

2000—2018年中国水库溃坝规律分析与对策

李宏恩, 马桂珍, 王芳, 戎文杰, 何勇军

Analysis of dam failure trend of China from 2000 to 2018 and improvement suggestions

LI Hongen, MA Guizhen, WANG Fang, RONG Wenjie, HE Yongjun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20201119001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

近20年中国水资源及用水量变化规律与成因分析

Change law and cause analysis of water resources and water consumption in China in past 20 years

水利水运工程学报. 2019(4): 31 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.04.005>

中小型水库防洪标准对比研究及对策建议

A comparative study of flood control standards for small and medium-sized reservoirs and recommendation

水利水运工程学报. 2021(1): 1 <https://doi.org/10.12170/20200503003>

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

水利水运工程学报. 2019(2): 93 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.02.013>

基于MIKE FLOOD的城区溃坝洪水模拟研究

Simulation research of urban dam break flood based on MIKE FLOOD model

水利水运工程学报. 2017(5): 67 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.05.010>

HEC-RAS模型在二维溃坝洪水研究中的应用

Application of HEC-RAS for the research of 2D dam-break flood

水利水运工程学报. 2019(2): 86 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.02.012>

我国新型城镇化进程中水问题及对策

Water problems and countermeasures during the process of new urbanization in China

水利水运工程学报. 2017(6): 104 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.06.015>



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:10.12170/20201119001

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))

2000—2018年中国水库溃坝规律分析与对策

李宏恩^{1,2}, 马桂珍¹, 王芳^{1,2}, 戎文杰³, 何勇军^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院, 江苏南京 210029; 2. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏南京 210029; 3. 河海大学, 江苏南京 210098)

摘要: 截至2018年底,我国已建成各类水库98 822座,总库容8 953亿m³。水库工程不仅是我国防洪体系的重要组成部分,更是优化水资源配置的关键工程措施。水库大坝一旦溃决将严重危及公共安全,从历史溃坝事件中吸取教训并分析溃坝特征规律,对提高水库安全管理和防灾减灾水平具有重要意义。在收集我国1954—2018年发生的3 541起溃坝事件的基础上,重点针对2000—2018年发生的84起溃坝事件,从空间分布、水库规模、坝高、坝型、溃坝原因、溃坝率等方面进行了详细统计分析,系统梳理了21世纪以来我国溃坝事件的规律趋势特征,主要包括:(1)气候变化背景下超标准洪水成为水库漫顶溃决的主因;(2)水库因工程质量导致的溃坝问题突出;(3)水库运行管理不当成为溃坝事件重要诱因;(4)西部地区溃坝率较其他地区仍然偏高。为进一步加强我国水库大坝安全管理,提出必须重视气候变化对水库大坝安全运行风险的影响、完善工程建设与运行安全监管体系、改善中西部地区大坝安全管理运行条件、兼顾水库安全管理工程措施与非工程措施等对策建议。

关键词: 大坝;溃坝规律;超标准洪水;工程质量;运行管理;对策建议

中图分类号: TV697 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2021)05-0101-11

截至2018年底,我国已建各类水库大坝98 822座,总库容达到8 953亿m³[1]。其中大型水库736座,占水库总数的0.74%,库容7 117亿m³,占水库总库容的79.49%;中型水库3 954座,占水库总数的4.00%,库容1 126亿m³,占水库总库容的12.58%;小型水库94 132座,占水库总数的95.26%,库容710亿m³,占水库总库容的7.93%。规模庞大的水库工程不仅是我国防洪体系的重要组成部分,更是优化水资源配置的关键工程措施[2],在防洪、灌溉、供水、发电、水产养殖、生态等方面都发挥了重要作用。然而,随着中国经济社会的快速发展,水库大坝一旦溃决,将造成严重的生命财产损失和恶劣的公众影响,水库大坝溃坝风险始终是大坝建设与管理中的关键问题。

从历史溃坝事件中吸取教训并分析溃坝特征规律,对揭示水库溃决机制和提高水库安全管理水平具有重要意义。国际大坝委员会(ICOLD)自1970年代就启动了多次大坝溃决与事故调查[3-5],美国、加拿大、澳大利亚等[6-8]也分别对本国的溃坝数据进行了统计分析。有学者[9-11]还尝试基于溃坝数据的统计分析成果对水库的溃坝概率进行预测。我国在1980年代也开展了系统的溃坝数据统计工作[12-13],并对溃坝的成因进行了总结梳理。解家毕等[14]收集了中国1954—2006年发生的3 498座溃坝案例,并从溃坝历史时期、省份分布、水库规模、坝高、坝型、溃坝原因、溃坝率等多个方面进行统计,对溃坝成因及其主要溃决模式进行了初步分析;蒋金平等[15]研究了1980—2006的小型水库溃坝数据,阐述了小型水库溃坝的成因与规律的同时,指出水库的规范化管理和病险水库除险加固工作的持续推进,为小型水库安全水平的提升奠定了必要

收稿日期: 2020-11-19

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0401809, 2017YFC0405006); 国家自然科学基金资助项目(51579154); 江苏省水利科技项目(2017005); 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(Y721010)

作者简介: 李宏恩(1982—),男,河北石家庄人,正高级工程师,博士,主要从事大坝安全评估与病险诊断方面研究。
E-mail: heli@nhri.cn

的基础;2013年水利部大坝安全管理中心^[16]对我国历史典型溃坝事件进行了现场调研,分析了我国溃坝的主要因素;张建云等^[17]分析了20世纪50年代以来中国溃坝的坝型、时间和空间分布规律。这些研究工作以历史溃坝数据为基础,总结了经验教训,为我国水库大坝溃坝风险防控和加强大坝安全管理提供了重要的参考依据。

