

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230925006

阿汝冰崩-碎屑流运动过程反演及预测模拟研究*

李 扬^{1,2}, 汤明高², 帅奕珪², 赵欢乐², 李超瑞², 倪文涛^{1,2}, 李 广²

(1. 四川省自然资源勘察设计集团有限公司, 四川 成都 610051;

2. 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, 四川 成都 610059)

摘要:冰崩作为冰冻圈最具灾难性的地质灾害之一,具有运动过程复杂、预测难度高、致灾后果严重等特点。2016年7月17日和9月21日在西藏阿里地区发生了两起巨型冰崩-碎屑流事件,对当地居民生命财产安全以及生态环境造成了严重危害,利用PFC^{3D}反演了这两次冰崩-碎屑流运动过程,在此基础上对周边区域潜在冰崩隐患进行了预测模拟研究。结果表明:(1)两次冰崩-碎屑流运动时间分别为300 s和240 s,颗粒平均速度峰值分别为32.05 m/s和34.80 m/s,第一次冰崩入湖体积约为 $8.47 \times 10^6 \text{ m}^3$;(2)前后部分的能量传递是冰崩-碎屑流产生高速远程运动的关键机制;(3)预测阿汝85号冰川(冰崩隐患)发生冰崩后形成的西北侧主堆积区面积约为1.1 km²,东北侧小堆积区面积约为0.3 km²,危险区面积共计3.28 km²;该成果对于青藏高原的冰崩防灾减灾工作具有一定科学价值和现实意义。

关键词:阿汝冰崩;冰崩-碎屑流;PFC^{3D};运动特征;危险预测

中图分类号:P343.6 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2132(2024)06-1311-12

Inversion and Prediction Simulation Study of AruIce Avalanche-debris Flow Movement Process

LI Yang^{1,2}, TANG Minggao², SHUAI Yiyao², ZHAO Huanle², LI Chaorui²,
NI Wentao^{1,2}, LI Guang²

(1. Sichuan Natural Resources Investigation and Design Group Co., Ltd., Chengdu 610051, China;

2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection,

Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: As one of the most catastrophic geological disasters in the cryosphere, ice avalanche is characterized by complex movement process, high prediction difficulty, and severe consequences. On July 17 and September 21, 2016, two massive ice avalanche-debris flow events occurred in Ali Prefecture, Tibet, causing significant harm to the life and property safety of local residents and the ecological environment. PFC^{3D} was used to invert the movement processes of the two events, and based on this, potential ice avalanche hazards in the surrounding areas were simulated and predicted. The results showed that: (1) The movement durations of the two ice avalanche-debris flows were 300 s and 240 s, with peak average particle velocities of 32.05 m/s and 34.80 m/s, respectively. The volume of the

* 收稿日期:2023-09-25;修回日期:2023-12-13

基金项目:国家自然科学基金(41941019,42377199)、第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0201)资助

作者简介:李扬(1998—),男,助理工程师,硕士。主要从事地质灾害评价、预测及防治研究。E-mail:1311903626@qq.com

通信作者:汤明高(1978—),男,教授,博导,博士。主要从事地质灾害机理、评价预测及防治研究。

E-mail:tomyr2008@163.com

first ice avalanche that entered the lake was approximately $8.47 \times 10^6 \text{ m}^3$. (2) Energy transfer between the front and rear was the key mechanism for the high-speed and long-range movement of ice avalanche-debris flow. (3) It was predicted that the main accumulation area on the northwest side formed after the ice avalanche at Aru No. 85 Glacier (ice avalanche hazard) was approximately 1.1 km^2 , the small accumulation area on the northeast side was approximately 0.3 km^2 , and the total danger area was 3.28 km^2 . The result has scientific value and practical significance for ice avalanche disaster prevention and mitigation on the Qinghai-Tibet Plateau.

Keywords: aru ice avalanche; ice-avalanche-debris flow; PFC^{3D}; motion characteristics; hazard prediction

0 引言

随着全球气候变暖,冰川逐渐融化,雪线不断上升^[1],冰川发生退缩,引发了诸多问题^[2],青藏高原冰崩及其链生灾害日益加剧^[3],对当地居民和生态环境造成不可磨灭的危害,冰川稳定性影响着我国及周边国家水源及生命财产安全^[4]。2016年阿里地区日土县阿汝错流域发生了两次冰崩-碎屑流灾害,第一次事件导致了9位牧民死亡,数百头牦牛被埋^[5-6],该灾害是国内观测记录以来堆积扇最大,运动距离最长的一次,与2002年在高加索山脉Kolka冰崩属同等水平^[7],开展冰崩发生后引发碎屑流运动及致灾规模研究具有重要意义。

高速远程碎屑流灾害均具有冲击力大、致灾范围广等特点^[8-9],冰崩-碎屑流与滑坡-碎屑流在研究方法上有一定相似性。N. Salzmann等^[10]通过建立数学模型模拟了其运动路径。在2010年以后使用数值模拟方法模拟碎屑流相关研究显著增多,K. B. Delaney等^[11]使用动态滑坡建模(DAN^{3D})反演了易贡冰岩崩碎屑流堵江后溃坝-洪水演进过程。夏式伟等^[12-13]基于DAN^{3D},反演了汤家沟和易贡滑坡,揭示了其堆积、速度分布以及铲刮等特征。段学良等^[14]基于Massflow对已发生泥石流进行反演,将模拟结果与现场进行对比验证,再利用该模型对隐患区域进行预测。徐奕梓等^[15]利用Massflow对贵州水城滑坡-碎屑流进行反演揭示其运动特征。

葛云峰等^[16]认为碎屑流不同位置运动及能量变化具有递变性规律,但DAN^{3D}、Massflow等软件只能描述整体运动过程,无法对局部位置以及能量等进行分析。而对于离散元软件PFC来说,可监测特殊点位运动特征,亦可提取能量时程曲线,对运动特征分析更加全面。大量学者利用PFC^{2D}软件较

好地模拟了碎屑流运动堆积过程^[17-21],但对于碎屑流堆积面积以及危险范围等研究有明显局限性,而PFC^{3D}拥有强大的三维处理能力,可更加真实地模拟碎屑流灾害。在2010年后,多位学者使用PFC^{3D}对已发生的碎屑流灾害进行了反演模拟研究,复现了碎屑流不为人知的运动过程,揭示其运动时的速度以及位移特征^[22-28]。此外,基于反演而预测未来的研究会更加具有现实意义,例如周礼等^[29]反演两次白格滑坡运动堆积过程,在此基础上预测了白格滑坡滑源区其他不稳定区域未来危险范围。

对于阿汝冰崩-碎屑流的研究,李明等^[30]通过FDEM二维数值模拟方法反演了阿汝冰崩失稳,后续碎屑流运动特征,但由于二维模拟的局限性,对于危险范围等方面的研究则较为欠缺,X. Bai等^[31]使用连续介质数值模拟较好地重现了阿汝冰崩发生后的运动过程。而在阿汝错流域仍存在一些较危险的冰崩隐患,上述研究均没有对周围冰崩隐患做预测研究,故需从这方面出发,根据预测结果在现场设置危险区,避免再次酿成惨痛悲剧。

本文应用PFC^{3D}首先对已发生的两次阿汝冰崩进行反演,基于反演参数来预测研究区其他具有冰崩隐患的冰川,研究结果可为该地区居民生命财产安全提供一定技术保障。

1 研究区背景

2016年7月17日,西藏阿里地区日土县阿汝错流域冰川群53号冰川(34.03°N , 82.25°E ,中国冰川编目5Z412C0011)发生冰崩(图1、图2(b)),冰崩体积为6800万 m^3 ,造成了9位牧民死亡,数百头牦牛被埋,部分碎屑流冲入阿汝错,称为阿汝1号冰崩(图2(b));2016年9月21日,在53号冰川南部的50号冰川(34.01°N , 82.27°E ,中国冰川编目5Z412C00

