

引用格式:王翔,陈果,戴晓爱,陈永俊,张诗琪.藏西南典型危险性冰湖监测与泥石流溃决模拟[J].山地学报,2021,39(5):687-700.

WANG Xiang, CHEN Guo, DAI Xiaoi, CHEN Yongjun, ZHANG Shiqi. Monitoring and simulation of debris flow of typical dangerous glacial lake in Southwestern Tibet, China [J]. Mountain Research, 2021, 39(5):687-700.

藏西南典型危险性冰湖监测与泥石流溃决模拟

王翔^{1a}, 陈果^{1a,1b*}, 戴晓爱^{1a}, 陈永俊², 张诗琪^{1a}

(1. 成都理工大学 a. 地球科学学院; b. 生态环境学院, 成都 610059;

2. 中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083)

摘要:藏西南地区位于喜马拉雅山脉中段,是我国冰湖溃决泥石流频发的重灾区之一。冰湖溃决泥石流数值模拟有助于认识灾害机理和评估灾害风险。冰湖溃决研究大多关注溃决洪水,针对青藏高原冰湖溃决泥石流的仿真模拟较少。本文基于1976—2018年Landsat系列遥感影像、野外调查和FLO-2D水文动力学模型等数据与方法,对藏西南地区典型冰湖强宗克措和吉莱普措开展动态变化分析、地貌调查和溃决泥石流模拟。结果表明:(1)气候变暖使得冰川不断退缩,致使典型冰湖规模持续扩张,强宗克措与吉莱普措的规模在近40 a分别增长了0.61 km²和0.26 km²;(2)触发冰湖溃决的地貌环境充分发育,冰湖发生溃决的潜在可能性增大,其中强宗克措尤为明显。因此,需进一步加强对强宗克措等典型冰湖的监测、预防和溃决灾害的治理;(3)FLO-2D模型可有效模拟复杂的冰湖溃决泥石流,有助于评估冰湖溃决灾害对下游的影响,模拟结果可作为制定下游地区灾害防治措施的依据。

关键词:藏西南;冰湖溃决;遥感监测;数值模拟

中图分类号: P954

文献标志码: A

随着全球气候变暖,喜马拉雅山脉冰川大规模消融退缩,冰缘地貌广泛发育。自20世纪70年代以来,青藏高原形成了大量冰湖^[1]。高原冰湖溯源侵蚀扩张加剧^[2-3],冰湖的扩张伴随着活跃的区域地壳运动,冰湖溃决(Glacier Lake Outburst Flood, GLOF)的风险不断增高^[4-7]。冰湖溃决一般具有突发性,瞬时流量远远高于冰雪消融补给。在喜马拉雅山地区,冰湖溃决洪水高速俯冲,裹挟沿程碎屑物转变为溃决泥石流,给下游居民地和基础设施造成严重破化^[8]。

高原冰湖溃决泥石流的动力学过程不同于沟谷泥石流和洪水,其演进过程与洪峰流量及加入

洪水中碎屑物等条件有关^[9]。数值模拟有助于认识和评估冰湖溃决灾害的危害和风险^[10]。一般主要是计算溃决流体的最大演进距离、体积和淹没面积3个参量来分析受灾区的风险状况^[11-12]。对于冰湖溃决模拟,国内外学者相继从采用简单的经验模型转变为基于复杂的物理模型^[10]。与经验模型不同,物理模型在模拟过程中会考虑到流体与颗粒之间的相互作用及湍流等流动行为。目前,常用的物理数值模拟模型有FLDWAN^[13-14], BASEMENT^[15], HEC-RAS^[8], FLO-2D^[16]等,并在全球不同地区被应用于冰湖溃决洪水建模分析,但已有研究对冰湖溃决泥石流的仿真模拟依然较为

收稿日期(Received date):2020-11-15; 改回日期(Accepted date):2021-10-16

基金项目(Foundation item):成都理工大学“珠峰科学研究计划”(80000-2020ZF11410);青藏高原及其东缘人文地理研究中心开放基金(RWDL2021-ZD003) [“Everest Scientific Research Project” of Chengdu University of Technology (80000-2020ZF11410); Open Fund of Human Geography Research Center of Qinghai-Tibet Plateau and its Eastern Rim (RWDL2021-ZD003)]

作者简介(Biography):王翔(1994-),男,安徽池州人,博士研究生,主要研究方向:遥感与冰冻圈灾害。[WANG Xiang (1994-), male, Ph. D. candidate, research on cryosphere remote sensing and disaster] E-mail: wangxiang@stu.cdut.edu.cn

* 通讯作者(Corresponding author):陈果(1986-),男,博士,副教授,主要研究方向:生态环境变化。[CHEN Guo (1986-), male, Ph. D., associate professor, research on ecological environment change] E-mail: chenguo17@cdut.edu.cn

缺乏。事实上,冰湖溃决发生后,产生的溃决洪水往往都会转变为溃决泥石流。

藏西南地区位于喜马拉雅山脉中段,是中国与不丹、尼泊尔等国的陆地交界处,也是我国确定的对外开放重点地区和重要口岸^[11, 17]。由于区域内冰湖不断扩张导致溃决事件频发^[18],一些跨境流域的冰湖溃决泥石流对当地和下游国家均造成一定破坏,成为国际灾害事件^[19]。对藏西南地区具有潜在溃决风险的冰湖进行重点监测和溃决泥石流灾害模拟分析,可为下游地区灾害防治措施提供依据。本文以藏西南地区两个潜在溃决冰湖强宗克措和吉莱普措为研究对象,基于 2019 年 6 月的野外地貌调查,完成了两个冰湖和冰碛坝的几何形态测量,结合遥感数据和地理信息技术,开展典型冰湖溃决灾害的遥感监测与地貌分析。以历史溃决典型冰湖吉莱普措为例,借助 FLO-2D 水文动力模型,模拟溃决泥石流演进过程。研究结果可为强宗克措和吉莱普措及藏西南地区的 GLOF 灾害提供防灾减灾的技术参考。

1 研究区概况

强宗克措($27^{\circ}55'48''N, 87^{\circ}46'12''E$)和吉莱普措($27^{\circ}57'36''N, 87^{\circ}48'36''E$)位于藏西南地区的定结县日屋镇(图 1),是受冰川作用形成的冰川终碛湖,二者均以冰川融水补给为主。在流域上属于朋曲流域。该区域在冈瓦纳北缘特提斯构造范围内,属于喜马拉雅山褶皱山系构造^[12, 20-21],区内新构造运动与环境地质灾害十分剧烈。

靠近研究区最近的定日气象站点资料表明,研究区年降水量则呈波动变化,整体变化趋势不显著。定日站在 1971—2015 年时段内的平均年降水量达到 292.2 mm。这是由于位于喜马拉雅山北坡的定日站受山脉阻挡,水汽难以输入,而年均温整体表现为明显上升趋势。定日站在 1971—2015 年时段内年平均气温变化幅度达到 $2.15^{\circ}C$,而增温率达到 $0.33^{\circ}C/(10\text{ a})$ 。先前的研究认为,自 20 世纪 70 年代开始,喜马拉雅山气温波动上升,突变发生在 1997 年,之后升温显著,且增温速率明显加快^[22-23]。

