国水库垮坝登记册[M]. 北京:水利部工程管理局, 1981. (Engineering Administration Bureau of the Ministry of Water Resources. National reservoir dam collapse register[M]. Beijing: Engineering Administration Bureau of the Ministry of Water Resources, 1981. (in Chinese))
- [10] 水利部水利管理司. 全国水库垮坝登记册(1981—1990)[M]. 北京:水利部水利管理司, 1993. (Engineering Administration Bureau of the Ministry of Water Resources. National reservoir dam collapse register(1981-1990)[M]. Beijing: Engineering Administration Bureau of the Ministry of Water Resources, 1993. (in Chinese))
- [11] 汝乃华, 姜忠胜. 大坝事故与安全: 拱坝[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1995. (RU Naihua, JIANG Zhongsheng. Arch dams: accident and safety of large dams[M]. Beijing: China Water Power Press, 1995. (in Chinese))
- [12] 周克发, 李雷, 盛金保. 我国溃坝生命损失评价模型初步研究[J]. *安全与环境学报*, 2007, 7(3): 145-149. (ZHOU Kefa, LI Lei, SHENG Jinbao. Evaluation model of loss of life due to dam breach in China[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2007, 7(3): 145-149. (in Chinese))
- [13] 周克发, 彭雪辉. 我国溃坝生命损失调研报告[R]. 南京: 南京水利科学研究所, 2009. (ZHOU Kefa, PENG Xuehui. Investigation report on dam break life loss in China[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2009. (in Chinese))

- [14] 周克发. 溃坝生命损失分析方法研究[D]. 南京: 南京水利科学研究所, 2006. (ZHOU Kefa. Study on the analysis method for loss of life due to dam breach dissertation for master degree of engineering[D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2006. (in Chinese))
- [15] 解家毕, 孙东亚. 全国水库溃坝统计及溃坝原因分析[J]. 水利水电技术, 2009, 40(12): 124-128. (XIE Jiabi, SUN Dongya. Statistics of dam failures in China and analysis on failure causations[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2009, 40(12): 124-128. (in Chinese))
- [16] 张建云, 杨正华, 蒋金平. 我国水库大坝病险及溃决规律分析[J]. 中国科学:技术科学, 2017, 47(12): 1313-1320. (ZHANG Jianyun, YANG Zhenghua, JIANG Jinping. An analysis on laws of reservoir dam defects and breaches in China[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2017, 47(12): 1313-1320. (in Chinese))
- [17] 张建云, 杨正华, 蒋金平. 水库大坝病险和溃坝研究与警示[M]. 北京: 科学出版社, 2014. (ZHANG Jianyun, YANG Zhenghua, JIANG Jinping. Study on reservoir dam defects and breaches in China[M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese))
- [18] 蒋金平, 杨正华. 中国小型水库溃坝规律与对策[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(11): 1626-1631. (JIANG Jinping, YANG Zhenghua. Laws of dam failures of small-sized reservoirs and countermeasures[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(11): 1626-1631. (in Chinese))
- [19] 水利部大坝安全管理中心. 我国典型水库溃坝现场调查报告[R]. 南京: 水利部大坝安全管理中心, 2013. (Dam Safety Management Center of the Ministry of Water Resources. Investigation report on dam break site of typical reservoirs in China[R]. Nanjing: Dam Safety Management Center of the Ministry of Water Resources, 2013. (in Chinese))
- [20] 盛金保, 刘嘉妍, 张士辰, 等. 病险水库除险加固项目溃坝机理调查分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(11): 1620-1625. (SHENG Jinbao, LIU Jiayin, ZHANG Shichen, et al. Investigation and analysis of failure mechanism of reinforced dams[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(11): 1620-1625. (in Chinese))
- [21] 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. (LI Hongen, MA Guizhen, WANG Fang, et al. Analysis of dam failure trend of China from 2000 to 2018 and improvement suggestions[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2021(5): 101-111. (in Chinese))
- [22] 厉丹丹, 柳志国, 李雷. 溃坝事件中的人因失误分析[J]. 水利水运工程学报, 2013(6): 92-95. (LI Dandan, LIU Zhiguo, LI Lei. Analysis of human error in dam break accidents[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2013(6): 92-95. (in Chinese))

## Statistical analysis of dam failure and its loss of life in China

SHENG Jinbao<sup>1,2</sup>, LI Hongen<sup>1,2</sup>, SHENG Taozhen<sup>3</sup>

(1. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *Key Laboratory of Reservoir Dam Safety, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China*; 3. *College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

**Abstract:** This paper introduces the basic information of dam failures in China and analyzes representative major dam failure events in different eras. Systematic statistic analysis has been carried out for 3 558 dams that failed in history ever since dam failure record was first available in 1954, as well as the life loss data, according to the era, dam scale, dam type, dam height, season, construction and operation period, and geographic region. It reveals the spatiotemporal distribution characteristics and social attributes of dam failures and their loss of lives, summarizes and analyzes the main reasons of dam failures. Based on the statistical analysis, dam failure lessons have been summed up, and countermeasures to prevent dam failure have been proposed. The results of this paper have reference significance for further improving the prevention and control system of reservoir dam failure in China and strictly preventing dam failure accidents.

**Key words:** reservoir; dam failure; loss of life; spatiotemporal distribution characteristics; experience and lessons