



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.06.017

常鸣, 唐川, 窦向阳. 藏东南典型冰湖溃决机制及危险性研究[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(6): 115-121. CHANG M, TANG C, DOU X Y. Mechanism and hazards of typical glacier lake burst in Southeastern Tibet[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(6): 115-121. (in Chinese)

藏东南典型冰湖溃决机制及危险性研究

常 鸣, 唐 川, 窦向阳

(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059)

摘要: 我国西藏地区冰湖分布十分广泛, 随着时间的推移, 气温逐渐升高, 一些冰湖出现消融现象, 部分冰湖溃决直接导致灾害级联效应产生, 进一步诱发了洪水、泥石流等次生灾害, 因此及时开展冰湖溃决机制及其危险性研究十分必要。为了更好地详细分析冰湖溃决的机制及致灾危险性模式, 重点选取西藏波密县米堆沟泥石流的源头光谢错为研究对象, 开展了野外调查取样、室内物理实验及高精度遥感解译等一系列工作, 分析结果表明光谢错溃决外因是由异常气候和水文条件诱发的, 内因是在终碛堤溃决过程中存在溢流型和管涌型两种机制。光谢错溃决后逐步完成了由洪水向稀性泥石流的转变过程, 泥石流的运移严重威胁到沟道两岸村庄、道路及耕地的安全。通过对光谢错溃决机制的研究能够为藏东南地区冰湖溃决的防治及预警提供科学的依据。

关键词: 西藏; 冰湖; 溃决机制; 危险性

中图分类号: P642; P343.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)06-0115-07

Mechanism and hazards of typical glacier lake burst in Southeastern Tibet

CHANG Ming, TANG Chuan, DOU Xiangyang

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment

Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Many glacier lakes are distributed in Tibet, China. With the passage of time, the temperature gradually raises, and some glacier lakes begin to melt. Their bursts will directly result in disastrous cascade effects and induce secondary disasters such as flood and debris flow. Therefore, it is imperative to timely carry out the study on the mechanism and hazards of glacier lake bursts. In order to better analyze the mechanism and hazard models of glacier lake bursts, we selected the Guangxiecuo glacier lake of Midui Gully in Tibet as the research object, and conducted a series of work including field investigation and sampling, indoor physical experiment, and high resolution remote sensing interpretation. The analysis results showed that the burst of Guangxiecuo lake was externally caused by abnormal climate and hydrological conditions and internally caused by the overflow type and piping type mechanisms during the burst of the terminal moraine dam. After the burst, the flood gradually transitioned to debris flow. The migration of debris flow seriously threatens the villages, roads, and cultivated land on both sides of the channel. The mechanism research can provide scientific basis for prevention and early warning of glacier lake bursts in the future.

Key words: Tibet; glacier lake; burst mechanism; hazard

收稿日期: 2016-12-23 修回日期: 2017-07-05 网络出版时间: 2017-11-16

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20171116.1130.007.html>

基金项目: 国家自然科学基金(41702312); 四川省教育厅科研项目(17ZB0054); 四川省教育厅高校人文社科重点研究基地气象灾害预测预警与应急管理研究中心(ZHYJ17-YB07)

Funds: National Natural Science Foundation of China (41702312); Sichuan Provincial Department of Education of China (17ZB0054) The Forecasting and Emergency Management of Meteorological Disasters (ZHYJ17-YB07)

作者简介: 常 鸣(1985-), 男, 山东人, 博士, 主要从事环境地质、地质灾害、遥感与GIS应用方面研究。E-mail: changmxq@126.com.

在 21 世纪全球变暖影响下各地冰川普遍出现消融现象^[1]。全球高海拔或在温度剧烈变化的高山地区通常会分布大量的冰川泥石流, 它们的分布密度与冰川所在区的物理性质、水热条件及地形地势密切相关^[2], 例如在加拿大、冰岛、挪威、帕米尔和我国喜马拉雅山、西藏等高海拔地区分布大量的冰川。我国西藏境内冰碛湖溃决为最为常见的灾害形式, 50 年以来在该区至少有 20 余次较大的冰碛湖溃决事件发生^[3,4]。一旦冰碛湖溃决导致洪水、泥石流发生会给出下游沟道中及两岸的桥梁、公路、居民点带来非常重大的灾难, 严重威胁当地群众的生命财产安全^[5,6]。近 20 年来, 消融后退是大多数冰川所处的阶段, 尤其