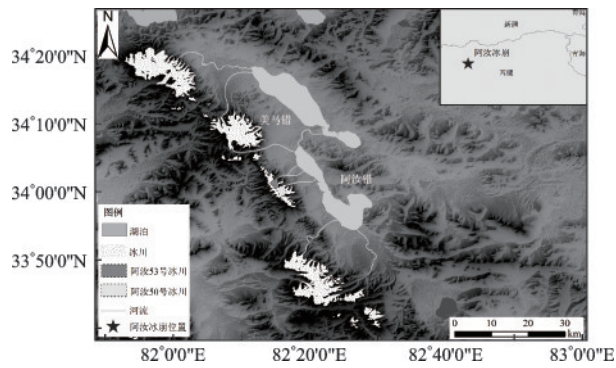
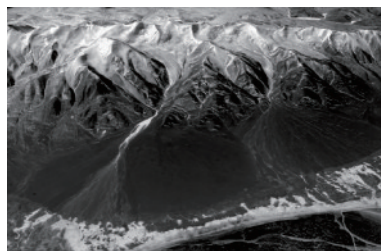
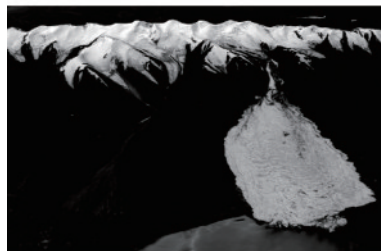


图1 阿汝冰崩地理位置

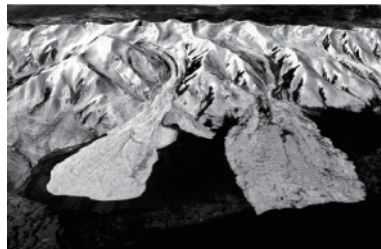
Fig.1 Geographical location of the Aru ice avalanche



(a) 2016年1月28日



(b) 2016年7月21日



(c) 2016年10月16日

图2 阿汝冰崩历史影像

Fig.2 Historical images of the Aru ice avalanche

07)发生冰崩,53号冰川南侧约2 km,再次发生了冰崩,冰崩体积为8 400万 m^3 ,称为阿汝2号冰崩(图2(c))。这两条冰川分别距离阿汝错西岸约有5.18 km和5.31 km。

2 模型方法及参数

2.1 软件选用

Rhino具有快速建立复杂三维模型的优点,

PFC^{3D}(离散单元法)在模拟碎屑流等灾害成灾具有较多优点,且可监测速度位移及能量变化,有助于分析颗粒运动过程,故选用Rhino作为三维建模软件,PFC^{3D}作为数值分析软件。

2.2 三维模型

阿汝冰崩三维地质模型建模流程如下(图3):

(1)获取DEM数据。在美国科罗拉多大学环境科学合作研究所国家冰雪数据中心获取了冰崩发生前数字高程模型(2015年),分辨率为 8×8 m。

(2)圈定冰崩区域。利用ArcGIS在DEM上划分出冰崩源区边界。

(3)建立三维模型。将DEM转为等高线,导入Rhino建立三维模型,根据前人计算的冰崩方量^[32],建立冰崩源区实体模型。

(4)导入PFC^{3D}。使用PFC^{3D}导入地形和冰崩源区实体STL文件;冰崩源区用离散球代替,按照冰崩源区实体范围生成半径为8~12 m的球体,阿汝1号和2号冰崩体分别由8 837和10 997个颗粒构成。

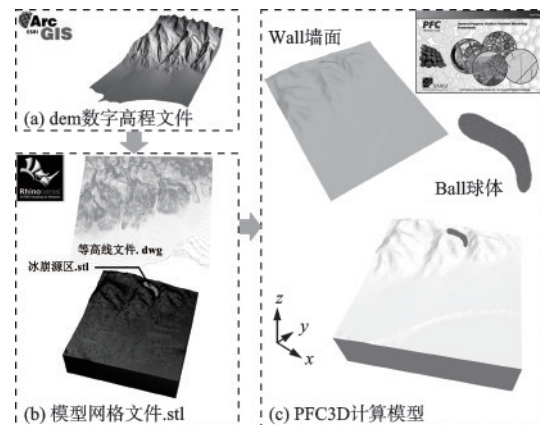


图3 三维模型建立

Fig.3 Three-dimensional model building

2.3 参数取值

实际冰崩-碎屑流颗粒具有一定棱角,在下滑过程中存在多种运动形式(滑动、滚动及跳动),而PFC^{3D}中的抗滚动接触模型有以下优点:(1)采用球体颗粒,且避免了对不规则颗粒间接触的反复判断,可提高计算效率;(2)冰崩-碎屑流具有离散特性以及不规则性,考虑到颗粒之间存在相互作用(咬合与摩擦)会对颗粒滚动产生阻碍,故冰崩-碎屑流运动过程模拟考虑选用抗滚动接触模型(rrlinear)。

选取青藏高原地区甘孜州乌库楚冰川冰样品,进行了基本物理性质测试并确定了冰川密度(图4): 906.66 kg/m^3 。孙荣^[33]在滑坡-碎屑流模拟研究中根据自然休止角试验标定参数,故引用该学者的微观参数取值,再通过不断反演阿汝冰崩1号冰崩-碎屑流堆积特征,不断调整抗滚动接触模型参数取值,最终得到微观参数取值,具体微观参数取值见表1。



图4 冰川密度测定

Fig.4 Glacier density measurement

表1 参数取值

Table 1 Parameter values

微观参数	符号	参数取值	命令
密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	ρ	906.66	density
有效模量/Pa	E^*	3e9	emod
法向切向刚度	k^*	1.5	kratio
颗粒与颗粒摩擦系数	μ	0.2	fric_ball
颗粒与墙体摩擦系数	μ_w	0.065	fric_wall
颗粒抗转动系数	μ_r	0.35	rr_fric
法向临界阻尼比	β_n	0.6	dp_ratio
切向临界阻尼比	β_s	0	dp_ratio

3 阿汝冰崩-碎屑流运动过程反演模拟

3.1 模拟与现实影像对比

模拟结果与现实遥感影像对比如图5所示,模拟中阿汝1号冰崩体积为 $68.05\times 10^6\text{ m}^3$,前端冲入了阿汝错,Y. Lei等^[5]推断出进入湖中冰崩体体积至少为 $7.1\times 10^6\text{ m}^3$,经统计模拟结果中冲入阿汝错颗粒体积为 $8.47\times 10^6\text{ m}^3$,模拟结果与遥感影像高度吻合,可证明该研究的可靠性。

阿汝2号冰崩体积为 $84.81\times 10^6\text{ m}^3$,PFC^{3D}模拟的堆积冰崩扇未完全覆盖实际区域,但堆积扇抵达最远处与现实情况基本一致,与阿汝错湖岸最短距离为1.06 km。

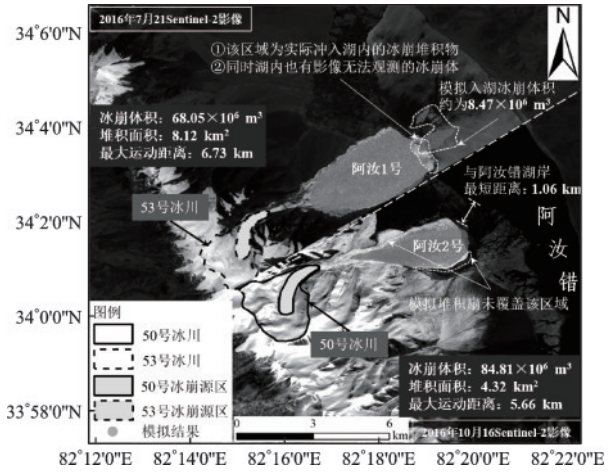


图5 阿汝冰崩-碎屑流运动堆积模拟与现实影像对比

Fig.5 Comparison of simulated and actual images of Aru ice avalanche-debris flow movement and deposition