水库大坝安全问题同时受地质、水文、设计、施工、管理水平等多种不确定因素影响。进入21世纪以来,伴随着中国经济社会的高速发展,社会对风险事故的可接受度发生了巨大变化^[18],溃坝事故作为典型公共安全突发事件的社会敏感性极高^[19-20];同时,近年来在气候变化的大背景下,因极端天气频发导致的溃坝事故偶有发生;另外,由于我国东中西部经济社会发展不均衡导致的水库管理水平差异等问题对不同区域的溃坝风险影响程度愈发显著。在这些因素的综合作用下,使我国2000年后的溃坝规律发生了显著变化,系统分析与揭示近年来水库溃坝的规律和趋势,对提升中国水库大坝安全管理水平具有指导意义。本文重点针对2000—2018年发生的84起溃坝事件,分析21世纪以来我国溃坝事件典型特征规律,从空间分布、水库规模、坝高、坝型、溃坝原因、溃坝率等方面进行详细统计分析,系统梳理21世纪以来我国溃坝事件的规律趋势特征,并对新时期加强我国水库大坝安全管理提出了对策建议。

1 2000—2018年中国溃坝规律与趋势

1.1 中国历史溃坝规律阶段划分

基于水利部大坝安全管理中心大坝基础数据库,对1954—2018年间中国的溃坝数据进行了统计,65年间共溃坝3541座,年均54.5座,年均溃坝率6.3/10000。表1为每10年不同规模水库溃坝数量和年均溃坝率特征统计。

表1 1954—2018年3个阶段的溃坝统计
Tab. 1 Dam break statistics of three stages from 1954 to 2018

阶段	年份	大型/座	中型/座	小(1)型/座	小(2)型/座	合计/座	占比/%	年均溃坝率/%
溃坝高发阶段	1954—1960年		64	156	129	349	10	0.0574
	1961—1970年		27	156	407	590	17	0.0679
	1971—1980年	2	26	282	1728	2038	58	0.2347
显著下降阶段	1981—1990年		4	46	214	264	7	0.0317
	1991—1999年		2	28	186	216	6	0.0282
趋于稳定阶段	2000—2009年		5	9	34	48	1	0.0055
	2010—2018年		2	10	24	36	1	0.0040
合计		2	130	687	2722	3541	100	0.0629

注:年均溃坝率计算中水库总数(单位:座)取值分别为:86852^[22](1954—1980年)、83387^[21](1981—1990年)、85120^[22](1991—1999年)、87873^[23](2000—2009年)及98822^[11](2010—2018年)。

从表1可知,在全部溃坝事件中中小型水库溃坝占绝大部分,溃坝总数3409座,占比达到96.27%。若以年均溃坝率作为判别指标,我国溃坝特征呈现了明显的年代阶段特征,这种演变趋势与国家社会经济和管理水平的发展密切相关,可将其分为3个阶段。

(1)溃坝高发阶段(1954—1980年),共计溃坝2977座,占溃坝总数的85%,1950年代和1960年代的年均溃坝率为5/10000左右,而1970年代的年均溃坝率高达23.5/10000,其中高峰期1973年当年溃决水库554座,这一时期发生了“75·8”特大洪水,导致我国历史上仅有的两座大型水库(板桥水库、石漫滩水库)溃决事件,造成重大的生命财产损失。

(2)显著下降阶段(1981—1999 年), 共计溃坝 480 座, 占溃坝总数的 13%, 较上一阶段的年均溃坝率下降一个数量级, 降至 3/10000, 这得益于相关法律、规章制度不断颁布与完善, 以及大坝设计、施工、安全监测、维修养护等体制机制的不断规范。

(3)渐趋稳定阶段(2000—2018 年), 共计溃坝 84 座, 占溃坝总数的 2%, 该阶段溃坝统计如图 1 所示, 这一阶段年均溃坝率进一步显著下降, 2010—2018 年的年均溃坝率已降至 0.4/10000, 低于世界公认的 2/10000 的低溃坝率水平^[24], 这与 21 世纪以来我国水库安全管理规范化、法制化、现代化、信息化进程的不断推进密切相关^[25]。2000—2018 年的溃坝统计情况显示, 这一阶段具有 3 个较明显特征: 一是气候变化导致的极端天气事件(主要为强降雨), 造成溃坝数量年际分布不均; 二是中型水库溃坝比例有所提高, 侧面反映部分中型水库在日常管理及工程除险加固的设计、施工过程中可能存在缺陷; 三是非汛期溃坝事故频发, 如 2013 年 2 月相继发生了新疆联丰水库、黑龙江星火水库、山西省曲亭水库等中小型水库非汛期溃坝事件, 其中暴露的水库管理能力不足问题值得特别重视。为进一步分析该阶段溃坝特征, 有必要从溃坝空间分布、水库规模、坝高、坝型等不同维度分析其溃坝规律与趋势。

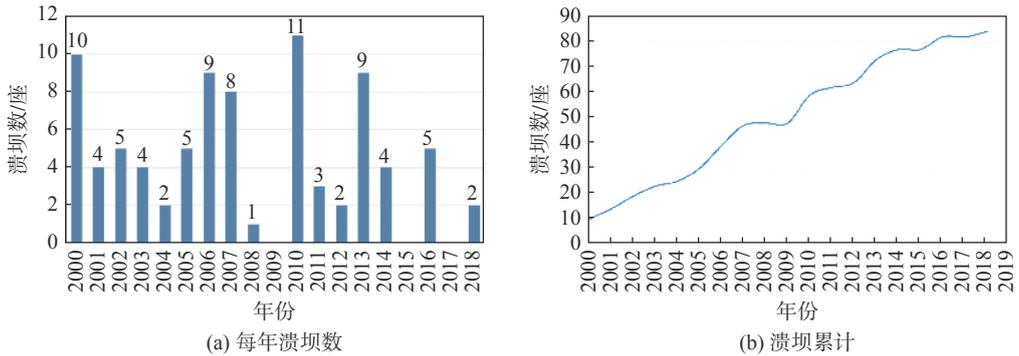


图 1 2000—2018 年溃坝统计

Fig. 1 Dam failure statistics from 2000 to 2018

1.2 按溃坝区域统计

图 2 为 2000—2018 年按地区统计的溃坝分布情况, 从总体规律上看, 相对低溃坝率地区水库数量相对较多, 而高溃坝率地区水库数量相对不多且多处西部地区。

