

# 国内外冰碛湖溃决研究进展

刘建康<sup>1,2</sup>, 周路旭<sup>1,3</sup>

(1.中国地质科学院探矿工艺研究所,四川成都 611734; 2.中国地质调查局地质灾害防治技术中心,四川成都 611734; 3.中国地质大学(北京),北京 100083)

**摘要:**末次冰期以来,气候变暖导致全球高山地区的冰川环境变化剧烈,冰碛湖稳定性降低导致溃决频率增加,成为中国、尼泊尔、俄罗斯、秘鲁等 10 多个国家和地区频繁发生的冰川灾害类型之一。冰碛湖溃决诱发形成的洪水和泥石流,由于规模巨大、成灾速度快和波及范围广等特点,造成下游地区的基础设施和生命财产遭受惨重损失。本文通过对国内外冰碛湖溃决事件、溃决诱因、溃决模式和溃决洪水特征 4 个方面研究现状和发展现状的梳理和分析,总结经验思路,从而为冰碛湖溃决研究和评价提供借鉴和参考。

**关键词:**冰湖溃决;冰湖;冰碛湖;冰川灾害

**中图分类号:**P642.23 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2018)08-0044-07

**Research Progress on Moraine Dammed Lake Outburst Flood/LIU Jian-kang<sup>1,2</sup>, ZHOU Lu-xu<sup>1,3</sup>**(1.Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China; 2.Technical Center for Geological Hazard Prevention and Control, CGS, Chengdu Sichuan 611734, China; 3.China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Since the last glacial age, climate warming led to the drastic changes in glacier environment in the global mountain areas, and the decrease of the stability of the Moraine Lakes leads to the increase of outburst frequency, which has become one of the frequent glacial disasters in more than 10 countries and regions all over world included China, Nepal, Russia, Peru and etc. Flood and debris flow induced by moraine lake outburst, due to its large scale, fast forming and wide spread, cause heavy losses of infrastructure, life and property in the downstream area. Through the summarization and analysis on the research situation and development status of Moraine Lake outburst flood events, outburst causes, outburst patterns and features of GLOF, this paper provides reference for the research and evaluation of moraine lake outburst.

**Key words:** GLOF; glacial lake; moraine dammed lake; glacial calamity

## 0 引言

冰碛湖主要是末次冰期以来冰进和冰退的产物。本文为考证冰碛湖形成的准确时间,依托项目“藏东南重要城镇和交通干线地质灾害调查研究”对我国西藏地区 2 个典型冰碛湖——印达普错和然则然错的冰碛坝进行了野外取样和光释光测年,其释光年龄结果分别为  $19.5 \pm 2.1$  ka 和  $13.6 \pm 2.5$  ka,说明冰碛湖冰碛坝体为末次冰期形成而非小冰期,冰川呈总体退缩状态的后小冰期时代应是冰碛湖湖盆形成和规模扩张的主要阶段。

随着全球气候变暖,高海拔地区尤其是热带高海拔地区变暖趋势更为明显,冰川活动性变强,冰碛

坝稳定性变弱,冰湖溃决灾害频繁发生,溃坝形成的大规模洪水和泥石流造成严重的经济损失和人员伤亡,如喜马拉雅山、天山、阿尔卑斯山脉、高加索山脉和科迪勒拉山系等地区<sup>[1-15]</sup>。在喜马拉雅山地区,自 20 世纪 30 年代至 2010 年,有记录的冰湖溃决事件呈增加趋势,累计发生的溃决灾害超过 32 次<sup>[3]</sup>。其中,1985 年尼泊尔的 Dig Tsho 冰湖溃决冲毁刚刚竣工的纳姆奇水电站,直接经济损失达 5 亿美元<sup>[3]</sup>;在欧洲,冰湖溃决洪水和泥石流是冰川灾害中发生频率最高、造成死亡人数最多的类型<sup>[7-10]</sup>;在秘鲁的 Cordillera Blanca 地区,到 21 世纪初冰湖溃决灾害达 21 次,占冰川灾害总数的 70%<sup>[16]</sup>。其中,

收稿日期:2018-07-01

**基金项目:**国家自然科学基金项目“弯道特征对泥石流堵塞系数的影响研究”(编号:41402315);中国地质调查局地质调查项目“藏东南重要城镇和交通干线地质灾害调查”(编号:DD20160279)、“西南山区重大泥石流灾害调查与防治”(编号:12120113011000)

**作者简介:**刘建康,男,汉族,1985 年生,高级工程师,岩土工程专业,博士,主要从事山地灾害形成机制与防治技术方法研究工作,四川省成都市郫都区现代工业港(北区)港华路 139 号,j\_jiankang@foxmail.com。

1941 年的 Cohup 冰湖溃决导致 6000 多人死亡<sup>[15]</sup>; 1971 年的 Huascaran 冰湖溃决并形成泥石流,摧毁下游的 Yungay 镇,近 2000 人在 5 min 之内丧生<sup>[16]</sup>。