3.2 整体运动特征

3.2.1 阿汝1号冰崩-碎屑流

PFC^{3D}模拟结果显示阿汝1号冰崩-碎屑流发生至停止的过程约为300 s,根据运动特征可分为四个阶段:启动、整体滑移、扩散堆积和入湖,分别对应时间区间为:0~20 s、20~120 s、120~180 s、180~300 s。提取碎屑流运动过程的平均位移、平均速度与加速度随时间变化的曲线如图6所示。冰崩-碎屑流在启动后在125 s时,此时加速度从正变为0,平均速度达到最大值32.05 m/s;300 s时,平均移动速度几乎归零,碎屑流停留堆积在了阿汝错湖岸,有部分碎屑流冲进了湖泊,颗粒平均位移5.46 km。

图7为阿汝1号冰崩-碎屑流运动过程,接下来对运动过程进行详细分析。

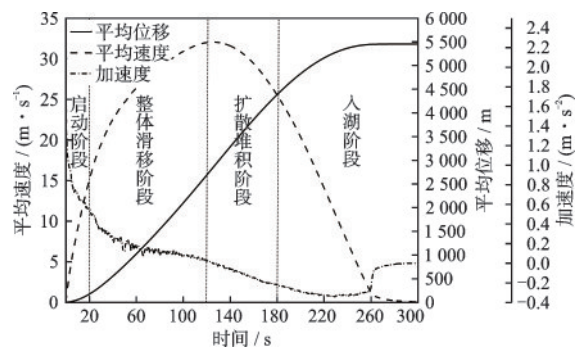


图6 阿汝1号颗粒平均速度、加速度及位移变化曲线

Fig.6 Curves of average velocity, acceleration, and displacement of particles in Aru No.1

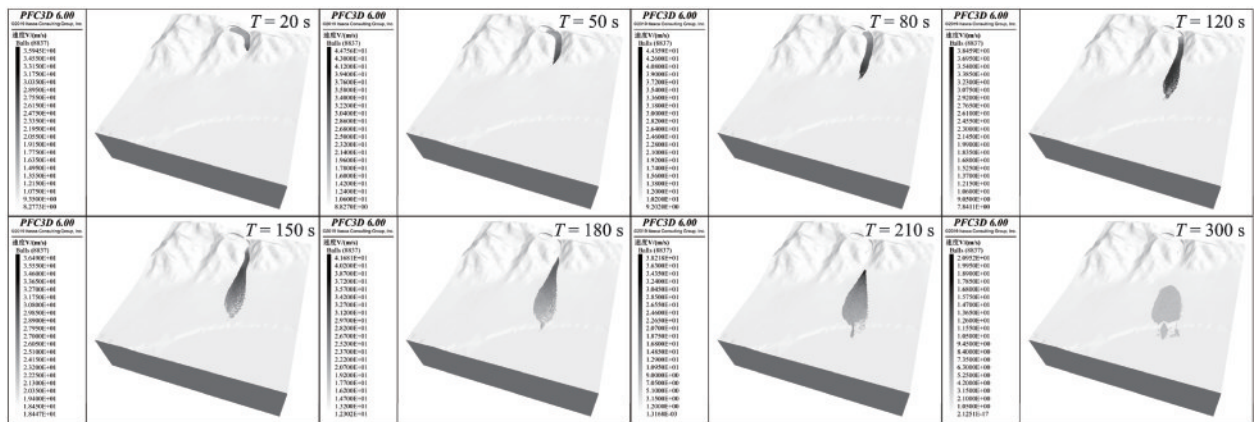


图7 阿汝1号冰崩-碎屑流运动过程

Fig.7 Aru No.1 ice avalanche-debris flow movement process

(1)启动阶段。该冰川发育于宛如围椅状冰斗,周围三面高耸的山峰将冰川紧紧环绕,唯独在下游敞开一道窄窄的沟谷,悬挂在沟谷入口的冰舌在重力作用下发生滑移,初始滑动方向为N4°E,冰川左侧山峰阻挡了冰崩体前进方向,促使其向冰川下游V型沟谷运动,滑动方向偏转至N59°E,而冰崩体后部也逐渐与母冰川分离。

(2)整体滑移阶段。冰川下游与湖岸平原之间铺展开狭长沟道是冰崩-碎屑流畅通无阻的通道,正因其存在, $T=50\text{ s}$ 时,冰崩体产生的巨大能量得以释放,使得冰崩-碎屑流以惊人的速度疾驰而下,以 $30\sim 40\text{ m/s}$ 速度冲刷沟道,左侧颗粒铲刮山峰(影像里山峰坡脚有明显擦痕),冰崩体前端(形似刀刃状)抵达V型槽谷谷口。当 $T=120\text{ s}$ 时,后部冰崩体已远远脱离母冰川,整体均离开冰崩源区,已发生整体滑移。狭窄陡峭的沟道地形让颗粒的平均速度达到峰值 31.99 m/s ,颗粒最大速度为 38.46 m/s 。

(3)扩散堆积阶段。整体滑移后,冰崩体在沟道高速冲刷塑造出了一条迅疾流动的碎屑流,颗粒以迅雷不及掩耳之势冲出了沟道,通往下游平原地带,碎屑流的速度逐渐从峰值下降, $T=150\text{ s}$ 时,碎屑流已来到了广袤湖岸平原,解脱了狭窄沟道的约束,碎屑流逐渐失去了之前狭长条状的形态,颗粒向着四周扩散。 $T=180\text{ s}$ 时,冰崩-碎屑流堆积扇的前端已近乎触及阿汝错北部湖区西岸。

(4)入湖阶段。最前端的碎屑流迅速地涌入阿汝错,而碎屑流尾部颗粒仍保持着 $30\sim 37\text{ m/s}$ 高速运动,碎屑流较为靠前颗粒速度逐渐稳定在 $10\sim$

20 m/s 之间,碎屑流尾部逐渐变短,逐渐融入到湖岸边堆积扇之中。 $T=300\text{ s}$ 时,阿汝1号冰崩-碎屑流整个运动过程结束,经统计有 $8.47\times 10^6\text{ m}^3$ 碎屑流涌入阿汝错,颗粒平均位移为 5.46 km ,颗粒最大位移为 6.73 km ,冰崩堆积扇 8.12 km^2 ,反映出该灾害的主要特点:高速远程。

3.2.2 阿汝2号冰崩-碎屑流

阿汝2号冰崩-碎屑流根据运动特征可分为三个阶段:启动、整体滑移和扩散堆积,分别对应时间区间为: $0\sim 20\text{ s}$ 、 $20\sim 100\text{ s}$ 、 $100\sim 240\text{ s}$ 。碎屑流运动过程中的平均位移、平均速度与加速度随着时间变化如图8所示,图9为阿汝2号冰崩-碎屑流运动过程,冰崩-碎屑流在 87 s 时,平均速度抵达峰 34.80 m/s ; $T=210\text{ s}$ 时,加速度抵达最大负值,加速度开始减小, $T=240\text{ s}$ 时,碎屑流停留堆积在了阿汝错湖岸,与湖泊相距 1.06 km ,颗粒平均位移达到了 4.82 km 。

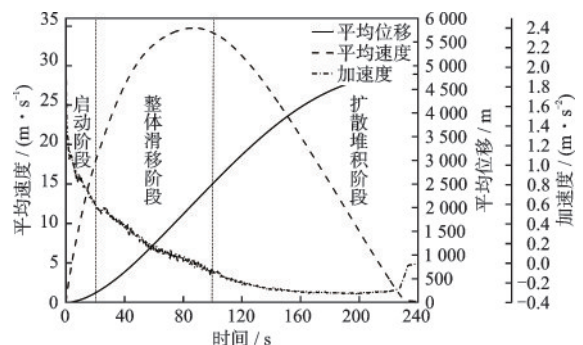


图8 阿汝2号颗粒平均速度、加速度及位移变化曲线

Fig.8 Curves of average velocity, acceleration, and displacement of particles in Aru No.2

