

西藏波密丹卡弄巴冰湖发育特征与潜在风险

刘建康¹, 周路旭², 李元灵³, 黄海³, 杨东旭³, 张佳佳³, 赵万玉⁴

LIU Jiankang¹, ZHOU Luxu², LI Yuanling³, HUANG Hai³, YANG Dongxu³, ZHANG Jiajia³, ZHAO Wanyu⁴

1. 西华大学应急管理學院/四川省应急管理學院, 四川 成都 610039;

2. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 611130;

3. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734;

4. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041

1. School of Emergency Management, Xihua University/Sichuan College of Emergency Management, Chengdu 610039, Sichuan, China;

2. POWERCHINA Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 611130, Sichuan, China;

3. Institute of Exploration Technology, Chinese Academy of Geological Sciences, Chengdu 611734, Sichuan, China;

4. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, Sichuan, China

摘要:冰湖溃决是青藏高原的典型山地灾害之一,严重威胁川藏交通廊道的安全。开展沿线地区的冰湖灾害调查和溃决风险评估,并制定针对性的防控对策十分必要。选取西藏波密的丹卡弄巴冰湖为研究对象,通过遥感解译、野外调查、工程地质类比、数值模拟等方法,查明了冰湖、冰川积雪区、形成流通区、堆积区等分区流域的发育特征,提出了丹卡弄巴具有发生冰湖溃决和形成泥石流的条件,揭示了高位冰崩、冰川跃动、雪崩等是引发冰湖溃决的主要诱因类型,计算了终碛垄发生全溃的洪水流量曲线,模拟了泥石流在下游沟道的演进过程。结果显示,冰湖全溃条件下形成的泥石流将对堆积区28户85人造成淤埋的直接危害,还将挤占帕隆藏布河,造成主河偏流,对右岸沿河的川藏交通廊道及其附属设施等造成路基水毁的间接危害。对川藏交通廊道沿线冰湖发育区开展灾害调查和风险评估进行初步探索,可供西藏国土空间风险管控、水利水电开发、冰湖景区选址等冰湖灾害评价提供借鉴。

关键词:冰湖溃决;冰川灾害;泥石流;青藏高原

中图分类号:P642.23 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2021)12-2080-09

Liu J K, Zhou L X, Li Y L, Huang H, Yang D X, Zhang J J, Zhao W Y. Development characteristics and potential risks of Dankanongba glacial lake in Bomi, Tibet. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(12): 2080–2088

Abstract: Glacial lake outburst flood (GLOF) is one of the serious mountain disasters in the Qinghai–Tibet Plateau, which seriously threatens the safety of the Sichuan–Tibet arterial traffic which is under construction recently. Therefore, it is necessary to carry out professional investigation and assessment of these potential hazard glacial lakes above the railway, and formulate targeted prevention and control countermeasures. The Dankanongba glacial lake in Bomi was selected as the research object, through remote sensing interpretation, field investigation, engineering geological analogy and numerical simulation, to investigate the background characteristics of glacial lake, glacier and snow covered zones, formation and transportation zones and accumulation zones. It is proposed that Dankanongba has the conditions for glacial lake breach and debris flow formation. It is also revealed that high–place glacier collapse, glacier surge and snow avalanche are the main inducement types of GLOF. Based on the calculation of flood discharge of the end moraine breach, the evolution

收稿日期:2021-06-15; **修订日期:**2021-08-16

资助项目:国家自然科学基金项目《高山峡谷区堰塞湖形成–溃决机理及溃决洪水风险》(编号:U19A2049)、西华大学人才引进项目《藏东南地区冰湖溃决灾害应急处置技术研究》(编号:Z212017)、第二次青藏高原综合科学考察研究项目(编号:2019QZKK0902)及中国地质调查局项目《藏东昌都地区城镇灾害地质调查》(编号:DD20190644)和《支撑服务川藏铁路规划建设地质调查》(编号:20190505)

作者简介:刘建康(1985–),男,博士,高级工程师,从事地质灾害机理和应急处置技术的研究与教学。Email:j_jiankang@foxmail.com

process of debris flow in the downstream channel is also simulated. The results of numerical calculation and analysis show that the debris flow formed under the condition of GLOF will cause direct damage to 85 people of 28 households in the accumulation area. It will also cause diversion of the main stream and indirect damage to the Sichuan-Tibet arterial traffic and their ancillary facilities by the right bank of the river. A preliminary exploration on how to carry out disaster investigation and potential assessment in the glacial lake areas above the Sichuan-Tibet arterial traffic is carried out, which can be used for reference in the natural resource management, water conservancy and hydropower development, glacial lake scenic spot location and other glacial lake disaster assessment in Tibet.

Key words: Glacial lake outburst flood; glacier hazard; debris flow; Tibet Plateau

冰湖溃决是一种突发性强、洪峰高、流量大、破坏力大和灾害持续时间短但波及范围广的山地灾害,具有小概率、大风险的特性^[1],在西藏东南部尤为突出,形成的洪水和泥石流在该地区造成严重的危害^[2]。1988年,西藏波密县的光谢错冰湖溃决导致川藏公路交通中断200天^[3];2013年和2020年,嘉黎县的然则然错和吉翁错先后发生冰湖溃决,造成直接经济损失合计约3.7亿元^[4-5]。受全球气候变化影响,高山冰川环境恶化,藏东南地区的冰湖溃决灾害在未来时间仍将处于活跃期^[2],严重威胁川藏交通廊道重大工程的安全。因此,开展冰湖灾害调查和潜在风险研究,对冰湖溃决危险性评估意义重大,对下游承灾体的防控对策建立也具有重要的科学参考价值。