由于冰湖及其溃决灾害的特殊性,如地处高寒地区、艰险偏远、政治安全、基础观测和监测资料少等,相关研究受到局限性<sup>[17]</sup>,但是随着遥感技术的发展和成熟,基于 GIS 地理信息系统的冰湖危险性评价体系研究逐渐完善,并成为多个国家和地区针对冰湖溃决危险而制定防灾减灾方案的参考依据之一<sup>[4, 17]</sup>。

本文主要从冰碛湖溃决资料收集、诱发因素、形成机制和溃决洪水特征 4 个方面,总结国内外冰碛湖溃决的研究现状和发展趋势,并结合项目实施过程中的经验和教训提出思路和想法,从而为冰碛湖溃决研究和评价提供借鉴和参考。

## 1 冰碛湖溃决事件

冰碛湖溃决事件是理论研究的基础原型和关键

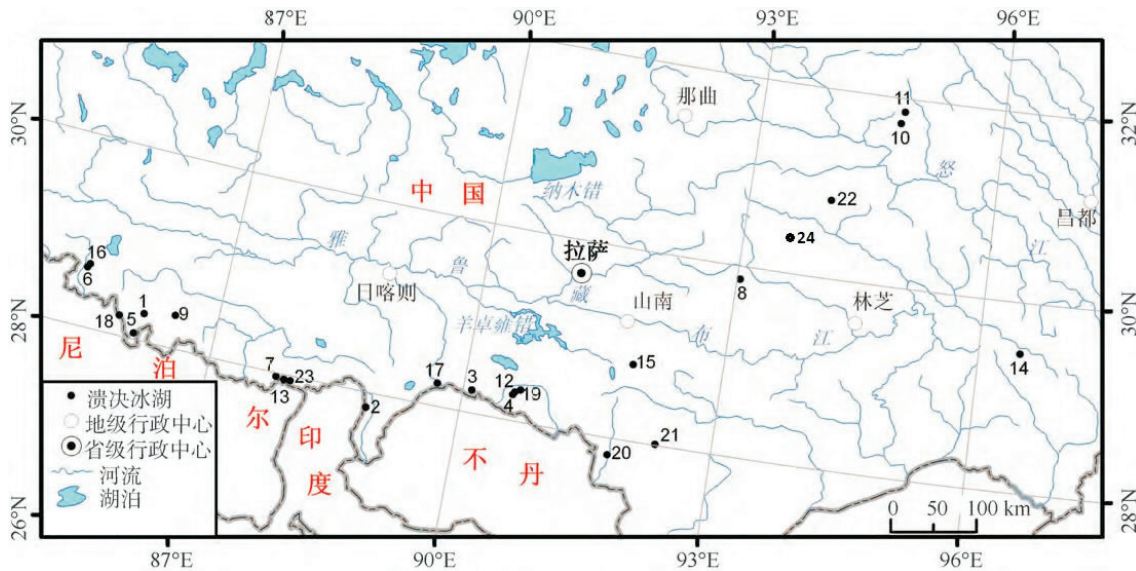
环节,但由于灾害的特殊性,收集和整理工作难度较大,通过调访而缺少实地调查导致的资料信息不完整或不准确是主要问题。截止目前,全球多个高山国家对部分溃决冰碛湖开展了调查研究,如喜马拉雅山<sup>[3-5]</sup>、天山<sup>[6]</sup>、阿尔卑斯山脉<sup>[7-10]</sup>、高加索山脉<sup>[11]</sup>和科迪勒拉山系<sup>[12-15]</sup>。受限于地理、政治或暴发年代久远等原因,现场调查的数量有限且精度差异较大,导致文献资料对冰碛湖溃决灾害描述的详实程度不一。2002 年,Würmli 初步梳理了全世界冰湖溃决事件,但由于资料完整性差异导致属性信息单一,但为全球资料数据库的建设和共享提供了借鉴<sup>[18]</sup>。2013 年起,国际滑坡合作项目(IPL)“冰湖溃决洪水数据库”(项目编号:179)立项开展,通过期刊文献、报告和数据等手段共收集了约 130 个冰碛湖溃决事件资料<sup>[18]</sup>,该项目正在完善补充阶段。根据文献总体对比和总结,现阶段冰碛湖溃决事件的信息完整程度由高到低分别为地理位置、暴发时间、冰湖尺寸、溃口参数、终碛堤参数和溃决洪水参数(表 1)。

表 1 冰碛湖溃决事件资料信息完整度总览

序号	资料信息	获取方法	完整程度	不完整或不准确原因
1	地理位置	遥感解译和现场调查复核	高	信息来源地方志或调访,具体位置不详,但可通过后期遥感解译定位补充完善
2	暴发时间	地方志、报告或调访	较高	年代久远无人记载,地理位置偏远
3	冰湖规模	遥感解译和现场勘查	一般	平面尺寸遥感解译获取,分辨率导致误差;水下地形需现场勘查测量,开展工作较少
4	溃口参数	遥感解译和现场勘查	较低	遥感解译溃口长宽尺寸误差较大;溃口横纵剖面则需现场勘查测量,开展工作较少
5	终碛堤参数	遥感解译和现场勘查	低	遥感解译堤坝横纵剖面误差较大;坝体形成年代和级配组成需现场采样测试,开展工作较少;较少埋藏冰和管涌分布情况需物探测量,开展工作极少
6	溃决洪水参数	现场勘查测量	极低	根据溃口尺寸和泥痕估算流量和流速等,误差较大,现场沿程测量工作极少

