

DOI:10.16867/j.issn.1673-9264.2022452

曲伟,刘昌军,吕娟,等.冰川崩塌冰湖溃决引发的洪涝灾害调查及应对策略[J].中国防汛抗旱,2023,33(1):27-30.QU Wei, LIU Changjun, LYU Juan, et al. Investigation and suggestions on flood disasters caused by glacier collapse and glacial lake breaking [J]. China Flood & Drought Management, 2023, 33(1): 27-30. (in Chinese)

# 冰川崩塌冰湖溃决引发的洪涝灾害调查及应对策略

曲伟<sup>1,2</sup> 刘昌军<sup>1,2</sup> 吕娟<sup>1,2</sup> 宋文龙<sup>1,2</sup> 刘业森<sup>1,2</sup> 李帅<sup>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,北京 100038;  
3. 沈阳农业大学,沈阳 110000)

**摘要:**我国冰川资源主要分布在青藏高原及周边地区,在全球变暖背景下,青藏高原及周边地区冰川整体上处于快速消融状态。冰川的快速变化降低冰川自身的稳定性,进而导致冰川灾害的发生风险增加,冰湖溃决洪水是冰川灾害中影响最大的自然灾害,21世纪以来冰湖溃决灾害发生频率明显上升。未来气温升高和降水的增加将加速冰川的退化,气温升高、冰川融水增加、降水量增加、极端天气条件增多,必将造成冰湖溃决风险增大。通过梳理典型历史灾害事件和气候变化下冰湖溃决洪水风险发展趋势,提出了冰川冰湖灾害应对建议,即部署排查普查,建立重点区域清单;建立多部门长效合作机制,做好协同协作;加强重点区域风险预警;研究冰湖溃决和漫溢溃坝洪水机理和风险;做好应急处置,指导地方编制预案。

**关键词:**冰川冰湖;冰湖溃决洪水;洪涝灾害

中图分类号:TV122.4;P343.6

文献标识码:B

文章编号:1673-9264(2023)01-27-04

## 0 引言

中国是世界上冰川资源最为丰富的国家之一,有“亚洲水塔”的美誉。在全球变暖背景下,冰川加速消融,有研究对第一次冰川编目中34 578条冰川变化做了分析,在过去半个世纪中,有5 956条小冰川已消失,25 901条冰川不断萎缩,融化的冰川水流入下游江河湖泊中,导致80%以上的冰湖面积扩大,而且冰川自身的不稳定性增大,从而导致伴生的灾害风险加剧<sup>[1]</sup>。20世纪以来,亚洲高山区共计发生冰湖溃决洪水277起,其中冰碛湖溃决洪水113起,冰坝湖溃决洪水164起<sup>[2]</sup>。

2021年2月7日,印度北阿坎德邦查莫利地区的一处水电站因附近山上的冰川滑落,造成溃坝,导致62人死亡、142人失踪,造成重大国际影响,引起了党中央和国务院的高度重视。本文搜集整理了相关资料,对我国冰川冰湖基

本情况、典型灾害事件、冰湖溃决洪水发展趋势等进行了分析,并对冰川崩塌冰湖溃决引发的灾害风险提出了下一步工作建议。

## 1 我国冰川冰湖基本情况

中国是世界冰川资源大国,冰川资源主要分布在青藏高原及周边地区。这些冰川分为海洋型冰川(占中国冰川面积的22%,分布于青藏高原东南部)、亚大陆型冰川(占中国冰川面积的46%,分布在青藏高原东北部及高原南缘和天山)、极大陆型冰川(占中国冰川面积的32%,主要分布在青藏高原西部)等3类。根据《中国第二次冰川编目》(2014年发布),中国境内面积超过0.01 km<sup>2</sup>的冰川共有48 571条,总面积51 766 km<sup>2</sup>,总储量4 554 m<sup>3</sup>。与《中国第一次冰川编目》(1999年发布)数据对比,中国境内冰川面积缩小约18%,储量减少约20%<sup>[3]</sup>。卫星遥感资料和实地观

收稿日期:2022-11-07

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

测研究均显示,在全球变暖背景下,青藏高原及周边地区冰川整体上处于快速消融状态<sup>[4-5]</sup>。

冰川的快速变化降低冰川自身的稳定性,进而导致冰川灾害的发生风险增加。青藏高原及周边地区冰川灾害的类型包括冰崩、冰川跃动、冰湖溃决洪水、冰川泥石流、冰雪洪水等<sup>[6]</sup>。冰湖是以现代冰川融水为主要补给源或在冰碛垄洼地内积水形成的天然水体,包括冰川末端湖、冰川表面湖、冰川补给湖等类型。冰湖溃决洪水是由冰川成因湖泊快速的大量排水或坝体垮塌而形成的突发性洪水<sup>[7]</sup>。青藏高原及周边地区的冰湖分布广泛,在冰川发育区几乎都有存在,但集中分布在念青唐古拉山和喜马拉雅山地区。