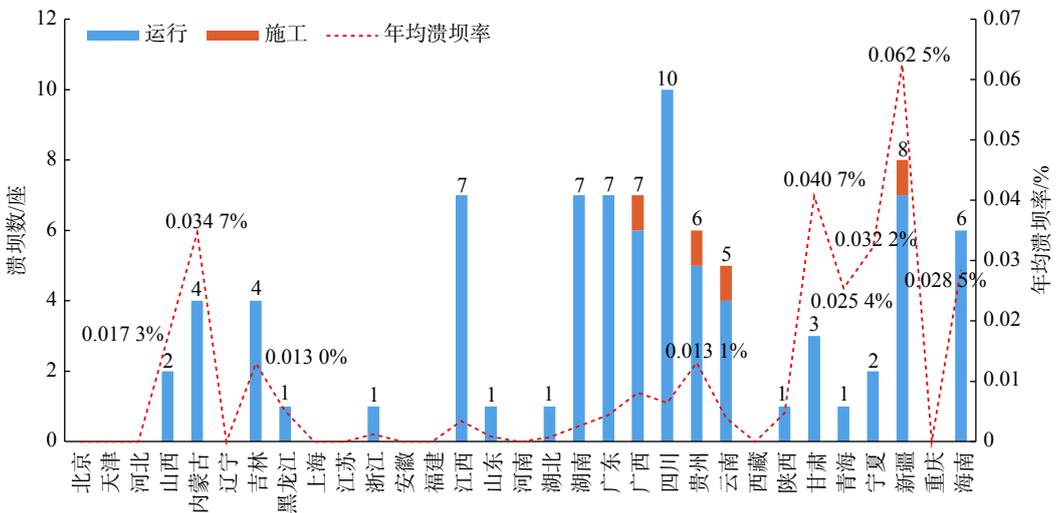


图 2 按地区统计的溃坝分布

Fig. 2 Regional distribution of dam failure

从溃坝事件的绝对数量上看,发生 5 座以上溃坝事件的有 9 个地区,其中四川省最多(10 座),占比 11.9%;除新疆外,溃坝事件绝对数偏多的省份集中于秦岭-淮河线以南区域,大部分地处亚热带季风、热带季风气候区,同时截至 2018 年,这些省份已建水库数均超过 1 000 座,其中,湖南(14 092 座)、江西(10 809 座)两省超过万座,溃坝数量最多的四川省已建水库数量为 8 239 座。

从年均溃坝率上看,2000—2018 年期间,新疆、甘肃、内蒙古、宁夏等 4 省(自治区)的年均溃坝率超过 3/10000,其中新疆年均溃坝率高达 6.25/10000,是全国平均值的 15 倍。对比 1954—1999 年的溃坝数据,近 20 年我国西部地区溃坝率仍然显著高于全国平均值。年均溃坝率偏高的省份集中于西北地区,地处温带大陆性气候与温带季风气候区,400 mm 降雨等值线以北,高溃坝率省份的分界线与我国历史上著名的“胡焕镛”线^[26]吻合。

1.3 按坝型统计

表 2 对 2000—2018 年溃坝坝型进行统计。从溃坝的大坝类型看,土坝占比约为 88.1%,较 1999 年以前的 93% 有所降低,这与我国土坝分布广泛、数量众多的现状直接相关,土石坝溃决问题是我国大坝安全管理中首要值得重视的问题。其他溃坝类型包括双曲拱坝(2000 年,贵州小冲沟水库,坝高 28.0 m,小(2)型)、堆石坝(2004 年,广西百色市沿小水库,坝高 11.5 m,小(2)型)、浆砌石坝(2006 年,广东英德市白水寨电站,坝高 14.1 m,小(2)型)、混凝土闸坝(2006 年,广东英德市锦潭三级,坝高 8.5 m,小(2)型)等,这说明由于我国 1950—1970 年代修建的水库大部分已达到或超过设计年限,砌石体、混凝土等工程结构的老化问题而引发的溃坝风险值得重视。

表 2 溃坝坝型统计
Tab. 2 Statistics of dam types of dam failure cases

序号	一级分类	1984—1999年		2000—2018年	
		溃坝数/座	占比/%	溃坝数/座	占比/%
1	混凝土坝	12	0.35	1	1.19
2	浆砌石坝	33	0.95	1	1.19
3	土坝	3 221	93.17	74	88.10
①	均质土坝	2 977	86.12	59	70.24
②	黏土斜墙坝	11	0.32		
③	黏土心墙坝	181	5.24	8	9.52
④	土石混合坝	19	0.55	1	1.19
⑤	其他	1	0.03	1	1.19
⑥	不详	32	0.93	5	5.95
4	堆石坝	31	0.90	1	1.19
5	其他	4	0.12	2	2.38
6	不详	156	4.51	5	5.95
	合计	3 457	100.00	84	100.00

1.4 按库容和坝高统计

按库容统计,在 2010—2018 年的 84 起溃坝事件中,小型水库溃坝占比相比 1954—2018 年有所下降,而中型水库溃坝比例明显上升。近年来,国家加大了对小型水库工程运行管理和暗访督察力度,大型水库管理基础普遍较好,因此在水库管理人员、经费、物资等保障资源分配方面,中型水库容易被忽视,部分地区中型水库陷入“比上不足,比下也相对不足”的困境,溃坝风险升高。