在我国,青藏高原冰川发育广泛,冰湖分布众多。研究表明,近 30 年来我国喜马拉雅山地区的冰湖变化总体呈现“数量减少、面积增大”的趋势<sup>[17,19]</sup>:数量由 1750 个减少到 1630 个,减少 7%;总面积由 168.53 km<sup>2</sup> 增加到 206.04 km<sup>2</sup>,增率达 22%。其中,该地区的 143 个冰湖具有潜在危险性,溃决概率等级判定为“高”及以上的有 91 个<sup>[17,19]</sup>。受全球气候变化影响,冰川环境逐渐恶化,如高温、多雨、雪崩以及冰跃动等,导致该地区的冰湖溃决洪水和泥石流活动在未来时间内将处于一段活跃期<sup>[20-21]</sup>,对下游地区的城镇设施和群众安全构成巨大威胁。冰碛湖溃决事件一般发生在海洋性冰川向大陆性冰川过渡地带(除光谢错外)<sup>[22]</sup>,所形成的洪水和泥石流造成严重危害。最新资料统计显示,自

20 世纪 30 年代到目前为止,该区共有 24 处冰碛湖先后发生了 28 次溃决<sup>[23]</sup>(图 1)。其中,规模最大的冰碛湖溃决事件是 1954 年的康马县桑旺错,形成的特大洪水和泥石流造成约 400 人死亡,2 万多人受灾,并使位于中、下游的江孜和日喀则等人口重镇遭受严重危害<sup>[21]</sup>;2013 年嘉黎县然则然错是最近一次冰碛湖溃决,灾害导致下游村庄人员失踪,房屋、桥梁和道路等基础设施严重破坏,直接经济损失达 2.7 亿元<sup>[24]</sup>。西藏地区的溃决冰碛湖中,约 70% 事件有不同程度的野外考察研究<sup>[17]</sup>,为国内冰碛湖溃决研究提供了宝贵的基础资料。由于部分冰碛湖溃决缺少详细调查,资料信息完整程度低,溃决原因常被归纳为未知或综合因素所致,因此有必要在下一步研究工作中继续完善和补充。



1—塔阿错;2—穷比吓玛错;3—桑旺错;4—鲁惹错;5—次仁玛措(章藏布错);6—隆达错;7—吉莱错;8—达门拉咳错;9—阿亚错;10—波戈错;11—波戈冰川湖;12—扎日错;13—印达普错;14—光谢错;15—夏嘎错;16—扎那泊;17—龙纠错;18—嘉龙错;19—德嘎错;20—浪措;21—折卖错;22—错噶;23—给曲冰湖;24—然则然错

图1 20世纪以来西藏地区溃决冰碛湖分布(据文献[23]修改)

## 2 冰碛湖溃决诱因

Yamada<sup>[25]</sup>在喜马拉雅山南坡地区(尼泊尔境内)冰湖研究中,将冰碛湖溃决诱因归纳划分为外部原因(冰/雪崩、强降雨和地震等)和内部原因(埋藏冰消融、管涌和冰碛坝失稳等)两类,Haerberli<sup>[26]</sup>、Clauge和Evans<sup>[15,27]</sup>和徐道明<sup>[28]</sup>等则研究分析了导致冰碛湖溃决的各类型诱发因素,王欣<sup>[17]</sup>通过收集国内外50处有诱因记录冰碛湖溃决事件,对诱发因素进行了全面总结,本文按照出现频次梳理了以下8个主要类型。

### 2.1 冰崩/冰滑坡

冰川前进、冰床坡度陡增或发育陡坎、冰雪融水和地震等作用引起湖盆周围悬冰川、山顶冰川或冰川末端滑塌入湖,抬高湖面水位,激起涌浪和冲击波,冲刷或直接冲垮冰碛坝薄弱鞍部,导致冰湖溃决。冰滑/崩是西藏地区冰碛湖溃决的主要诱因,李吉均<sup>[22]</sup>提出了“水枕”机制,当冰川前部由于消融水流强烈下渗,融水热融不断切割冰体,从冰体中解脱出来的冰碛物和坠落、下塌冰块堵塞汇水通道时,裂隙、孔隙和冰下空洞的水位将急剧上升,浮冰作用使冰舌的缓慢运动状态被打破,瞬间转为高速运动,冰川以冰崩或快速运动的冰滑坡形式涌入湖内,导致冰湖溃决;吕儒仁等<sup>[29]</sup>提出了“应力释放”机制,当

处于相对湿冷年份时,冰川物质积累,向前运动速度小,而紧接着出现气候转暖时冰雪融水沿冰裂隙下渗冰川前部,润滑冰床,冰川以冰崩或快速运动的冰滑坡形式拥入湖内,导致冰湖溃决。

