

藏东南直白沟冰崩型泥石流孕灾条件与动力特征

龙飞¹, 龚诚^{2,3}, 黄海², 焦成才⁴

[1.西藏自治区地质环境监测总站, 西藏 拉萨 850000; 2.中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734; 3.中国地质大学(武汉) 工程学院, 湖北 武汉 430074; 4.北京欧远致科技有限公司, 北京 100085]

摘要: [目的] 分析西藏林芝市米林县派镇直白沟 2020 年 9 月 10 日泥石流灾害的形成条件、启动机制和动力特征, 为藏东南地区重大工程建设中的冰崩型泥石流灾害的监测预警及风险防控提供科学参考。[方法] 综合利用野外调查、多期遥感解译、灾害监测和现场观测等手段, 研究了泥石流的启动过程、冲淤特征和灾损情况, 计算了动力参数。[结果] “9·10”泥石流灾害是高位冰岩崩驱动形成的, 包括 3 个形成过程: ①受 2017 年米林地震对岩体震裂作用和冻融循环作用, 南侧分水岭发育高位冰岩崩, 形成冰岩碎屑流在斜坡冰碛平台运动, ②冰岩碎屑流铲刮斜坡冰碛物与松散岩土体, 进入 2[#] 支沟运动并沿途携带沟道物质, 放大碎屑流规模。③通过运动过程中的碰撞摩擦, 冰体发生相变, 冰岩碎屑流转化为泥石流。[结论] 冰崩型泥石流的触发条件、水土耦合过程和动力特征均异于常规冰川降雨复合型泥石流, 其动力参数受启动点高势能和运动中冰水相变作用影响, 与现有计算方法所得结果具有极大差异。未来对冰川泥石流灾害防治研究不能直接采用现有降雨型泥石流动力参数计算方法, 应基于泥石流启动机制来分析动力参数。**关键词:** 冰川泥石流; 冰岩崩; 灾害链; 地震; 动力特征

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)06-0031-08

中图分类号: P642.3

文献参数: 龙飞, 龚诚, 黄海, 等. 藏东南直白沟冰崩型泥石流孕灾条件与动力特征[J]. 水土保持通报, 2022, 42(6): 31-38. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.06.004; Long Fei, Gong Cheng, Huang Hai, et al. Formation conditions and dynamic characteristics of debris flow triggered by an ice avalanche at Zhibai Gully in Southeast Tibet [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(6): 31-38.

Formation Conditions and Dynamic Characteristics of Debris Flow Triggered by an Ice Avalanche at Zhibai Gully in Southeast Tibet

Long Fei¹, Gong Cheng^{2,3}, Huang Hai², Jiao Chengcai⁴

[1. Geological Environment Monitoring Station of Tibet Autonomous Region, Lhasa, Tibet 850000, China;

2. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu, Sichuan 611734, China; 3. School of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China; 4. Beijing Ouyuanzhi Technology Co., Ltd., Beijing 100085, China]

Abstract: [Objective] The formation conditions, initiation mechanism and dynamic characteristics of the glacial debris flow disaster occurred on September 10, 2020 at Zhibai gully in Linzhi City of Tibet, were analyzed in order to provide scientific reference for the early warning and risk prevention in the construction projects in Southeast Tibet. [Methods] The initiation process, erosion-sediment characteristics and destruction of the debris flow disaster were identified according to the field survey, remote sensing interpretation, observation, and monitoring. [Results] The drive force of the “9·10” debris flow was the high-altitude rock/ice avalanche. The formation process included three processes: ① Due to the seismic fracturing caused by the Milin earthquake in 2017, and freeze-thaw cycle of high level rock, a rock collapse was developed in the south watershed, triggering ice avalanche and forming ice-rock mass flow moving to the slope moraine platform, ② Ice-rock mass flow scraped slope moraine and loose soil materials, entered into the 2[#] branch gully and carry soil material along the channel bed, amplified disaster scale. ③ Through the collision and friction in the

收稿日期: 2022-04-27

修回日期: 2022-05-22

资助项目: 中国地质调查局地质调查项目“青藏高原东南缘及过渡带地质灾害调查与风险管控”(DD20221741), “藏东昌都地区城镇灾害地质调查”(DD20190644); 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0902)

第一作者: 龙飞(1989—), 男(汉族), 四川省西充县人, 学士, 工程师, 主要从事地质灾害调查与监测研究。Email: 604593429@qq.com。

通信作者: 黄海(1984—), 男(汉族), 湖南省株洲市人, 博士, 高级工程师, 主要从事泥石流灾害防治理论与技术研究。Email: 52134170@qq.com。

process of movement, the ice undergoes phase changed and drove the ice-rock mass flow to debris flow. [Conclusion] The triggering conditions, water-soil coupling process and dynamics characteristics of the ice avalanche type debris flow are different from those of the other glacial rainfall complex type debris flow, and its dynamics parameters are influenced by the high potential energy at the initiation point and the ice-water phase change during the motion, which are very different from the results obtained by existing calculation methods. In the future, the existing methods for calculating the dynamic parameters of rainfall type mudflow cannot be directly adopted in the prevention and control of glacial mudflow disasters, and the dynamic parameters should be analyzed based on the initiation mechanism of mudflow.