是在我国藏东南地区, 冰川的消融引发一系列级联效应, 间接导致了冰湖溃决、泥石流等灾害的发生^[7-8]。

我国西藏冰湖的分布基本上由东南向西北方向呈递减趋势, 其中林芝地区分布的冰湖是最多的, 其余分别在日喀则地区、昌都地区及阿里地区^[9]。由冰湖溃决产生的泥石流具有暴发突然、持续时间短、洪峰值高、流量大及级联效应明显等特点。此外大型泥石流还有可能在运移途中诱发沟道两岸崩塌、滑坡等次生地质灾害, 产生一系列的级联效应, 进一步放大了冰湖溃决所带来的威胁。在西藏地区大约记载了 14 处冰湖溃决型泥石流, 本文列举了近期冰湖溃决事件, 见表 1。

表 1 藏东南冰湖分布及溃决特征

Tab. 1 Distribution characteristics of glacier lake outbursts in Southeastern Tibet

冰湖名称	河流名称	位置	溃决日期	溃决原因	致灾形式
鲁姆湖	帕隆藏布	波密县	1931-06-08	冰滑坡	稀性泥石流
穷比吓玛错	康布曲	亚东县	1940-07-10	冰崩	黏性泥石流
桑旺错	年楚河	康马县	1954-07-16	冰滑坡	稀性泥石流
吉莱错	朋曲	定结县	1964-09-21	冰滑坡	稀性及黏性泥石流
达门拉咳错	尼洋河	工布江达县	1964-09-22 1968-08-15	冰崩, 冰滑坡	稀性及黏性泥石流
阿亚错	朋曲	定日县	1969-08-17 1970-08-17	冰滑坡	稀性泥石流
次仁玛错	波曲	聂拉木县	1981-07-01	冰崩, 管涌	稀性泥石流
培龙错	帕隆藏布	林芝县	1983-07-29 1984-08-23 1985-06-20	冰崩, 冰滑坡	黏性泥石流
光谢错	帕隆藏布	波密县	1988-07-14	冰崩, 管涌	稀性泥石流
嘉龙湖	波曲	聂拉木县	2002-05-23 2002-06-02	冰体坠落	稀性泥石流
得嘎错	洛扎雄曲	洛扎县	2002-09-18	冰崩, 冰滑坡	稀性泥石流

我国从 20 世纪 80 年代就开始对冰湖溃决事件展开研究, 针对唐布朗冰湖溃决引发的泥石流, 吕儒仁^[10]对其成因开展了详细的析; 针对波曲河的冰湖溃决事件徐道明^[11]研究了其形成与沉积特征; 为了更好地分析冰湖变化特征, GIS、RS 等技术被广泛应用, 陈晓清^[12]通过高精度遥感解译统计了波曲流域 20 年来冰湖的变化情况; 刘晶晶等^[13]针对冰碛坝溃决现象初步分析了坝体失稳存在的管涌和溢流机制。本文选取西藏波密县米堆沟泥石流的源头光谢错作为研究对象, 通过开展野外调查、室内实验及高精度遥感解译等工作, 分析冰湖溃决的内外因素及危险性, 为今后藏东南地区冰湖溃决的防治及预警提供更好的防灾减灾对策。

1 研究区概述

本文研究区位于西藏东南部波密县米堆沟的源头光谢错, 位于北纬 $29^{\circ}27'57.8''$, 东经 $96^{\circ}30'3.5''$ 。

1988 年 7 月 15 日由于米堆沟后源的贡扎冰川冰舌前缘发生整体崩落, 致使终碛湖瞬间溃决, 大量的洪水在短时间内强烈掏蚀沟道和两岸坡体, 最终由洪水转换为泥石流。米堆沟口地处川藏公路 84 道班, 直接与帕隆藏布交汇, 交汇处西距波密县约 96 km, 东距然乌湖约 30 km, 整个流域面积约为 120.5 km^2 , 最低点堆积区海拔为 3 600 m, 最高点清水区海拔为 6 600 m, 相对高差为 3 000 m, 主沟道长度约 7.6 km, 平均纵比降 31%, 见图 1。流域在 3 850 m 以上存在大型冰川, 常年覆盖积雪, 4 500 m 的地方分布贡扎冰川。贡扎冰川由贡扎主冰川、东支冰川、西支冰川三部分组成, 见表 2。其中贡扎主冰川的冰舌直接与冰湖接触, 其滑落后的冰舌直接冲击冰湖, 贡扎主冰川呈现出明显的“座椅”效应, 后壁形成十分陡峭的冰后壁。1988 年 7 月 15 日米堆沟光谢错发生溃决, 最大洪峰流量可达 $1.27 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$, 历时半个小时, 溃决时洪水总量可达 540 万 m^3 ^[14]。