根据灾害成灾特征,冰湖潜在风险研究主要包括冰湖发生溃决的危险性判别、溃决洪水流量的参数预测、下游洪水或泥石流的演进计算和主河堵塞程度分析四方面的内容。①冰湖溃决的危险性判别是国内外研究最早、应用最广泛的内容,先后提出了冰湖危险指标评估体系、冰湖溃决危险指数和冰湖溃决概率评价模型等判别方法,通过定性或(半)定量等手段,利用遥感解译、野外调查等数据对危险冰湖进行评估、判断和筛选,在冰湖普查和编目阶段发挥了重要作用。如Huggel等^[6]提出五因子列表方法用以定性估算瑞士阿尔卑斯山地区的冰湖溃决概率,Wang等^[7]采用概率计算方法查明了中国青藏高原地区的冰湖溃决灾害风险分区。②冰湖溃决洪水的参数预测是土石坝溃坝水力学的研究分支,主要采用经验回归公式和土石坝溃决模型进行计算,前者是通过各种已溃坝体的坝高和库容得出溃决峰值流量的经验值,后者基于溃口宽度、深度和溃决历时等参数,通过时间变化过程计算溃口的流量变化过程。总体看,经验公式具有参数少、计算简单的优点,但结果误差较大,适用性较低。通过溃决模型可以得到较为合理的溃决洪水

过程、峰值流量、洪水过程曲线等重要参数,例如Dam Break和BREACH模型^[8-9],但计算参数要求较复杂。③下游洪水或泥石流演进主要采用数值模拟手段,计算演进距离、淹没面积、流速、冲击力等致灾运动参数,其中HEC-RAS、FLO-2D、RAMMS等洪水演算模型或软件应用较广泛,如Huggel等^[6]采用数值计算模型对瑞士南部阿尔卑斯山的2次冰湖溃决事件进行预测分析,圈定了下游潜在危险区域;周路旭等^[10]以龙利空则错为例,采用HEC-RAS模拟分析了不同溃决模式下冰湖溃决洪水的演进差异和影响范围。④主河堵塞是冰湖溃决泥石流的主要次生灾害问题,其判别依据主要基于主支沟的流体动力条件差异,采用经验回归公式或数值模拟计算,在泥石流运动机理研究中应用较广泛,如Liu等^[11]采用经验公式判别分析了肖家沟泥石流堵塞渔子溪的程度;许晓君等^[12]采用CFX流体动力软件模拟分析了石吾陇沟泥石流对主河的堵江程度。

总体而言,国内外冰湖溃决风险研究取得了较大进展,但目前主要集中于冰湖区,受调查手段和技术方法限制,系统的风险评估方法仍处于探索和发展阶段,体系大但缺乏分级标准^[13-16]。本文以西藏波密丹卡弄巴冰湖为研究对象,从冰湖发生溃决的危险性判别、溃决洪水流量过程、沟道泥石流的形成和演进、承灾体风险等方面,采用综合技术方法重点分析冰湖及所在流域的发育特征,系统研究和定量评估冰湖潜在风险,对西藏自治区公路、铁路和水电等重大工程区的冰湖溃决风险预测和风险控制有重要的实践意义。

1 冰湖发育特征

1.1 冰湖区的发育特征

丹卡弄巴地处波密县扎木镇西侧,属帕隆藏布左岸支流水系,沟口地理坐标为北纬 $95^{\circ}40'15.62''$ 、东经 $29^{\circ}53'31.05''$,流域面积 42.20 km^2 ,最低海拔

2684 m,最高海拔 5785 m,流域高差 3101 m,主沟长度 15.43 km,平均沟床比降 155.93‰。

冰湖位于丹卡弄巴流域上游(图 1),出水口地理坐标为北纬 95°38′32.30″、东经 29°48′30.65″。根据 2017 年获取的资源三号卫星影像和 2015 年四川省遥感信息测绘院测绘生产的 1:10 000 地形数据,冰湖的湖面高程 4130 m,纵向长度约 850 m,平均宽度约为 282 m,面积约 0.24 km²。冰湖的汇水流域约 9.34 km²,发育补给冰川面积约 3.46 km²,其中临近冰湖冰舌段坡度 8°~11°,末端距离冰湖 630 m,其间分布死冰含量较高的冰碛物。终碛垄在平面上呈弧形拱向下游,坝顶宽度约 20 m,坝顶和坝

底的高程分别为 4135 m 和 4066 m,坝体的高差约为 69 m,其中背水坡的坡度约为 18°,迎水坡的坡度参考侧碛垄约为 20°,考虑湖盆的实际地形和终碛垄的堆积形态,估算冰湖坝前水深约 38 m,根据表 1 计算方法,综合得到冰湖库容约 500×10⁴ m³。冰湖在终碛垄前缘右侧发育 1 处出水口,沟槽部位略低于两侧冰碛垄的坝顶,与湖面水位基本相当。因条件限制,野外调查未到达冰湖位置,终碛垄物质组成参考东侧相似发育条件的嘎弄曲和莫曲,采用遥感解译和工程地质类比的方法,分析得到终碛垄主要由块碎石堆积而成,粒径集中分布于 0.5~2 m 之间,且内部无透镜体状的大规模死冰发育。