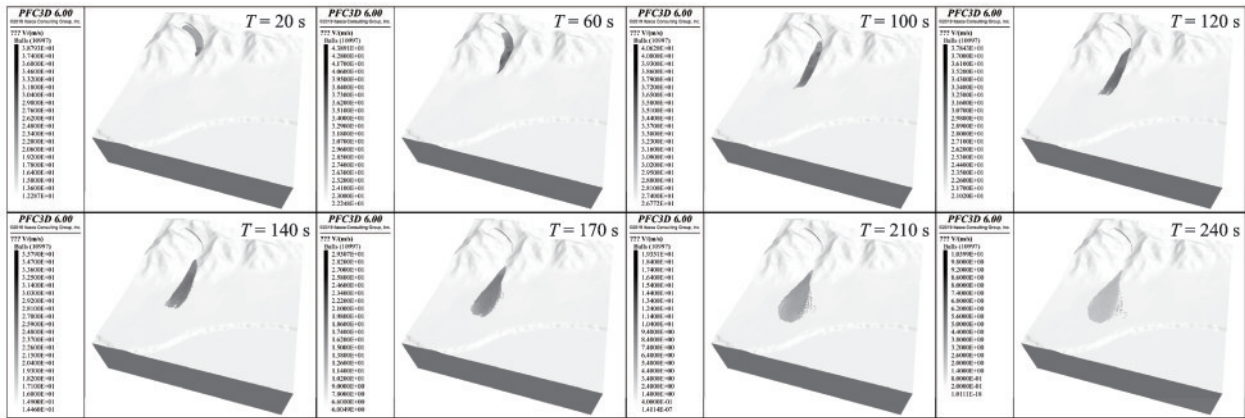


图9 阿汝2号冰崩-碎屑流运动过程

Fig.9 Aru No.2 ice avalanche-debris flow movement process

3.3 局部运动特征

以阿汝1号冰崩为例,将阿汝1号冰崩体分为三个部分:前部、中部和后部,每个部分设置3个监测点,监测点布置如图10所示。

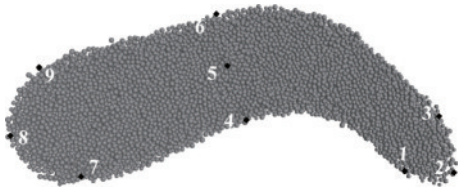


图10 阿汝1号冰崩体监测点布置

Fig.10 Layout of Aru No.1 ice avalanche monitoring sites

图11(a)为监测点运动路径,冰崩-碎屑流前部3个颗粒均进入阿汝错,颗粒2首先进入湖泊,阿汝错湖岸与湖区内有一定的高差,3个颗粒进入阿汝错后速度会有陡增,随后呈直线下降(图11(b))。对于中部颗粒,这3个颗粒冲出沟谷,向四周扩散,它们鲜明地勾勒出了冰崩-碎屑流在宽广平坦地形上的扩散特征,这也让冰崩-碎屑流扩张出了惊人的致灾范围,成为该灾害庞大的直接原因。后部颗粒位于冰崩源区的最高海拔,虽蕴藏着巨大的重力势能,但该部分颗粒与前中部产生相互作用,仅在冲出沟道口约0.6 km处便停留在冰崩堆积扇末端。

图11(b~d)为不同颗粒速度时程曲线。前部颗粒的速度峰值处于50~100 s区间,中部颗粒的速度峰值处于60~140 s区间,后部颗粒的速度峰值处于160~230 s区间,证明后部颗粒的速度变化滞后于前部颗粒。

图11(e)为颗粒2、5、8加速度时程曲线,在60~120 s期间,颗粒5(碎屑流中部)和颗粒8(碎屑流后

部)的加速度明显下降,而加速度与中后部碎屑流的合力有密切联系(图12),碎屑流的中后部所受到的合力=重力的分力-摩擦力-前端颗粒反作用力,先涌入沟道的颗粒造成拥堵,对中后部的颗粒产生了反作用力,合力不断减小,逐渐中后部颗粒加速度降为负值,颗粒的速度开始减小,产生速度波谷;在120~160 s期间,随着碎屑流前部颗粒逐渐脱离狭窄沟道,沟道内变得更为开阔,缺少了前部阻碍,碎屑流中后部的颗粒的下滑力增大,加速度由负变正,后部颗粒涌入沟道,后部颗粒速度逐渐回升,在160~230 s之间逐渐达到速度峰值,而前部的颗粒早已抵达阿汝错湖岸,形成大面积堆积扇,此时中部的颗粒会受到前部颗粒影响,速度再次降低。

图11(f)为颗粒位移及前中后平均位移对比,前部颗粒2位移为9个监测点最大,为6 586.08 m;中部的左侧颗粒6为中部最大,为6 215.35 m;后部颗粒的左侧颗粒9是后部最大,为5 155.91 m。不难发现碎屑流的运动方向左侧的颗粒位移较为显著,这种现象紧密关联于碎屑流在进入沟道前所经历的弯道,这种弯道对碎屑流的路径产生了明显影响。碎屑流受到沟道限制,只能向右前方转入沟道,碎屑流会与右侧山峰形成挤压作用,导致该部分的颗粒受到了更加明显的碰撞和摩擦,消耗了它们的动能。前中后的颗粒平均位移分别为:6 499.84 m,5 640.11 m和4 664.22 m,平均位移前>中>后。

3.4 能量特征

以阿汝1号为例,冰崩-碎屑流运动能量变化如图13所示。整个冰崩-碎屑流运动过程中,庞大重力势能被释放,转化为动能,120 s时动能达到峰值

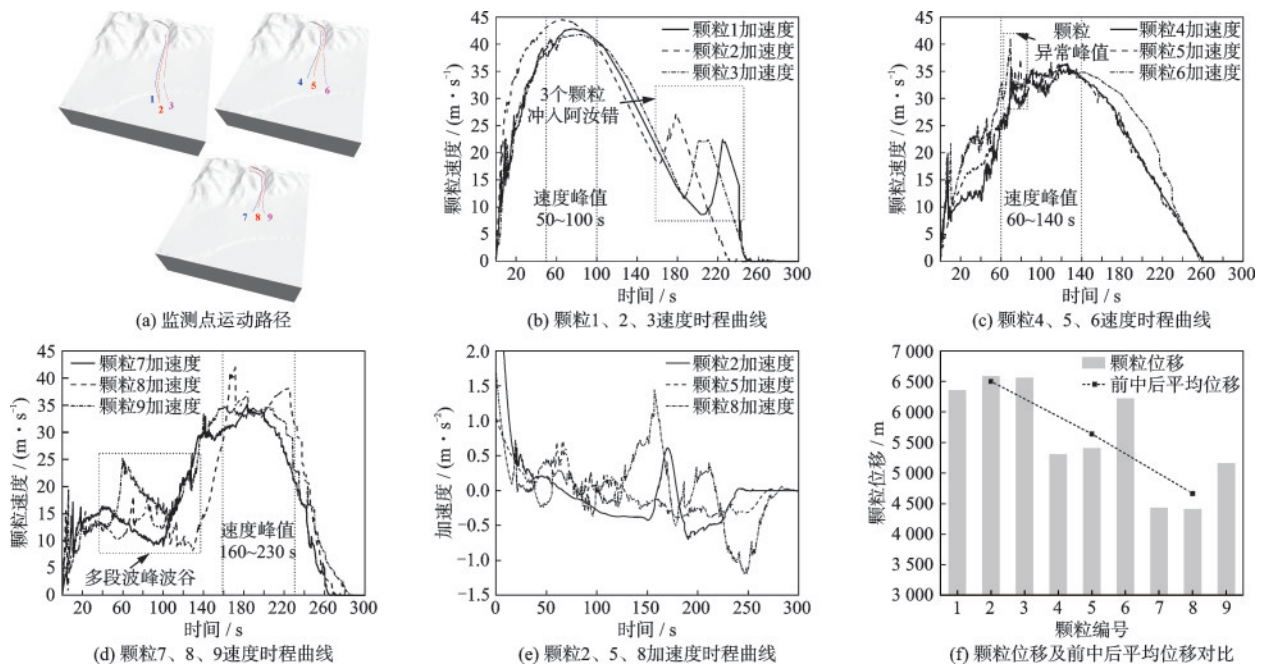


图11 阿汝1号冰崩-碎屑流监测点路径、速度及加速度

Fig.11 Path, velocity, and acceleration of Aru No.1 ice avalanche-debris flow monitoring sites