### 2.2 埋藏冰消融

受全球气候变暖影响,埋藏冰发生消融崩解,一方面造成冰碛坝下沉导致漫顶过流湖水量增加,溃决风险增加<sup>[30]</sup>。据观察,尼泊尔Imja冰碛坝下沉速度达2.7 m/a, TshoRolpa冰碛坝下沉速度也达2.0 m/a<sup>[31]</sup>;另一方面激发冰碛坝内部形成潜蚀,诱发渗透变形,诱发冰碛湖管涌溃决。

### 2.3 冰雪融水

受气候条件变化影响,湖盆集水流域的冰川或积雪强烈消融,湖面水位急剧上升,导致冰碛坝漫顶过流增加,溃决风险增加。

### 2.4 强降雨

由于冰碛湖分布海拔高度为4600~5600 m<sup>[28]</sup>,湖盆集水流域的地形雨特征明显,一旦暴发强降雨,汇流导致湖面水位急剧上升,漫顶过流增加,溃决风险随之增加。

### 2.5 岩/雪崩

类似冰崩,湖盆周围岩/雪崩落涌入冰湖,湖面水位急剧上升,激起涌浪和冲击波,冲刷或直接冲垮冰碛坝,导致冰湖溃决。与冰崩的不同在于,该类型

诱因出现频次较低,主要发生在非喜马拉雅山地区。

## 2.6 冰川快速滑动/跃动

冰川快速滑动/跃动拥入湖内,湖面水位剧增,激起涌浪和冲击波,导致冰湖溃决。

## 2.7 地震

地震作用造成冰碛坝发生垮塌或滑坡,或地震形成的涌浪击溃冰碛坝,导致冰湖溃决。

## 2.8 多种诱因组合

组合型是冰碛湖溃决的常见诱因之一,如 1998 年 9 月 3 日尼泊尔境内的 Tam Pokhari 冰碛湖,即在湖盆集水流域强降雨、地震和冰崩等多种外力因素综合作用下发生的溃决<sup>[17]</sup>。

## 3 冰碛湖溃决模式

刘宁等<sup>[32]</sup>在堰塞湖研究中,将天然堰塞坝溃决模式划分为坝顶溢流、坝坡失稳、渗透管涌和人工诱发 4 个种类。冰碛坝是堰塞坝的一种特殊类型,刘晶晶等<sup>[33]</sup>综合前人研究,总结分析了漫顶溃坝和管涌溃坝 2 种主要溃决模式的形成机制。王欣等<sup>[17]</sup>通过国内外冰碛湖溃决事件提出了漫顶溃坝、漫顶流溃坝、管涌溃坝、瞬间溃坝和多种溃决机制组合 5 种冰碛湖溃决模式。本文通过总结前人研究成果,将冰碛湖溃决模式按照堰塞湖溃坝分类方法划定为 3 类,并分别对各溃决模式进行进一步分类和说明(见表 2)。

表 2 冰碛湖溃决模式分类

序号	溃决模式	细分	溃决特征	主要诱发因素
1	漫顶溃坝	涌浪漫顶溃坝	瞬间部分全溃 逐渐溃	冰崩、冰滑坡、雪崩、岩崩、地震和冰跃动
		溢流漫顶溃坝	逐渐溃	冰雪融水、强降雨、人工不合理开挖泄洪渠和埋藏冰融化
2	管涌溃坝		逐渐溃	埋藏冰融化
3	坝坡失稳溃坝		逐渐溃	冰湖水位变化、涌浪、地震和埋藏冰融化等

### 3.1 漫顶溃坝

最常见的冰碛湖溃决模式,其机制核心在于漫顶水流剪切力超过坝体冰碛物的抗冲临界值,在薄弱部位引起冲刷,形成溃口并最终发展成为溃坝。蒋忠信等<sup>[34]</sup>通过理论推导,提出冰碛湖坝顶溢流型溃决的临界水力条件,即溢流总水头超过临界阈值则发生漫顶溃坝,反之亦然。根据诱因类型和是否发生涌浪,本文将漫顶溃坝溃决模式细分为以下 2 类。

#### 3.1.1 涌浪漫顶溃坝

冰崩、冰滑坡、雪崩、岩崩和冰跃动等诱因造成大量固体物质拥入湖内,除抬高湖面水位增加漫顶水头外,激起的涌浪和冲击波也对溃决模式具有重要影响。当涌浪条件充分时,冲击波直接击垮冰碛坝发生瞬间部分全溃,如 1964 年 9 月 21 日定结县吉莱普错冰碛湖溃决,经测量推断巨浪高度达到 6 m 以上<sup>[29]</sup>;当涌浪条件不足以一次性冲溃冰碛坝时,坝顶在循环涌浪和湖面抬高水头增加的共同作用下,被冲刷形成溃口发生逐渐溃决,而涌浪规模则决定了初始溃口的形成和冲刷下蚀的速率<sup>[35-36]</sup>。Awal 等<sup>[37]</sup>制作了长 250 cm,宽 30 cm 的水槽,采用实体块件模拟冰崩体,通过改变释放高度得到不同规模的涌浪规模,研究了不同涌浪条件下溃坝产生