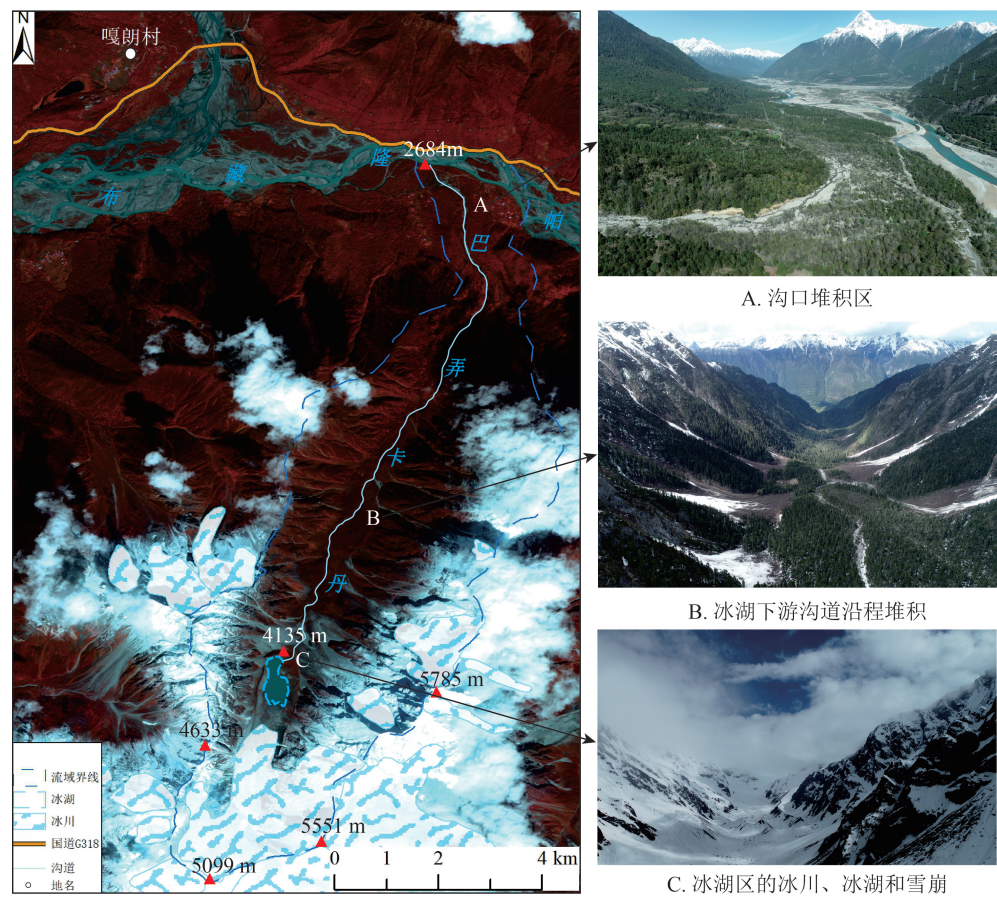


图 1 丹卡弄巴冰湖流域环境全貌

Fig. 1 Environment background of Dankanongba glacial lake valley

表 1 丹卡弄巴冰湖库容计算方法及结果

冰湖基本参数				冰湖库容计算方法			
长度 L/m	宽度 W/m	水深 H/m	侧碛垄 坡度 $i/^\circ$	文献 ^[17]		几何计算	
				计算 参数 L, W	库容 $/10^4 \text{ m}^3$ 485	计算 参数 L, W, H, i	库容 $/10^4 \text{ m}^3$ 568
850	282	38	20				

1.2 近 30 年冰川冰湖变化

为分析丹卡弄巴冰川冰湖变化情况,共收集 7 种多源多期卫星遥感和地形测绘数据,分别是 1983 年的 1:10 万地形图、2015 年的 1:1 万地形图、1987 年和 2003 年的 Landsat TM、2014 年的 Landsat ETM⁺、2016 年的 Landsat OLI 和 2017 年的资源三号卫星影像。从湖面轮廓和冰川变化情况可以看出,丹卡弄巴冰湖为冰川退缩后冰川融水受终碛垄阻塞而形成的冰碛湖,近 40 a 来冰湖几乎未发生明显扩张或缩减,面积大小保持在 0.24 km²,但补给冰川的冰舌末端在不断后退。遥感解译显示,1987 年冰舌末端距离冰湖 425 m,2003 年的距离为 480 m,2014 年的距离为 620 m,2017 年的距离为 640 m,近 30 a 冰川冰舌的平均后退速率为 7.17 m/a,变化特征与藏东南地区的气候趋势和周边已溃的冰湖较一致(图 2),但其值较低,推测除补给冰川、地层岩性和地形地貌等发育环境差异影响外,还可能为已溃决冰湖冰舌末端直接伸入冰湖,导致显著的热融作用,而丹卡弄巴的冰舌末端与冰湖之间发育大量冰碛物堆积。

1.3 丹卡弄巴流域特征

除上述的冰湖特征外,丹卡弄巴根据主沟地形还可分为 3 个主要流域区段(图 3):冰湖以上至沟源段的冰川积雪区,海拔 4130 m 以上;冰湖以下至出山口的形成流通区,海拔 2900~4130 m;出山口至主河的堆积区,海拔 2900 m 以下。

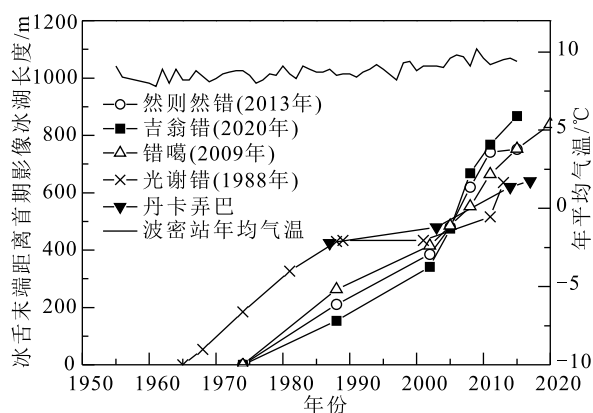


图 2 丹卡弄巴冰湖冰舌后退速率与藏东南地区气候变化和已溃冰湖对比

Fig. 2 Comparison of glacier tongue receding rate of Dankanongba glacial lake with climate change and glacial lake outburst floods (GLOFs) in southeast Tibet