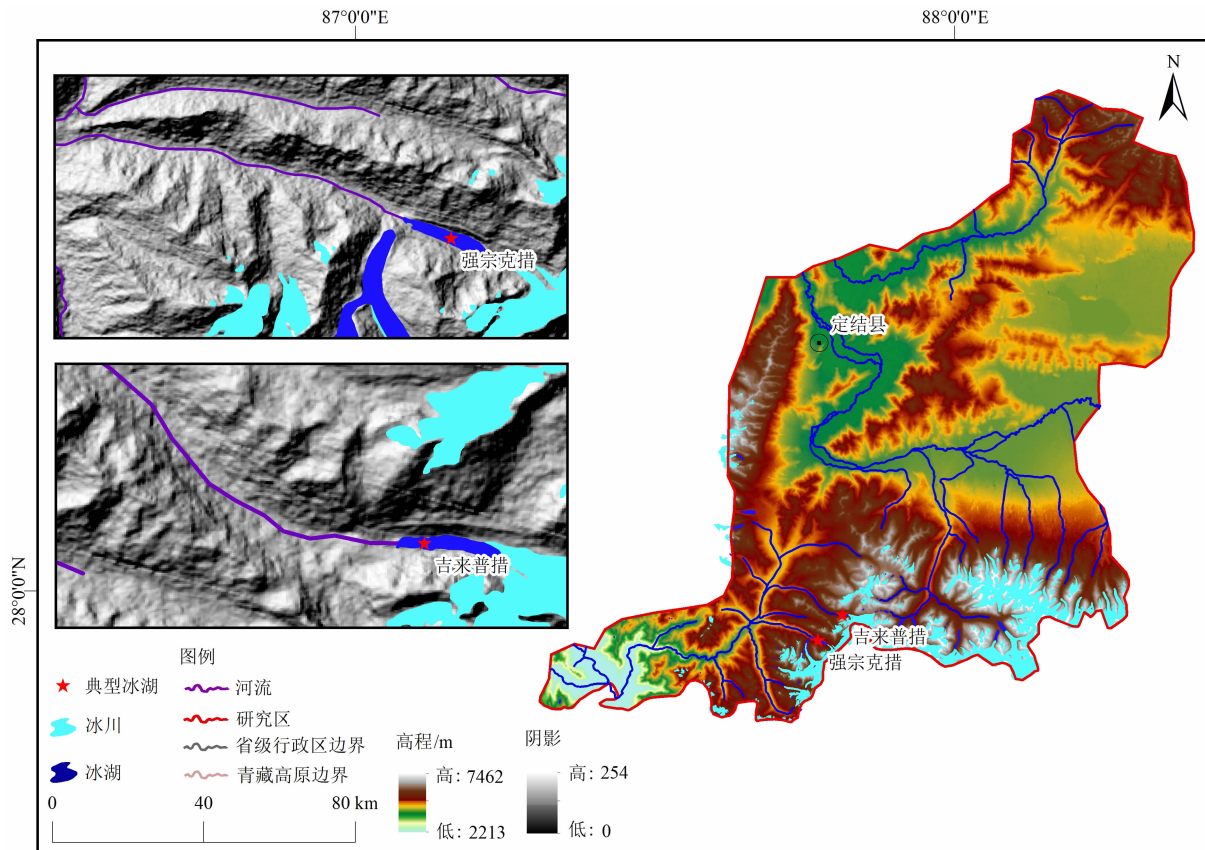


图 1 研究区概况

Fig. 1 Research area profile, China

2 数据和方法

2.1 数据

采用 Landsat 遥感影像数据 (MSS/78 m、TM/30 m、ETM+/15 m、OLI/15 m) 开展冰川、冰湖信息提取, 由 USGS 提供 (United States Geological Survey), 网址为 (<https://earthexplorer.usgs.gov/>)。共选取了 1976—2018 年 10 期 63 张 Landsat 系列遥感影像。选取的数据成像时间大多在秋季和初冬, 该时间段内, 冰湖变化差异较小, 云雾覆盖率较低。而本研究选取的数据云覆盖率均低于 10%, 此外还考虑到研究区积雪覆盖率应最小。同时选取不同时段、同一区域 (前后 1 年) 的少云雾或无云雾遥感影像来替代研究时段云量高的影像^[12]。

其它数据包括: (1) ASTER GDEM V2 数字高程模型 (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model), 空间分辨率 30 m, 利用高程信息辅助冰湖边界的提取和水文动力建模 (<http://www.gscloud.cn/>)。 (2) 从中国气象科学数据共享网获取了气象资料 (<http://data.cma.cn/>)。 (3) 来自于全国地理信息资源目录服务系统 (National Catalogue Service For Geographic Information) 的 1:25 万基础地理信息数据 (<http://www.webmap.cn/>)。

2.2 方法

2.2.1 冰湖与冰川制图

首先, 对 Landsat 遥感数据进行假彩色合成处理 (波段 4/3/2、5/4/3、7/5/2), 且通过图像融合来提高遥感影像空间分辨率, 融合后 ETM+ 和 OLI 的遥感影像空间分辨率由 30 m 提高到 15 m。然后, 基于预处理的影像, 开展目视解译冰湖与冰川边界信息^[24]。此外, 引入 ASTER GDEM V2 生成的坡度图开展叠加解译分析, 按照阴影坡度大于湖面坡度的原理消除山区遥感图像的阴影问题。这里以湖面坡度大于 5° 的水体为阴影, 否则为冰湖^[12, 25]。同时, 依据高空间分辨率的 Google Earth 影像, 检查和修正提取的冰湖和冰川信息^[12]。

针对基于遥感影像提取的冰湖和冰川面积误差, 本文采用 HANSHAW 等人^[26-27]的方法来估算, 误差公式为:

$$U_a(1\sigma) = \frac{P}{G} \times \frac{G^2}{2} \times 0.6872 \quad (1)$$

式中, U_a 为最大面积误差; G 为影像像元分辨率; P 为冰湖或冰川边界周长 (m); σ 为方差^[12, 28]。

2.2.2 溃决泥石流数值模拟模型

利用 O'BRIEN^[29-30] 开发的水文动力模型 FLO-2D 进行泥石流演进模拟, 并进行模型的敏感性分析。FLO-2D 模型可以模拟一相液态水流和二相固液泥石流, 这是基于非牛顿流体模式与中心有限差分数值方法实现^[31-32]。FLO-2D 模型主要由控制方程 (式 2~4) 和流变方程 (式 5) 构成, 其中连续方程 (式 2) 与运动方程 (式 3、式 4) 构成控制方程。力平衡的动量守恒由运动方程表示, 流体体积质量守恒由连续方程控制, 而泥石流堆积运动过程则由流变方程以扩散波模式和动力波模式模拟^[30]。

连续方程公式为:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = I \quad (2)$$

式中, t 为流体持续时间 (s); h 为流体深度 (m); v 为流体在 y 垂直方向上的平均流速 (m/s); u 为流体在 x 水平方向上的平均流速 (m/s); I 是降雨强度 (mm)^[12]。

运动方程公式为:

$$S_{fx} = S_{ox} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\partial u}{g \partial t} - u \frac{\partial u}{g \partial x} - v \frac{\partial u}{g \partial y} \quad (3)$$

$$S_{fy} = S_{oy} - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{\partial v}{g \partial t} - u \frac{\partial v}{g \partial x} - v \frac{\partial v}{g \partial y} \quad (4)$$

式中, g 为重力加速度 (m/s^2); S_{fx} 、 S_{fy} 分别为 x 、 y 方向上的摩擦坡降 (%); S_{ox} 、 S_{oy} 为 x 、 y 方向上的沟床坡降 (%)。

流变方程公式为:

$$f_y = S_y + S_v + S_{td} = \frac{\tau_y}{h\gamma_m} + \frac{k\eta u}{8h^2\gamma_m} + \frac{n^2 u^2}{h^{4/3}} \quad (5)$$

式中, f_y 为摩擦坡降 (%); S_{td} 为紊流—分散坡降 (%); S_v 为粘滞坡降 (%); S_y 为屈服坡降 (%); τ_y 为屈服应力 (Pa); γ_m 为流体比重; k 为层流阻滞系数; η 为粘滞系数; n 为研究区曼宁系数^[12]。

模型的建立包括创建用于建模的地形模型、曼宁粗糙度值与层流阻滞系数及水文流量过程线等相关参数的选择。根据已有研究表明, ASTER GDEM 数字高程模型能够适用于青藏高原 GLOF 的模拟要求^[33]。因此, 本模拟采用空间分辨率为 30 m 的 ASTER GDEM V2, 考虑模拟精度和模拟效率, 将模

拟网格划分为 30 m×30 m 大小。然后,依据 FLO - 2D 手册和相关文献资料,选择 GLOF 模拟参数见表 1。

表 1 冰湖 GLOF 模拟参数

Tab. 1 Simulation parameters for moraine lake
outburst debris flow processes

α_1	β_1	α_2	β_2	K	n	C_v
0.811	13.72	0.00462	11.24	2280	0.15	0.5

注: K 为层流阻滞系数; n 为曼宁系数; C_v 为体积浓度; α_1 、 β_1 、 α_2 、 β_2 为经验系数^[14,16,34-35]。

(1) 水文流量过程线

冰湖溃决产生的实时水文流量过程线通常难以获取。但冰湖溃决产生的水文流量线的大小主要取决于冰湖溃决水体体积和溃口高度。对于水文流量过程线的估算,利用经验公式是当前最简单的方法。本文在结合前人研究的基础上^[8,36],采用 FROELICH 经验公式估算洪峰流量 Q_p (m^3/s)^[37], 设定的模拟时间为 2 h,然后利用五边形方法进行输出^[38],公式如下:

$$Q_p = 0.607 V^{0.295} h_w^{1.24} \quad (6)$$

式中, V 为溃决冰湖体积(m^3); h_w 为湖面高度(溃决前)至湖底高度(溃决后)的高程值(m)^[12]。依据徐道明等^[39]的调查,吉莱普措在 1964 年溃决体积为 $23.4 \times 10^6 \text{ m}^3$,吉莱普措的溃口高度和溃决水深均为 41 m。

(2) 敏感性分析

由于模型参数的选取会影响泥石流流动特性,所以很难评估冰湖溃决泥石流模拟过程中的不确定性。此时,进行敏感性分析有助于提供泥石流流动力学中主导参数的有用信息。本文在保持其他参数不变的情况下,通过输入不同水文流量曲线(图 2)和曼宁系数(0.10,0.15,0.20)开展模型的敏感性分析。该分析有助于认识不同的曼宁系数和水文流量曲线对溃决泥石流在淹没面积、淹没深度、流动速度等方面的影响。

3 结果和分析

3.1 冰湖及母冰川变化

冰湖与母冰川面积信息有助于人们快速了解冰

湖的变化和稳定性状况^[40-44]。本研究结合 2019 年 6 月的野外实地调查和遥感影像对藏西南地区强宗克措、吉莱普措典型冰湖及其母冰川变化,进行时空尺度的变化特征分析,获得冰湖及其母冰川年际变化。