单纯从库容角度并不能完全反映水库的溃坝风险^[20],因此进一步根据坝高进行统计分析,如图 3 所示。在 2000—2018 年溃决的 84 起溃坝案例中,若按国际大坝委员会 ICOLD 对高坝的定义,当坝高超过 15 m 即为高坝^[5],有 44 座可被定义为高坝,占比达到 52.38%,而在 1954—1999 年溃决的 3 457 水库中坝高 15 m 以上的水库占 38.74%。由于我国目前仍采用以库容为水库规模定级的主要依据,因此在前述 44 座高坝溃决事件中仅有 4 座为中型水库,溃坝事件中存在的“小库高坝、低标准、高风险”的问题值得特别重视。类似 1993 年青海共和县沟后水库^[17](小(1)型水库,但坝高达到 71 m)的惨痛案例仍难以避免。在 2000—2018 年的溃坝事件中,有 5 座水库的坝高超过 30 m,设计、施工、运行管理的相关标准明显偏低,说明我国现行按照库容划分大坝标准等级的方式亟待进一步探讨与完善。

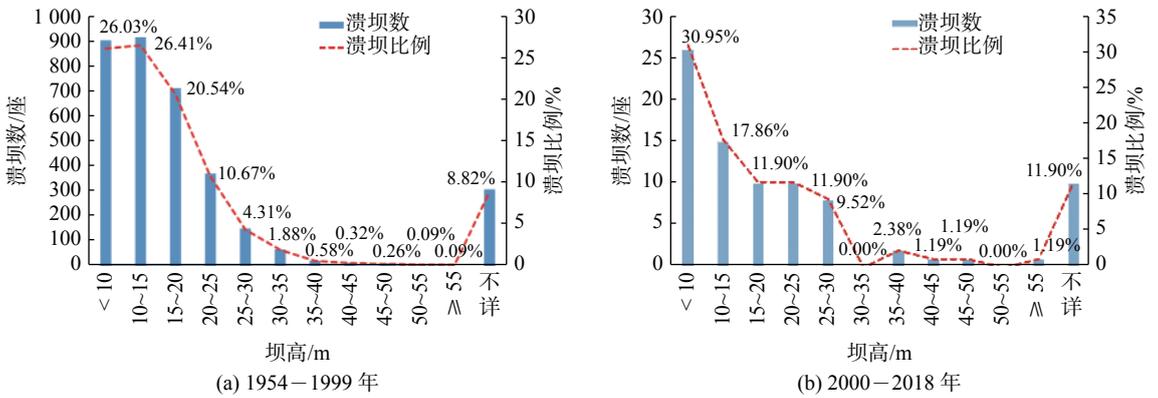


图 3 按坝高统计的溃坝分布

Fig. 3 Height distribution of dam failure cases

2 2000—2018 年溃坝成因特征

2.1 溃坝成因基本分类

在深入分析任何单一溃坝事件时,可以发现溃坝都是由多种因素耦合叠加导致的。本文所研究的溃坝成因指某起溃坝事件中占主导作用的溃坝因素。国内外众多组织、学者对溃坝成因进行过分类^[5],一般将溃坝成因归纳为 3 大类,即自然因素、工程因素和人为因素。其中,人为因素包括运行管理不当、人为破坏等,围绕溃坝的人因可靠性研究取得了一定进展^[20, 27],从广义人因可靠性的定义看,工程因素和人为因素可统一纳入人因因素。水利部曾将水库溃坝成因细分为 5 大类 16 小类^[12],多位学者^[9, 14, 28]在研究我国溃坝成因规律时一直采用这一分类方法。本文为了对比研究近 20 年我国溃坝成因的变化趋势,对溃坝成因分类也基本沿用了该方法。2000—2018 年溃坝成因统计见表 3。

表 3 1954—2018 年我国溃坝成因统计

Tab. 3 Statistics on causes of dam failure cases in China from 1954 to 2018

序号	分类	溃坝原因	1954—1999年				2000—2018年			
			所有溃坝		运行中溃坝		所有溃坝		运行中溃坝	
			溃坝数/座	比例/%	溃坝数/座	比例/%	溃坝数/座	比例/%	溃坝数/座	比例/%
1	漫顶	超标准洪水	424	12.26	293	12.43	45	53.57	42	55.26
		泄洪能力不足	1 348	38.99	832	35.30	2	2.38	2	2.63
2	质量问题	稳定问题	121	3.50	93	3.95	5	5.95	5	6.58
		渗流问题	889	25.72	713	30.25	20	23.81	18	23.68
		工程缺陷	281	8.13	163	6.92	4	4.76	4	5.26
3	管理不当	超蓄	40	1.16	32	1.36	2	2.38	2	2.63
		维护运用不良	62	1.79	31	1.32	1	1.19		
		溢洪道未及时拆除	15	0.43	11	0.47				
		无人管理	51	1.48	38	1.61				
4	其他	库区或溢洪道塌方	66	1.91	50	2.12	1	1.19	1	1.32
		人工扒坝	81	2.34	58	2.46				
		工程设计布置不当	20	0.58	14	0.59	1	1.19		
		上游垮坝	5	0.14	2	0.08				
5	原因不详	其他	5	0.14	2	0.08	3	3.57	2	2.63
		原因不详	49	1.42	25	1.06				
		合计	3 457	100.00	2 357	100.00	84	100.00	76	100.00

2.2 我国近 20 年溃坝成因特征分析与讨论

2.2.1 超标准洪水成为水库漫顶溃决的主因 在我国近 20 年各类溃坝成因中,漫顶仍然是最主要的溃坝因素(表 3)。对比 1954—1999 年的漫顶溃坝数据,因泄洪能力不足导致漫顶溃坝的比例显著减少,这与我国自 1998 年长江流域大洪水后开展的多批次大范围病险水库除险加固工作密切相关^[22]。而超标准洪水已成为我国水库漫顶溃决的主因,2000—2018 年较 1999 年以前因超标准洪水导致的漫顶溃坝比例大幅度升高,高达 95.74%,如 2013 年 6 月四川省遂宁市安居区在一次强降雨过程后,导致 1 座小(1)型水库、3 座小(2)型水库因超标准洪水连续溃决;又如 2018 年新疆射月沟水库的校核洪水标准为 300 年一遇,但经实测反推溃坝时的入库洪水标准超过了 1 000 年一遇。这与全球气候变化造成的极端强降雨等灾害日益频发直接相关。据《第三次气候变化国家评估报告》^[29]:“中国极端强降雨日数、极端降雨平均强度和极端降雨值都有增强趋势,极端降雨事件趋多,尤其是 20 世纪 90 年代后,极端降雨量比例区域增大。”