Keywords: glacial debris flow; ice rock avalanche; geohazard chain; earthquake; dynamic characteristics

地震和全球气候变暖是青藏高原地质灾害的两个关键驱动力^[1-2]。地震在诱发同震灾害的同时^[3],还对周边岩体具有震裂效应^[4-5],而气温升高则对冰川消退和高山区的冻融作用具有明显加剧作用^[6],两者的叠加导致冰冻圈的地震影响区泥石流非常活跃。如 1950 年墨脱地震影响下^[7],直白沟和古乡沟相继暴发特大堵江型冰川泥石流灾害^[8-9],2017 年米林地震后,色东普在 4 个水文年暴发了 7 次泥石流^[10-11]。前人对于周边区域不同类型冰川泥石流开展了大量研究,如冰崩型泥石流(天摩沟)^[12]、冰水复合型泥石流(古乡沟)^[13]、冰湖溃决型泥石流(光谢错)等^[14],探索了冰川泥石流灾害演化、触发条件、启动机制、动力过程及风险评价,为深入认识冰川泥石流灾害提供了重要理论基础。在取得丰硕成果的同时,由于冰川泥石流多发育于人迹罕至的极高山区,现场观测与监测工作开展较少,使得我们对于冰川泥石流的触发条件、动力参数等特征还存在较多不足。

2017 年 11 月 18 日,藏东南南迦巴瓦地区发生 Ms 6.9 级地震,震中位于色东普沟源头(29.89°N, 95.04°E)^[15]。地震在雅鲁藏布江大峡谷附近诱发大量同震地质灾害^[16],大部分为冰冻圈的岩土体失稳,这些灾害多数都与冰川或者高山积雪相关。同时,地震作用还破坏了周边岩体和冰川的稳定性,震后高位冰崩、岩崩高发(以色东普沟为代表),这些高位地质体失稳后,沿沟道铲刮侵蚀,形成大规模泥石流,并多次堵塞雅鲁藏布江形成堰塞湖,回淹范围达上百公里^[17]。2020 年 9 月 10 日下午 5:00 左右,直白沟暴发大规模泥石流,造成直白大桥损毁,公路路面淤埋破坏,中断交通近半年之久,所幸未造成人员伤亡。同时,大量泥石流固体物质冲入雅鲁藏布江,堵塞主

河行洪断面 50%。“9·10”冰川泥石流灾害暴发时温度与气温均无明显异常,其触发机制有别于其他震区的泥石流事件^[3]。本文通过野外调查、遥感解译、现场观测和灾害监测等研究手段,分析该次泥石流灾害事件的触发条件、演进过程和动力参数,为进一步认识冰崩型泥石流的触发与运动具有重要现实意义和理论意义。

1 流域概况

直白沟位于西藏自治区林芝市米林县派镇,为雅鲁藏布江右岸一级支流。流域地处青藏高原喜马拉雅东构造和雅鲁藏布江水汽通道交汇处^[18-19],邻近雅鲁藏布江大拐弯。研究区地质背景复杂,活动构造发育,地震频发,地貌类型复杂多样。直白沟流域面积 57.50 km²,主沟沟长 11.50 km,地势总体东高西低,海拔最高点为著名的南迦巴瓦峰,海拔高程为 7 527 m,最低海拔为主河交汇口,海拔 2 953 m,相对高差达 4 574 m。沟道上游发育著名的则隆弄冰川,冰川的进退变化为泥石流孕灾提供了丰富的冰碛物物源。受冰川作用,流域水系复杂,一直延伸到出山口的冰川侧碛垄将汇流通道分割成 3 个水系,为泥石流的运动提供了有利的沟道地形条件。

直白沟流域复杂的地质构造和充沛水汽补给为泥石流的启动提供了驱动力。在地震和气候变暖的内外动力耦合作用下,研究区历史上多次暴发泥石流灾害,对沟口直白村居民区、交通设施以及河流等危害严重(表 1)。总体上,直白沟泥石流具有冰川失稳和岩土体失稳两种激发模式,1950 年和 1968 年暴发的 3 次泥石流灾害均由冰川跃动诱发;2020 年泥石流灾害则为高位冰岩崩诱发。

表 1 直白沟泥石流灾害事件统计

事件编号	暴发时间	降水条件	危害情况	数据来源
1	19500815	无降雨	夷平直白村,百余人死亡	张文敬 ^[6]
2	19500815	无降雨	堵塞主河,形成溃决洪水	
3	1968 年(藏历 7 月)	无降雨	堵塞主河,形成溃决洪水	
4	20200910	无降雨	冲毁桥梁,挤占主河	本研究

如图 1 所示,2020 年 9 月 10 日直白沟暴发的大规模泥石流损毁了沟口直白大桥和公路,并堵塞主河。

泥石流中的巨块石撞击在净空约 25 m 高的直白

大桥,造成主桥桥面下沉 15 cm,水平错位移动 30 cm,泥石流从沟道右岸平台漫流至公路,淤埋公路约 150 m,所幸未造成人员伤亡,大量泥石流固体物质冲入雅鲁藏布江,堵塞主河行洪断面 50%。