由于大约有 $3.6 \times 10^5 \text{ m}^3$ 的冰舌断裂滑移至冰湖, 致使湖面平均上升 1.4 m, 溃决前冰湖总储水量约为 $6.42 \times 10^6 \text{ m}^3$, 面积约为 0.52 km^2 , 平均水深 12.35 m, 有些地方可达 32 m。光谢错终碛堤失稳后, 洪水瞬间下泄, 致使溃决处大量的松散物质被裹挟进去, 洪水在运行过程中, 沟道两岸的崩滑体不断失稳且沟道出现揭底现象, 导致洪水逐渐向泥石流转变。通过现场野外调查, 沟口处泥石流流量能够达到 $1022.1 \text{ m}^3/\text{s}$, 流速可达 6.7 m/s 。米堆沟冰湖溃决后直接对沟道两侧米堆、俄次、古勒村的耕地、作物、房屋及人身安全产生严重威胁, 在其汇入帕隆藏布后进一步对川藏公路造成重大损害, 致使 18 座桥梁被毁, 中断交通半年之久。

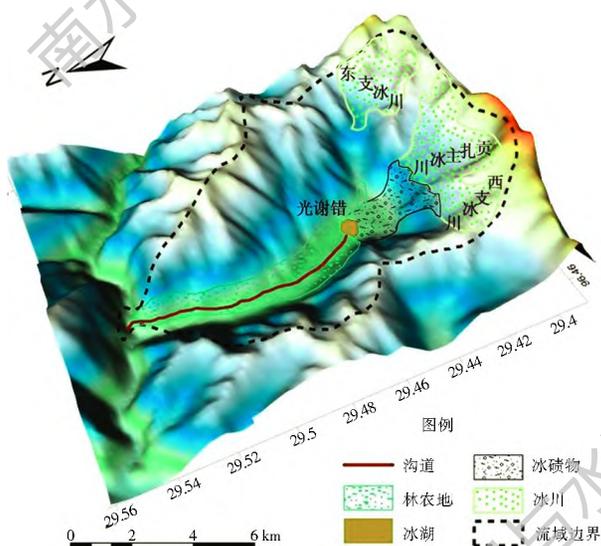


图 1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of study area

表 2 米堆沟冰川分布特征

Tab. 2 Distribution characteristics of glaciers in Midui Gully

冰川名称	高程/m	面积/ km^2	冰面坡度($^\circ$)	冰川主长/km
贡扎主冰川	4 150	12.6	20.1	5.1
东支冰川	4 300	6.2	12.5	4.7
西支冰川	4 200	10.2	15.4	4.6

2 冰湖溃决的气象水文条件

经过调查发现藏东南地区的冰湖溃决与现代地质冰川活动有着密切的联系, 而气象水文是影响冰川活动最为主要的因素, 冰川的运动能够改变冰湖的形态, 反应研究区气象水文的重要指标是温度和降雨量。一般来说, 温度的高低直接关系到冰川及终碛堤的稳定, 降雨的多少直接影响冰湖的库容及压力的大小, 温度和降雨的双重效应可以促进冰湖的溃决。据吕儒仁^[15]调查, 20 世纪以来藏东南地区冰湖溃决事件都与该地区的降雨失衡及温度大范围

的波动有紧密的联系, 因此, 研究藏东南地区的气象水文条件, 尤其是温度和降雨量十分必要。

2.1 温度条件

藏东南地区冰湖溃决现象与温度的高低直接有关, 温度的降低与升高直接影响到冰川及终碛堤的增加和消逝, 进而影响冰湖的稳定性状态。在体现气候变化因子当中, 温度的降低与升高是冰湖稳定性的一个反应, 根据吕儒仁^[15]调查, 20 世纪以来藏东南发生的冰湖溃决现象大部分发生在温度由冷向热转变的年份里。当温度降低时, 有利于冰川的积累和推移, 致使冰舌不断延伸慢慢的靠近冰湖, 其达到冰湖里后, 相对冰湖整个容积来说, 冰舌增加进入的速度远小于引发冰湖剧烈震荡的速度, 因此不会引发冰湖溃决大灾难, 等达到冰湖容积上限时, 由于终碛堤在冷环境下会更加坚固, 整个冰湖存在于稳定的环境中, 仅会出现平稳的溢流现象; 当温度升高的时候, 经过统计藏东南地区气温相对上一年会升高 $1\text{ }^\circ\text{C}$ 左右, 尤其在夏季就会引起整个冰川的消融退缩, 降低终碛堤的稳定性, 冰雪融化后沿冰川表层运动进而进入冰湖, 迅速增加湖水容积, 在运动过程中就会出现下渗、侵蚀冰舌, 导致其断裂, 瞬间崩落至湖水中, 产生剧烈的涌浪, 由于温度升高终碛堤内的冰碛物不断融化, 降低其稳定性, 随着孔隙的增大可能出现大量的管涌。随着冰舌的跳跃性变化, 致使湖水量在短时间内的剧烈激增, 产生了大量的涌浪, 引起翻坝效应。涌浪不断冲击终碛堤, 导致终碛堤的管涌加剧甚至溃坝, 由此导致了洪水或泥石流等灾害链的暴发。