气候变化将对水利工程,尤其是对水库大坝工程产生愈发明显的不利影响已成为不争的事实^[30-31],特别是气候变化引起暴雨、洪水等水文极值变化,直接改变了工程设计洪水系列,增大了设计洪水核算的不确定性,使得由现有工程水文计算方法制定的流域开发利用工程、防洪和抗旱工程的设计与运行将面临由变化环境带来的风险增大,也给保障水库大坝安全管理中水雨情监测、运行调度、应急预案等关键非工程措施的完备性、有效性及可操作性带来了很大难度,尤其是位于我国南方地区的湖南、江西、四川、广东等水库大省更应引起足够重视。

2.2.2 工程质量导致的溃坝问题突出 由表 3 可见,2000—2018 年间,因工程质量问题导致的溃坝占比 34.52%,对比 1954—1999 年间的该比例为 37.35%,表面上看差别不大,但在 1954—1999 年的溃坝案例中涵盖了我国的 20 世纪 50 至 70 年代的建坝高峰,30 年间累积建成各类水库 79 500 座,约占水库总数的 80.4%,特殊的历史时期和经济技术条件导致这些水库工程存在先天不足^[22,28],导致大量因工程质量问题导致的溃坝事件。然而 21 世纪以来,我国水库建设与管理趋于规范,如前所述,我国总体溃坝率已经大幅度下降,但水库因工程质量问题导致的溃坝占比较高、问题仍然突出,这与在水库除险加固工作的大规模推进过程中,因设计、施工不当导致的大坝稳定、渗流及工程质量缺陷问题直接相关。

在因工程质量问题导致的土石坝溃坝案例中,因渗流问题导致的溃坝占比 23.68%,另外在 4 起因工程缺陷导致的溃坝案例(表 3)中,因溢洪道或泄洪洞施工质量缺陷导致的溃坝事故最终也是以大坝接触渗漏失稳为最终破坏路径,此类溃坝事故广义上也可归因为渗流问题。渗流问题导致的溃坝事故值得重点关注,其中以新老坝体、泄水建筑物与坝体结合部位及穿坝建筑物(涵管)导致的坝体渗漏问题最为突出,如 2013 年新疆联丰水库和山西曲亭水库、2014 年广西六洪水库、2016 年江西煤炭井水库、2018 年内蒙古增隆昌水库等,造成了比较恶劣的公众影响,穿坝涵管的渗漏隐患已成为制约我国中小型水库长效安全运行亟待解决的关键问题。水库除险加固措施均会对原坝体造成直接扰动,若设计、施工或运行不当极易产生严重的渗流隐患进而导致溃坝事故,如 2004 年新疆八一水库、2005 年青海英德尔水库、2007 年甘肃小海子水库及 2007 年内蒙古岗岗水库等均是在水库除险加固过程中因地勘深度不足、设计施工缺陷、管理水平低下等原因在加固部位产生严重的渗漏问题进而造成溃坝事故。

2.2.3 运行管理不当成为溃坝事件重要诱因 从全国范围看,运行管理不当一直是引起溃坝的一个不可忽视的重要诱因。在表 3 中运行管理不当导致溃坝占比仅为 3.57%,但溃坝往往并非发生于单一要素^[32],详细的溃坝调查发现几乎每一起溃坝事故中都有人为作用的因素^[16-17]。人因失误造成溃坝的作用机制目前是溃坝相关研究工作的热点和难点^[20]。水库调度不当、维护养护不良、盲目超蓄、闸门操作失灵、无人管理等运行管理问题的长期存在,当耦合库水位等运行条件发生改变时极易导致溃坝事故。如 2003 年 7 月,内蒙古凉城县五号河水库遭遇强降雨溃坝,但水库溃决的根本原因在于大坝及泄水建筑物多年来得不到维修,在洪峰入库、水位上涨过程中,泄洪洞的三孔闸门未能正常开启进行泄洪最终导致大坝失事。

另外在 2000 年后,我国发生了多起非汛期因管理问题造成的溃坝事件,其中包括除险加固进行中或已

完成投入运行的多起案例,具有较大的警示意义。非汛期水库溃决突出暴露了我国水库管理在巡视检查、监测预警、运行调度、应急预案、人员培训等方面还存在明显的薄弱环节。

2.2.4 西部溃坝率较其他地区偏高 根据多年溃坝统计数据,西部溃坝率始终居高不下,主要与极端天气频发、筑坝材料抗侵蚀性差和管理水平落后等因素相关。在气候变化的大背景下,我国西部干旱和半干旱地区近30年来降水呈持续增加趋势^[29]。极端天气对西部水库溃坝率的影响集中表现在低温、干旱和极端强降水三个方面,低温事件导致冻融循环作用对水库混凝土建筑物老化损伤作用加剧,进一步影响水库重要泄水设施的服役安全;极度干旱导致水库极端低水位和干涸引起大坝水平铺盖等防渗体大范围产生裂缝,破坏了防渗体系连续性和完整性,任其发展将危及大坝渗流安全;在极端强降雨的影响下,位于西部地区的水库工程遭遇超标准洪水的风险正在上升。2018年内蒙古增隆昌水库、新疆射月沟水库溃坝事故均印证了西部地区面临的极端暴雨洪水风险显著增大的趋势。此外,干旱和极端强降雨连续发生将导致更加严重的“旱涝急转”问题^[33],不仅给工程安全带来直接影响,而且更易造成地方政府为缓解旱情对部分水库超蓄进而导致的人因失误溃坝问题,2007年甘肃小海子、2013年黑龙江星火等水库因违规超蓄导致溃坝事故教训深刻。