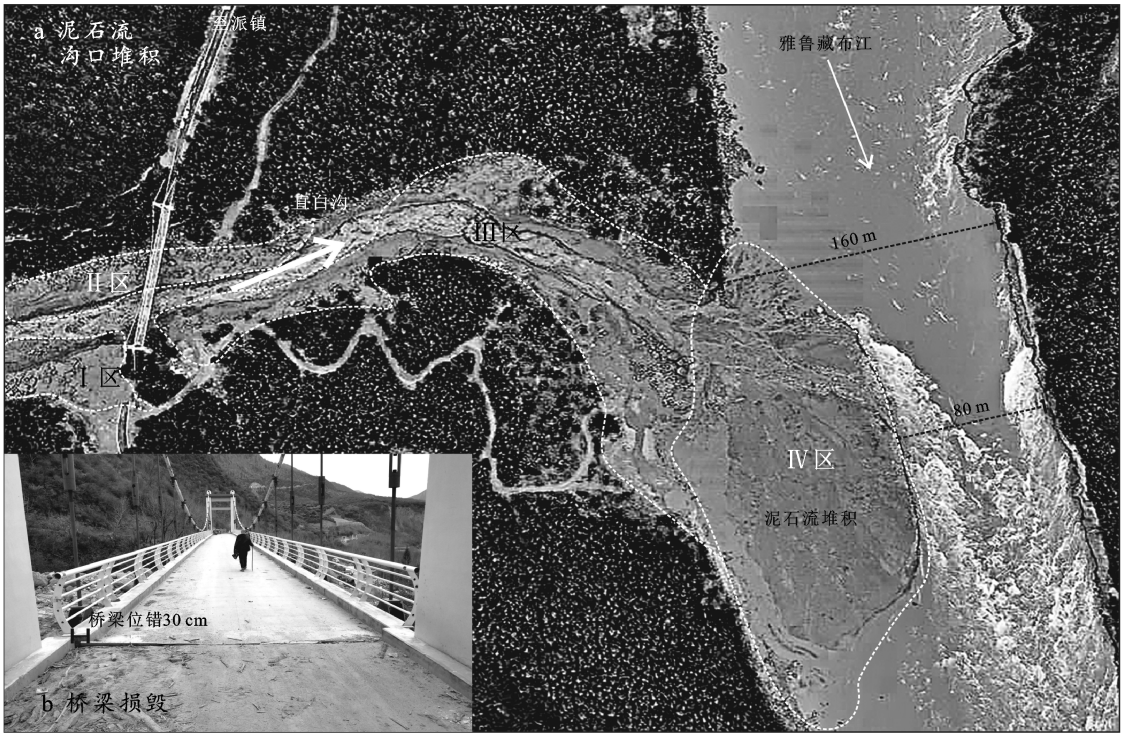


图 1 直白沟 2020 年 9 月 10 日泥石流灾害灾损情况

2 泥石流形成条件

2.1 流域地貌特征

直白沟发育典型冰川地貌,主沟沟谷呈现 U 形

地貌,沟谷宽度达 800~1 200 m,在强烈构造运动作用下,形成陡峻沟床纵比降,主沟平均纵比降 203.73‰。根据泥石流形成过程,可将直白沟自上游而下划分为形成区、流通补给区和堆积区(图 2)。

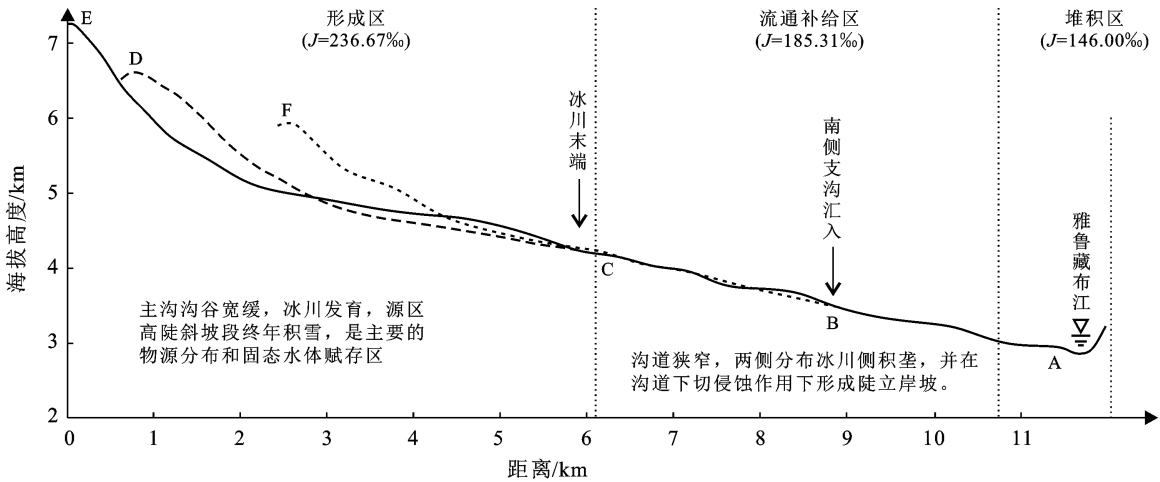


图 2 直白沟沟道纵剖面图

海拔 3 750 m 以上主沟汇水区内冰川发育,基岩陡立,发育零星高位崩滑体,冰川和岩体的失稳常诱

发大规模泥石流,划分为泥石流形成区;出山口以上段沟道两岸分布冰碛物台地,沟道下切严重,形成陡

峻的岸坡,尤其是冰碛物岸坡,形成近 90°的直立陡崖,在沟道流水侧蚀作用下,极易形成补给泥石流的松散物源,划分为泥石流流通补给区;出山口至交汇口段为泥石流堆积区。因此形成区陡峻的沟道和斜坡,有利于泥石流物源的启动,流通区顺直深切的水力断面在泥石流输移过程中产生“束水攻沙”效应,有利于物质输移和泥石流龙头的形成^[20]。