(1) 强宗克措

根据遥感影像发现强宗克措面积从 1976 年 ($0.34 \pm 0.03 \text{ km}^2$) 到 2018 年 ($0.95 \pm 0.07 \text{ km}^2$) 一直保持着扩张趋势,扩张比率达到 179% (图 3a)。强宗克措全长 3.12 km,其母冰川冰舌直接插入冰湖,终碛坝顶宽度约为 382 m,坝体南侧上部紧挨着一条山谷冰川,该冰川长约 5270 m,面积达到 $6.20 \pm 0.25 \text{ km}^2$ (图 3b)。强宗克措湖口海拔 4917 m,冰湖两岸崩滑发育明显(图 3c、图 3d)。强宗克措终碛坝体由不同粒径的冰碛物与死冰组成^[39],坝体表面覆盖着中小粒径的碎屑物(图 3e)。根据以往的研究,这类终碛堤通常在具有良好的渗透性时其稳定性也普遍较差,它在正常的气候条件下成为湖泊泄水的主要途径,起到平衡湖泊水量的作用^[7,37]。但是在气候急剧变化的情况下,湖泊水量平衡将失效,如当气温急剧上升或降水快速增多情况下,终碛堤可能发生管涌致使终碛堤失稳发生溃决。同时,野外调查发现强宗克措呈现蓄满状态,其湖水沿终碛坝溢流而出(图 3f),而这正是形成溃决灾害的首要条件。水流的下切侵蚀,进一步增强了坝体的不稳定性。当发生冰崩、雪崩或滑坡时,瞬间大量的物质进入湖体,引发涌浪冲击坝体,势必造成急速溃决,而这正是喜马拉雅地区冰湖溃决的主要原因^[37,45-46]。强宗克措母冰川面积(图 4a)从

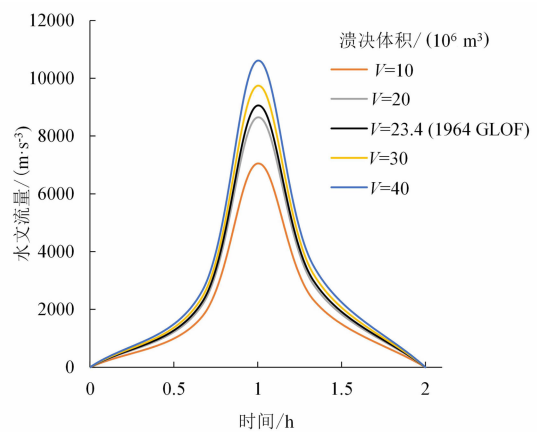


图 2 估算的吉莱普措历史溃决流量过程线

Fig. 2 Estimated Jilaipuo historical failure flow process line

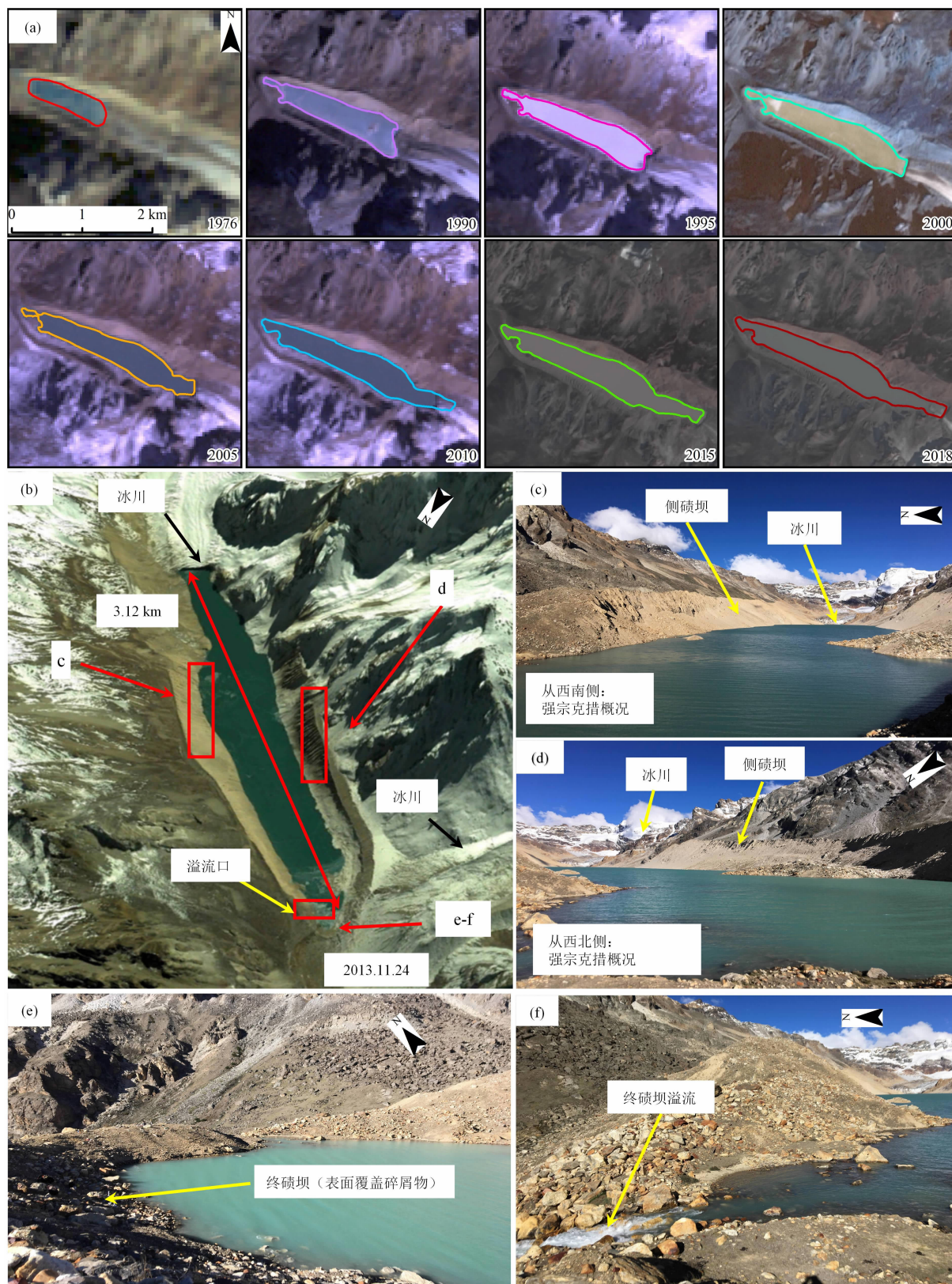


图3 强宗克措概况：

(a) 1976—2018 年际演化；(b) 强宗克措地貌概况；(c、d) 强宗克措侧碛坝；(e) 强宗克措终碛坝；(f) 终碛坝溢流

Fig. 3 Overview of Qiangzongkeco: (a) 1976 to 2018 intravolution; (b) overview of Qiangzongkeco geomorphology;

(c, d) Qiangzongkeco lateral moraine dam; (e) Qiangzongkeco terminal moraine dam; (f) overflow of terminal moraine dam

注：图 3c ~ f 由野外调查团队成员于 2019 年 6 月 20 日考察时拍摄。

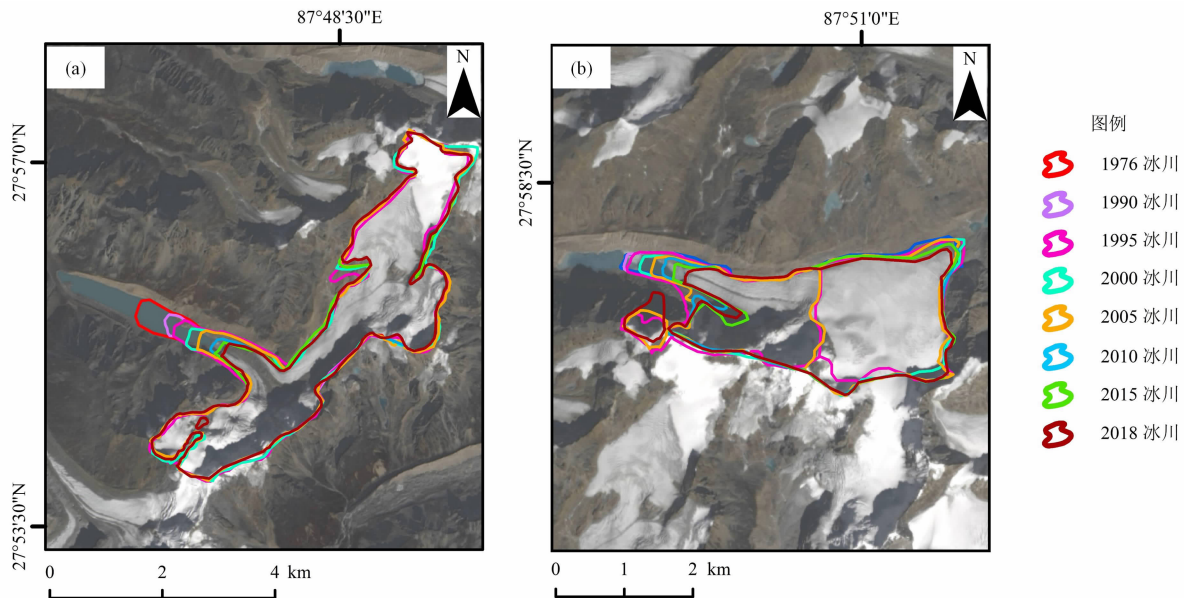


图 4 1976—2018 典型冰湖母冰川演化:(a)强宗克措;(b)吉莱普措

Fig. 4 Evolution of a typical glacier lake mother glacier from 1976 to 2018:(a) Qiangzongkeco; (b) Gelhaipuco