1.3.1 冰川积雪区

冰川积雪区以冰川侵蚀作用为主(图 1-C)。该段沟床纵剖面长度约 3.64 km,平均比降约 224.69‰,地形突变带可见冰川表面贯通集中分布的张拉裂缝,存在冰川滑动的可能;沟床横剖面呈 U 形,槽底宽度 400~600 m,两侧山坡平均坡度约 35°,最大垂向高差达 1000 m,而最小高差约 450 m,其剖面位于嘉黎断裂的韧性剪切带^[18]。冰川积雪区和冰湖湖盆区常年覆盖冰川和积雪,受气候变化影响,高位的冰崩、雪崩、岩崩等现象频发,并于坡脚处堆积形成冰碛物物源,最终转化为终碛垄或侧碛垄堆积地貌的组成部分。

1.3.2 形成流通区

形成流通区沿程分布松散物源,以山洪或泥石流的固体物质裹挟和泥砂输移作用为主(图 1-B)。该段沟床纵剖面长度约 8.75 km,平均沟床比降约 140.57‰,支沟交汇处因支沟堵塞而发育 1 处裂点,沟床形态呈凸起状;沟床横剖面呈 U 形,槽底宽窄相间,宽度 200~600 m,最窄处位于主支交汇的裂点段,倒二冰期形成的冰川侧碛垄局部保留完好,最大厚度超过 100 m。两侧山坡平均坡度 35°~40°,最大垂向高差达 1400 m,而最小高差约 550 m。高山和极高山地区常年覆盖积雪,冰川零星分布,高位的雪崩、岩崩、碎屑流等密集发育,并于坡脚处沟槽两侧堆积形成连续的堆积扇群,估算平均厚度超过 20 m,是山洪或泥石流的主要松散物质来源。

1.3.3 堆积区

堆积区以山洪或泥石流的淤积作用为主,是灾害体与承灾体相互作用的主要区域(图 1-A)。该段沟床纵剖面长度约 2.00 km,平均沟床比降约 105.00‰;沟床横剖面呈 U 形,槽底宽度低于 50 m,沟岸为末次冰期侧碛垄,平均垂向高差约 100 m。堆积区前缘因河流演化和人类活动的改造,地貌垄状特征不明显而呈缓坡地形,已成为易贡茶场村民生活和耕作的场所,建筑物基础高于沟槽约 20 m。主河帕隆藏布因堆积区挤占平面形态呈喇叭口状,河宽长度 300~1000 m,河床比降约 2.79‰,多年平均流量约 890 m³/s,其右岸为川藏公路和规划中的川藏高速公路等重要交通廊道。若丹卡弄巴暴发冰湖溃决,极易诱发泥石流、堵江等次生灾害链,将直接威胁堆积区易贡茶场村民 28 户 85 人,并对主河临近区域的重要交通廊道构成间接影响。

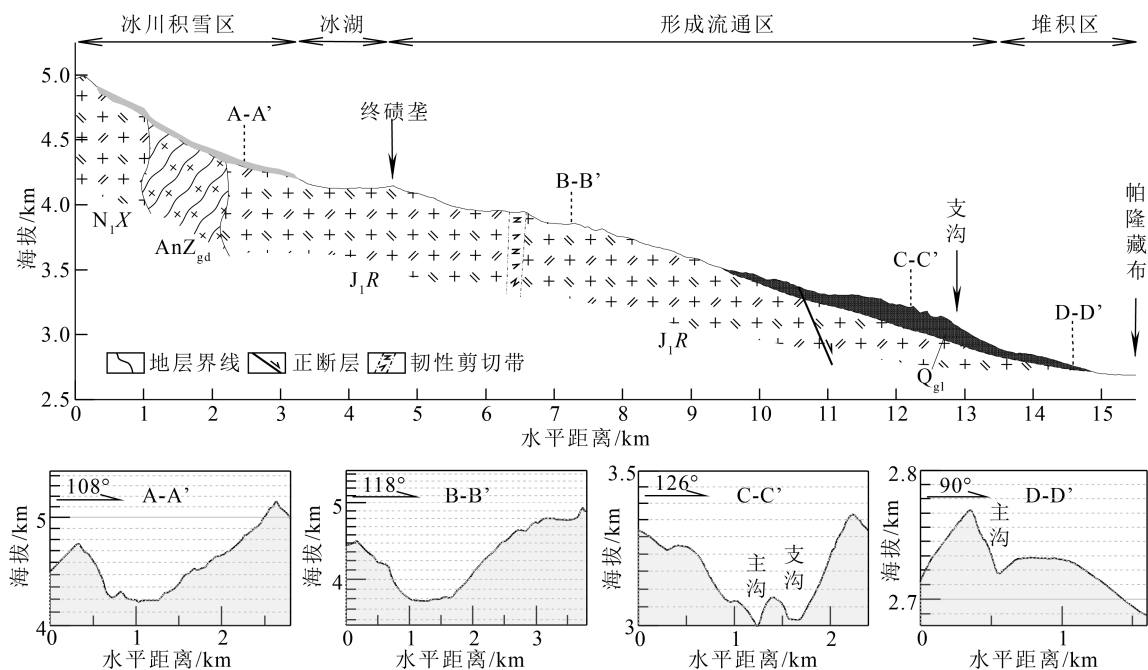


图3 丹卡弄巴冰湖纵横剖面地形地貌特征

(上图为纵剖面, 下图为横剖面)