西部地区筑坝材料普遍黏粒含量低、抗渗和抗冲能力差^[34],导致了西部地区水库大坝相较东部地区的防洪、防渗等运行条件差。在水土保持研究领域,常采用土壤可蚀性 K 值表征区域土壤的被冲蚀的难易程度,该值越大抗侵蚀能力越弱。由于我国的土石坝基本为当地材料坝,其筑坝料的抗侵蚀性可以通过区域的土壤可蚀性 K 值反映,图4为我国省际宏观分布的水蚀区土壤可蚀性 K 值^[35]与2000年后各省平均溃坝率对应关系。可见,西部高溃坝率省份的土壤可蚀性 K 值普遍大于 $0.30 \text{ t}\cdot\text{hm}^2\cdot\text{h}/(\text{hm}^2\cdot\text{MJ}\cdot\text{mm})$,其中新疆的 K 值超过了 $0.40 \text{ t}\cdot\text{hm}^2\cdot\text{h}/(\text{hm}^2\cdot\text{MJ}\cdot\text{mm})$,西部地区水库大坝筑坝料的抗冲蚀能力差是该地区溃坝率偏高的重要原因。此外,受制于地方经济社会发展程度的影响,西部地区水库工程在管理水平、设计能力、建设质量等问题更为突出。

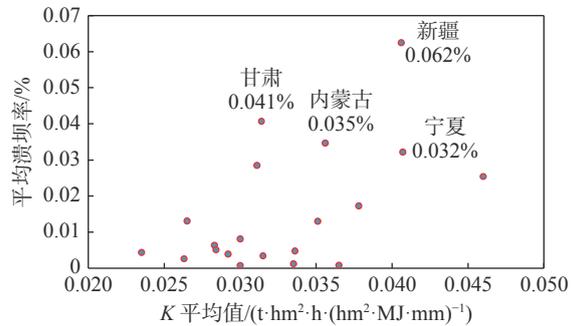


图4 2000—2018年省际土壤可蚀性 K 值与平均溃坝率变化关系

Fig. 4 Relationship between inter-provincial soil erodibility K value and average dam break rate from 2000 to 2018

3 加强水库大坝安全管理的对策建议

通过对近20年我国溃坝事件的分析可知,由于我国中小型水库存在历史欠账多、风险人口巨大、配套法规不健全、除险加固不彻底、非工程措施配套不到位等诸多问题,溃坝事故很难完全杜绝,如何有效降低水库溃决风险任重道远。加强水库安全与管理的对策建议主要有如下几点。

3.1 重视气候变化对水库大坝安全运行风险的影响

在气候变化的大背景下,我国境内因极端天气导致的超标准洪水事件发生频率将显著升高、工程设施老化加速、西部地区水库管理面临更高风险,逐步实施以风险管理理念为基础的水库差异化管理非常必要,建议:①按风险评估的溃坝后果对工程等别及建筑物级别进行分类,并据此确定建筑物的设计洪水标准和抗震设计标准,以及配套管理设施,提升重要水库应对突发极端事件的能力;②进一步强化按流域、区域应对气候变化对水库大坝安全运行影响的监督与管理机制,对西部经济社会发展较落后地区的水库安全管理应予更多重视与政策倾斜,降低水库失事风险;③重视工程风险管理,在水库水雨情监测、调度运用、应急预案的各环节中逐步考虑气候变化可能导致的极端天气影响,实现“工程安全管理”到“工程风险管理”

模式的转变,持续加强非工程措施建设;④加大气候变化对大坝等水利工程影响领域的科研投入,揭示各类极端天气对水库大坝等重要水利工程的作用机制与量化影响程度,为应对气候变化决策提供理论和技术支撑。

3.2 完善工程建设与运行安全监管体系

完善的工程建设与运行安全监管体系是全面防范和化解新老水库大坝安全问题所隐藏的潜在风险的基础,建议进一步完善现行的注册登记、安全鉴定、安全监测、维修养护、应急管理制度的制定与落实,对汛前检查与各种专项检查、稽查中发现的问题及提出的整改要求,要督促落实到位,通过体制创新和制度完善进一步加强监管,加大水库大坝安全管理基本制度的执行力度和问责力度。重视病险水库“三类坝”核查中的水库安全鉴定质量、新建水库或除险加固水库工程的蓄水安全鉴定程序规范,特别重视水库工程在除险加固前和降等报废后水库(山塘)存在运行风险的监督管理,严格控制运用,加强巡视检查。

3.3 兼顾水库安全管理工程措施与非工程措施

我国中小型水库安全及管理方面长期积淀的问题短期内不可能彻底解决。建议确立近期、中期和远期目标,工程措施与非工程措施并重,重视“小库高坝、低标准、高风险”等问题,逐步实现中小型水库的长治久安及水库管理自我完善的良性循环。在“十四五”期间,进一步明确和落实责任主体,强化行政首长安全责任制;贯彻流域水安全理念,依托“长江大保护”“黄河高质量发展”等国家战略,协同各流域机构积累的人才、平台优势,针对各流域、地区的水库大坝特征,探索统筹分片实施大坝安全区域化管理;加大针对气候变化、工程老化、风险管理等大坝安全相关研究领域的科研投入力度,研究实用技术,解决共性问题,提高管理水平;通过平台联动、项目合作、人才交流等形式,切实促进水库大坝突发事件应急处置中,水利部门与国土、气象等部门协调处置与信息共享。

3.4 完善中西部地区大坝安全设计标准及管理运行条件

针对我国中西部地区普遍溃坝率较高的现状,建议从结构设计及管理运行两个方面进行改善:①建设初期应考虑当地筑坝材料特性因地制宜,适当提高设计施工标准;②中西部地区近年来受极端降雨、干旱天气的影响明显,运行条件恶劣,结构设计时应考虑极端工况,尤其针对存在穿坝建筑物等工程的关键部位在设计时加强安全储备;③加大中西部地区水库日常维修养护的资金投入,同时对除险加固工作常抓不懈、动态管理;④切实提高基层水管人员收入水平和生活工作条件,在积极引进管理技术人员的同时,加强对现有管理人员的培训,及时掌握必备的管理知识,提升自身管理能力和水平。