1976 年到 2018 年共减少了 1.17 km^2 , 退缩比率为 13%, 年平均消融速率为 $0.03 \text{ km}^2/\text{a}$ 。特别是在 2000 年后, 强宗克措母冰川处在快速消融状态, 消融面积达到 0.86 km^2 , 年均退缩速率是 2000 年前的 5 倍占整个减少量的 74%。因此, 持续扩张的强宗克措使得其终碛坝承受的静水压力不断上升, 加大溃决风险。

(2) 吉莱普措

1988 年($0.16 \pm 0.02 \text{ km}^2$)至 2018 年($0.42 \pm 0.04 \text{ km}^2$), 吉莱普措冰湖面积扩张了近 3 倍, 年平均增长速率 $0.01 \text{ km}^2/\text{a}$, 扩张比率高达 163% (图 5a)。吉莱普措在 1964 年 9 月 21 日发生了冰湖溃决, 溃决原因是冰崩引发的湖水涌浪冲击坝体导致溃决, 溃决产生的泥石流中泥沙总量达到 $1.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ [39, 41]。吉莱普措湖口海拔约 5260 m, 冰湖侧碛崩滑情况较发育 (图 5b、图 5c), 吉莱普措母冰川直接伸入湖中 (图 5d), 这在区域地震活跃和气候快速变暖的背景下, 极易发生冰崩、滑坡和崩塌等灾害, 在短时间内大量固体物源滑入冰碛湖, 激起涌浪冲击堤坝引发溃决 [47]。同时, 在终碛坝南侧有一处溢流口 (图 5d), 同样在气温升高与降雨增多的情况下, 溢流量增加进一步下切侵蚀, 导致冰碛坝稳定性降低乃至溃决, 而这些都是吉莱普措发生溃决的潜在影响因素。冰湖后缘母冰川冰舌裂隙发育强

烈, 在 2002—2017 年向母冰川溯源扩张距离达到平均每年 48 m (图 5e ~ 图 5i)。吉莱普措母冰川在 1988—2018 年, 面积共减少了 1.09 km^2 , 年平均减少速率为 $0.03 \text{ km}^2/\text{a}$, 减少比率达到 20% (图 4b)。吉莱普措母冰川在 2000 年前后, 消融的面积相当, 在 2000 年之前消融了 0.58 km^2 , 之后则减少了 0.51 km^2 , 而 2000 年之前的年均减少速率 ($0.05 \text{ km}^2/\text{a}$) 高于 2000 年之后 ($0.03 \text{ km}^2/\text{a}$)。

3.2 GLOF 数值建模

本研究使用 FLO-2D 模型进行吉莱普措冰湖溃决泥石流的模拟工作与敏感性分析, 并绘制了泥石流淹没图 (图 6、图 7)。FLO-2D 模型通过模拟计算流体在 x 水平方向上的流动速度和在 y 垂直方向上的流动深度 [12, 36]。在模拟中, 以吉莱普措 1964 年溃决水量为模拟溃决水量, 沟道与河漫滩的曼宁系数为 0.15。模拟结果表明, 淹没面积为 4.9 km^2 , 泥石流平均流速和平均深度分别为 2.97 m/s 与 11.6 m 。模拟结果还显示, 位于沟道下游的吉勒村泥石流平均深度达到 21.3 m , 平均流速为 8.675 m/s , 而泥石流到达时间大约是 1.5 h。该模拟结果可作为制定下游地区防灾减灾措施的依据。

当吉莱普措发生溃决时, 产生的泥石流沿着沟道流入萨作曲, 引发主河道堵塞。河水将倒灌淹没居民地, 且堵塞的坝体将形成堰塞湖, 易造成二次溃

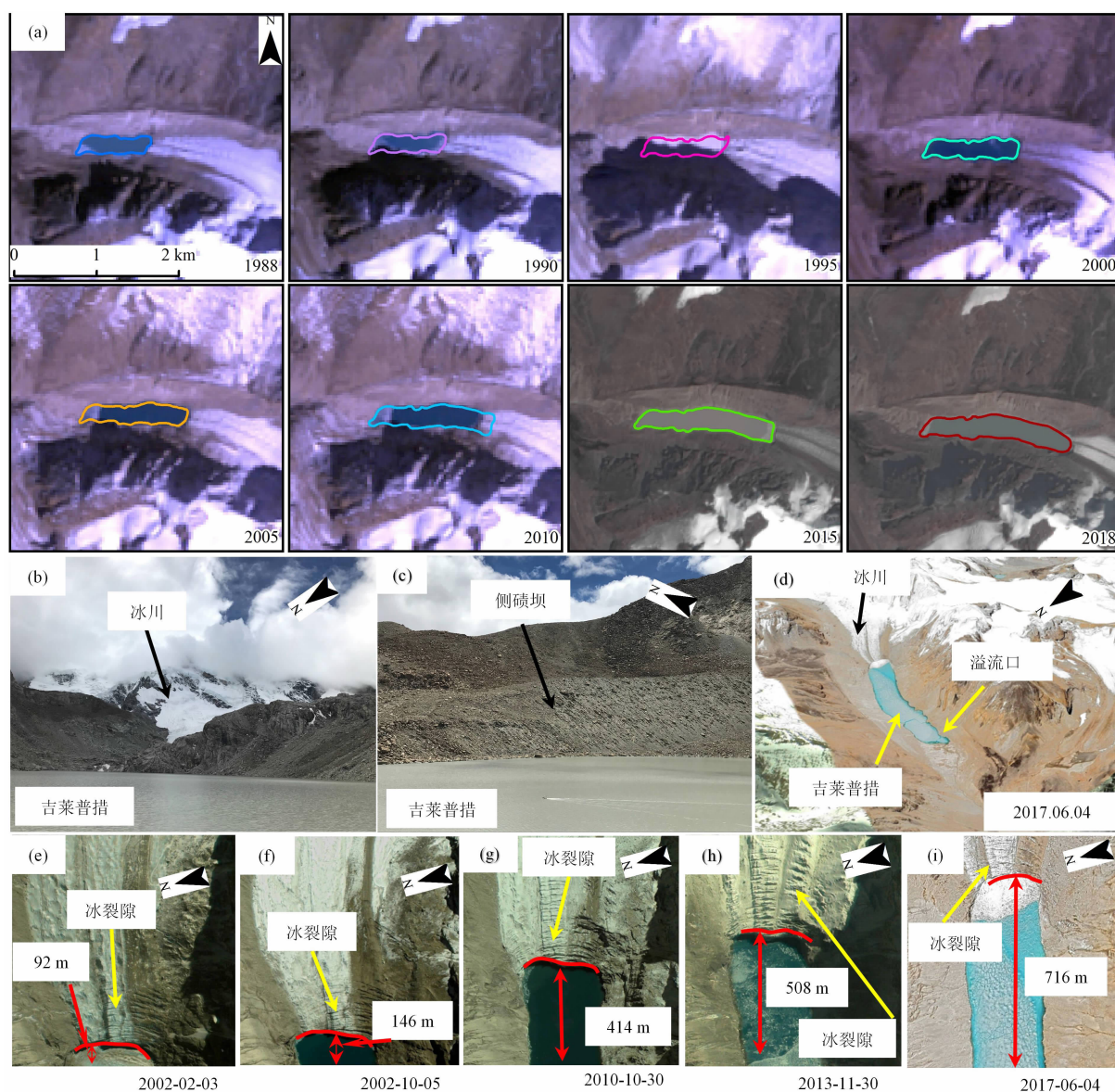


图5 吉莱普措概况：

(a) 1976—2018 年际演化；(b) 吉莱普措母冰川；(c) 吉莱普措侧碛坝；(d) 吉莱普措地貌概况；(e~i) 吉莱普措扩张过程

Fig. 5 Overview of Gelhaipuco: (a) evolution from 1976 to 2018; (b) Gelhaipuco mother glacier;

(c) Gelhaipuco lateral moraine dam; (d) overview of Gelhaipuco geomorphology; (e~i) Gelhaipuco expansion process

注：图 5b~d 由野外调查团队成员于 2019 年 6 月 18 日考察时拍摄。

决灾害。此外,夏秋季节冰川消融达到最大,且降水集中,研究区和整个青藏高原水系处于充沛阶段。冰湖溃决形成的泥石流顺势直下与河水相汇,转化为破坏力更大的洪水、泥石流等地质灾害。