的溃决洪水特征;当不能发生一次性瞬间溃决且湖区水位因无固体物质拥入而水位不变时,坝顶仅在循环涌浪作用下,被冲刷形成溃口发生逐渐溃决。Balmforth 等<sup>[38]</sup>制作了长 125 cm、宽度可调范围为 5~20 cm 的水槽,采用桨叶起浪装置,研究了静水位不变情况下涌浪条件对溃口侵蚀速率、溃决过程和溃决洪水的影响。

#### 3.1.2 溢流漫顶溃坝

冰雪融水和强降雨等汇流入湖、人工不合理开挖泄洪渠或冰碛坝内部埋藏冰融化引起坝顶降低导致过流水量增加,冲刷发生,冰碛物被带走,从而发生逐渐溃决。与江河滑坡泥石流堰塞湖溃决特征相比,前两者具有更多的共性,后者则具有高寒地区冰川冻土灾害的个性,其对气候变暖的敏感性给冰碛坝稳定性增添了诸多变数,导致溃决机制更加复杂多样<sup>[17]</sup>。

### 3.2 管涌溃坝

由于冰碛坝结构松散和埋藏冰发育,受气候变化影响,死冰消融引起内部渗透潜蚀加剧,导致管涌的发生和扩张,最终造成坝体溃决。

### 3.3 坝坡失稳溃坝

由于冰湖水位变化、涌浪侵蚀坝面、地震破坏和埋藏冰融化等诱因,冰碛坝陡倾的迎水坡或背水坡

发生失稳导致坝体崩滑破坏,湖水漫顶或阻水应力低于湖水压力而诱发溃决。Hubbard 等人<sup>[39]</sup>通过对 Laguna Safuna Alta 冰碛坝抗剪强度参数的测量及其坝体稳定性的模拟计算,提出气候变暖是导致冰碛坝稳定性降低的主要原因。

#### 4 冰碛湖溃决洪水特征

冰碛湖溃决形成的特大规模洪水或泥石流将对下游地区造成极其严重的灾难,3个特征参数指标是评价冰碛湖溃决危险性的重要依据:溃决洪峰流量、洪水演进和泥石流形成的临界条件。

##### 4.1 溃决洪峰流量

目前,国内外研究成果可以直接应用于冰碛湖溃决流量计算的公式较少,洪峰流量一般借助于经验回归公式或已有的土石坝溃决模型进行计算。关于堰塞湖溃决流量过程的计算方法主要有3种<sup>[32]</sup>。

第一种是通过溃决坝体(混凝土和土石水工坝,滑坡坝,泥石流坝,冰川侧碛、终碛堤等)的坝高和库容计算洪峰流量的经验公式,或是通过溃决参数(溃口宽度、深度等)计算洪峰流量的半经验理论公式,常见计算公式见表3。计算方法优点在于简单,但存在问题是计算误差较大,经验要求较高,适用性较低。

表3 常见土石坝溃决洪峰流量经验计算公式

序号	作者	预测公式
1	Kirkpatrick <sup>[40]</sup>	$Q_m = 2.297(H+1)^{2.5}$
2	美国垦务局	$Q_m = 19.1H_d^{1.85}$
3	美国垦务局	$Q_m = 48H_d^{1.63}$
4	Costa <sup>[41]</sup>	$Q_m = 2950(W \times 10^{-6})^{0.57}$
5	Hagen <sup>[42]</sup>	$Q_m = 370(HW \times 10^{-6})^{0.5}$
6	Singh and Snorrason <sup>[43]</sup>	$Q_m = 13.4H_d^{1.89}$
7	Singh and Snorrason <sup>[43]</sup>	$Q_m = 1.776W^{0.47}$
8	Evans <sup>[44]</sup>	$Q_m = 0.720W^{0.53}$
9	Froehlich <sup>[45]</sup>	$Q_m = 0.607H^{1.24}W^{0.295}$
10	Webby <sup>[46]</sup>	$Q_m = 0.0443g^{0.5}H_d^{1.4}W^{0.365}$
11	黄河水利委员会 <sup>[47]</sup>	$Q_m = 0.296\sqrt{g}(B_w/b)^{0.4}bH^{1.5}$
12	白世录 <sup>[48]</sup>	$Q_m = 0.296\sqrt{g}bH^{1.5}$
13	肖克利奇 <sup>[49]</sup>	$Q_m = 0.9(B_w/b)^{0.25}bH^{1.5}$
14	美国水道实验站 <sup>[49]</sup>	$Q_m = 0.29\sqrt{g}(B_w/b)^{0.25}bH^{1.5}$
15	波堰流相交 <sup>[49]</sup>	$Q_m = 0.9bH^{1.5}$

注:  $Q_m$ —峰值流量,  $m^3/s$ ;  $B_w$ —坝顶宽度,  $m$ ;  $b$ —溃口平均宽度,  $m$ ;  $H$ —湖区水深,  $m$ ;  $W$ —湖区库容,  $m^3$ ;  $H_d$ —坝高,  $m$ 。