Fig. 3 Topographic and geomorphic features of Dankanongba glacial lake valley

AnZ_{gd}—冈底斯岩群片麻岩; J₁R—侏罗纪黑云二长花岗岩; N₁X—新近纪黑云二长花岗岩; Q_{gl}—第四纪冰碛物

2 冰湖发生溃决的危险性

基于冰湖的发育特征, 根据冰湖危险指标评估体系^[19]和已有研究成果^[20], 丹卡弄巴冰湖具有潜在的溃决危险性。通过类比周边地区冰湖溃决、冰崩、冰川泥石流等冰川灾害事件, 推测丹卡弄巴冰湖溃决的诱因类型存在以下几种可能。

2.1 高位冰崩

冰崩是在坡度较大的斜坡上大块冰体甚至整条冰川在重力作用下沿冰川内部的某一剪切破裂面或脆弱面, 脱离母体而迅速倾倒或滑塌、坠落的现象^[21]。冰崩多发生在冰川末端, 是西藏地区冰湖溃决的主要诱发模式^[22]。由于丹卡弄巴冰川末端坡度较缓且前缘堆积大量冰碛物, 冰川末端冰崩规模小而对冰湖影响小, 其主要威胁来自高位冰川积雪区。经遥感解译分析, 冰川积雪区海拔在 4500~5000 m 范围, 距离冰湖垂向高差超过 1000 m, 地形坡度大于 25°, 母体冰川表面贯通集中分布的张拉裂缝, 具备发生高位冰崩的条件。

近年西藏地区的高位冰崩事件频发, 诱发大量

冰川灾害事件。1953 年, 波密县的古乡沟悬冰川部位发生高位冰崩, 在沟道发生堵溃效应, 形成特大规模泥石流, 堵断帕隆藏布形成堰塞湖^[23]; 2014 年, 波密县的那隆藏布支沟冰湖右侧岸坡发生高位冰崩, 形成泥石流冲至坡脚导致冰湖发生溃决^[22]; 2018 年, 米林县的色东普发生 2 次高位冰崩并形成远程碎屑流, 堵断雅鲁藏布江形成堰塞湖^[24]。若在冰川积雪区的高位冰川发生断裂或崩塌, 极易诱发下游冰川整体运动, 形成大规模的冰崩体、碎屑流或泥石流并冲至湖区, 可能是造成丹卡弄巴冰湖溃决的主要诱因类型。

2.2 冰川跃动

冰川跃动是一种冰川周期性突然快速运动的现象。受暖湿气候变化影响, 冰川积雪区物质积累速率提升, 冰下静水压力增强, 冰体滑动速度加快^[21]。冰川下游的堵塞地形对冰川运动阻力较大, 造成冰川在跃动前期积蓄了大量的运动势能。经气候条件和遥感解译分析, 丹卡弄巴的冰川积雪区山地垂直气候明显, 估算年均降雨量超过 1000 mm, 加之冰川末端发育右侧 2 条支沟冰川, 堵塞主

冰川形成运动阻力,具备发生冰川跃动的气候和地形条件。

西藏有记录的冰川跃动发生频率较冰崩低,但随着全球气候变暖,近年冰川跃动发生频率有不断上升的趋势^[21]。1950 年和 1968 年,米林县的则隆弄先后 2 次发生冰川跃动,摧毁沟口直白村并堵断雅鲁藏布江^[25];1988 年,波密县的米堆冰川突然跃动,冰川末端断裂导致的巨大冰体冲入光谢错使冰湖发生溃决^[3];2016 年,阿里地区的阿汝错 53 号和 50 号冰川相继发生跃动,分别在堆积区形成 $7 \times 10^7 \text{ m}^3$ 和 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的冰崩体^[26]。若冰川积雪区发生冰川跃动,极易诱发冰川末端越过或裹挟前缘冰碛物冲至湖区,是造成丹卡弄巴冰湖溃决的次要诱因类型之一。

2.3 雪崩

雪崩是斜坡上大量积雪在重力驱动下倾泻而下的物质输移过程,是在丹卡弄巴及帕隆藏布流域广泛发生的自然现象。由于丹卡弄巴岸坡坡度大于 30° ,且垂向高差超过 400 m,雪崩具有高势能、运距长、气浪冲击强等特点,解译可见湖区 2 处雪崩已破坏路径上的侧碛垄并冲至湖区或冰碛体表层。根据当地村民的反馈,每年的 10 月至次年的 5 月是雪崩的高发期,但多以小型规模为主。若冰川积雪区发生大规模雪崩,极易裹挟冰碛物形成碎屑流或泥石流,冲至冰湖或破坏坝体稳定,也可能是造成丹卡弄巴冰湖溃决的次要诱因类型之一。

2.4 其他类型

冰湖的形成和演化是复杂环境条件作用的产物,加上极端气候的影响,冰湖溃决的诱因类型和溃坝模式也呈多样化的发展趋势^[22]。除高位冰崩、冰川跃动和雪崩外,还存在以下几种较低概率的诱发模式:①嘉黎断裂垂直穿越冰川积雪区,断裂带岩体破碎,楔形岩体普遍发育,丹卡弄巴具有发生类似易贡滑坡的岩质崩孕灾条件^[27];②湖盆两岸侧碛垄在强降雨、冰雪融水或水位变化等条件下发生失稳,发生类似吉翁错的滑坡诱发冰湖溃决事件^[5];③嘉黎断裂为第四纪活动断层,若诱发强震则易发生终碛垄的坝体失稳、冰川积雪区的冰崩、雪崩等次生灾害问题,导致冰湖溃决^[28]。虽然以上 3 种其他诱因类型发生概率低,但一旦暴发则冰湖发生溃决的概率极高,仍需高