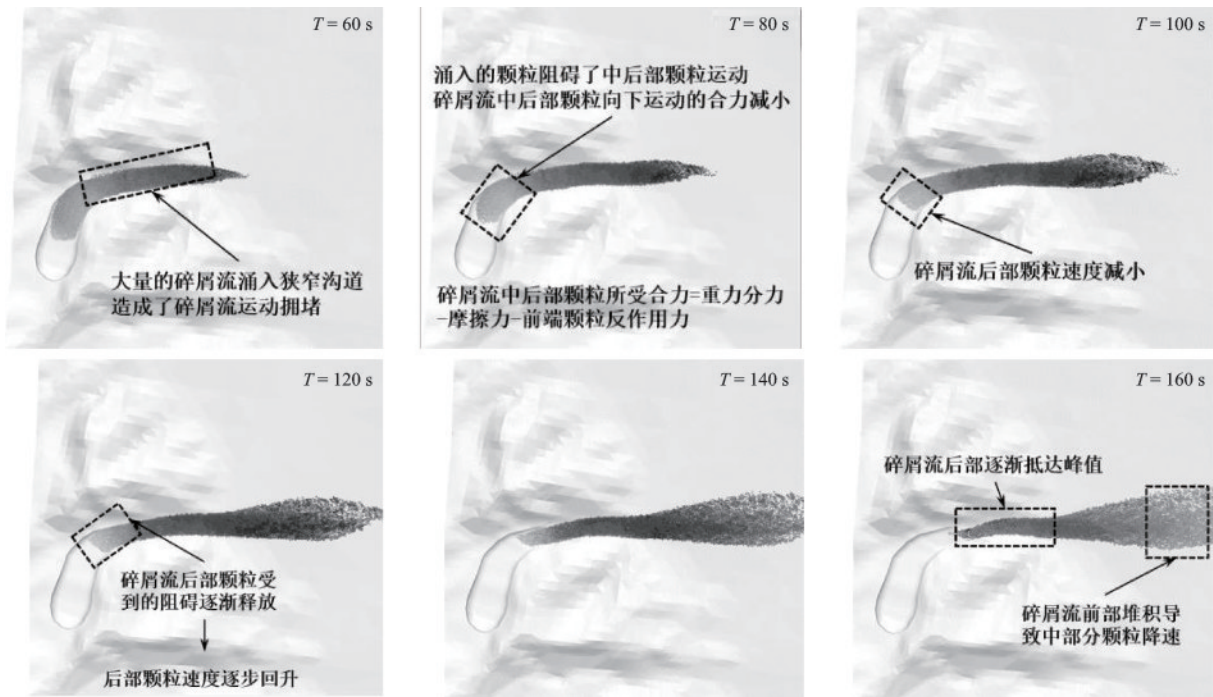


图12 阿汝1号冰崩-碎屑流60~160s运动特征

Fig.12 Movement characteristics of Aru No.1 ice avalanche-debris flow (60-160 s)

18.42×10^{12} J,同时颗粒与地形,颗粒与颗粒之间碰撞摩擦,将动能消耗殆尽,运动停止。重力势能总耗散量为 190.50×10^{12} J,其中阻尼耗能 80.61×10^{12} J,摩擦耗能 109.38×10^{12} J、颗粒应变能峰值为 846.42×10^7 J,冰崩-碎屑流整个运动过程中,动能最大值达到 18.42×10^{12} J。从能量耗散的比例来

看,冰崩-碎屑流运动过程中,应变耗能可忽略不计,摩擦耗能为主导,占总重力势能的57.42%,阻尼耗能占重力势能释放能量的42.31%。动能在120s时达到峰值,占重力势能的9.67%。由此可得:冰崩-碎屑流释放的重力势能主要被颗粒与颗粒、颗粒与地形之间的摩擦阻尼所消耗。

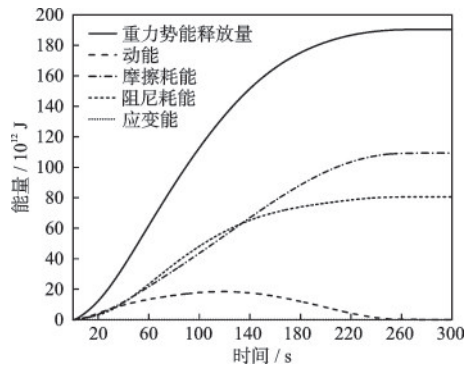


图 13 运动过程能量迹线

Fig.13 Energy trace of movement process

4 周边冰崩隐患运动及堆积范围预测

4.1 冰崩隐患基本信息

通过近期 Sentinel-2 影像观测,在美马错南部冰川群中解译出一条具有危险隐患冰川:阿汝 85 号冰川(中国冰川编目:5Z412E0002),它与阿汝 53 号和 50 号冰川距离较近(图 14),这条冰川的后缘出现了密集的拉裂缝,是较为危险的冰崩隐患(图 15)。

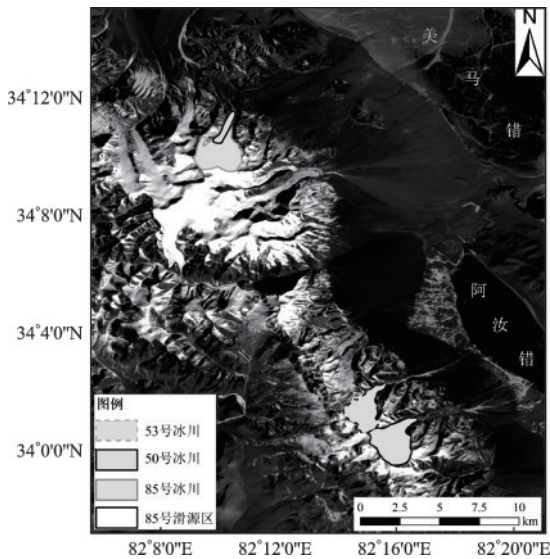


图 14 85号冰川地理位置

Fig.14 Location of Aru No.85 Glacier

阿汝 85 号冰川处于 $34^{\circ}10'37.41''N$, $82^{\circ}10'2.50''E$,海拔区间为 5 303~5 771 m,高程差为 468 m,形似 Y 状(图 15),冰川后部分为左右两条,

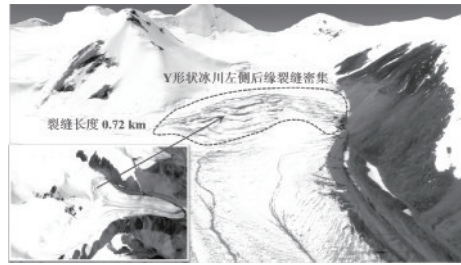


图 15 阿汝 85号冰川近景

Fig.15 Close-up view of Aru No.85 Glacier

发生裂缝的位置主要为左后侧的冰川,裂缝前后有较大的高程落差,裂缝的前部高程为 5 680 m,后部为 5 775 m,高程落差为 95 m,后缘最大裂缝长达 0.72 km,85 号冰川较宽,平均宽度为 0.44 km,长度约为 2.17 km,经过统计后该冰川具有隐患的面积约为 0.73 km^2 ,由影像观测冰川前端冰舌较厚(图 16)。