冰湖溃决洪水是冰川灾害中影响最大的自然灾害。气候变化引起的降水增加或冰川融水增加会引发冰湖溃决,冰崩、冰川跃动形成的物质冲进下游冰湖,也会引发冰湖溃决,因此冰湖溃决洪水是冰川灾害中影响最大的自然灾害。冰湖溃决洪水主要发生在喜马拉雅山、喀喇昆仑山的叶尔羌河和天山的阿克苏河源区。发生溃决的冰湖主要分为冰川阻塞湖(冰坝湖)和冰碛阻塞湖(冰碛湖)两大类,其中冰碛湖堤溃决过程主要有溢流型和管涌型两种机制<sup>[8]</sup>。冰湖溃决洪水具有突发性强、规模大、破坏力强和危害范围广的特点,往往会使得下游地区遭受惨重的生命财产损失。

## 2 典型历史灾害事件

冰湖溃决洪水是全球关注的热点问题,其引发的次生灾害极易造成重大损失。自20世纪30年代以来,有记录的冰湖溃决灾害呈增加趋势,其中超过一半以上事件发生在我国西藏地区。据记载,我国西藏地区1960—2019年共33个冰湖发生过37次溃决灾害<sup>[9]</sup>。据自然资源部的调查显示,21世纪以来冰湖溃决灾害发生频率明显上升,近100年来详细记载的34次冰湖溃决灾害中,2000年以来就有10次<sup>[10]</sup>。冰湖溃决及其引发的次生灾害不仅对当地的基础设施和人民生命财产安全有重要影响,更关系到我国与周边国家的睦邻友好关系。

冰川冰湖灾害链灾害类型多样、后果严重,其中冰湖溃决灾害频次最高、破坏最大。1954年7月16日,西藏自治区康马县桑旺错冰湖溃决导致下游约400人死亡,2万多人受灾,造成江孜县和日喀则市城区等人口重镇蒙受惨重损失。1981年,聂拉木县樟藏布沟次仁玛错冰湖发生溃决,

摧毁了河谷两岸牧场、707大桥、友谊桥及附近所有建筑物,摧毁了尼泊尔境内的逊科西水电站,影响交通路线3年,导致尼泊尔境内200人丧生。1988年,波密县光谢错冰湖溃决冲毁川藏线42 km,导致交通中断200 d,冲毁桥梁18座,造成5人死亡。2013年,嘉黎县然则然错冰湖溃决导致下游村落人员失踪,房屋、桥梁和道路等基础设施严重受损,直接经济损失达2.7亿元。2020年6月,那曲市金乌措在持续升温 and 强降雨影响下,冰湖后缘冰川冰舌发生冰崩,形成冰湖溃决洪水,对下游水利、交通基础设施造成了较为严重的损失。

冰川洪水、冰川崩塌引发泥石流等次生灾害也具有很大风险。1950年,米林县直白村曾发生冰川崩塌灾害,导致97人遇难,堵塞雅鲁藏布江1 d。2017—2018年,雅鲁藏布江色东普沟发生了7次有记录的堵江事件,都是由冰川崩塌引起的泥石流导致的。2018年,叶尔羌河上游克亚吉尔冰川洪水,形成了冰川堰塞湖,对下游阿尔特什水利枢纽工程造成很大风险。2015年公格尔冰崩、2016年阿汝冰崩、2018年藏东南冰崩、2021年印度冰崩都引发了一系列次生灾害。

## 3 冰湖溃决洪水灾害风险发展趋势

在气候变暖的驱动下,冰湖溃决风险不断加剧。1960年以来,气候变暖进入加速期,全球地表年平均温度升高0.4~0.6℃,西藏地区年平均气温升高1.0~1.5℃,升温幅度高于全球海陆均温增幅近2倍<sup>[11]</sup>。据联合国政府间气候变化专门委员会预测,到2030年,西藏年平均气温较1990年将升高0.8~1.2℃,降雨量将增加7%~17%;到2050年,年平均气温将升高2.3~2.7℃,降雨量增加3%~33%<sup>[12]</sup>。

气温升高和降水增加将加速冰川的退化。即便在全球升温幅度低于1.5℃的情况下,亚洲高山地区仍将损失35%的冰量,在温室气体排放量较高的情景下,这一损失比例将增至65%<sup>[13]</sup>。气温升高、冰川融水增加、降水量增加、高温、强降雨等极端天气条件增多,必将造成冰湖溃决风险增大。同时,气温升高、降水增加,又有利于地表物质加速风化,沟谷中的松散固体物质增多,冰湖溃决洪水更易引发泥石流。冰川灾害会引发一系列的次生灾害,包括冰崩、冰川泥石流、冰湖溃决洪水等,形成一个从冰冻圈开始影响到岩石圈、水圈、生物圈和人类圈的灾害链。