度关注。

3 冰湖溃决诱发的潜在风险

3.1 冰湖溃决洪水预测

根据调查分析,丹卡弄巴周边地区已溃冰湖溃坝模式以全溃甚至坝基冲蚀为主,考虑到川藏交通廊道重大工程的重要性,本文采用 BREACH 模型对冰湖终碛垄发生一次性全溃的情况开展溃决洪水计算。计算前,利用 BREACH 模型对该地区已溃的光谢错冰湖进行溃决洪水反演,以判断模型的合理性^[10]。从反演结果可以看出,已知溃口深度条件下,溃决洪水流量过程曲线与实测曲线接近,溃决洪水历时相对于实测值基本一致,验证了 BREACH 模型用于冰湖溃决洪水过程是可行的。丹卡弄巴冰湖与光谢错均发育于帕隆藏布南岸,形成时期均为小冰期以来,补给冰川和终碛垄坝体性质相似,因此丹卡弄巴冰湖溃决洪水计算参考了光谢错的部分参数(表 2),最终得到全溃条件下冰湖溃决洪水流量过程曲线(图 4)。根据计算结果,丹卡弄巴冰湖一次性全溃形成的洪水峰值流量为 $2047.57 \text{ m}^3/\text{s}$,高于光谢错冰湖溃决洪峰流量,其值为 $1270 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[3]。

表 2 模型输入参数

Table 2 Model input parameters

输入参数	数值	输入参数	数值
坝顶宽/m	20	初始溃口深度/m	2
溃口边坡/ $^\circ$	45	初始溃口底宽/m	1
曼宁系数	0.045	临界剪切应力 τ_c/Pa	30
坝体下游坡比	0.3249	含量占 90% 与 30% 的颗粒粒径之比 d_{90}/d_{30}	40
冰湖湖面面积/ m^2 $A(Z_s) - h$		平均粒径 d_{50}/m	0.01
初始溃口顶宽/m	3	孔隙比 e	0.493

注: $A(Z_s) - h$ 表示冰湖水深与面积的动态相关关系

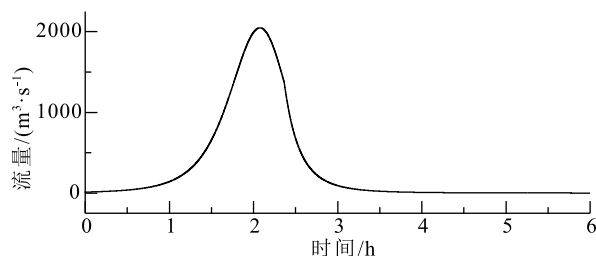


图 4 丹卡弄巴冰湖一次性全溃的溃决洪水流量过程曲线

Fig. 4 GLOF process of one-time total collapse of Dankanongba glacial lake

3.2 冰湖溃决洪水演变成泥石流的分析

冰湖溃决洪水能否演变成泥石流,取决于洪水演进的沟床坡度和松散物源分布状况。对西藏冰湖溃决研究认为^[19],沿程松散物丰富的条件下,沟床平均纵比降小于 30‰,冰湖溃决仅形成洪水;沟床平均纵比降为 30‰~50‰时,溃决洪水演变成稀性泥石流;沟床平均纵比降为 50‰~200‰时,溃决洪水可演变成粘性泥石流。为进一步验证溃决洪水能否形成泥石流,本文收集了周边地区溃决库容相近、演进沟床物源条件相似的已溃冰湖进行类比(图 5)。分析认为,丹卡弄巴形成流通区的平均纵比降为 140.57‰,沟床横剖面呈 U 形且宽窄相间,满足溃决洪水演进形成泥石流的地形条件;演进沟床中沿程雪崩、冰碛物等松散物源丰富,分布有针阔混交林、阔叶林等大量植被,粘粒含量较丰富,满足溃决洪水演进形成泥石流的物源条件。综上所述,丹卡弄巴具备冰湖溃决洪水演变成泥石流的条件。

3.3 冰湖溃决泥石流的演进模拟和承灾体风险分析

冰湖溃决泥石流演进距离、淹没面积、流速、流深等运动参数模拟是分析承灾体风险程度的主要手段或方法。本文以 2015 年的 1:1 万地形数据和野外调查资料为基础,采用 RAMMS:DEBRIS 软件进行数值模拟。数值模拟以丹卡弄巴冰湖发生一次性全溃为参照条件,设置参数包括^[29]:①密度 ρ 为 1.8 g/cm³(过渡性泥石流),重力加速度 g 为 9.8 m/s²;②系数 Lambda 采用默认值 1.00;③保持零深度截止值采用默认值 0.0001 m,以消除模拟实际浅

深度最小化数值的误差;④摩擦系数 μ 为 0.14,湍流系数 ξ 为 180 m/s²;⑤溃决洪水流量 Q 为 2047.57 m³/s(图 4),采用泥石流配方法换算为泥石流洪峰流量, Q_s 为 5961.84 m³/s。

模拟计算结果显示:泥石流在丹卡弄巴沟床演进过程中形成多处临时堵塞点,最大泥深超过 13 m;泥石流冲出量为 674×10⁴ m³,会造成堆积区村民 28 户 85 人淤埋;泥石流冲出山口后绝大部分在堆积区发生停淤,仅少部分冲入主河且平均泥深约为 2 m,受主河宽度大、流量大等条件影响,泥石流模拟结果未发生完全堵江,而是挤占部分主河,引发帕隆藏布往右岸偏流,导致河流淘刷川藏公路、拟建高速公路及其附属设施的基础,构成路基水毁危害。