研究区位于藏东南地区的波密县, 该地区是冰川泥石流活动最为强烈的地区, 波密地区在最近的 60 年时间里年均气温基本呈现增加态势。在 20 世纪 80 年代以前温度相对较低, 主要在低温区波动, 冰湖相对稳定, 由冰湖引起的泥石流活动比较少; 80 年代至今气温逐步缓慢回升, 促使冰川不断地消融, 加剧了冰湖溃决的风险。见图 2。研究区内的培龙沟于 1984 年、1985 年、1988 年三次暴发特大规模的冰川泥石流, 堵塞了帕隆藏布江, 形成了一个巨大的堰塞湖, 最长 6.5 km, 最宽 0.3 km, 最深 14 m, 将近 7 km 的公路被淹没, 河床抬升了近 10 m。1988 年 7 月 15 日米堆沟光谢错发生溃决, 将帕隆藏布沿岸的公路冲毁, 中断交通半年之久。由趋势线可以看出年均温与时间存在着明显的线性函数关系, 复相关系数 $R=0.66$, 证明了年均温与时间回归效果非常显著。

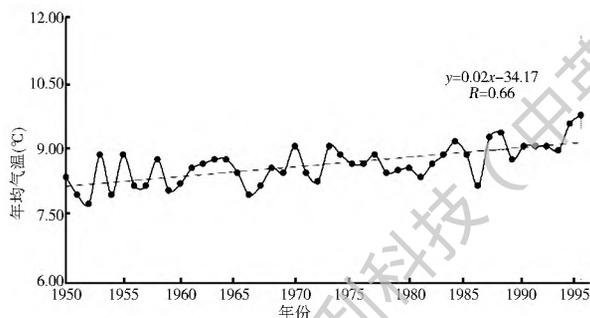


图 2 波密年均气温变化

Fig. 2 Variations of annual mean temperature in Bomi

2.2 降雨条件

藏东南地区冰湖溃决现象与雨量的大小直接有关,雨量的大小与冰湖的库容量直接相关,可以影响冰湖的稳定性。在影响气候变化因子当中,降雨的多少是冰湖稳定性的一个指标,20 世纪以来藏东南发生的冰湖溃决泥石流现象大部分发生在降雨量增加的年份里。当降雨量降低的时候,相对冰湖整个容积来说,其储存量会降低,同时对终碛堤的压力也降低,即使冰湖小范围溃决后也因为沿途水量的补给较少不会引发大规模的泥石流灾害;当降雨量增加的时候,就会不断冲刷冰川,随着大量雨水的渗透,可导致冰舌的断裂,产生涌浪,增加冰湖的库容量,将压力传递到终碛堤,最终在多种作用下导致冰湖溃决。由于降雨量的增加,会不断将两岸的松散固体物质带入沟道,导致冰湖溃决后泥石流灾害的发生。

研究区位于藏东南地区的波密县,在最近 60 年时间里降雨量基本呈现出反复波动的现象。该时期冰湖溃决泥石流活动相对频繁,培龙沟的 3 次大型溃决泥石流,以及光谢错的溃决为典型的代表,在统计的年代区间内,1988 年的年降水量达到了最高值为 1 153 mm,其年均温也达到了较高的 9 °C,见图 3。进入 21 世纪以来,降雨量相对以前有所减少,但是综合全局考虑,整个研究区的气候环境仍然以湿润气候为主,由此导致的由冰湖溃决引发的泥石流

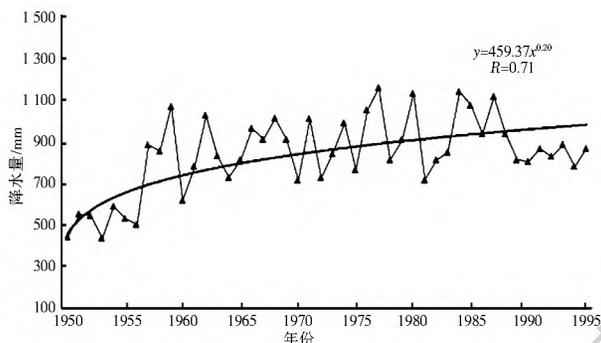


图 3 波密年均降水量变化

Fig. 3 Variations of annual mean precipitation in Bomi

的风险性很大。本文拟合了年降雨量与时间的趋势线,由趋势线可以看出年降雨量与时间存在着明显的幂函数关系,复相关系数 $R=0.71$,证明年降雨量与时间回归效果显著。