冰湖溃决风险提高,将对下游地区构成严重威胁。过

去40年的卫星数据表明喜马拉雅山脉2000—2016年损失的冰量比1975—2000年翻了一番,喜马拉雅山脉东部冰川的萎缩速度高于中部和西部冰川<sup>[4]</sup>,喜马拉雅山脉东部地区是冰湖溃决洪水的热点地区,其洪水风险是喜马拉雅山脉其他地区的3倍。2020年世界银行开展的一项研究,调查了印度喜马拉雅山脉中329个冰湖的风险状况,考虑下游居民、建筑、桥梁和水利工程的数量,认定23个冰湖为“极高危冰湖”,50个冰湖为“高危冰湖”。

我国冰川周边水利工程众多,要加强冰川灾害对水利工程的风险评估工作。据有关部门对我国冰川周边水电站和水库的统计,10 km范围内大中型水电站11个、水库16个,小型水电站97个、水库43个;20 km范围内大中型水电站44个、水库41个,小型水电站336个、水库117个;50 km范围内大中型水电站116个、水库135个,小型水电站1 069个、水库440个。随着气候持续变化,必须做好更充分的准备以应对冰湖灾害事件的发生。

#### 4 冰川冰湖灾害应对建议

基于全国山洪灾害防治项目和“十一五”国家科技支撑项目等的积累,中国水利水电科学研究院在青藏高原地区基础地理数据、实时预警预报系统、高寒地区水文模型等有丰富积累,具有高原地区冰湖发生、溃决、模拟和评估体系等方面的技术储备,研发了寒区冰湖溃决及次生灾害的观测、模拟和排险技术及装备,参与了近年来帕里河堰塞湖、易贡特大滑坡、新疆库勒堰塞湖等冰湖堰塞湖的应急处置。鉴于此,对冰川冰湖引发的灾害链提出以下建议。

(1)立即部署排查普查,建立重点区域清单。组织相关单位,联合地方政府水利部门,根据湖泊大小,汇水区面积,冰/岩石的崩塌地形潜力及坝体坡度等重要指标开展高危冰湖排查。对我国现有高危冰湖进行摸底排查,对可能威胁下游铁路、公路、水利基础设施和居民聚集区等冰湖,建立重点区域清单,利用3S技术综合评定隐患影响区域及风险。建议在风险普查基础上做风险等级评估及区划工作等。

(2)建立长效机制,做好协同协作。各部门依据职责分工,建立与国土、应急等部门的长效协调机制,做好相关工作。建议由国土及地方负责做好冰川冰湖及灾害的普查排查工作,水利部对可能造成水利工程安全有重大影响的区

域,做好监测预警和风险分析工作,指导地方制定相应的处置措施。水利部配合应急管理部对突发冰川冰湖及次生灾害做好应急处置工作,逐步完善信息报送和应急值守、基础资料获取、应急监测、会商研判、水工程调度、应急处置方案编制、灾后水利设施水毁修复等主要工作流程,以规范指导水利部及各地相关部门堰塞湖应急处置相关工作。

(3)加强遥感监测,做好重点区域风险预警。应用中高分辨率多光谱与温度卫星数据,构建基于深度学习与水体指数、温度阈值漂移算法等方法的冰湖快速监测识别与变化分析技术,开展高时间频率冰湖面积监测和溃决预警分析;融合InSAR卫星遥感、光学遥感、全球导航卫星系统、激光雷达和无人机等综合监测手段,形成空天地一体化的灾害风险排查和稳定性监测预警成套技术。针对已确定的目标灾害隐患体研发长期、专用、智能的精细化监测设备,解决维护难、周期长、自动化、智能化等问题。充分利用遥感、无人机、雷达、InSAR等综合现代测绘技术,研发冰湖堰塞湖、滑坡、泥石流、溃决山洪等链发灾害形成过程、机理、多灾害综合风险关键因子识别、分析评估和预测预警等成套技术,构建冰川冰湖灾害及次生灾害综合防治减灾技术体系,实现对人民生命财产和水工程安全带来巨大的风险的实时评估,最大可能减少青藏高原地区因自然、地质灾害所引发的人员伤亡和财产损失。

(4)研究冰湖溃决和漫溢溃坝洪水机理和风险。研究气候变化条件下冰川冰湖灾害链孕灾机理、成灾机制,以及对水工程影响规律。防灾减灾技术是急需解决的关键技术问题,全球气候变暖趋势下埋藏冰融化诱发的冰湖溃决和涌浪条件对冰湖溃决模式的影响,急需深入细化研究以揭示其复杂的形成机制。开展综合遥感调查监测,研究其机理、形成规律和监测预报预测工作。