2.2 物源特征

通过多期遥感解译和野外调查,查出直白沟物源主要有 3 类:高位崩滑物源、冰碛物源和沟床物源。流域物源储量丰富,总量估算为 $6.45 \times 10^6 \text{ m}^3$,其中高位崩滑物源量约 $7.50 \times 10^5 \text{ m}^3$,主要分布于海拔 5 000 m 以上的基岩裸露区,其形成与冻融循环作用和地震活动密切相关;冰碛物源量约 $4.70 \times 10^6 \text{ m}^3$,主要分布于冰川下游段主沟沟道两侧和支沟源头;沟床物源量约 $1.00 \times 10^6 \text{ m}^3$,主要分布于主沟沟道中,为泥石流、碎屑流及斜坡侵蚀等搬运作用在沟道中堆积的松散物质。

2.3 冰川发育特征

由历史灾害事件资料分析^[8],冰川是直白沟泥石流重要孕灾体。受气候变暖影响,直白沟冰川退缩严重,主沟冰川长度由 1950 年的 7.4 km 缩短至现在的 5.9 km。冰川变化速度总体呈现慢—快—慢的趋势,近 20 a 来冰川变化较慢,末端高程变化约 10 m^[21]。冰川长度的缩小和厚度的减薄均有利于冰川整体稳定性,其赋存状态的变化对直白沟泥石流的启动机制具有显著影响,相较于 20 世纪 50 年代,现状由冰川运动直接诱发的泥石流的可能性已经大大降低。

2.4 气象条件

水热组合和长期气候变化是冰川泥石流的重要诱因,冰川泥石流触发时的气象条件不仅仅由降雨决定,如色东普、天摩沟等,均在少雨的情况下暴发泥石流^[22]。研究区对全球气候变暖的响应非常敏感,1981 年以来,青藏高原地区气温升温 $0.60 \text{ }^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ 。米林县汛期平均气温与 1—10 月平均气温均为线性增长趋势,汛期增速 $0.35 \text{ }^\circ\text{C}/10 \text{ a}$,1—10 月平均气温

增速为 $0.39 \text{ }^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ 。在快速增温的背景下,冰川不稳定性增加,消融加剧,冰崩诱发的泥石流还将持续甚至加强,危险性增加。综上所述,直白沟沟域内赋存丰富的松散物源,在气候变化下的冰雪运动强烈,沟道堵塞严重且纵比降陡峻,具备泥石流形成的三大主要条件。因此在水热条件的有利组合诱发下,直白沟于 2020 年 9 月 10 日暴发特大规模泥石流灾害。

3 泥石流灾害特征

3.1 触发条件

根据安装于直白沟沟口(海拔 2 900 m)的降雨量和附近白努弄巴(海拔 3 000 m)的气温监测数据,“9·10”泥石流暴发当日未出现集中降雨,沟口 24 h 降雨量仅有 1.00 mm,气温在一周内也无明显强烈变化(图 3)。从全年降雨量分布来看,直白沟沟口的降雨量监测显示 9 月的降雨量仅为 23.50 mm,仅占全年降雨总量的 6.80%,属于少雨季节(表 2)。由此可见,直白沟的“9·10”泥石流并非由于短周期内的气候突变诱发,而是长期以来的气候变化叠加 2017 年的米林地震的影响,高寒山区强烈的冻融作用驱使高位岩体失稳而形成的泥石流。对比 1968 年暴发的冰川跃动泥石流事件,同样为无降雨的情况下诱发灾害,由此推测直白沟冰川泥石流与周边的冰水复合型泥石流灾害在启动机制上存在差异^[23],其触发条件中水热优势组合并非唯一条件。

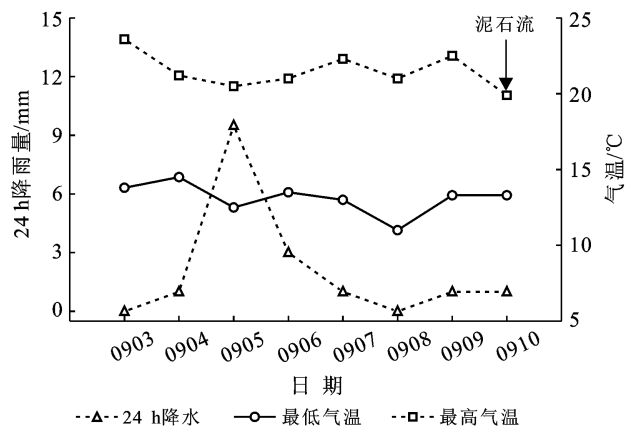


图 3 “9·10”泥石流暴发时气温与降雨条件

表 2 直白沟沟口 2020 年降雨量监测值分月统计

月 份	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	总量
降雨量	11.00	13.50	16.50	22.00	47.00	31.50	114.50	37.00	23.50	7.50	17.00	4.50	345.50