4 讨论

4.1 冰湖及母冰川关系

冰湖与其母冰川之间的关系极其密切,母冰川

退缩是引发冰湖扩张的直接原因^[12, 48]。在过去的几十年间,喜马拉雅山地区年平均气温显著上升,喜马拉雅山北坡气温上升幅度明显高于南坡,且北坡的气温增幅是南坡的近两倍^[11, 49]。先前的研究表明了这一点,在高海拔地区,随着海拔升高,变暖趋势更为显著^[50-51]。具体来说,随海拔升高增温率先增大,最大值出现在 4800 ~ 6200 m,随后慢慢趋于稳定^[52]。这加速了研究区冰川规模不断消融及退缩,冰川消融所产生的大量冰川融水为冰湖扩张提

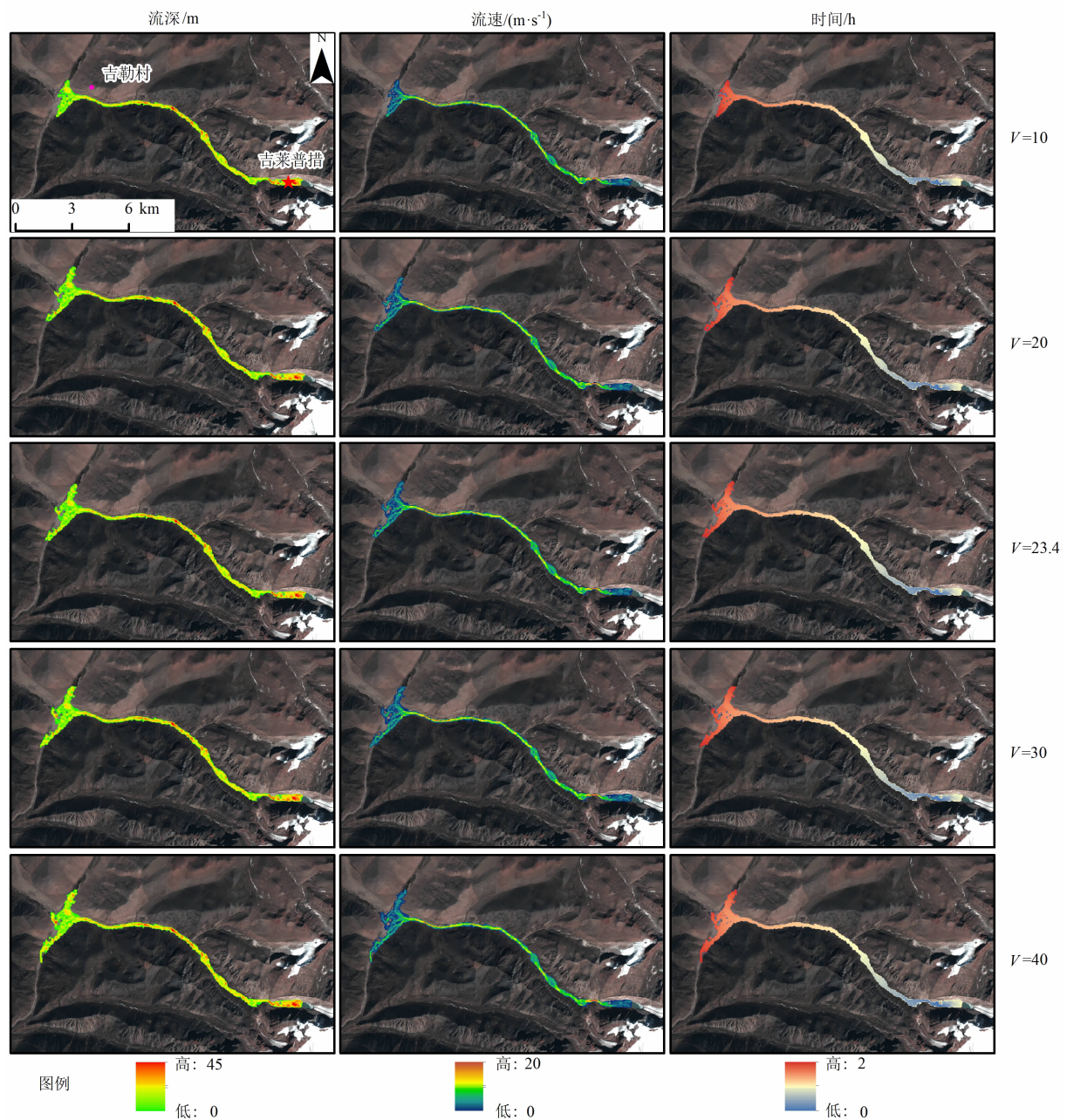


图 6 不同溃决水量 (10^6 m^3) 情况下模拟的吉莱普措溃决泥石流流深、流速和到达时间

Fig. 6 Simulation of the flow depth, velocity, and arrival time of the Gelhaipuco outburst debris flow under different water volume (10^6 m^3)

供了充沛的补给源,而冰川退缩则为冰湖扩张提供了足够的空间^[8]。通过对强宗克措、吉莱普措 2 个典型冰湖与母冰川的面积变化分析得知,在近几十年间母冰川规模均呈明显退缩,而冰湖规模也相应的增加,这一变化过程,进一步显示出冰川退缩和冰湖扩张具有很好的相关性。总的来说,区域气温升高致使冰湖母冰川消融退缩是藏西南地区冰湖扩张变化的重要动力。

野外调查表明,母冰川与冰湖相连,冰川舌几乎

直接伸入湖中,在冰川舌上部裂缝分布明显,当冰舌达到一定坡度时受外力影响,极易发生冰崩。终碛坝则是由不同粒径的碎屑物及死冰等物质组成,大部分均出现渗流或溢流现象,冰碛坝的不稳定性很明显。在冰湖两边的侧碛坝地貌呈现出陡峭的形态,且滑坡现状发育强烈,先前的研究表明当坝体斜坡达到 $45^\circ \sim 70^\circ$ 时,通常容易发生滑坡^[53],而藏西南地区典型冰湖的侧碛坝通常都能达到 45° 及以上。同时,不断扩张和升高的水体又侵蚀侧碛坝体,

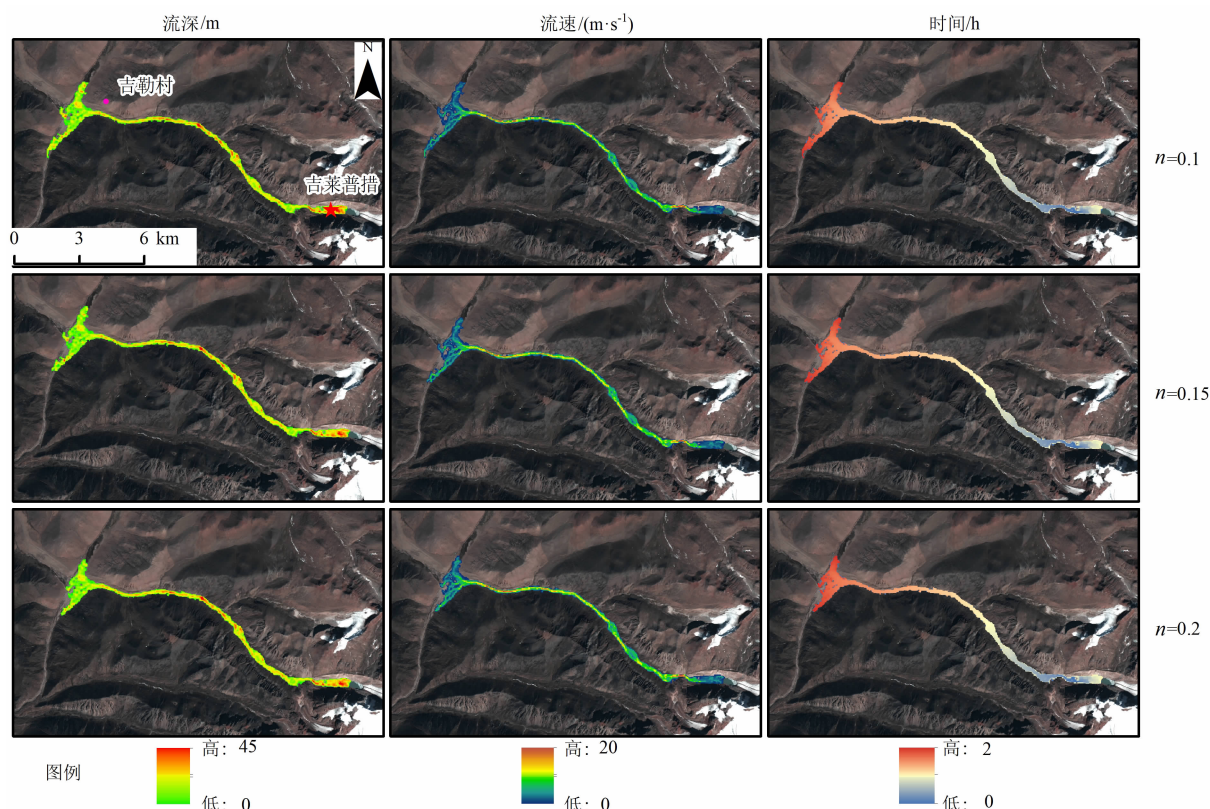


图7 不同曼宁系数情况下模拟的吉莱普措溃决泥石流流深、流速和到达时间

Fig. 7 Simulated flow depth, velocity and arrival time of the Gelhaipuco outburst debris flow under different Manning coefficients