3 冰湖溃决的机制分析

冰湖的形式有很多种,包含了冰面湖、冰斗湖、冰内湖、终碛湖、冰坝湖、冰碛湖等。根据调查西藏大多数的冰湖都是终碛湖,与冰川运动密切相关,并且其溃决后容易引发洪水、泥石流等次生地质灾害。在藏东南地区已经有 17 场冰湖溃决的详细记录,刘晶晶总结了终碛湖溃决有四种形式^[6]:漫顶溢流溃坝产生了洪水、管涌溃坝产生洪水、瞬间溃坝产生洪水、多种机制相互耦合;在研究区米堆沟野外调查及室内试验发现,光谢错的溃决是由冰舌部位断裂产生涌浪及管涌溃坝两种机制组合导致的。

3.1 涌浪溢流机制

研究区米堆沟的光谢错直接与贡扎主冰川的冰舌相连接,其冰舌受力更为复杂。在过去的几年里,藏东南地区冰湖溃决主要是以溢流为主,一方面是冰川融雪和大气降雨为冰湖提供水源补充,另一方面是湖水通过终碛堤缓慢的渗流,两者基本保持平衡状态。一旦冰舌断裂入湖,会瞬间致使冰湖面急剧上升,产生规模巨大的涌浪然后导致形成的水头高于溢出口,见图 4。

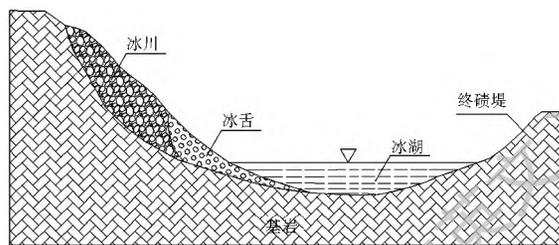


图 4 光谢错涌浪溢流示意图

Fig. 4 Schematic diagram of overflow in Guangxiexue

涌浪溢流在光谢错冰湖主要体现在两个地方:第一个是终碛堤,在高水头的作用下,终碛堤溢流口处会形成强大的压力,压力分为两部分,一部分压力挤压终碛堤,致使终碛堤的裂隙越来越大;另一部分压力不断地挤压湖水,致使湖水不停的翻滚,不断下切加深终碛堤的裂隙,并且能够将湖底的泥沙启动,激发泥石流的物源条件。第二个是冰舌,随着温度的上升及降雨强度的增加,冰舌可能会脱离冰川主体,滑落到冰湖中产生巨大的涌浪,其形成的冲击力威胁终碛堤的安全。

研究区光谢错冰湖符合涌浪溢流机制,在贡扎主冰川的冰舌受冰湖的浮力、自身重力、摩擦力及黏

聚力四个力的作用,又鉴于1988年的温度较高湿度较大,冰舌在综合环境影响下瞬间断裂入湖,产生强烈的涌浪,部分湖水在压力作用下翻越终碛堤造成大量溢流。

3.2 管涌溃坝机制

一般来说,在渗流作用下细颗粒从粗颗粒孔隙中被冲走的现象称为管涌作用,对于终碛堤来说,管涌作用会使其变得薄弱。其作用在终碛堤上一般表现为以下三方面:(1)在气候条件改变下,终碛堤内部的冰碛物会消融,管涌加大了孔隙的掏蚀强度;(2)孔隙中的细颗粒逐渐流失,进一步破坏了终碛堤的稳定性;(3)随着涌浪带来的压力,湖底的泥沙被裹挟上来,在管涌条件下大量泥沙被带出,直接导致次生灾害泥石流的发生。

研究区米堆沟光谢错冰湖的暴发也与管涌机制密切相关,见图5,光谢错终碛堤一般是由黏土、冰碛物、粗细不均的固体颗粒共同组成,其中细颗粒要占到80%左右,终碛堤平均高度约为45 m,在堤身最薄处的地方堤顶的宽度约为30 m,平均宽度约为50 m,背水坡的坡度能达到 30° 。据调查湖水分别从坝体的中部及左部管涌出来,为了更好的验证光谢错冰湖是否具有管涌机制,在野外对光谢错冰湖进行了取样和水位调查,通过研究土体的级配和坝体上下游水位水力坡度来确定其形成机制。根据对光谢错的访问调查研究,1988年溃决之前光谢错湖面最长距离可达950 m,最宽可达550 m,面积可达 0.523 km^2 ,由于连续高温和降雨,光谢错水位逐步升高,7月15日23时左右发生溃坝,溃口约10 min后下切到底,历时2.5 h左右,排泄洪水总量可达 $2.78 \times 10^6 \text{ m}^3$,溃决后冰湖面积为 0.129 km^2 ,通过一系列调查表明光谢错土体的渗透坡降超过一定程度时,水的渗透作用对内不透水地表土层的顶托力大于地表土的重量,将会产生管涌现象^[21]。同时针对终碛堤的级配开展取样调查,粒径分布见图6。判断终碛堤的级配一般采用不均匀系数和曲率系数来判定:

$$C_u = d_{60}/d_{10} \quad (1)$$

$$C_c = d_{30}^2/d_{10}d_{60} \quad (2)$$

式中: C_u 代表了不均匀系数; C_c 代表了曲率系数; d_{10} 代表了泥沙颗粒中百分比小于10%的颗粒粒径(mm); d_{60} 代表了泥沙颗粒中百分比小于60%的颗粒粒径(mm); d_{30} 代表了泥沙颗粒中百分比小于30%的颗粒粒径(mm);在砾土或砂土中,同时满足 $C_u \geq 5$ 和 $C_c = 1 \sim 3$ 的时候,则为级配良好,不能够同时满足时则为级配不良,经过计算得到光谢错部