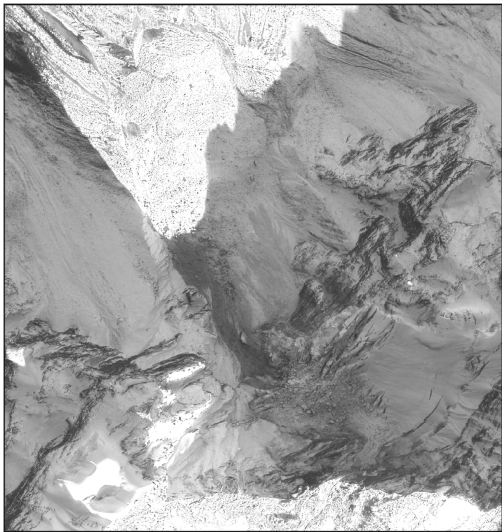
3.2 泥石流灾害过程

通过泥石流灾害暴发前后的遥感影像分析发现,“9·10”泥石流主要是在 2[#]支沟活动。受 2017 年米

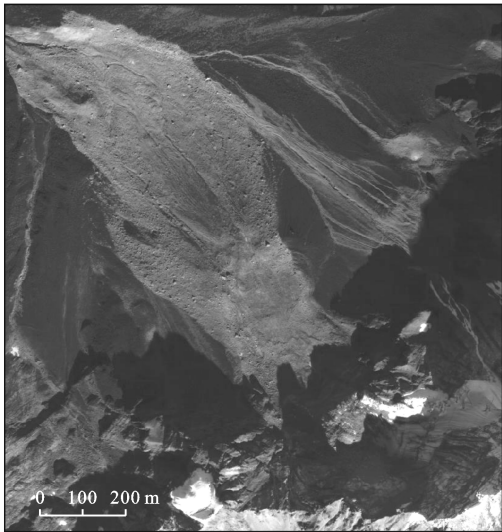
林地震影响,2[#]支沟源头发育了一处同震崩塌,形成冰岩崩碎屑流堆积于山坡冰碛台地上(图 4a)。2020 年 9 月 10 日,上述崩塌所在海拔 5 500 m 的分水岭

再次发生高位岩崩,大量碎屑物沿斜坡倾泻而下,并撞击下部平台上的冰川,致使冰川前缘发生冰崩(图 4b)。冰块混合岩土体一起冲击在冰碛平台上,铲刮 2017 年形成的冰岩崩堆积体和冰碛物,快速运动的冰岩碎屑流进入狭窄的沟道中,在冰雪的相变作用和沟道径流补给作用下,碎屑流逐步转化为泥石流。高速运动的

流体沿途铲刮沟道两侧冰碛垄和沟床物质,不断补给松散固体物质并放大灾害规模。在泥石流冲出山口后,受沟谷宽度扩张影响,龙头撞击岸坡冲起部分流体沿着沟道右岸平台漫流,大量松散物质堆积于公路路面。泥石流主流部分从直白大桥桥下排导进入雅鲁藏布江,将原 160 m 宽的主河挤占至 80 m。