第二种是基于参数的计算方法,主要是利用土石坝溃决参数(溃口宽度、深度、溃决历时等),通过时间的变化过程(如溃口下切,侧蚀线性变化)计算

溃决洪水的流量变化过程。其中影响较大的是 Fread<sup>[50-51]</sup>研发的 Dam Break 和 BREACH 模型,具有模型简单、对数据输入要求较少和使用较为方便等特征,可对冰碛湖溃决进行计算,但难点在于需要已知溃口最终形状以及溃口形成的时间等参数。

第三种是基于土石坝溃口发展的物理模型。通过综合水力学、泥沙、土力学等学科知识,构建一个时变过程以模拟实际溃坝过程和溃坝洪水过程线。

根据本文进展综述对冰碛湖溃决模式的类型划分,对于溢流漫顶或管涌引起的冰碛湖溃决,可以借鉴上述土石坝溃决模型并调整参数输入得出较为合理溃决过程、峰值流量、洪水过程线等重要参数,例如 DamBreak 模型和 BREACH 模型<sup>[50-51]</sup>。但是对于绝大部分涌浪漫顶诱发的冰碛湖溃决来讲,溃口的形成时间或溃口的发展速率主要决定于涌浪规模,冰碛坝是发生瞬间局部溃决还是逐渐溃决是溃决洪水的关键参数。因此,亟待建立涌浪条件与溃口形成机制和溃决形成机制的计算模型,以更精确预测冰碛湖溃决的洪峰流量。

##### 4.2 洪水演进和泥石流形成的临界条件

堰塞湖溃决洪水演进依据公式(1)进行估算,但因模型简单导致计算误差较大。

$$Q_n = \frac{W}{\frac{W}{Q_m} + \frac{L}{VK}} \quad (1)$$

式中:  $Q_n$ ——洪水演进至下游某处的洪峰流量,  $m^3/s$ ;  $W$ ——冰碛湖溃决时的库容,  $m^3$ ;  $L$ ——下游某处距溃口距离,  $m$ ;  $V$ ——河道洪水期断面最大平均流速,  $5 m/s$ ;  $K$ ——经验系数。

沟道地形条件,断面形状、水力坡降、松散物的分布及物质组成等,不仅影响溃决洪水的能量耗散和危害范围<sup>[15-52]</sup>,还将对溃决洪水演变成泥石流的过程起到重要作用<sup>[15,29,53-55]</sup>。其中,高陡狭窄的沟道地形将降低洪水耗散率,而平缓宽阔则增加耗散率,从而前者的危害较后者更广<sup>[15,52]</sup>;松散物源充分条件下,冰湖溃决泥石流在坡度  $8^\circ$  以下将发生淤积,  $4^\circ$  以下则严重淤积并演变成含沙水流<sup>[53-55]</sup>。不同的是,国内学者根据西藏冰湖溃决的案例,认为冰湖溃决泥石流形成的底限临界坡度为  $3\%$ ,粘性泥石流则为  $5\%$ <sup>[29]</sup>。党超<sup>[56]</sup>在水力类泥石流起动机理的研究成果基础上,通过改变模型试验中的三个参数变量:单宽峰值流量、坡度和颗粒级配,

研究得到冰湖溃决泥石流形成的临界条件。此外,冰碛湖溃决洪水或泥石流在演进过程中,极易在支沟交汇处堵断主沟或主河,形成临时堰塞坝,发生二次溃决洪水叠加诱发更为严重的次生灾害链,是冰湖溃决灾害的重要特征之一<sup>[57]</sup>。2013 年嘉黎县忠玉乡的然则然错冰湖溃决,分别在交汇处主河形成 2 处堰塞湖,溃决风险性高,是冰湖溃决后遗留的重大安全隐患和灾后抢险的首要任务。

## 5 结论

通过国内外冰碛湖溃决研究现状和发展现状的梳理总结,得到以下几点结论供参考。

(1)冰碛湖溃决事件是研究的基础,但由于诸多客观因素,资料信息缺乏质量较高的完整度,因此通过调查查漏补缺形成并完善数据库是研究的重要工作内容。

(2)冰碛湖溃决诱因是形成机制的重要组成部分,本文总结了前人提出的 8 种诱发因素类型,但由于冰碛湖溃决事件调查资料信息的完整度较低,存在个别事件诱因亟待进一步查明。

(3)冰碛湖溃决模式是形成机制的关键组成部分,影响溃决洪水的形成和发展,继而影响冰碛湖溃决危险性评价指标的判定。现阶段,全球气候变暖趋势下埋藏冰融化诱发的冰碛湖溃决和涌浪条件对冰碛湖溃决模式的影响,急需深入细化研究以揭示其复杂的形成机制。

(4)冰碛湖溃决洪水特征是冰碛湖溃决危险性评价的重要依据,现阶段主要依据土石坝溃决洪水参数的方法模型进行估算,但因冰碛湖溃决具有埋藏冰融化或涌浪作用等额外影响,简单借鉴套用将导致计算结果存在较大误差,因此需要结合冰碛湖溃决形成机制的研究成果进行深入分析和经验调整。

## 参考文献:

[1] Org W M, Professor Strachan. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)[J]. United Nations, 2007, 114(D14): 48-56.