4 结论与建议

4.1 结论

(1) 丹卡弄巴具有发生冰湖溃决的危险性,其中高位冰崩、冰川跃动、雪崩等是引发冰湖溃决的主要诱因类型。

(2) 丹卡弄巴冰湖全溃条件下溃口处的洪峰流量为 2047.57 m³/s,高于 1988 年的米堆沟光谢错冰湖溃决洪水规模。

(3) 丹卡弄巴具有形成泥石流的地形条件和物源条件,模拟结果显示泥石流的冲出量为 674×10⁴ m³。

(4) 丹卡弄巴冰湖若发生一次性全溃,溃决洪水将转化形成泥石流对堆积区 28 户 85 人造成潜在的淤埋危害,并将挤占帕隆藏布造成主河偏流,对

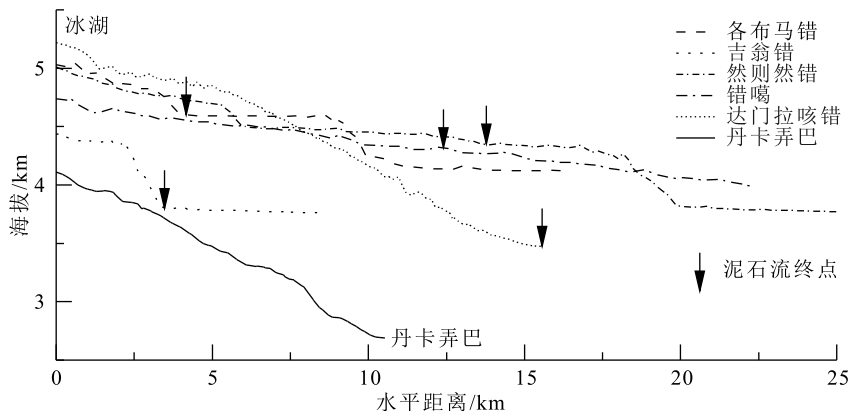


图 5 丹卡弄巴形成流通区与藏东南地区已溃冰湖泥石流形成条件对比

Fig. 5 Comparison of the formation conditions of debris flow in Dankanongba and the breached glacial lakes in southeast Tibet

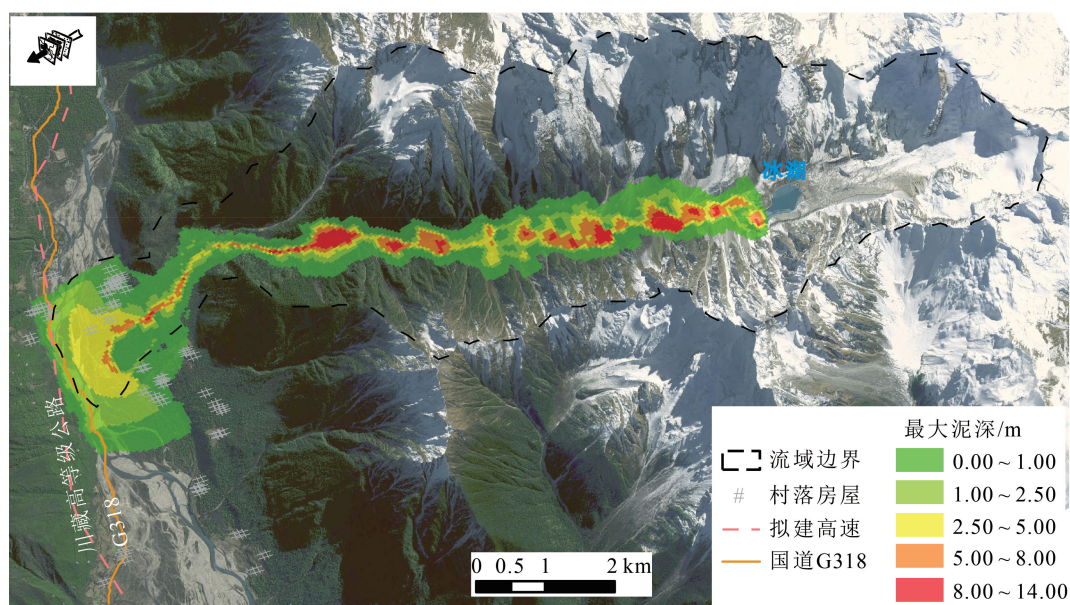


图6 丹卡弄巴冰湖溃决泥石流演进模拟结果(模拟时间4 h)

Fig. 6 Simulation results of the evolution of the GLOF debris flow in Dankanongba (Simulation time: 4 hours)

右岸沿河川藏交通廊道造成潜在的路基水毁危害。

4.2 建议

(1) 开展丹卡弄巴冰湖的精细化地质调查评价工作。采用现场勘察、地形测绘、物探测量等手段, 查明冰湖基本特征, 如库容、坝体组成、高位危险性冰体等, 厘定冰湖发生溃决的危险性和溃决洪水的特征参数; 查明冰湖下游沟谷不良地质体分布, 厘定冰湖溃决洪水形成泥石流、诱发沟岸滑坡复活、堵断主支汇流段河道等灾害链的可能性和程度; 查明冰湖溃决洪水影响区居民房屋、工程设施等承灾体分布, 厘定不同溃决模式下冰湖溃决的风险性, 制定相应的防治对策和应急预案。

(2) 建立冰湖溃决泥石流灾害综合治理体系。针对泥石流挤占帕隆藏布导致川藏交通廊道面临路基水毁危害的问题, 建议右岸线路适当提高路基标高, 或采用深基础防护或丁坝导流等路基防护工程, 抵抗洪水冲刷; 针对泥石流可能淤埋堆积区村民并发生堵河的问题, 建议在堆积区修建单侧防护堤, 使其与帕隆藏布主河呈锐角相交, 防止形成泥石流堰塞坝。