a 2017 年米林地震后



b 2020 年“9·10”泥石流后

图 4 “9·10”泥石流启动区遥感影像

从现场拍摄的观测视频上看,“9·10”冰川泥石流具有典型黏性泥石流特征,流体结构整体性强,巨

块石含量高,滚动的巨块石对流速和峰值流量均具有放大效应(如图 5 所示)。

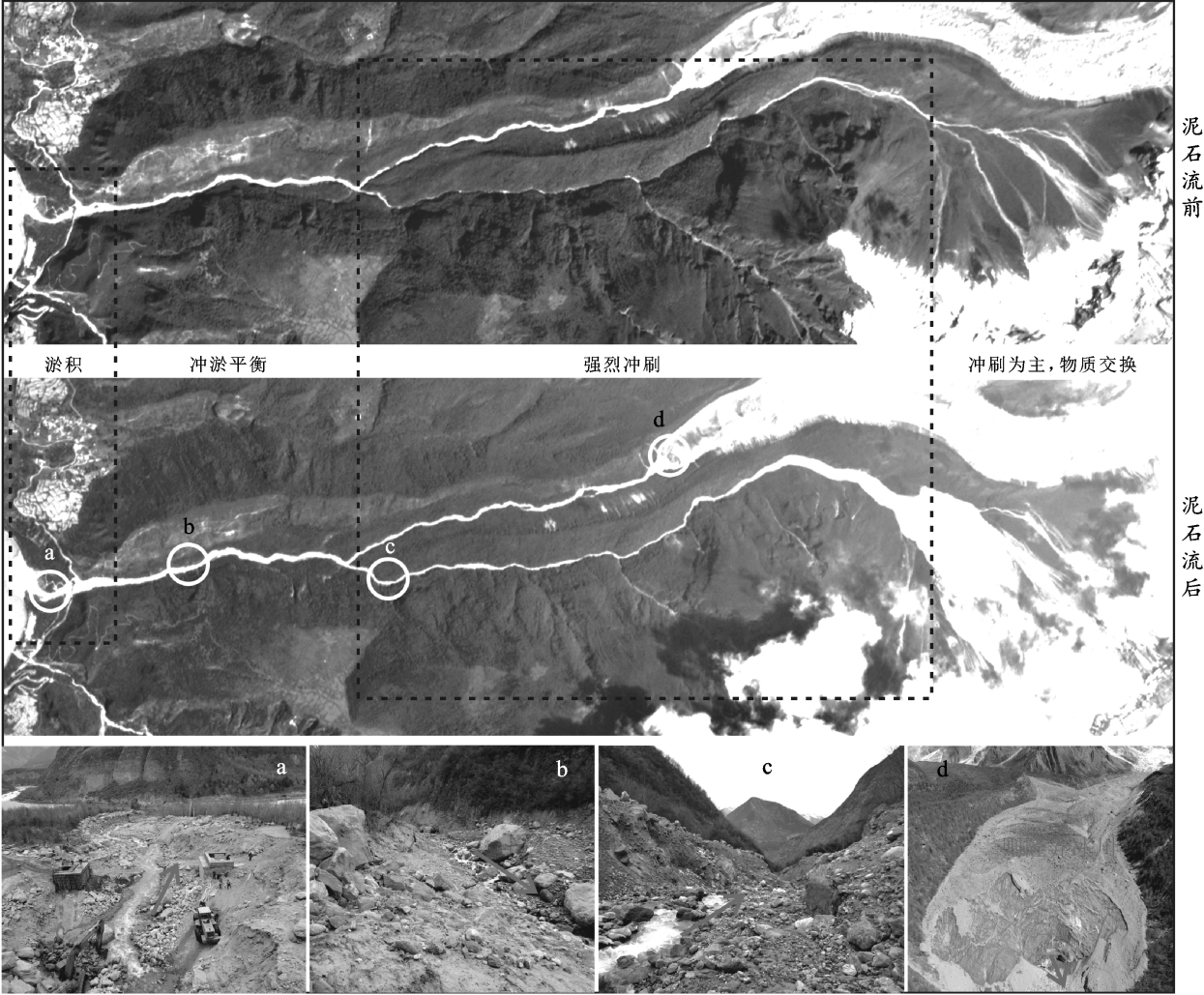


图 5 “9·10”冰川泥石流观测视频截图(受监测设备影响图像精度较低)

3.3 泥石流沟道冲淤特征

利用泥石流前后遥感影像,基于沟道微地貌变化,“9·10”泥石流过程中的沟道冲淤特征上可划分为 4 个区段(如图 6 所示)。2[#]支沟汇入主沟之前主要表现为冲刷作用为主,但在不同区段,由于灾害体物理性质差异,在不同时空尺度上表现出差异化的冲淤特征。在源头斜坡区域主要表现为以冲刷为主,部分由陡变缓的地形突变段存在明显淤积,显示出物质交换现象。当灾害体为冰岩碎屑流时,其运动性远低于固液两相的泥石流,但是这种高势能驱动下的高速碎屑流对斜坡依然具有强烈的冲刷作用,灾害体前端快速改变斜坡地貌,侵蚀冲刷形成沟槽(图 4b),但碎屑流末端的能量相对较弱,在地形平缓段出现局部的堆积。当碎屑流高速进入 2[#]支沟后,碎屑流中的冰和雪产生相变,不断补给水体进入到流体中,碎屑

流逐步转化为泥石流,并在沿沟道运动过程中,侵蚀岸坡和沟床,以滚雪球方式不断放大灾害规模,如图 6d 所示。泥石流进入主沟后,得到主沟充沛的径流补给和稀释,同时主沟沟道远宽于支沟沟道,泥石流流速逐步减少,但依然具有一定的冲刷能力,在侵蚀岸坡和沟床底部的同时也沿弯道的宽缓平台产生少量堆积(图 6c),总体表现为冲淤平衡状态(图 6b)。泥石流进入堆积区后,灾害体沿堆积扇扩散堆积,塑造新的堆积扇形态(图 6a)。泥石流在沟口产生大量固体物质堆积,堆积范围面积达 $6.50 \times 10^4 \text{ m}^2$,平均堆积厚度约 4 m,根据堆积厚度特征,可划分为 4 个堆积区(见图 1),其中 I 区堆积厚度 0.2~2 m,II 区堆积厚度 1~3 m,III 区堆积厚度 2~5 m,IV 区堆积厚度 3~10 m,估算总计冲出固体物质 $2.5 \times 10^5 \text{ m}^3$,其中进入主河约 $2.00 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。