[2] M. Beniston, H. F. Diaz, R. S. Bradley. Climatic Change At High Elevation Sites: An Overview[J]. Climatic Change, 1997, 36(3-4): 233-251.

[3] Shaun D Richardson, John M Reynolds. An overview of glacial hazards in the Himalayas[J]. Quaternary International, 2000, 65(99): 31-47.

[4] Iturrizaga L. Historical glacier-dammed lakes and outburst floods in the Karambar valley (Hindukush-Karakoram)[J]. Geojournal, 2005, 62/63(1-4): 1-47.

[5] Cenderelli D A, Wohl E E. Peak discharge estimates of glacial-lake outburst floods and "normal" climatic floods in the Mount Everest region, Nepal[J]. Geomorphology, 2001, 40(1): 57-90.

[6] Janský B, Engel Z, Šobr, M, et al. The evolution of Petrov lake and moraine dam rupture risk (Tien-Shan, Kyrgyzstan). [J]. Natural Hazards, 2009, 50(1): 83-96.

[7] Huggel C, Kääb A, Haeblerli W, et al. Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: a case study in the Swiss Alps[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008, 39(2): 316-330.

[8] Huggel C, Kääb A, Haeblerli W, et al. Regional-scale GIS-models for assessment of hazards from glacier lake outbursts: evaluation and application in the Swiss Alps[J]. Natural Hazards & Earth System Sciences, 2003, 3(6): 647-662.

[9] Huggel C, Haeblerli W, Kääb A, et al. An assessment procedure for glacial hazards in the Swiss Alps[J]. Revue Canadienne De Géotechnique, 2004, 41(6): 1068-1083.

[10] Haeblerli W. Frequency and Characteristics of Glacier Floods in the Swiss Alps[J]. Annals of Glaciology, 2017, 4(4): 85-90.

[11] Seinova IB, Zolotarey E. The evolution of glaciers and debris flow in the vicinity of Elbrus, Central Caucasus[C]// In: D. Richenmann & C. Cheng-lung (Eds). 3rd International conference on Debris flow Hazards Mitigation, Mechanics, Prediction and Assessment, Davos, 2003: 189-198.

[12] Louis L, Benjamā-N M A, Andrā P, et al. Glaciological Problems Set by the Control of Dangerous Lakes in Cordillera Blanca, Peru. I. Historical Failures of Morainic Dams, their Causes and Prevention[J]. Journal of Glaciology, 1972, 18(79): 239-254.

[13] Hoblitt R P, Walder J S, Driedger C L, et al. Volcano hazards from Mount Rainier, Washington[J]. U. s. geological Survey, 1998.

[14] Clague J J, Evans S G. The 1994 jökulhlaup at Farrow Creek, British Columbia, Canada[J]. Geomorphology, 1997, 19(1-2): 77-87.

[15] Clague J J, Evans S G. A review of catastrophic drainage of moraine-dammed lakes in British Columbia[J]. Quaternary Science Reviews, 2000, 19(17): 1763-1783.

[16] Mark Carey. Living and dying with glaciers: people's historical vulnerability to avalanches and outburst floods in Peru[J]. Global and Planetary Change, 2005, 47(2): 122-134.

[17] 王欣, 刘时银, 丁永建. 中国喜马拉雅山冰碛湖溃决灾害评价方法与应用研究[M]. 北京: 科学出版社, 2016.

[18] Vilimek V, Emmer A, Huggel C, et al. Database of glacial lake outburst floods (GLOFs) - IPL project No. 179[J]. Landslides, 2014, 11(1): 161-165.

[19] 王欣. 我国喜马拉雅山冰碛湖溃决灾害评价方法与应用研究[D]. 甘肃兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2008.

