

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2019.05.19

西藏天摩沟泥石流形成机制与成灾特征

高波^{1,2}, 张佳佳^{1,2}, 王军朝^{1,2}, 陈龙^{1,2}, 杨东旭^{1,2}

(1. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734;

2. 中国地质调查局地质灾害防治技术中心, 四川 成都 611734)

摘要: 西藏林芝市波密县天摩沟于 2007 年 9 月、2010 年 7 月、2010 年 9 月和 2018 年 7 月分别发生大型和巨型泥石流, 4 次泥石流活动均不同程度堵塞主河帕隆藏布, 淤埋国道 318 或摧毁桥梁, 堰塞湖淹没村道、溃决造成下游塌岸, 给当地居民生命财产尤其是交通干道造成极大危害。文章针对以上 4 次泥石流活动, 采用高分辨率遥感影像, 对泥石流发生前的孕灾背景进行解译, 同时结合无人机航空摄影和地面调查对天摩沟泥石流形成机制和成灾特征进行了对比分析, 得到以下结论: (1) 天摩沟内冰川发育, 年际变化大, 目前泥石流形成的主要方式为岩崩和堵溃, 其中 2018 年和 2007 年为岩崩引发, 2010 年为堵溃引发, 该沟同时具有冰川泥石流和降雨泥石流的特征。 (2) 经历了 2007 年和 2010 年 3 次大规模泥石流后, 天摩沟内斜坡类物源储量增加了 19.6%, 绝大部分启动的冰碛物和崩滑物源都转化为泥石流沟道堆积物或冲出沟口。 (3) 天摩沟 2018 年泥石流容重为 2.10 g/cm^3 , 为黏性泥石流, 流速快冲击力强, 帕隆藏布河道受到挤压多次变道, 历史上最大偏移距离为 190 m。 (4) 2018 年 7 月 11 日泥石流成因为降雨条件下加剧冰川消融引发主沟沟源右侧岩崩, 形成多阵次泥石流, 主泥石流体积 $18 \times 10^4 \text{ m}^3$, 淤埋 G318 近 220 m。后续依然具有暴发大型泥石流的可能性, 建议进行防治降低其危害程度。

关键词: 西藏; 天摩沟; 泥石流; 地质灾害; 堰塞湖; 遥感; 无人机

中图分类号: P642.23; P694

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2019)05-0144-10

Formation mechanism and disaster characteristics of debris flow in the Tianmo gully in Tibet

GAO Bo^{1,2}, ZHANG Jiajia^{1,2}, WANG Junchao^{1,2}, CHEN Long^{1,2}, YANG Dongxu^{1,2}

(1. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu, Sichuan 611734, China;

2. Technical Center for Geological Hazard Prevention and Control, CGS, Chengdu, Sichuan 611734, China)

Abstract: In September of 2007, July of 2010, September of 2010 and July of 2018, four large or giant debris flows took place in the Tianmo gully in Bomi county of Linzhi in Tibet. Four debris flow activities all blocked the Parlung River to varying degrees, buried the 318 national highway and destroyed bridges. Dammed lakes flooded village roads and caused downstream bank collapses. They caused great damage for the local residents' life and property, especially the traffic trunk roads. Based on the above four debris flow activities, this paper uses high resolution remote sensing images to interpret the disaster-pregnant environment. Formation mechanism and disaster characteristics of different debris flows are analyzed in combination with the UAV aerial photography and ground investigation. The results show that (1) glaciers in the Tianmo gully is rich, and its interannual change is big. Formation of the primary debris flows in the Tianmo gully is rockfall (debris flows in 2007 and 2010) and dam breaking (debris flow in 2010). The Tianmo gully is characterized by glacial debris flow and rainfall debris flow at the same time. (2) After three large-scale debris flows in 2007

收稿日期: 2018-10-31; 修订日期: 2019-02-19

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20160279; DD20190644; 20190505); 国家自然科学基金资助项目 (41402315)

第一作者: 高波 (1990-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事地质灾害调查和科研工作。E-mail: gaobo@mail.cgs.gov.cn

and 2010, the slope material source reserve in the Tianmo valley increased by 19.6%, and most of the activated moraine and landslide material sources were converted into debris deposits in the debris flow gully or out of the gully mouth. (3) In 2018, the mass density of debris flow in the Tianmo gully is 2.10 g/cm^3 , and it is a viscous debris flow. The debris flow has a strong impact force and squeezes the Parlun river channel for many times. The maximum deviation distance in history is 190 m. (4) The debris flow on July 11 of 2018 is formed by rockfall on the right side of the main gully source caused by intensified glacier melting under the rain-fall condition, which has multiple bands. The volume of the main debris flow is $18 \times 10^4 \text{ m}^3$, and buried the G318 for nearly 220 m. The possibility of large-scale debris flows still exist in the future. It is suggested that prevention and controlling of debris flows are effective ways to reduce damage caused by debris flows.