注:图 a 为沟口淤积;图 b 为沟道冲淤平衡;图 c 为强烈的沟床侵蚀;图 d 为则隆弄冰川冰舌。

图 6 “9·10”2[#]支沟泥石流沿沟道的冲淤特征

3.4 泥石流动力参数计算

“9·10”泥石流暴发前,西藏自治区地质灾害主

管部门在直白沟开展了地质灾害监测工作,布设了次声仪、泥位计、降雨温度站以及视频等监测设备。在

该次泥石流暴发时,捕获到泥石流过流视频,同时当地居民还通过手机现场拍摄了泥石流视频。根据这些视频资料,结合地形测绘资料,可计算出该次冰川泥石流的流速和峰值流量两个关键动力参数。流速计算公式如公式(1),计算结果详见表 3。

$$v=\frac{L}{T}$$

(1)

表 3 出山口处泥石流流速观测结果

计算断面	泥石流位置	沟床纵比降/‰	泥深/m	距离/m	时间/s	流速/(m·s ⁻¹)
出山口	龙头	115	18.40	88.60	5.00	17.72
	龙身	115	5.20	21.00	2.50	8.40

表 4 出山口处泥石流峰值流量计算结果

计算断面	泥石流位置	沟道底宽/m	泥深/m	液面顶宽/m	过流截面积/m ²	峰值流量/(m ³ ·s ⁻¹)
出山口	龙头	14.50	18.40	48.00	560.00	9 923.20
	龙身	14.50	5.20	16.30	75.40	633.40

以观测所得流速对泥石流灾害防治工程勘察规范所推荐的黏性泥石流流速计算公式进行对比分析分析结果见表 5。

$$v=\frac{1}{n}H^{\frac{3}{4}}J^{\frac{1}{2}}$$

(3)

$$v=\frac{1}{n}H^{\frac{2}{3}}J^{\frac{1}{2}}$$

(4)

式中: v 为断面流速(m/s); n 为泥石流粗糙系数公式(3)取 0.45,公式(4)取 0.27; H 为泥石流流深(m); J 为沟床纵比降。

计算结果分析表明,直白沟“9·10”冰川泥石流与暴雨型泥石流在动力参数上具有显著的差距,对比规范推荐流速计算公式计算,理论计算值与观测值差距 50% 以上,由此按照泥痕法计算峰值流量具有同样的误差率。结合触发的气象条件,进一步证明了冰川泥石流成因机制与动力特征的差异性,传统的泥石流动力计算分析方法无法有效刻画冰川泥石流运动特征。

表 5 流速经验公式检算

计算方法	龙头部位流速		龙身部位流速	
	计算结果/ (m·s ⁻¹)	与观测结果 对比误差	计算结果/ (m·s ⁻¹)	与观测结果 对比误差
公式(3)	6.69	−62.22%	2.26	−73.07%
公式(4)	8.75	−50.60%	3.77	−55.12%

4 泥石流形成机制讨论

(1) 泥石流驱动力。该次泥石流事件暴发前 7 d 内并无明显降雨过程,气温也没有明显异常,由此可

式中: v 为断面流速(m/s); L 为运动距离(m); T 为运动时间(s)。

峰值流量基于流速和过流断面进行计算,计算公式如公式(2),计算结果详见表 4。

$$Q=v\cdot S$$

(2)

式中: Q 为峰值流量(m³/s); v 为断面流速(m/s); S 为过流断面(m²)。

知泥石流中的主要水源并非来自降雨或者融水,这与传统水力驱动型泥石流存在巨大差异。结合前后遥感影像分析发现,该次泥石流是由 2[#] 支沟出现的高位崩塌并铲刮了斜坡上的冰川和冰碛台地而演化形成。高寒山区的岩体稳定性与冻融作用密切相关。直白沟泥石流暴发前 7 d 的平均最高温度和最低温度分别为 21.5 ℃和 13.1 ℃,根据海拔对气温影响规律,研究区相应的 0 ℃等温线高程范围为 5 100~6 550 m。激发泥石流的高位岩崩海拔正处于 0 ℃等温线波动范围,这也从侧面进一步说明泥石流灾害是冻融循环作用的驱动。同时 2017 年地震对周边岩土体的震裂效应也加剧了冻融循环作用的强度,未来周边山体可能还存在类似的岩体失稳隐患将是冰川泥石流的重要激发源。

(2) 高流速特征。前述可知该次冰川泥石流出山口位置的龙头最大流速达 17.72 m/s,且远高于经验公式计算的理论值,这说明该次泥石流灾害的能量转化不同于传统意义上的降雨型泥石流,其运动过程中的能量受到初始激发点物源的高势能控制。启动该次泥石流的高位岩崩(海拔高度 5 500 m)距离撞击的斜坡相对高差约 600 m,距离沟床底部(海拔高度 4 225 m)达 1 275 m。高势能岩体失稳形成的碎屑流具有极快的运动速度,同时冰雪的相变作用对流体输移具有减阻等作用更进一步减小了势能向动能转化过程中的能量损耗,经验公式中的阻力系数可能远低于规范中所界定的范围。

(3) 水文过程特征。在流速之外该次泥石流灾害的峰值流量同样极高达到 9 923.20 m³/s。按照流

域汇流的水文理论,仅 57.50 km^2 汇水面积的直白沟在无明显降雨情况下,基本不可能形成满足该次泥石流所需的水量,因此冰川泥石流的水源来源明显不仅仅是降雨和冰雪融水。从灾害过程分析,该次泥石流的水体主要来源于岩崩撞击斜坡上的冰川和冰碛平台上裹挟的冰和雪,固态水体以集中补给方式参与泥石流活动。泥石流龙头峰值流量与龙身流量比值达 15.67,流量过程呈现明显三角形而非五边形,这也说明存在集中水体补给的泥石流的冲出量计算不能按照五边形概化模型进行分析。