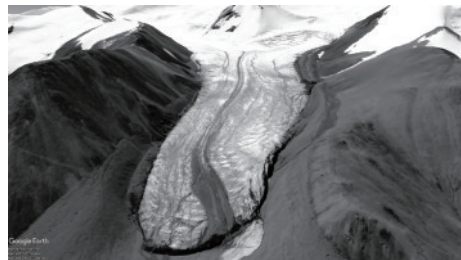


图 16 阿汝 85号冰川前端

Fig.16 Front of Aru No.85 Glacier

根据阿汝 53 号和 50 号冰川方量及厚度等特征,在 85 号冰川的左后侧的冰川后缘处划分出冰崩源区,冰崩体的最大厚度为 113 m,到冰舌厚度逐渐减小,经计算冰崩体体积为 $53.22 \times 10^6 \text{ m}^3$,冰崩前后的高程剖面如图 17 所示。

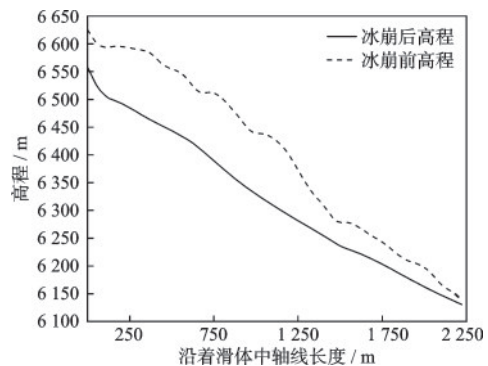


图 17 85号冰川冰崩前后高程剖面线

Fig.17 Elevation profile of Aru No.85 Glacier before and after the avalanche

4.2 冰崩隐患运动特征和堆积范围预测

4.2.1 整体运动特征

阿汝 85 号冰川冰崩-碎屑流颗粒数量为 6 907

个,整个运动过程时间约为 280 s,具体过程如图 18 所示,颗粒平均速度峰值最大为 21.29 m/s,颗粒的平均位移达到了 2 560.36 m,85号冰川冰崩颗粒平均位移、速度和加速度变化如图 19 所示。

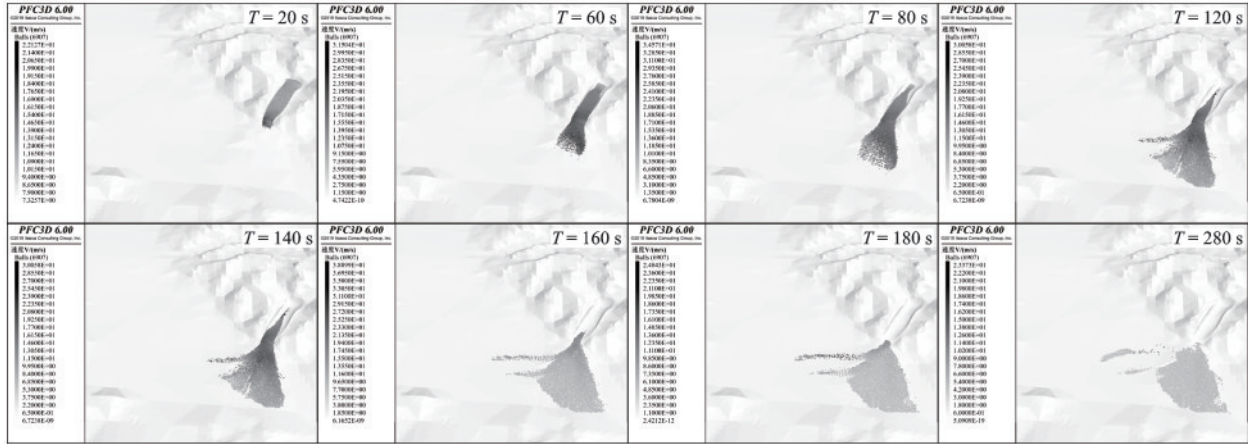


图 18 阿汝 85 号冰川冰崩-碎屑流运动过程

Fig.18 Change in average displacement, velocity, and acceleration of particles for Aru No.85 Glacier

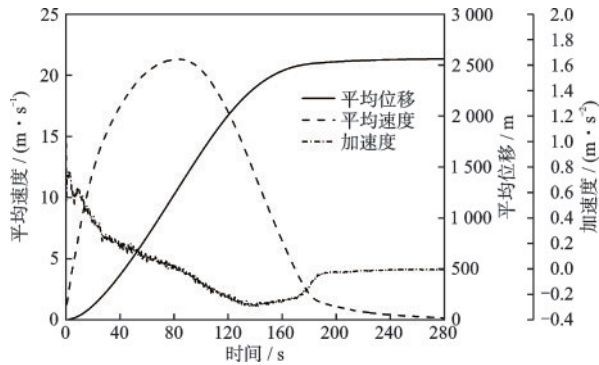


图 19 85 号冰川冰崩颗粒平均位移、速度和加速度变化

Fig.19 Movement process of Aru No. 85 Glacier ice avalanche-debris flow

图 18 为该冰崩-碎屑流运动过程,约有 $53.22 \times 10^6 \text{ m}^3$ 体积的冰川发生了冰崩,该冰崩体为直线长条状,主滑动方向为 $N27^\circ E$,并无狭长且蜿蜒曲折的沟道,这使得冰崩体整体滑动的流畅性较好, $T=20 \text{ s}$ 时,冰崩体的前部正朝向沟道口左前方快速运动,运动方向偏转为正北,冰崩体后部已脱离母体。 $T=80 \text{ s}$ 时,颗粒平均速度迅猛攀升至峰值 21.29 m/s ,在孕育冰川沟谷下游凸起地形对冰崩-碎屑流产生了阻碍(图 20),这导致冰崩-碎屑流的前部开始表现出扩散分流趋势, $T=120 \text{ s}$ 时,有一小部分碎屑流受到阻碍,迫使其向 $N57^\circ E$ 向运动。 $T=140 \text{ s}$ 时,碎屑流扇形区域的右侧部分颗粒做分流运动。 $T=180 \text{ s}$ 时,碎屑流尾部已完全离开滑源区,逐渐融入

前方堆积扇。 $T=220 \text{ s}$ 时,沟道口西北侧碎屑流已完全堆积,该堆积扇覆盖了沟道口 $N60^\circ W$ 至 $N12^\circ E$ 扇形区域,距沟道口最远能达到 2.3 km 。 $T=280 \text{ s}$ 时,仅剩下零星数个颗粒向沟道口外 $N57^\circ E$ 向小堆积区域缓行,阿汝 85 号冰川冰崩-碎屑流运动过程几乎停止,最终平均位移为 $2 560.36 \text{ m}$ 。

通过影像观测到 85 号冰川下游发育大片的冰水扇,对比发现堆积区形态与影像中冰水扇有显著相似性(图 20)。它是源自于冰川融水携带着丰富碎屑物质,在宽缓地带逐渐沉积而成,冰水扇对微观地貌敏感性异常显著。曾经的阿汝 53 号和 50 号冰川发生冰崩后的运动堆积形态,同样与冰川前端的冰水扇产生了极佳的相似性。

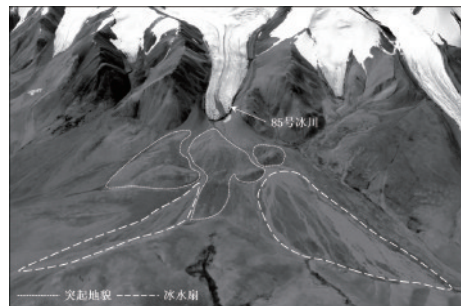


图 20 85 号冰川前端地貌

Fig.20 Front topography of Aru No.85 Glacier

4.2.2 堆积范围

将堆积区的颗粒叠加在 2023 年 3 月 24 日的影

像上,具体如图21所示。阿汝85号冰川的下游对岸有一座山体,而沟道前端的东北侧则铺展着起伏崎岖的地形,导致所形成的堆积扇并没有先前发生的两次冰崩大。整个堆积区可以分为两个主要区域,首先是位于沟道口西北侧的主堆积区,面积为 1.1 km^2 ,而右侧有一分流堆积区,该区由两条长条状的堆积扇构成,面积为 0.3 km^2 ,该冰崩-碎屑流形成的总面积约为 1.40 km^2 ,运动及堆积形成的危险区域为“V”形,长边为 2.92 km ,短边为 1.82 km ,危险区面积共计 3.28 km^2 。