分参数,见表3。

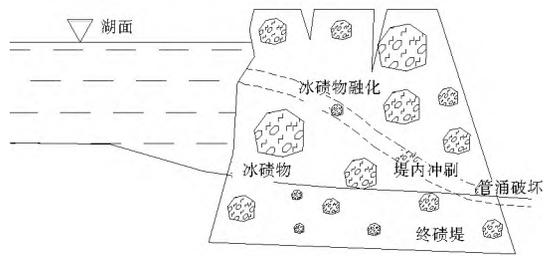


图5 光谢错管涌溃坝示意图

Fig. 5 Schematic diagram of piping burst in Guangxiecuo

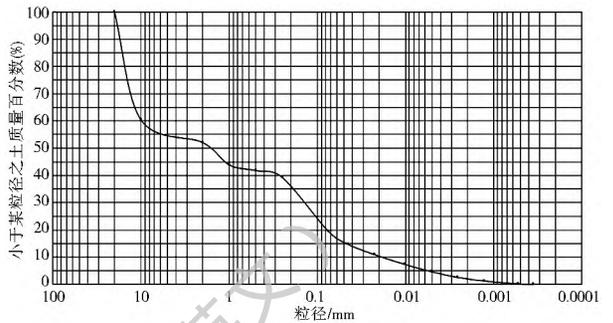


图6 光谢错颗粒级配曲线

Fig. 6 Grading curve of sediments in Guangxiecuo

根据土体的级配情况来推断光谢错的渗透破坏形式,发现光谢错终碛堤的级配不良,比较容易产生管涌,然后再利用公式(3)中的细粒直径 d_3 、 d_5 与孔隙的平均直径 D_0 进行进一步判别^[17],具体结果见表4。经过计算可以看出光谢错的溃决中含有管涌溃坝机制。

$$D_0 = 0.25C^{1/8}/Ud_{20} \quad (3)$$

表3 光谢错取样的粒径分布

Tab. 3 Particle size distribution of Guangxiecuo samples

土样名称	粒径			C_u	C_c	备注
	d_{60}	d_{10}	d_{30}			
光谢错	10	0.02	0.15	496.5	0.1	级配不良

表4 光谢错可能发生的溃决形式

Tab. 4 Possible burst forms of Guangxiecuo

土样名称	粒径			C_u	D_0/mm	可能破坏模式
	d_3	d_5	d_{20}			
光谢错	0.003	0.006	0.088	496.5	0.048	管涌型

4 冰湖溃决泥石流危害及防治

在高山冰川的藏东南地区,冰湖溃决后一般以洪水、泥石流灾害形式出现,崔鹏等总结了冰湖溃决后向泥石流演化的6种模式^[18]。冰湖在溃决初期规模较大,一旦溃决大量的水体会突然释放,将终碛堤的堆积物裹挟冲出,一开始在溃决口附近形成规模巨大的洪水,然后沿途不断冲刷两岸,将固体颗粒混

到沟道形成泥石流。研究区米堆沟光谢错溃决后主要是洪水、稀性泥石流次生灾害,本文详细分析了米堆沟泥石流的沟道及岩性条件,见米堆沟纵坡面图7,发现十分有利于冰湖泥石流的形成。