(3) 建立“空天地”一体化的冰湖溃决灾害预警体系。空, 利用卫星影像解译, 监测冰川运动和冰湖扩张变化; 天, 利用机载 LiDAR 或三维扫描仪等无人机航测, 获取冰川、冰湖、终碛垄等关键部位的

精细地表形变; 地, 布设气象、水位、次声等专业监测仪器, 提供预警预报。

(4) 建立冰湖溃决灾害综合风险管理体系。在上述工作基础上, 建立以灾前及时预警、灾后快速保障为目标的综合风险管理体系, 通过网络、短信、广播等新闻媒介, 让交通部门、国土部门、承灾区村民等及时掌握丹卡弄巴冰湖的灾情信息, 加强防灾减灾基础知识的宣传和普及, 增强防灾意识和自我保护能力, 使交通部门、国土部门与当地村民做到“灾前、灾中和灾后”的全过程风险管理。

致谢: Landsat TM、Landsat ETM⁺、Landsat OLI 遥感数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn>), 气象数据来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn>), 在此一并表示感谢。

参考文献

- [1] 王世金, 汪宙峰. 冰湖溃决灾害综合风险评估与管控——以中国喜马拉雅山区为例[M]. 北京: 中国社会科学出版社, 2017.
- [2] 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.
- [3] 李德基, 游勇. 西藏波密米堆冰湖溃决浅议[J]. 山地研究, 1992, (4): 219-224.
- [4] 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.

- [5] 刘建康,周路旭,张佳佳,等.西藏嘉黎吉翁错冰湖溃决机制特征[J].地质论评,2021,67(z1): 17-18.
- [6] Huggel C, Haeblerli W, Käab A, et al. An assessment procedure for glacial hazards in the Swiss Alps [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41(6): 1068-1083.
- [7] Wang S, Che Y, Ma X. Integrated risk assessment of glacier lake outburst flood (GLOF) disaster over the Qinghai-Tibetan Plateau (QTP) [J]. Landslides, 2020, 17(12): 2849-2863.
- [8] Fread D L. DAMBRK: The NWS Dam-Break Flood Forecasting Model [M]. Silver Spring, Maryland: U.S. National Weather Service, Hydrologic Research Laboratory, 1982: 1-56.
- [9] Fread D L. BREACH: An Erosion Model For Earthen Dam Failures [M]. Silver Spring, Maryland: U.S. National Weather Service, National Oceanic and Atmospheric Administration, Hydrologic Research Laboratory, 1991: 1-35.
- [10] 周路旭,刘建康,李元灵,等.川藏交通廊道龙利空泽错冰湖溃决危险性评价[J].地理与地理信息科学,2020,36(6): 38-45,53.
- [11] Liu J, You Y, Chen X, et al. Characteristics and hazard prediction of large-scale debris flow of Xiaojia Gully in Yingxiu Town, Sichuan Province, China [J]. Engineering Geology, 2014, 180: 55-67.
- [12] 许晓君,胡卸文,许泽鹏,等.四川壤塘县石吾陇沟泥石流启动条件与堵河程度分析[J].中国地质灾害与防治学报,2019,30(3): 44-53.
- [13] 王世金,秦大河,任贾文.冰湖溃决灾害风险研究进展及其展望[J].水科学进展,2012,23(5): 735-742.
- [14] 铁永波,唐川.冰湖溃决评价体系研究进展[J].水科学进展,2009,20(3): 448-452.
- [15] 王欣,刘时银.冰湖溃决灾害研究进展[J].冰川冻土,2007,29(4): 626-635.
- [16] 刘建康,周路旭.国内外冰湖溃决研究进展[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(8): 44-50.
- [17] 周路旭,刘建康,李元灵.一种冰湖库容计算方法的探讨[J].科学技术与工程,2020,29(3): 162-172.
- [18] 任金卫,沈军,曹忠权,等.西藏东南部嘉黎断裂新知[J].地震地质,2000,22(4): 344-350.
- [19] 吕儒仁.西藏泥石流与环境 [M].成都:成都科技大学出版社,1999.
- [20] 王军朝,刘建康,陈龙,等.国道 G318 暨重要城镇(林芝市)地质灾害调查研究成果图集 [M].成都:成都地图出版社,2019.
- [21] 郭光剑,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.
- [22] 刘建康,张佳佳,高波,等.我国西藏地区冰湖溃决灾害综述[J].冰川冻土,2019,41(6): 1335-1347.
- [23] 施雅风,杨宗辉,谢自楚,等.西藏古乡地区的冰川泥石流[J].科学通报,1964,(6): 542-544.
- [24] 刘传正,吕杰堂,童立强,等.雅鲁藏布江色东普沟崩滑-碎屑流堵江灾害初步研究[J].中国地质,2019,46(2): 7-22.
- [25] 张文敬.南迦巴瓦峰跃动冰川的某些特征 [J].山地研究,1985,(4): 46-50.
- [26] Käab A, Leinss S, Gilbert A, et al. Massive collapse of two glaciers in western Tibet in 2016 after surge-like instability [J]. Nature Geoscience, 2018, 11: 114-120.
- [27] 黄润秋,许强.中国典型灾难性滑坡 [M].北京:科学出版社,2008.
- [28] Richardson S D, Reynolds J M. An overview of glacial hazards in the Himalayas [J]. Quaternary International, 2000, 65: 31-47.
- [29] 宋兵,沈军辉,李金洋,等. RAMMS 在泥石流运动模拟中的应用——以白沙沟泥石流为例 [J].泥沙研究,2018,43(1): 32-37.