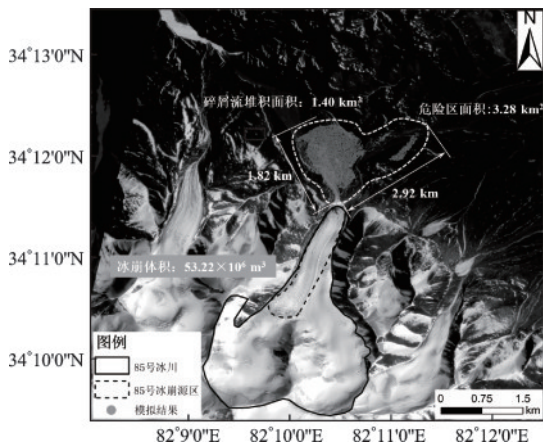


图21 阿汝85号冰川冰崩-碎屑流危险区

Fig.21 Hazard zone of Aru No.85 Glacier ice avalanche - debris flow

5 结论

(1)反演了两次阿汝冰崩-碎屑流运动堆积特征。阿汝1号冰崩-碎屑流运动至停止的过程约为 300 s , 125 s 颗粒平均速度抵达峰值 32.05 m/s ,约 $8.47\times 10^6\text{ m}^3$ 颗粒冲入阿汝错,最终平均位移为 5.46 km ,堆积扇面积为 8.12 km^2 ,入湖颗粒最大运动距离为 6.73 km 。阿汝2号冰崩-碎屑流运动至停止的过程约为 240 s , 87 s 颗粒平均速度抵达峰值 34.80 m/s ,最终颗粒平均位移为 4.82 km ,堆积扇面积 4.32 km^2 ,最大运动距离 6.26 km 。

(2)揭示了阿汝冰崩-碎屑流整体运动过程(以阿汝1号为例)。阿汝冰川发育于宛如围椅状冰斗之间,周围三面高耸的山峰将冰川紧紧环绕,为冰崩积蓄了大量重力势能,冰崩体与母冰川脱离后,急速下滑,受冰川左侧山峰阻挡,发生碰撞刮挂,冰崩体发生偏转进入冰川下游与湖岸平原间铺展开的狭长且畅通无阻的沟道,使得冰崩体以 $30\sim 40\text{ m/s}$ 速度冲刷沟道,逐渐解体,塑造出疾驰而下的高

速碎屑流,通往下游平原地带,碎屑流速度逐渐从峰值下降,摆脱了沟道束缚,碎屑流逐渐向四周奔散,前端冲入了阿汝错,在阿汝错西岸形成了庞大的冰崩扇。

(3)前后部的能量传递是冰崩-碎屑流产生高速远程运动的关键机制。冰崩-碎屑流的前后不同碎屑块体之间频繁而激烈的碰撞所导致的能量传递作用,使得碎屑流前部能够行进更远,后部碎屑流所蕴含的动能,通过持续不断的挤压和碰撞,源源不断地传递给了前部碎屑流。在这种传递的过程中,前部碎屑流不断积聚能量,使其能够持续地向前推进,而后部颗粒受到前中部传来的反作用力的影响,呈现出明显的滞后效应,有时甚至会表现出速度衰减的特征,能量从后部传递到前部,从而推动了碎屑流的持续前进,这正是碎屑流远距离运动的关键机制。

(4)预测了周边冰崩隐患发生冰崩-碎屑流的运动堆积范围。阿汝85号冰川发生冰崩的体积约为 $53.22\times 10^6\text{ m}^3$,该堆积区主要是分为两块区域,沟道口西北侧的堆积区,面积约为 1.1 km^2 ,东北侧有分流的堆积区,面积约为 0.3 km^2 ,该冰崩-碎屑流形成的总面积约为 1.40 km^2 ,冰崩-碎屑流运动及堆积形成的危险区域为“V”形,长边为 2.92 km ,短边为 1.82 km ,危险区面积共计 3.28 km^2 。

致谢:衷心感谢美国科罗拉多大学环境科学合作研究所国家冰雪数据中心提供的高精度DEM,感谢欧洲航天局和 Planet Explore 提供的光学遥感影像,最后感谢审稿专家提出的建设性建议。

参考文献:

- [1] 李红梅,李林. $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 全球变暖背景下青藏高原平均气候和极端气候事件变化[J]. 气候变化研究进展,2015,11(3): 157-164.
Li H M, Li L. Mean and extreme climate change on the Qinghai-Tibetan Plateau with a $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ global warming[J]. Climate Change Research, 2015, 11(3): 157-164. (in Chinese)
- [2] 童立强,裴丽鑫,涂杰楠,等. 冰崩灾害的界定与类型划分:以青藏高原地区为例[J]. 国土资源遥感,2020,32(2): 11-18.
Tong L Q, Pei L X, Tu J N, et al. A preliminary study of definition and classification of ice avalanche in the Tibetan Plateau region [J]. Remote Sensing for Land and resources, 2020, 32(2): 11-18. (in Chinese)
- [3] 汤明高,王李娜,刘听听,等. 青藏高原冰崩隐患发育