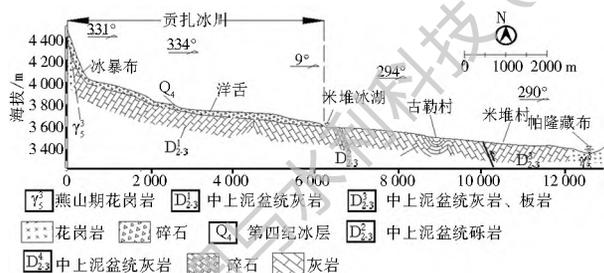


图7 米堆沟泥石流纵剖面

Fig. 7 The longitudinal profile of debris flow in Midui Gully

光谢错溃决时,大量的湖水挤压光谢错冰堤,在堤坝口处由于终碛堤出现裂缝,会瞬间形成流速很大的洪流。然后根据沟道纵坡降及冰湖所处位置的地势条件,洪水的冲击力很强,会不断冲刷沟道两侧的岸坡堆积物,沟床比降的不断变化对泥石流的形成有很大的影响^[19]。当沟床上有迭水和陡坎的时候,有利于大规模泥石流的形成。一旦从狭小缝隙转换到宽阔的区域就会产生淤积,当淤埋速度过快时就会产生很大的破坏力,对沟道沿岸的村庄造成严重破坏,经过野外调查米堆沟的沟道较为顺直,堆积淤埋较少。如果沿途松散堆积物过多的进入沟道就会让洪水转变为泥石流,米堆沟泥石流的容重为 1.53 g/cm^3 ^[14],属于稀性泥石流,在流通过程中对沟道中下游的米堆、俄次、古勒村造成了一定的威胁,1988年的光谢错冰湖暴发泥石流就将这三个村子的房屋和耕地部分摧毁^[20]。当泥石流冲出沟口时,所携带的固体物质将帕隆藏布沿线的道路全部掩埋水毁,致使交通完全中断。

一般冰湖堰塞坝溃决按时间可分为三类:高危型堰塞湖、即消型堰塞湖及稳态型堰塞湖。冰湖形成的堰塞坝通常以漫顶溢流与潜蚀管涌的形式发生溃决现象。治理冰湖溃决需要充分考虑到冰湖特征、水文气象、危害范围及施工条件等因素。经研究分析,今后光谢错还存在溃决的风险。光谢错冰湖堰塞坝的溃坝工程应急处理应该从两个方面展开:(1)通过工程措施在冰湖上开设排水通道,使得冰湖底部超载水流逐步顺畅导入下游,同时拓宽及加固两岸的河堤,防止冰湖溃决后洪水扩散;(2)通过相关工程措施,在水位较低的时候,及时排除冰湖堵塞体和减小水位差,削弱泥石流冲刷能力,防止坝体在短时间内整体溃决。

5 结论

通过总结藏东南地区的冰湖溃决事件,本文重点以光谢错为研究对象,分析了冰湖溃决的气象水文条件、成因机制及危险性,结果如下。

温度和降雨是影响冰湖溃决最为主要的外部因素。一般来说,温度的高低直接关系到冰川及终碛堤的稳定,降雨的多少直接影响冰湖的库容及压力的大小,温度和降雨的双重效应可以促进冰湖的溃决,它们和冰湖溃决的时间回归效果显著。

在米堆沟野外调查及室内试验发现光谢错溃决的内因是由涌浪溢流及管涌溃坝两种机制组合形成的。涌浪溢流机制主要体现在光谢错冰湖终碛堤的溢流及冰舌断裂的涌浪;通过野外取样级配分析后发现在终碛堤溃坝的过程中存在管涌机制。

光谢错溃决后完成了洪水-稀性泥石流的转变过程,一旦发生溃决洪水会携带大量泥沙运移形成稀性泥石流,随着泥石流裹挟带来的泥沙会淤埋到两岸的村庄、耕地及林地,并且损毁道路堵塞河道,造成重大的生命财产损失。

参考文献(References):

- [1] PAUL F, HUGGEL C, KAAB A. Combining multispectral satellite data and a digital elevation model for mapping of debris covered glaciers[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 89(4): 510-518. DOI: 10.1016/j.rse.2003.11.007.
- [2] 李鸿斌, 蔡祥兴. 中国冰川泥石流的一些特征[J]. 水土保持通报, 1989, 9(6): F9. (LI H L, CAI X X. The glacial debris flow of China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1989, 9(6): F9. (in Chinese))
- [3] 崔鹏, 马东涛, 陈宁生, 等. 冰湖溃决泥石流的形成、演化与减灾对策[J]. 第四纪研究, 2003, 26(6): 621-627. (CUI P, MA D T, CHEN N S, et al. The initiation, motion and mitigation of debris flow caused by glacial lake outburst[J]. Quaternary Sciences, 2003, 26(6): 621-627. (in Chinese))
- [4] 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 西藏自治区交通厅科学研究所. 西藏泥石流与环境[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1999: 106-136. (Institute of Mountain Hazards and Environment, Institute of Science of the Department of Transport of Tibet Autonomous Region. Debris flow and environment in Tibet[M]. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1999: 106-136. (in Chinese))
- [5] MUÑOZ R, GONZALES C, PRICE K, et al. Managing glacier related risks disaster in the Chucchi n Catchment, Cordillera Blanca, Peru [M]. Climate Change Adaptation Strategies An Upstream downstream Perspective, 2016: 59-78. DOI: 10.1007/978-3-319-40773-9_4.
- [6] TIE Y, FENG X, RAN J, et al. Hydrodynamic processes and depositional styles of glacier associated deposits in the Moxi