4 结 语

(1)2000—2018 年我国共发生溃坝事件 84 起,年均溃坝率约为 0.4/10000,已低于世界公认的 2/10000 的低溃坝率水平,与我国水库安全管理规范化、法制化、现代化、信息化进程的不断推进密切相关。

(2)从近 20 年我国的溃坝总体情况看,低溃坝率地区水库数量相对较多,而高溃坝率地区水库数量相对较少且多处西部地区,新疆、甘肃、内蒙古、宁夏等 4 省(自治区)的年均溃坝率超过 3/10000,高溃坝率省份多位于我国 400 mm 降雨等值线和“胡焕镛”线以北。

(3)从溃坝的大坝类型看,小型水库溃坝 77 座,占比 91.67%,中型水库占比 8.33%,中型水库溃坝比例明显上升,与大型、小型水库管理人财物保障相比,部分地区中型水库陷入“比上不足,比下也相对不足”的困境;坝高 15 m 以上的水库溃决 33 座,占比 39.29%,暴露了我国现行按照库容划分大坝标准和工程等级易造成“小库高坝、低标准、高风险”的问题,大坝定级标准亟待完善。

(4)近 20 年我国的溃坝成因与趋势特征包括:①漫顶仍是我国溃坝的主要成因,其中因超标准洪水导致的漫顶溃坝占全部漫顶溃坝比例高达 95.74%,与全球气候变化造成的极端强降雨等灾害日益频发直接相关;②工程质量问题导致的溃坝问题突出,因新老坝体结合部位和穿坝建筑物(涵管)导致坝体渗漏问题的溃坝事件占比明显上升,其中土石坝穿坝涵管渗漏问题导致的溃坝问题最为突出;③运行管理不当成为溃

坝事件重要诱因,水库调度不当、维护养护不良、盲目超蓄、闸门操作失灵、无人管理等运行管理问题在遭遇突发洪水时极易导致溃坝事故;④西部溃坝率较其他地区偏高,与极端天气、筑坝材料抗侵蚀性和管理水平相关。

(5)由于我国中小型水库存在历史欠账多、配套法规不健全、除险加固不彻底、非工程措施配套不到位等诸多问题,溃坝事故很难完全杜绝。对加强水库大坝安全管理的对策建议包括:①重视气候变化对水库大坝安全运行风险的影响;②完善工程建设与运行安全监管体系;③兼顾水库安全管理工程措施与非工程措施;④改善中西部地区大坝安全管理运行条件。

参 考 文 献:

- [1] 中华人民共和国水利部. 中国水利统计年鉴2018[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018. (Ministry of Water Resources of PRC. China water statistical yearbook 2018[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2018. (in Chinese))
- [2] 中华人民共和国水利部, 中华人民共和国国家统计局. 第一次全国水利普查公报[J]. [中国水利](#), 2013(7): 1-3. (Ministry of Water Resources of PRC, National Bureau of Statistics of PRC. Bulletin of the first national census of water resources[J]. [China Water Resources](#), 2013(7): 1-3. (in Chinese))
- [3] ICOLD. Lessons from dam incidents[R]. Paris: International Commission Large Dams (ICOLD), 1974.
- [4] ICOLD. Deterioration of dams and reservoirs[R]. Paris: International Commission on Large Dams (ICOLD), 1983.
- [5] ICOLD. Dam failures statistical analysis[R]. Bulletin 99. Paris: International Commission on Large Dams (ICOLD), 1995.
- [6] USCOLD. Lessons from dam incidents, USA[M]. New York: American Society of Civil Engineers, 1975.
- [7] USCOLD. Lessons from dam incidents, USA-II[M]. New York: American Society of Civil Engineers, 1988.
- [8] ANCOLD. Status of dam safety in Australia[R]. Bulletin No. 91, Hobart, Tasmania: Australian National Committee on Large Dams, 1992.
- [9] ZHANG L M, XU Y, JIA J S. Analysis of earth dam failures: a database approach[J]. [Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards](#), 2009, 3(3): 184-189.
- [10] 傅志敏, 杜汶桐, 孟颖, 等. 基于GeoDam-BREACH与Graham法的溃坝生命损失估算[J]. [水利水运工程学报](#), 2019(2): 93-98. (FU Zhimin, DU Wentong, MENG Ying, et al. Estimation of life loss by dam-break flood based on GeoDam-BREACH and Graham methods[J]. [Hydro-Science and Engineering](#), 2019(2): 93-98. (in Chinese))
- [11] 杨德玮, 盛金彪, 彭雪辉, 等. BREACH模型与MIKE21模型在溃坝风险中的耦合分析[J]. [水利水运工程学报](#), 2016(6): 23-28. (YANG Dewei, SHENG Jinbao, PENG Xuehui, et al. Coupling analysis of MIKE21 model and BREACH model for dam-break risk[J]. [Hydro-Science and Engineering](#), 2016(6): 23-28. (in Chinese))
- [12] 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. (Department of Water Resources Engineering Administration. National register of reservoir breakdowns[M]. Beijing: Department of Water Resources Engineering Administration, 1981. (in Chinese))
- [13] 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. (Department of Water Resources Management. National register of reservoir breakdowns (1981—1990)[M]. Beijing: Department of Water Resources Management, 1993. (in Chinese))
- [14] 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))
- [15] 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))
- [16] 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 Ministry of Water Resources. Field investigation report of typical reservoir dam break in China[R]. Nanjing: Dam Safety Management Center of Ministry of Water Resources, 2013. (in Chinese))