提高坝体水分饱和度,增加了侧碛坝体的不稳定性,这些因素的共同作用使得侧碛坝滑坡发生的可能性大大提高。因此,随着全球变暖促使冰湖不断扩张,终碛坝塌陷管涌,冰崩、雪崩及侧碛坝滑坡所造成的涌浪等,将最终导致冰湖的溃决。

4.2 冰湖溃决泥石流建模

冰湖溃决流动的过程通常由清水流转换到含泥沙流,再到泥石流^[10]。先前的研究已经使用了BASEMENT^[15], HEC-RAS^[8]等模型来模拟高原冰湖GLOF事件。然而,这些模型无法用于冰湖溃决泥石流的模拟。研究发现冰湖溃决泥石流的峰值流量比只计算洪水的结果要高得多^[10]。FLO-2D模型则可以模拟泥石流,它是二维数值模型,结合宾汉剪应力和湍流一分散剪应力来计算流体运动^[10]。此外,高精度的DEM对于准确模拟冰湖溃决泥石流至关重要,因为它可以更加真实地反映GLOF沟道的侵蚀和沉积状况。尽管采用的第二版ASTER GDEM数据精度有了很大改进,能够满足GLOF的模拟,但空间分辨率依然较粗。最新研究表明,基于

无人机衍生的DEM产品,同时具备低成本和非常高的空间分辨率,能够改善GLOF的模拟精度^[54]。

GLOF事件模拟中的输入参数的选择具有极大的挑战性。相对于经验模型的参数校准,物理模型(如FLO-2D模型)则利用质量和动量守恒等物理原理表示过程。然而,即使是复杂的物理模型在应用于真实事件时也有很大的不确定性,因此模型校准是必不可少的^[55]。虽然模型校准在实验室中很常见,但是在现实应用中,受限GLOF事件高质量的现场数据获取,有时必须做出相应的妥协。例如,在吉莱普措1964年GLOF重建过程中,FLO-2D所需的水文流量输入参数是基于经验公式计算得出的。模型校准的关键问题在于选择合适的调整参数和定义一个能被接受的参数调整范围^[10],而敏感性分析可以识别模型校准中使用的敏感输入参数,但这需要建模者证明标准参数值的偏差。

在模型敏感性分析中,通过调整曼宁系数和溃决水量来观察模拟结果的差异,其中曼宁系数控制着流体的紊流运动。敏感性分析表明,曼宁系数从

0.1 变化到 0.2 时,泥石流淹没面积仅差 0.3 km^2 , 平均流速相差 0.5 m/s , 平均泥石流流深度则相差 0.9 m 。但致使到达吉勒村的泥石流时间延迟了 9 min 。而溃决水量的增加致使泥石流淹没面积和平均泥深也随之增加,泥石流流侵蚀距离也显著延长,但在泥石流平均流速上差异很小。同时,溃决水量的增加也加快了泥石流到达吉勒村的时间。模拟结果显示,当溃决水量由 $10 \times 10^6 \text{ m}^3$ 增加到 $40 \times 10^6 \text{ m}^3$ 时,泥石流到达吉勒村的时间也提前了 12 min 。上述结果进一步证实,较大的曼宁系数将导致泥石流到达时间延迟,并增加泥石流深度和侵蚀距离,这与溃决洪水的模拟结果一致^[7]。这些分析结果可能是降低区域风险工作的一个有价值的输入,但由于 GLOF 的复杂性质和流动行为可能发生的变化,在解释模型结果时仍然需要特别小心。

5 结论

本研究综合野外调查、遥感、地理信息技术、数值模拟方法及各类数据,开展藏西南典型冰湖调查与泥石流模拟。主要研究结论如下:

(1) 由遥感时空变化监测,发现过去的 40 a,强宗克措和吉莱普措扩张比率超过 150%。母冰川退缩面积达到 1 km^2 左右,年均退缩比率则分别达到 17% (吉莱普措) 和 13% (强宗克措)。这进一步说明了母冰川的快速大量消融是冰湖快速扩张的重要原因之一。母冰川的退缩为冰湖扩张即提供了空间,又提供了补给水源,也是冰湖不稳定性增加的重要影响因素之一。

(2) 2019 年现场调查发现,大部分典型冰湖的母冰川冰舌直接伸入湖内,且冰舌裂隙较为发育,母冰川非常不稳定。冰湖侧碛坝崩塌和滑坡发育明显,终碛坝体主要由不同粒径的埋藏冰、碎屑物、冰碛物及多年冻土构成,冰碛坝稳定性差,出现湖水溢流或渗流现象。强宗克措尤为突出,其面积自 1976—2018 年共增加了 0.61 km^2 ,增长了近 2 倍,使原有冰碛坝体承受的静水压力不断增大,引发溃决的各类不稳定性地貌极其发育。在当前气候变暖,冰湖溃决发生概率不断提升的背景下,需进一步加强对强宗克措等潜在危险性冰湖的监测和灾害预防。

(3) 运用 FLO-2D 模型对吉莱普措典型冰湖溃决模拟表明,在近 15 km 的吉莱普沟内,溃决泥石流沿沟道急速泄流,沟道内最大流速约 14.1 m/s , 平均流速和淹没深度分别为 2.8 m/s 和 11.6 m , 整个淹没面积为 4.9 km^2 。模拟结果将可能为冰湖下游的危险性分区和防治工作起到有效的作用,但考虑到冰湖溃决泥石流的复杂性和流动过程中可能发生的变化,在使用模型结果时需要特别注意。

版权申明: 本文是在第一作者学位论文《藏西南地区冰碛湖灾害遥感监测评价与模拟分析》的基础上的后续研究,采用了原文的基础数据及方法,但在冰湖溃决泥石流模拟基础上进行了敏感性分析。硕士论文版权归原培养单位:成都理工大学,特此申明。

参考文献 (References)

- [1] GOVINDHA RAJ K B. Remote sensing based hazard assessment of glacial lakes: A case study in Zaskar basin, Jammu and Kashmir, India [J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2010, **1** (4): 339–347. DOI: 10.1080/19475705.2010.532973
- [2] KOMORI J. Recent expansions of glacial lakes in the Bhutan Himalayas [J]. *Quaternary International*, 2008, **184**: 177–186. DOI: 10.1016/j.quaint.2007.09.012
- [3] BENN D I, BOLCH T, HANDS K, et al. Response of debris-covered glaciers in the Mount Everest region to recent warming, and implications for outburst flood hazards [J]. *Earth - Science Reviews*, 2012, **114** (1–2): 156–174. DOI: 10.1016/j.earscirev.2012.03.008
- [4] 施雅风, 黄茂桓, 姚檀栋, 等. 中国冰川与环境—现在、过去和未来 [M]. 北京: 科学出版社, 2000: 236–243. [SHI Yafeng, HUANG Maoheng, YAO Tandong, et al. China's glaciers and environment: Present, past, and future [M]. Beijing: Science Press, 2000: 236–243]
- [5] GARDELLE J, ARNAUD Y, BERTHIER E. Contrasted evolution of glacial lakes along the Hindu Kush Himalaya mountain range between 1990 and 2009 [J]. *Global and Planetary Change*, 2011, **75** (1–2): 47–55. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2010.10.003
- [6] LIU J J, CHENG Z L, SU P C. The relationship between air temperature fluctuation and Glacial Lake Outburst Floods in Tibet, China [J]. *Quaternary International*, 2014, **321**: 78–87. DOI: 10.1016/j.quaint.2013.11.023
- [7] 朱颖彦, 李朝月, 杨志全, 等. 中巴喀喇昆仑公路冰湖溃决灾害 [J]. *山地学报*, 2021, **39** (4): 524–538. [ZHU Yingyan, LI Chaoyue, YANG Zhiqian, et al. Glacier Lake Outburst Flood (GLOF) along China–Pakistan International Karakoram Highway