5 结论

(1) 近 70 a 来直白沟冰川泥石流的驱动力有冰川跃动和高位冰崩两种,均受到地震和气候变暖的影响,尤其是地震诱发的同震灾害和震裂山体的演化。泥石流灾害的启动过程中的水热优势条件组合并非必要条件。

(2) 2020 年“9·10”冰川泥石流灾害的演进过程可分为岩崩—冰崩—冰岩碎屑流—泥石流—堵江,泥石流水源主要来自于冰雪为代表的固态水,相对于汇流形成的泥石流,水土耦合过程显著异于降雨补给型泥石流。

(3) 冰崩型泥石流灾害具有高初始势能和集中补给水源的特点,进而导致其高流速和高峰值流量的运动学特点,沿沟道运动过程中的冲刷和淤积特征主要受固体物质控制,而非水动力条件控制。

(4) 冰崩型泥石流灾害的动力学分析表明,冰水相变作用对流速和峰值流量均具有显著放大效应。现有规范推荐的流速、峰值流量和一次性冲出固体物质量计算公式不适宜于此类灾害的计算,误差在 50% 以上。

[参 考 文 献]

- [1] 崔鹏,郭晓军,姜天海,等.“亚洲水塔”变化的灾害效应与减灾对策[J].中国科学院院刊 2019,34(11):1313-1321.
- [2] 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.
- [3] Fan Xuanmei, Scaringi G, Korup O, et al. Earthquake-induced chains of geologic hazards: patterns mechanisms and impacts [J]. Reviews of Geophysics, 2019, 57(2): 421-503.
- [4] 张祖武,林余辉,姚令侃.地震行波作用下山脊震裂现象的物理机制探讨[J].灾害学,2013,28(2):161-165.
- [5] 黄润秋.汶川 8.0 级地震触发崩滑灾害机制及其地质力学模式[J].岩石力学与工程学报,2009,28(6):1239-1249.
- [6] 崔鹏,陈容,向灵芝,等.气候变暖背景下青藏高原山地灾害及其风险分析[J].气候变化研究进展,2014,10(2): 103-109.
- [7] 温燕林,宋治平,于海英,等.1950 年墨脱 8.6 级巨震前地震活动特征与当前喜马拉雅构造带东段大震危险性对比分析[J].地球物理学进展,2016,31(1):103-109.
- [8] 张文敬.南迦巴瓦峰跃动冰川的某些特征[J].山地研究,1985,3(4):234-238.
- [9] 杜榕桓,章书成.西藏古乡沟 1953 年特大冰川泥石流剖析[C]//中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊第 4 号(中国泥石流研究专辑).北京:科学出版社,1985.
- [10] An Baosheng, Wang Weicai, Yang Wei, et al. Process mechanisms and early warning of glacier collapse-induced river blocking disasters in the Yarlung Tsangpo Grand Canyon Southeastern Tibetan Plateau [J]. the Science of the Total Environment, 2021,816:151652.
- [11] Li Weile, Zhao Bo, Xu Qiang, et al. More frequent glacier-rock avalanches in Sedongpu gully are blocking the Yarlung Zangbo River in Eastern Tibet [J]. Landslides, 2022,19(3):589-601.
- [12] Wei Rongqiang, Zeng Qingli, Davies T, et al. Geohazard cascade and mechanism of large debris flows in Tianmo gully SE Tibetan Plateau and implications to hazard monitoring [J]. Engineering Geology, 2018, 233:172-182.
- [13] 鲁安新,邓晓峰,赵尚学,等.2005 年西藏波密古乡沟泥石流暴发成因分析[J].冰川冻土,2006,28(6):956-960.
- [14] Liu J J, Cheng Z L, Li Y. Glacier Lake outburst floods of the Guangxienco Lake in 1988 in Tibet China [J]. Natural Hazards & Earth System Sciences Discussions, 2013,1(5):4605-4634.
- [15] 韩佳东,杨建思,刘莎,等.2017 米林 M 6.9 地震序列监测及南迦巴瓦地震活动性研究[J].地球物理学报,2019,62(6):2059-2069.
- [16] Zhao Bo, Li Weile, Wang Yunsheng, et al. Landslides triggered by the Ms 6.9 Nyingchi earthquake China(18 November 2017): Analysis of the spatial distribution and occurrence factors [J]. Landslides, 2019, 16(4): 765-776.
- [17] Chen Chen, Zhang Limin, Xiao Te, et al. Barrier lake bursting and flood routing in the Yarlung Tsangpo Grand Canyon in October 2018 [J]. Journal of Hydrology, 2020,583:124603.
- [18] 黄臣宇,常利军,丁志峰.喜马拉雅东构造结及周边地区地壳各向异性特征[J].地球物理学报,2021,64(11): 3970-3982.
- [19] 高登义,邹捍,王维.雅鲁藏布江水汽通道对降水的影响[J].山地研究,1985,3(4):239-249.