- 分布规律及危险性[J]. 地球科学, 2022, 47(12): 4647-4662.
- Tang M G, Wang L N, Liu X X, et al. Distribution and risk of ice avalanche hazards in Tibetan Plateau[J]. Earth Science, 2022, 47(12): 4647-4662. (in Chinese)
- [4] 张议芳, 刘阳, 苏鹏程, 等. 西藏地区冰崩灾害研究进展[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(2): 132-145.
- Zhang Y F, Liu Y, Su P C, et al. Advances in the study of glacier avalanches in Tibet[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(2): 132-145. (in Chinese)
- [5] Lei Y, Yao T, Tian L, et al. 2021. Response of downstream lakes to Aru glacier avalanches on the western Tibetan Plateau[J]. The Cryosphere, 2021, 15: 199-214.
- [6] 邬光剑, 姚檀栋. 第二次青藏高原综合科学考察研究丛书西藏阿里地区阿汝冰崩科学考察研究报告[M]. 北京: 科学出版社. 2021.
- [7] Kotlyakov V M, Rototaeva O V, Nosenko G A. The september 2002 Kolka Glacier Catastrophe in North Ossetia, Russian Federation: evidence and analysis[J]. Mountain Research and Development, 2004, 24(1): 78-83.
- [8] 汪发武, 陈也, 刘伟超, 等. 藏东南高位远程滑坡动力学特征及研究难点[J]. 工程地质学报, 2022, 30(6): 1831-1841.
- Wang F W, Chen Y, Liu W C, et al. Characteristics and challenges to dynamics of long-runout landslides with high-altitude in southeast Tibet[J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(6): 1831-1841. (in Chinese)
- [9] 刘艺梁, 陈健翔, 高晨曦, 等. 基于滑面分区段力学模型的高速滑坡运动过程能量转化研究[J]. 地质科技通报, 2022, 41(2): 139-146.
- Liu Y L, Chen J X, Gao C X, et al. Energy connection of the high-speed landslide movement process based on a sliding surface partition mechanical model[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(2): 139-146. (in Chinese)
- [10] Salzmann N, Käab A, Huggel C, et al. Assessment of the hazard potential of ice avalanches using remote sensing and GIS-modelling[J]. Norsk Geografisk Tidsskrift-Norwegian Journal of Geography, 2004, 58(2): 74-84.
- [11] Delaney K B, Evans S G. The 2000 Yigong landslide (Tibetan Plateau), rockslide-dammed lake and outburst flood: Review, remote sensing analysis, and process modelling[J]. Geomorphology, 2015, 246: 377-393.
- [12] 夏式伟, 郑昭扬, 袁小一, 等. 芦山地震汤家沟滑坡-碎屑流过程模拟[J]. 山地学报, 2017, 35(4): 527-534.
- Xia S W, Zheng Z Y, Yuan X Y, et al. Dynamic simulation of Tangjia valley rock avalanche in Tianquan, Sichuan, China[J]. Mountain Research, 2017, 35(4): 527-534. (in Chinese)
- [13] 夏式伟. 易贡滑坡-碎屑流-堰塞坝溃决三维数值模拟研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- Xia S W. Study on three dimensional numerical simulation of Yigong rock avalanche and its dam breach[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018. (in Chinese)
- [14] 段学良, 马凤山, 郭捷, 等. 基于Massflow模型的西藏仁布杰仲沟泥石流运动特征分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(6): 25-33.
- Duan X L, Ma F S, Guo J, et al. Movement characteristics of Jiezhonggou debris flow of Renbu, Tibet based on massflow model[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(6): 25-33. (in Chinese)
- [15] 徐奕梓, 樊晓一, 杨维斌, 等. 贵州水城高速远程滑坡运动过程及动力参数分析[J/OL]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(5): 987-998.
- Xu Y Z, Fan X Y, Yang W B, et al. Analysis of motion process and dynamic parameters of high-speed and long-distance landslide in Shuicheng, Guizhou Province[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(5): 987-998. (in Chinese)
- [16] 葛云峰, 周婷, 霍少磊, 等. 高速远程滑坡运动堆积过程中的能量传递机制[J]. 地球科学, 2019, 44(11): 3939-3949.
- Ge Y F, Zhou T, Huo S L, et al. Energy transfer mechanism during movement and accumulation of rockslide avalanche[J]. Earth Science, 2019, 44(11): 3939-3949. (in Chinese)
- [17] 李祥龙, 唐辉明, 熊承仁, 等. 基底刮铲效应对岩石碎屑流停积过程的影响[J]. 岩土力学, 2012, 33(5): 1527-1534, 1541.
- Li X L, Tang H M, Xiong C R, et al. Influence of substrate ploughing and erosion effect on process of rock avalanche[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(5): 1527-1534, 1541. (in Chinese)
- [18] 毕钰璋, 付跃升, 何思明, 等. 牛眠沟地震滑坡碎屑化全过程离散元模拟[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(3): 17-25.
- Bi Y Z, Fu Y S, He S M, et al. Simulation of the whole process of Niuniangou creek rock avalanche triggered by the earthquake using a distinct element method[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, 26(3): 17-25. (in Chinese)

- [19] 段晓冬, 樊晓一, 姜元俊, 等. 碎屑流冲击挡墙的土拱效应研究[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(5): 92-102.
Duan X D, Fan X Y, Jiang Y J, et al. Study on soil arch effect of dry debris flow for impact barricade wall [J]. Journal of Natural Disasters, 2015, 24(5): 92-102. (in Chinese)
- [20] 张志东, 樊晓一, 姜元俊. 岩土体颗粒级配对滑坡碎屑流冲击力链特征的影响[J]. 山地学报, 2020, 38(3): 402-415.
Zhang Z D, Fan X Y, Jiang Y J. Effect of granularity of rock and soil mass on regularity of impact force chain in a fluidized landslide [J]. Mountain Research, 2020, 38(3): 402-415. (in Chinese)
- [21] 代欣然, 赵建军, 赖琪毅, 等. 青藏高原察达高速远程滑坡运动过程与形成机理[J]. 地球科学, 2022, 47(6): 1932-1944.
Dai X R, Zhao J J, Lai Q Y, et al. Movement process and formation mechanism of rock avalanche in Chada, Tibet Plateau [J]. Earth Science, 2022, 47(6): 1932-1944. (in Chinese)
- [22] 张龙, 唐辉明, 熊承仁, 等. 鸡尾山高速远程滑坡运动过程PFC^{3D}模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增1): 2601-2611.
Zhang L, Tang H M, Xiong C R, et al. Movement process simulation of high-speed long-distance Jiweishan landslide with PFC3D [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(Sup1): 2601-2611. (in Chinese)
- [23] 陈镛增. 易贡高速远程滑坡运动颗粒流数值分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
Chen L Z. Three-dimensional numerical simulation of yigong rock avalanche using particle flow code [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016. (in Chinese)
- [24] 刘昕昕. 西藏米林县色东普沟冰崩灾变机理及灾变过程模拟[D]. 成都: 成都理工大学, 2021.
Liu X X. Disaster mechanism and simulation of cataclysmic process of the ice avalanche in Sedongpu Basin, Milin County, Tibet [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [25] 罗浩. 鸡场镇滑坡成因机制与碎屑流运动特征研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2021.
Luo H. Research on formation mechanism and kinematic characteristics of the debris flow of the landslide in Jichang Town [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [26] 孟桓羽, 占洁伟, 卢全中, 等. 陕西山阳“8·12”大型山体滑坡运动特征及数值模拟分析[J]. 工程地质学报, 2023, 31(6): 1910-1928.
Meng H Y, Zhan J W, Lu Q Z, et al. Kinematics characteristics and numerical simulation analysis of “8·12” giant landslide in Shanyang County, Shaanxi Province [J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(6): 1910-1928. (in Chinese)
- [27] 陈果, 钮志林, 樊晓一, 等. 高速远程滑坡沿程速度演化与冲击力分布研究—以三溪村滑坡为例[J]. 自然灾害学报, 2022, 31(3): 232-241.
Chen G, Niu Z L, Fan X Y, et al. Velocity evolution and impact force distribution of high-velocity and long-runout landslide debris flow along the way: A case study of Sanxi Village landslide [J]. Journal of Natural Disasters, 2022, 31(3): 232-241. (in Chinese)
- [28] 王泽华, 李昶, 邢磊, 等. 基于PFC^{3D}的滑坡与建筑物相互作用过程研究[J]. 安全与环境工程, 2023, 30(1): 107-118, 191.
Wang Z H, Li B, Xing L, et al. Research on the interaction process between landslide and buildings based on PFC^{3D} [J]. Safety and Environment Engineering, 2023, 30(1): 107-118, 191. (in Chinese)
- [29] 周礼, 范宣梅, 许强, 等. 金沙江白格滑坡运动过程特征数值模拟与危险性预测研究[J]. 工程地质学报, 2019, 27(6): 1395-1404.
Zhou L, Fan X M, Xu Q, et al. Numerical simulation and hazard prediction on movement process characteristics of Baige landslide in Jinsha river [J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(6): 1395-1404. (in Chinese)
- [30] 李明, 刘恩龙, 苏雨, 等. 基于连续-离散模拟方法的冰川失稳过程与机理分析[J]. 甘肃水利水电技术, 2022, 58(10): 13-19, 27.
Li M, Liu E L, Su Y, et al. Glacier instability process and mechanism analysis based on continuous-discrete simulation method [J]. Gansu Water Resources and Hydropower Technology, 2022, 58(10): 13-19, 27. (in Chinese)
- [31] Bai X, He S. Dynamic process of the massive Aru glacier avalanche in Tibet [J]. Landslides, 2020, 17(6): 1353-1361.
- [32] Käab A, Leinss S, Gilbert A, et al. Massive avalanche of two glaciers in western Tibet in 2016 after surge-like instability [J]. Nature Geoscience, 2018, 11(2): 114-120.
- [33] 孙荣. 滑坡—碎屑流模型试验及离散元模拟[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2022.
Sun R. Model experiment and discrete element method simulation of landslide-debris flow [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)

(本文编辑: 张艺)