- (KKH) [J]. *Mountain Research*, 2021, **39** (4): 524 – 538] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000617
- [8] WANG W, GAO Y, ANACONA P I, et al. Integrated hazard assessment of Cirenmaco glacial lake in Zhangzangbo valley, Central Himalayas [J]. *Geomorphology*, 2018, **306**: 292 – 305. DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.08.013
- [9] HUGGEL C, KAAB A, HAEBERLI W, et al. Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: A case study in Swiss Alps [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2002, **39** (2): 316 – 330. DOI: 10.1139/t01-099
- [10] WORN R, HUGGEL C, CLAGUE J, et al. Coupling glacial lake impact, dam breach, and flood processes: A modeling perspective [J]. *Geomorphology*, 2014, **224**: 161 – 176. DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.06.031
- [11] 王世金, 汪宙峰. 冰湖溃决灾害综合风险评估与管控 [M]. 北京: 中国社会科学出版社, 2017: 25 – 43. [WANG Shijin, WANG Zhoufeng. Comprehensive risk assessment and management of glacial lake outburst disasters [M]. Beijing: China Social Sciences Press, 2017: 25 – 43]
- [12] 王翔. 藏西南地区冰湖溃决灾害遥感监测评价与模拟分析 [D]. 成都: 成都理工大学, 2020: 67 – 71. [WANG Xiang. Remote sensing monitoring evaluation and simulation analysis of Glacier Lake Outburst Flood in southwest Tibet [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020: 67 – 71]
- [13] BAJRACHARYA B, SHRESTHA A B, RAIBHANDARI L. Glacial Lake Outburst Floods in the Sagarmatha region [J]. *Mountain Research and Development*, 2007, **27** (4): 336 – 344. DOI: 10.1659/mrd.0783
- [14] 舒有锋. 西藏喜马拉雅山地区冰湖溃决危险性评价及其演进数值模拟 [D]. 吉林: 吉林大学, 2011: 109 – 124. [SHU Youfeng. Hazard assessment of moraine-dammed lake outburst in the Himalayas, Tibet and the propagating numerical simulation [D]. Jilin: Jilin University, 2011: 109 – 124]
- [15] WORN R, STOFFEL M, HUGGEL C, et al. Analysis and dynamic modeling of a moraine failure and glacier lake outburst flood at Ventisquero Negro, Patagonian Andes (Argentina) [J]. *Journal of Hydrology*, 2012 (444 – 445): 134 – 145. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.04.013
- [16] PETRAKOV D A, TUTUBALINA O V, ALEINIKOV A A, et al. Monitoring of Bashkara glacier lakes (Central Caucasus, Russia) and modelling of their potential outburst [J]. *Natural Hazards*, 2012, **61** (3): 1293 – 1316. DOI: 10.1007/s11069-011-9983-5
- [17] 邓伟, 赵伟, 刘斌涛, 等. 基于“一带一路”的南亚水安全与对策 [J]. *地球科学进展*, 2018, **33** (7): 687 – 701. [DENG Wei, ZHAO Wei, LIU Bintao, et al. Water security and the countermeasures in South Asia based on the “Belt and Road” Initiative [J]. *Advances in Earth Science*, 2018, **33** (7): 687 – 701] DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2018.07.0687
- [18] 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, **29** (8): 1377 – 1390. [YAO Xiaojun, LIU Shiyin, SUN Meiping, et al. Study on the Glacial Lake Outburst Flood events in Tibet since the 20th century [J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, **29** (8): 1377 – 1390] DOI: 10.11849/zrzyxb.2014.08.010
- [19] 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, **23** (6): 621 – 628. [CUI Peng, MA Dongtao, CHEN Ningsheng, et al. The initiation, motion and mitigation of debris flow caused by glacial lake outburst [J]. *Quaternary Sciences*, 2003, **23** (6): 621 – 628] DOI: 10.3321/j.issn:1001-7410.2003.06.005
- [20] 潘桂棠, 李兴振, 王立全, 等. 青藏高原及邻区大地构造单元初步划分 [J]. *地质通报*, 2002, **21** (11): 701 – 707. [PAN Guitang, LI Xingzhen, WANG Liquan, et al. Preliminary division of tectonic units in the Qinghai – Tibet Plateau and adjacent regions [J]. *Geological Bulletin of China*, 2002, **21** (11): 701 – 707] DOI: 10.3969/j.issn.1671-2552.2002.11.002
- [21] 潘桂棠, 丁俊, 王立全, 等. 青藏高原区域地质调查重要新进展 [J]. *地质通报*, 2002, **21** (11): 787 – 793. [PAN Guitang, DING Jun, WANG Liquan, et al. Important new progress in regional geological survey of the Qinghai – Tibet Plateau [J]. *Geological Bulletin of China*, 2002, **21** (11): 787 – 793] DOI: 10.3969/j.issn.1671-2552.2002.11.018
- [22] 杨续超, 张懿锂, 张玮, 等. 珠穆朗玛峰地区近 34 年来气候变化 [J]. *地理学报*, 2006, **61** (7): 687 – 696. [YANG Xuchao, ZHANG Yili, ZHANG Wei, et al. Climate change in Mt. Qomolangma region in China during the last 34 years [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2006, **61** (7): 687 – 696] DOI: 10.3321/j.issn:0375-5444.2006.07.002
- [23] 周天财, 孙建, 于欢. 1980—2013 年青藏高原气候时空变化特征研究 [J]. *成都信息工程大学学报*, 2017, **32** (5): 524 – 531. [ZHOU Tiancai, SUN Jian, YU Huan. Spatial and temporal patterns of climate in the Tibetan Plateau (1980 – 2013) [J]. *Journal of Chengdu University of Information Technology*, 2017, **32** (5): 524 – 531] DOI: 10.16836/j.cnki.jcuit.2017.05.010
- [24] 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** (3 – 4): 298 – 311. DOI: 10.1016/j.geomorph.2006.11.012
- [25] 王欣, 刘时银, 姚晓军, 等. 我国喜马拉雅山区冰湖遥感调查与编目 [J]. *地理学报*, 2010, **65** (1): 29 – 36. [WANG Xin, LIU Shiyin, YAO Xiaojun, et al. Glacier lake investigation and inventory in the Chinese Himalayas based on the remote sensing data [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010, **65** (1): 29 – 36] DOI: 10.11821/xb201001004
- [26] HANSHAW M N, BOOKHAGEN B. Glacial areas, lake areas, and snowlines from 1975 to 2012: Status of the Cordillera

- Vilcanota, including the Quelccaya Ice Cap, northern central Andes, Peru [J]. *The Cryosphere Discuss*, 2013, **7**(2): 573 – 634. DOI: 10.5194/tcd-7-573-2013
- [27] 杨成德, 王欣, 魏俊峰, 等. 基于 3S 技术方法的中国冰湖编目 [J]. *地理学报*, 2019, **74**(3): 544 – 556. [YANG Chengde, WANG Xin, WEI Junfeng, et al. Chinese glacial lake inventory based on 3S technology method [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, **74**(3): 544 – 556] DOI: 10.11821/dlxb201903011
- [28] 刘娟, 姚晓军, 高永鹏, 等. 帕隆藏布流域冰湖变化及危险性评估 [J]. *湖泊科学*, 2019, **31**(4): 1132 – 1143. [LIU Juan, YAO Xiaojun, GAO Yongpeng, et al. Glacial lake variation and hazard assessment of glacial lakes outburst in the Parlung Zangbo River Basin [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, **31**(4): 1132 – 1143] DOI: 10.18307/2019.0420
- [29] O'BRIEN J S, JULIEN P Y. Physical properties and mechanics of hyper concentrated sediment flows [R]. Logan: Delineation of Landslide, Flash Floods and Debris Flow Hazards in Utah, 1985: 260 – 279.
- [30] O'BRIEN J S, JULIEN P Y, FULLERTON W T. Two-dimensional water flood and mudflow simulation [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1993, **119**(2): 244 – 261. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1993)119:2(244)
- [31] LIN M L, WANG K L, HUANG J J. Debris flow run off simulation and verification? case study of Chen-You-Lan watershed, Taiwan [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2005, **5**(3): 439 – 445. DOI: 10.5194/nhess-5-439-2005
- [32] WU Y H, LIU K F, CHEN Y C. Comparison between FLO-2D and Debris-2D on the application of assessment of granular debris flow hazards with case study [J]. *Journal of Mountain Science*, 2012, **10**(2): 293 – 304. DOI: 10.1007/s11629-013-2511-1
- [33] WANG W C, YANG X X, YAO T D. Evaluation of ASTER GDEM and SRTM and their suitability in hydraulic modelling of a glacial lake outburst flood in southeast Tibet [J]. *Hydrological Processes*, 2012, **26**(2): 213 – 225. DOI: 10.1002/hyp.8127
- [34] 朱海波. 冰碛湖泥石流灾害: 危险性评价与数值模拟 [D]. 长春: 吉林大学, 2016: 85 – 99. [ZHU Haibo. Moraine lake debris flow disaster: Risk evaluation and numerical simulation [D]. Changchun: Jilin University, 2016: 85 – 99]
- [35] 戎丹雅. 西藏典型冰湖溃坝洪水演进模拟 [D]. 杭州: 浙江大学, 2016: 59 – 61. [RONG Danya. Typical glacial lake outburst flood evolution simulation in Tibet [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016: 59 – 61]
- [36] WESTOBY M J, GLASSER N F, BRASINGTON J, et al. Modelling outburst floods from moraine-dammed glacial lakes [J]. *Earth – Science Reviews*, 2014, **134**: 137 – 159. DOI: 10.1016/j.earscirev.2014.03.009
- [37] FROELICH D C. Peak outflow from breached embankment dam [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1995, **121**(1): 90 – 97. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(1996)122:4(317)
- [38] 常鸣. 基于遥感及数值模拟的强震区泥石流流量风险评价研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2014: 44 – 58. [CHANG Ming. Quantitative risk assessment of debris flow in coseismic area based on remote sensing and numerical simulation [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014: 44 – 58]
- [39] 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, **44**(3): 343 – 351 + 385 – 352. [XU Daoming, FENG Qinghua. Dangerous glacial lake and outburst features in Xizang Himalayas [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1989, **44**(3): 343 – 351 + 385 – 352] DOI: 10.11821/dlxb198903010
- [40] NIE Y, SHENG Y W, LIU Q, et al. A regional-scale assessment of Himalayan glacial lake changes using satellite observations from 1990 to 2015 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, **189**: 1 – 13. DOI: 10.1016/j.rse.2016.11.008
- [41] NIE Y, LIU Q, WANG J D, et al. An inventory of historical glacial lake outburst floods in the Himalayas based on remote sensing observations and geomorphological analysis [J]. *Geomorphology*, 2018, **308**: 91 – 106. DOI: 10.1016/j.geomorph.2018.02.002
- [42] 宫鹏, 姚晓军, 孙美平, 等. 1967—2014 年科西河流域冰湖时空变化 [J]. *生态学报*, 2017, **37**(24): 8422 – 8432. [GONG Peng, YAO Xiaojun, SUN Meiping, et al. Spatial-temporal variations of glacial lakes in the Koshi River basin from 1967 to 2014 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(24): 8422 – 8432] DOI: 10.5846/stxb201611012223
- [43] 柴开国. 珠峰地区冰湖变化及其影响研究 [D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2017: 5 – 6. [CHAI Kaiguo. The change of glacial lake and its influence in the Everest region [D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2017: 5 – 6]
- [44] ALLEN S K, ZHANG G Q, WANG W C, et al. Potentially dangerous glacial lakes across the Tibetan Plateau revealed using a large-scale automated assessment approach [J]. *Science Bulletin*, 2019, **64**(7): 435 – 445. DOI: 10.1016/j.scib.2019.03.011
- [45] STOFFEL M, WYZGA B, MARSTON R A. Floods in mountain environments: A synthesis [J]. *Geomorphology*, 2016, **272**: 1 – 9. DOI: 10.1016/j.geomorph.2016.07.008
- [46] GURUNG D R, KHANAL N R, BAJRACHARYA S R, et al. Lemthang Tsho Glacial Lake Outburst Flood (GLOF) in Bhutan: Cause and impact [J]. *Geoenvironmental Disasters*, 2017(1): 56 – 64. DOI: 10.1186/s40677-017-0080-2
- [47] 艾洪舟. 地震涌浪机理及冰碛堰塞湖溃决风险研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2017: 1 – 10. [AI Hongzhou. Study of seismic surge mechanism and glacier lake outburst risk [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017: 1 – 10]
- [48] 姚晓军, 刘时银, 魏俊峰. 喜马拉雅山北坡冰碛湖库容计算及变化—以龙巴萨巴湖为例 [J]. *地理学报*, 2010, **65**(11):