(5)做好应急处置技术支撑,指导地方编制预案。针对寒区冰湖溃决及次生灾害的特殊情况,依托科研单位研究成灾及灾害链机理,加强冰川冰湖溃决应急处置技术研发,在灾害模拟、排险技术及装备等方面创新与高原相适应的技术手段,指导各地分区分级建立冰川冰湖相关灾害应急处置预案,创新监测手段,提升“十四五”期间应急水文监测能力,从灾害危险性评估、监测预警、应急处置等各方面规范流程,提高应急处置能力。

## 参考文献

- [1] 姚檀栋, 邹光剑, 徐柏青, 等. “亚洲水塔”变化与影响[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1203-1209.
- [2] 张太刚, 王伟财, 高坛光, 等. 亚洲高山区冰湖溃决洪水事件回顾[J]. 冰川冻土, 2021, 43(6): 1673-1692.
- [3] 刘时银, 姚晓军, 郭万钦, 等. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状[J]. 地理学报, 2015, 70(1): 3-16.
- [4] 孙美平, 刘时银, 姚晓军, 等. 近50年来祁连山冰川变化——基于中国第一、二次冰川编目数据[J]. 地理学报, 2015, 70(9): 1402-1414.
- [5] 冯童, 刘时银, 许君利, 等. 1968—2009年叶尔羌河流域冰川变化——基于第一、二次中国冰川编目数据[J]. 冰川冻土, 2015, 37(1): 1-13.
- [6] 邹光剑, 姚檀栋, 王伟财, 等. 青藏高原及周边地区的冰川灾害[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1285-1292.
- [7] 张太刚, 王伟财, 高坛光. 亚洲高山区冰湖溃决洪水事件回顾[J]. 冰川冻土, 2021, 43(6): 1673-1692.
- [8] 冉启华, 吴秀山, 贺治国, 等. 冰湖溃决模式对下游洪水过程的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2014, 54(8): 1049-1056.
- [9] 刘建康, 张佳佳, 高波, 等. 2019. 我国西藏地区冰湖溃决灾害综述[J]. 冰川冻土, 41(6): 61-73.
- [10] 邹光剑, 姚檀栋, 王伟财, 等. 青藏高原及周边地区的冰川灾害[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1285-1292.
- [11] 贾洋, 崔鹏. 西藏冰湖溃决灾害事件极端气候特征[J]. 气候变化研究进展, 2020, 16(4): 395-404.
- [12] Fox-Kemper B, Hewitt H T, Xiao C, et al. Ocean, cryosphere and sea level change [C]//IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [13] Kraaijenbrink P, Bierkens M, Lutz A, et al. Impact of a global temperature rise of 1.5 degrees Celsius on Asia's glaciers[J]. Nature, 2017(549): 257-260.
- [14] Maurer J, Schaefer J, Rupper S, et al. Acceleration of ice loss across the Himalayas over the past 40 years[J]. Science Advances, 2019, 5(6): eaav7266.

## Investigation and suggestions on flood disasters caused by glacier collapse and glacial lake breaking

QU Wei<sup>1,2</sup>, LIU Changjun<sup>1,2</sup>, LYU Juan<sup>1,2</sup>, SONG Wenlong<sup>1,2</sup>, LIU Yesen<sup>1,2</sup>, LI Shuai<sup>3</sup>

(1. China Institute of Water Resource and Hydropower Research, Beijing 100038; 2. Research Center on Flood & Drought Disaster Reduction of the Ministry of Water Resources, Beijing 100038; 3. Shenyang Agricultural University, Shenyang 110000)

**Abstract:** Glacier resources in China are mainly distributed in the Qinghai-Tibet plateau and its surrounding areas. Under the background of global warming, the glaciers on the Tibetan plateau and surrounding areas are in a state of rapid melting as a whole. Rapid change of the glacier reduces its stability, resulting in increased risk of the occurrence of glacier disaster. Glacial lake outburst floods(GLOFS) is the most influential natural disaster among glacier disasters, the frequency of GLOFS increased dramatically since the 21st century. The future increase in temperature and precipitation will accelerate the degradation of glaciers, and rising temperature, increasing glacier meltwater, abundant precipitation, and more extreme weather conditions will increase the risk of GLOFS. Through sorting out the development trend of typical historical disaster events and the risk of glacial lake outburst flood under climate change, the paper puts forward suggestions for glacial lake disaster response, that is, deployment check and survey and establishment of a list of key areas; Establish a long-term cooperation mechanism with multiple departments and do a good job of coordination; Strengthen risk early warning in key regions; Study the mechanism and risk of glacial lake outburst flood and overflow dam-break flood; Do a good job in emergency response and guide local authorities formulating forecast scheme.

**Keywords:** glacial lake; glacial lake outburst flood; flood disaster

责任编辑 姚力玮