- [17] 张建云, 杨正华, 蒋金平. 水库大坝病险和溃坝的研究与警示[M]. 北京: 科学出版社, 2014. (ZHANG Jianyun, YANG Zhenghua, JIANG Jinping. A study on reservoir dam defects and breaches in China[M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese))
- [18] 李杰. 核电风险接受度分析方法与影响因素综述[J]. 武汉理工大学学报(社会科学版), 2017, 30(4): 10-16. (LI Jie. Literature review of methods and factors of public acceptance in nuclear power risk[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Social Sciences Edition), 2017, 30(4): 10-16. (in Chinese))
- [19] 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. (LIANG Zhe, XU Jiehong, LI Shu, et al. Perplexing problems in risk communication of emergent public security events: a psychological perspective[J]. Journal of Natural Disasters, 2008, 17(2): 25-30. (in Chinese))
- [20] 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. (SHENG Jinbao, LI Dandan, CAI Qian, et al. Research progress and its practice of key techniques for dam risk assessment and management[J]. Scientia Sinica Technologica, 2018, 48(10): 1057-1067. (in Chinese))
- [21] 中国水利年鉴编辑委员会. 中国水利年鉴1991[M]. 北京: 水利电力出版社, 1991. (Editorial Committee of China Water Resources Yearbook. China water resources yearbook 1991[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1991. (in Chinese))
- [22] 中国水利年鉴编纂委员会. 中国水利年鉴2000[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000. (Editorial Committee of China Water Resources Yearbook. China water resources yearbook 2000[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2000. (in Chinese))
- [23] 中国水利水电出版社. 中国水利年鉴2010[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010. (China WaterPower Press. China water resources yearbook 2010[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2010. (in Chinese))
- [24] FOSTER M, FELL R, SPANNAGLE M. The statistics of embankment dam failures and accidents[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37(5): 1000-1024.
- [25] 孙金华. 我国水库大坝安全管理成就及面临的挑战[J]. 中国水利, 2018(20): 1-6. (SUN Jinhua. Achievements of reservoir dam safety management in China and challenges[J]. China Water Resources, 2018(20): 1-6. (in Chinese))
- [26] 戚伟, 刘盛和, 赵美凤. "胡焕庸线"的稳定性及其两侧人口集聚模式差异[J]. 地理学报, 2015, 70(4): 551-566. (QI Wei, LIU Shenghe, ZHAO Meifeng. Study on the stability of Hu Line and different spatial patterns of population growth on its both sides[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(4): 551-566. (in Chinese))
- [27] 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))
- [28] 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))
- [29] 《第三次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第三次气候变化国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社, 2015. (Committee for the Preparation of the Third National Assessment of Climate Change. Third national assessment of climate change[M]. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese))
- [30] 张建云. 气候变化与水利工程安全[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(3): 326-330. (ZHANG Jianyun. Climate change and safety of water conservancy projects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(3): 326-330. (in Chinese))
- [31] 张建云, 向衍. 气候变化对水利工程安全影响分析[J]. 中国科学: 技术科学, 2018, 48(10): 1031-1039. (ZHANG Jianyun, XIANG Yan. Analysis on the impact of climate change on the water conservancy project safety[J]. Scientia Sinica Technologica, 2018, 48(10): 1031-1039. (in Chinese))
- [32] MORGAN M G. Safety of existing dams: evaluation and improvement, committee on the safety of existing dams[M]. Washington, DC: National Academy Press, 1983.
- [33] 叶伟, 马福恒, 胡江, 等. 旱涝急转下斜墙坝渗流特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(10): 1923-1929. (YE Wei, MA Fuheng, HU Jiang, et al. Seepage behaviors of inclined wall dams under drought-flood abrupt alternation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(10): 1923-1929. (in Chinese))
- [34] 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))

- [35] 梁音, 刘宪春, 曹龙熹, 等. 中国水蚀区土壤可蚀性 K 值计算与宏观分布[J]. *中国水土保持*, 2013(10): 35-40. (LIANG Yin, LIU Xianchun, CAO Longxi, et al. K value calculation of soil erodibility of China water erosion areas and its macro-distribution[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2013(10): 35-40. (in Chinese))

Analysis of dam failure trend of China from 2000 to 2018 and improvement suggestions

LI Hongen^{1,2}, MA Guizhen¹, WANG Fang^{1,2}, RONG Wenjie³, HE Yongjun^{1,2}

(1. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China*; 3. *Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: At the end of year 2018, the total number of built reservoirs in China reached 98, 822, with a total storage capacity of 895.3 billion m³. Reservoirs are not only important parts of national flood defense system, but also are key engineering measures to optimize the allocation of water resources. However, once a dam failure incident happens, it will involve major public safety. In-depth analysis of the historical data of dam failure cases is of great significance for preventing dam failure and improving the management level of disaster prevention and mitigation. Based on the collection of 3 541 dam failure cases that occurred in China from 1954 to 2018, this paper focuses on 84 dam failure cases that occurred from 2000 to 2018. Detailed statistical analysis of the dam failure cases is carried out from the perspective of spatial distribution, reservoir size, dam height, type, failure causes, and other aspects. The trend characteristics of dam failure cases since 2000 can be summarized as: (i) Over-standard flooding becomes the main cause of dam failure cases of overtopping; (ii) Dam failure cases caused by quality defects at different locations of reservoirs significantly increased; (iii) The dam failure rate in the western part of China is dramatically higher than in other regions; (iv) Improper operation and management of reservoirs has become an important reason of dam failure incidents. Based on the aforementioned analysis, suggestions for further strengthening the dam safety management are proposed including that more attention should be paid to the impact of climate change on reservoirs, the engineering construction and operation safety supervision system should be continuously optimized, the management and operation conditions in the central and western regions of China should be intrinsically improved, and engineering measures and non-engineering measurements should be taken into account simultaneously in the field of dam safety management.

Key words: dam; dam failure trend; exceeding standard flood; engineering quality; management and operation; improvement suggestions