- 1381 – 1390. [YAO Xiaojun, LIU Shiyin, WEI Junfeng. Reservoir capacity calculation and variation of moraine-dammed lakes in the north Himalayas: A case study of Longbasaba Lake [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010, **65** (11): 1381 – 1390] DOI: 10.11821/xb201011008
- [49] 王欣, 刘时银, 莫宏伟, 等. 我国喜马拉雅山区冰湖扩张特征及其气候意义[J]. *地理学报*, 2011, **66** (7): 895 – 904. [WANG Xin, LIU Shiyin, MO Hongwei, et al. Expansion of glacial lakes and its implication for climate changes in the Chinese Himalaya [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, **66** (7): 895 – 904] DOI: 10.11821/xb201107003
- [50] 姚檀栋, 刘晓东, 王宁练. 青藏高原地区的气候变化幅度问题[J]. *科学通报*, 2000, **45** (1): 98 – 106. [YAO Tandong, LIU Xiaodong, WANG Ninglian. The issue of the extent of climate change in the Qinghai – Tibet Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, **45** (1): 98 – 106] DOI: 10.3321/j.issn:0023 – 074X.2000.01.021
- [51] 段安民, 肖志祥, 吴国雄. 1979—2014 年全球变暖背景下青藏高原气候变化特征[J]. *气候变化研究进展*, 2016, **12** (5): 374 – 381. [DUAN Anmin, XIAO Zhixiang, WU Guoxiong. Characteristics of climate change over the Tibetan Plateau under the global warming during 1979 – 2014 [J]. *Climate Change Research*, 2016, **12** (5): 374 – 381] DOI: 10.12006/j.issn.1673 – 1719.2016.039
- [52] 冀琴. 1990—2015 年喜马拉雅山冰川变化及其对气候波动的响应[D]. 兰州: 兰州大学, 2018:54 – 56. [JI Qin. Glacier variations in response to climate change in the Himalaya during 1990 – 2015 [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018:54 – 56]
- [53] VLIMEK V, ZAPATA M L, KLIMES J, et al. Influence of glacial retreat on natural hazards of the Palcacocha Lake area, Peru [J]. *Landslides*, 2005, **2**: 107 – 115. DOI: 10.1007/s10346 – 005 – 0052 – 6
- [54] NIE Y, LIU W, LIU Q, et al. Reconstructing the Chongbaxia Tsho glacial lake outburst flood in the Eastern Himalaya: Evolution, process and impacts [J], *Geomorphology*, 2020, **370**: 107393. DOI: 10.1016/j.geomorph.2020.107393
- [55] TINGSANCHALI T, CHINNARASRI C. Numerical model of dam failure due to flow overtopping [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2001, **46** (1): 113 – 130. DOI: 10.1080/02626660109492804

Typical Monitoring of Dangerous Glacial Lakes in Southwestern Tibet, China and Simulation of GLOF Debris Flow

WANG Xiang^{1a}, CHEN Guo^{1a,1b*}, DAI Xiaoi^{1a}, CHEN Yongjun², ZHANG Shiqi^{1a}

(1. a. College of Earth Sciences; b. College of Ecology and Environment, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;
2. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Southwest Tibet is one of the hardest hit areas in the middle of the Himalayas of China haunted by debris flows relevant to glacial lake outburst flood (GLOF). Most of the studies on GLOF were merely concerned with flood themselves, but few attentions were paid to the simulations on debris flow mobilization caused by GLOF in the Qinghai – Tibet Plateau, China. It is quite believed that numerical simulation is an appropriate approach to interpretation of the mechanism of GLOF – related debris flow and assess their risks. In this study, it addressed typical glacial lakes, Qiangzongkeco and Gelhaipuco in southwest Tibet as case study. Investigation on dynamic change of glacial lake, simulation of GLOF – related debris flow was organized by field survey, analysis of Landsat series remote sensing images from 1976 to 2018 and FLO – 2D hydrodynamic modelling. The results are those: (1) Climate warming caused glaciers to retreat continuously, resulting in the continuous expansion of typical glacial lake. The scales of Qiangzongkeco and Gelhaipuco in past 40 years had increased by 0.61 km² and 0.26 km², respectively; (2) Southwest Tibet is a fully developed periglacial goe-environment favorable to glacial lake outburst. The potential to GLOF had been increasing, especially at Qiangzongkeco and Gelhaipuco. The retreat area of the parent glaciers at Qiangzongkeco and Gelhaipuco reached about 1 km², and the average annual retreat

rate reached 17% at Gelhaipuco and 13% at Qiangzongkeco, respectively. Therefore, it is necessary to further strengthen the monitoring, prevention, and management of outburst disasters in typical glacial lakes such as Qiangzongkeco; (3) FLO – 2D model could properly simulate the complicated GLOF – related debris flow, to evaluate the impacts of GLOF – related disasters on the downstream. According to our simulation, GLOF – related debris flow at Gelhaipuco had the maximum flow velocity in the channel was about 14.1 m/s, with an average flow velocity 2.8 m/s and inundation depth 11.6 m. The whole inundation area was 4.9 km². Our research achievements can be used as the basis for formulating disaster prevention measures in the downstream area.

Key words: Southwestern Tibet; GLOF; remote sensing monitoring; numerical simulation

藏东南地质灾害易发性评价

(韩用顺 湖南科技大学、河南理工大学测绘与国土信息工程学院)

藏东南地区是世界内陆上海洋性冰川集中分布区,区域气候复杂多变,是我国崩塌、滑坡、泥石流等突发性地质灾害最为发育和严重的地区之一。近年来区内极端天气事件频发、地质灾害活动日趋频繁,严重威胁着人民生命财产安全和社会经济可持续发展。区内自然条件恶劣,监测台网和站点不足,灾害调查与监测困难,适用于该区域的地质灾害易发性评价理论与方法仍不完善,因此如何结合特定区域地质灾害成因机制,建立科学的评价指标体系并构建有效的评价模型仍是区域地质灾害易发性评价的两个关键科学问题。针对藏东南冰川积雪活动和气候变化的特殊作用与影响,引入了积温和冰雪消融量两个特色因子,提出了距平差气象插补法和冰川积雪消融量概化模型,并从孕灾环境、动力条件和人类扰动等方面共选取了 13 个因子,建立了高寒山区地质灾害易发性评价指标体系,构建了证据权 – 投影寻踪模型,实现了灾害易发性评价计算、分级区划和精度验证。

详见本期《基于证据权 – 投影寻踪模型的藏东南地质灾害易发性评价》一文。