[20] 程尊兰, 朱平一, 党超, 等. 藏东南冰湖溃决泥石流灾害及其发

- 展趋势[J].冰川冻土,2008,30(6):954—959.
- [21] 程尊兰,田金昌,张正波,等.藏东南冰湖溃决泥石流形成的气候因素与发展趋势[J].地学前缘,2009,16(6):207—214.
- [22] 李吉均.西藏冰川[M].北京:科学出版社,1986.
- [23] 姚晓军,刘时银,孙美平,等.20世纪以来西藏冰湖溃决灾害事件梳理[J].自然资源学报,2014,(8):1377—1390.
- [24] 孙美平,刘时银,姚晓军,等.2013年西藏嘉黎县“7.5”冰湖溃决洪水成因及潜在危害[J].冰川冻土,2014,36(1):158—165.
- [25] Yamada T. Glacier lakes and their outburst floods in the Nepal Himalaya[J]. Report of Water & Energy Commission Secretariat Kathmandu Nepal,1993.
- [26] Wilfried Haerberli. On the morphodynamics of iceldebris-transport systems in cold mountain areas [J]. Norsk-GeografiskTidsskrift,1996,50(1):3—9.
- [27] Clague JJ, Evans SG. Formation and failure of natural dams in the Canadian Cordillera[R]. Geological Survey of Canada: 1994, Bulletin:464
- [28] 徐道明,冯清华.西藏喜马拉雅山区危险冰湖及其溃决特征[J].地理学报,1989,(3):343—352.
- [29] 吕儒仁,等.西藏泥石流与环境[M].四川成都:科技大学出版社,1999.
- [30] Yamada T. Glacier lake and its outburst flood in the Nepal Himalaya[J]. Monographs of the Data Center for Glacier Research,1998.
- [31] Watanabe T. Imja Glacier Dead-Ice Melt Rates and Changes in a Supra-Glacial Lake, 1989—1994, KhumbuHimal, Nepal; Danger of Lake Drainage[J]. Mountain Research & Development,1995,15(4):293.
- [32] 刘宁,程尊兰,崔鹏,等.堰塞湖及其风险控制[M].北京:科学出版社,2013.
- [33] 刘晶晶,程尊兰,李泳,等.西藏冰湖溃决主要特征[J].灾害学,2008,23(1):55—60.
- [34] 蒋忠信,崔鹏,蒋良淮.冰碛湖漫溢型溃决临界水文条件[J].铁道工程学报,2004,21(4):21—26.
- [35] 刘建康.涌浪条件下冰湖溃坝的模拟实验研究[D].北京:中国科学院大学,2013.
- [36] 黄金辉,刘建康,程尊兰,等.涌浪规模对冰碛湖溃决的影响实验[J].山地学报,2014,32(2):241—248.
- [37] Awal R, Nakagawa H, Kawaike K, et al. Study on moraine dam failure and resulting flood/debris flow hydrograph due to waves overtopping and erosion[J]. KlinischePdiatrie, 2011, 184(3):385—402.
- [38] Balmforth N J, Von Hardenberg J, Provenzale A, et al. Dam breaking by wave-induced erosional incision[J]. Journal of Geophysical Research Earth Surface,2008,113, F01020, doi: 10.1029/2007JF000756.
- [39] Hubbard B, Heald A, Reynolds J M, et al. Impact of a rock avalanche on a moraine-dammed proglacial lake: Laguna Safuna Alta, Cordillera Blanca, Peru[J]. Earth Surface Processes & Landforms,2010,30(10):1251—1264.
- [40] Kirkpatrick G W. Evaluation guidelines for spillway adequacy [C]// Evaluation of Dam Safety; Proceedings of the Engineering Foundation Conference.1977:395—414.
- [41] Costa J E. Floods From Dam Failures[J]. Flood Geomorphology,1985.
- [42] Hagen, VK. Re-evaluation of design floods and dam safety [C]// Paper presented at 14th International Commission on Large Dams Congress, Rio de Janeiro.1982:475—491.
- [43] Singh K P, Snorrason A. Sensitivity of outflow peaks and flood stages to the selection of dam breach parameters and simulation models[J]. Journal of Hydrology, 1984, 68(1): 295—310.
- [44] Evans S G. The maximum discharge of outburst floods caused by the breaching of man-made and natural dams: Reply[J]. Canadian Geotechnical Journal,1986,24(3):470—470.
- [45] Froehlich D C. Peak Outflow from Breached Embankment Dam[J]. Journal of Water Resources Planning & Management,1995,121(1):90—97.
- [46] Webby M G. Discussion of “Peak Outflow from Breached Embankment Dam” by M. Grant Webby[J]. Journal of Water Resources Planning & Management,1996,122(4):316—317.
- [47] 黄河水利委员会科研所情报资料室.溃坝水流计算方法 and 初步探讨[J].水利科技情况,1977,(8):1—5.
- [48] 白世录.土坝溃坝流量计算方法的研究[J].水利水电工程设计,1990,(2):40—47.
- [49] 谢任之.溃坝水力学[M].山东济南:山东科学技术出版社,1993.
- [50] Fread, D L. The development and testing of a dam-break flood forecasting model[C]// In: Proceedings of Dam-break flood Routing Model workshop Held in Bethesda, Maryland on October 18—20, Water Resour. Couns., Washington, D. C.1977:164—197.
- [51] Fread DL. BREACH: An Erosion Model for Earthen Dam Failures[R]. National Weather Service (NWS) Report, NOAA, Silver Spring, MA,1988.
- [52] Costa, J. E. The formation and failure of natural dams[J]. Geological Society of America Bulletin,1988,100(7):1054—1068.
- [53] O'Connor J E, Hardison J H, Costa J E. Debris flows from failures of Neoglacial-age moraine dams in the Three Sisters and Mount Jefferson wilderness areas, Oregon[J]. Economic Theory,2001,4(1):11—40.
- [54] Pierson T C, Scott K M. Downstream Dilution of a Lahar: Transition From Debris Flow to Hyperconcentrated Stream-flow[J]. Water Resources Research, 1985, 21(10): 1511—1524.
- [55] O'Connor J E, Baker V R. Magnitudes and implications of peak discharges from glacial Lake Missoula[J]. Geological Society of America Bulletin, 1992, 104(3):267—279.
- [56] 党超.藏东南冰湖溃决泥石流形成机制[D].四川成都:中国科学院·水利部成都山地灾害与环境研究所,2009.
- [57] 刘建康,程尊兰,郭芬芬,等.藏东南典型冰湖溃决危险性分析[J].灾害学,2011,26(2):45—49.