- basin, Southwest China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2016, 13(3), 557-568. DOI: 10.1007/s11629-014-3205-z.
- [7] SONG C Q, SHENG Y W. Contrasting evolution patterns between glacier-fed and non-glacier-fed lakes in the Tanggula Mountains and climate cause analysis[J]. *Climatic Change*, 2016, 135(3), 493-507. DOI: 10.1007/s10584-015-1578-9.
- [8] WANG S J, JIAO S T. Evolution and outburst risk analysis of moraine dammed lakes in the central Chinese Himalaya[J]. *Journal of Earth System Science*, 2015, 124(3), 567-576. DOI: 10.1007/s12040-015-0559-8.
- [9] 刘伟. 西藏典型冰湖溃决型泥石流的初步研究[J]. *水文地质工程地质*, 2006(3): 8-89. (LIU W. Preliminary study on debris flow induced by glacier lake outburst in Tibet[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2006(3): 8-89. (in Chinese))
- [10] 吕儒仁, 李德基. 西藏工布江达县唐不朗沟的冰湖溃决泥石流[J]. *冰川冻土*, 1986, 8(1): 61-64. (LYU R R, LI D J. Debris flow induced by ice lake burst in Tangbulang gully, Gongburjiangda, Xizang (Tibet)[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1986, 8(1): 61-64. (in Chinese))
- [11] 徐道明. 西藏波曲河冰湖溃决泥石流的形成与沉积特征[J]. *冰川冻土*, 1987, 9(1): 23-34. (XU D M. Characteristics of debris flow caused by outburst of Glacier Lake on Boqu River in Xizang[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1987, 9(1): 23-34. (in Chinese))
- [12] CHEN X Q, CUI P, LI Y, et al. Changes in glacial lakes and glaciers of post-1986 in the Poiqu river basin, Nyalam, Xizang (Tibet) [J]. *Geomorphology*. 2007(88): 298-311. DOI: 10.1016.11.012.
- [13] LIU J J, TANG C, CHENG Z L. The two main mechanisms of Glacier Lake Outburst Flood in Tibet, China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2013, 10(2): 239-248. DOI: 10.1007/s11629-013-2517-8.
- [14] 游勇, 程尊兰. 西藏波密米堆沟泥石流堵河模型试验[J]. *山地学报*, 2005, 23(3): 288-293. (YOU Y, CHENG Z L. Modeling experiment of debris flow in Midui Gully, Tibet[J]. *Journal of Mountain Research*, 2005, 23(3): 288-293. (in Chinese))
- [15] 吕儒仁, 唐邦兴, 朱平一. 西藏泥石流与研究[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1999: 69-78. (LYU R R, TANG B X, ZHU P Y. Debris flow and environment in Tibet[M]. Chengdu University of Science and Technology Press, 1999: 69-78. (in Chinese))
- [16] 刘晶晶, 程尊兰, 李泳, 等. 西藏终碛湖溃决形式研究[J]. *地学前缘*, 2009, 16(4): 372-380. (LIU J J, CHENG Z L, LI Y, et al. A study of the outburst form of the end moraine lake in Tibet[J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(4): 372-380. (in Chinese))
- [17] 耿贺松, 耿敬. 管涌、流土渗流破坏的判别及实例[J]. *黑龙江水利科技*, 2004, 8(3): 14-15. (GENG H S, GENG J. Piping and flow soil seepage failure criterion and example[J]. *Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy*, 2004, 8(3): 14-15. (in Chinese))
- [18] 崔鹏, 马东涛. 冰湖溃决泥石流的形成、演化与减灾对策[J]. *第四纪研究*, 2003, 23(6): 621-628. (CUI P, MA D T. The initiation, motion and mitigation of debris flow caused by glacial lake outburst[J]. *Quaternary Science*, 2003, 23(6): 621-628. (in Chinese))
- [19] 常鸣, 唐川, 李为乐, 等. 汶川地震区绵远河流域泥石流形成区的崩塌滑坡特征[J]. *山地学报*, 2012, 30(5): 561-569. (CHANG M, TANG C, LI W L. The characteristic of collapse and landslide by Wenchuan earthquake in debris flow for marine region along the Mianyuan river basin, China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2012, 30(5): 561-569. (in Chinese))
- [20] 李德基, 游勇. 西藏波密米堆冰湖溃决浅议[J]. *山地学报*, 1992, 10(4): 219-224. (LI D J, YOU Y. Bursting of the Midui Moraine Lake in Bomi, Xizang[J]. *Mountain Research*, 1992, 10(4): 219-224. (in Chinese))
- [21] 赵万玉, 陈晓清, 刘建康, 等. 冰川终碛湖溃决再生特征与机理[J]. *山地学报*, 2015, 32(6): 703-712. (ZHAO W Y, CHEN X Q, LIU J K, et al. Outburst regeneration characteristic and mechanism of glacier lake[J]. *Journal of Mountain Science*, 2015, 32(6): 703-712. (in Chinese))