Keywords: Tibet; Tianmo gully; debris flow; geological hazards; dammed lake; remote sensing; UAV

天摩沟位于帕隆藏布流域东部,该流域位于西藏东南部,雅鲁藏布江大拐弯东北侧。流域面积 28801.45 km^2 ,发源于伯舒拉岭西面冰川,途经仲巴、松宗、波密、通麦,在雅鲁藏布江大拐弯顶部的觉东附近汇入主河,在行政上分属波密、林芝、嘉黎、边坝和八宿县^[1]。流域地壳活动性强,海洋性冰川发育程度高,活动性强,冰川地貌发育。随着全球气温逐渐升高,该区冰川逐年退缩,在沟谷流域中上部遗留大量的冰碛物和冰水融水产生的崩滑堆积物,在沟内常年冰雪融水作用下易启动形成泥石流。加之地处高山峡谷区,山高谷深,同时又位于西藏东南部降雨中心位置,在降雨和冰雪融水共同作用下该区泥石流启动临界雨量相较于普通沟谷泥石流要低。该区雨水充足,植被覆盖率高,传统地面调查和遥感解译难度很大,尤其在物源调查上精度较低。因此总体上该区泥石流具有高易发性、高隐蔽性和高突发性的特征。

帕隆藏布流域泥石流研究从 1954 年川藏公路建设初期交通部门对公路沿线的灾害普查开始,积累了丰富的研究成果。不同学者在泥石流类型、诱发因素、形成机制、活动特征等方面做了大量研究工作。胡桂胜等^[2-3]将林芝地区泥石流按照激发条件分为降雨型泥石流,冰川降雨型泥石流,冰崩、雪崩型泥石流,冰湖、堰塞湖溃决型泥石流共 4 类;吕儒仁等^[4]按不同的水源补给方式将林芝地区泥石流分为降雨型泥石流和冰川泥石流。邓明枫等^[5]对天摩沟泥石流形成条件进行了研究,发现年际水热条件和前期水热条件变化是引发冰川泥石流的重要原因;陈宁生等^[6]认为温度和降水波动性变化以及不同水热组合影响林芝地区泥石流发育;刘建康等^[7]通过对古乡沟泥石流研究发现泥石流暴发与日降雨和日最高气温存在密切关系。邓养鑫^[8]对冰碛向冰川泥石流转化的详细分析,认为

为当冰碛堵塞体溃决时冰碛将以牵引式和推移式两种方式启动,前者往往形成黏性泥石流,后者多形成稀性泥石流;中国科学院-水利部成都山地灾害与环境研究所等单位^[9]对川藏公路沿线典型冰湖溃决泥石流、冰川泥石流、冰川-降雨泥石流和降雨泥石流形成机理进行了研究,指导了该区泥石流研究和防治工作;铁永波等^[10]系统总结了现有冰川泥石流形成机理,同时提出了 5 个冰川泥石流形成机理的未来研究方向。杜榕桓等^[11]对西藏高原东南部冰川泥石流的研究发现其活动具有暴发频繁、规模大、首次暴发或停息若干年后再次暴发常形成特大型泥石流、泥石流活动呈波浪式发展等特点;李鸿璜等^[12]对我国冰川泥石流的活动周期、年际活动特征和季节性活动特征进行了深入研究;高波等^[13]对帕隆藏布流域典型冰川泥石流进行研究发现,沟谷形态为 U 型谷的大型冰川泥石流一般情况下支沟泥石流较主沟泥石流活跃。

以上研究多聚焦于某次泥石流活动,针对该区多期高频泥石流活动下的发展演变特征的研究相对较少。本文选取帕隆藏布流域内天摩沟为研究对象,天摩沟为典型冰川谷,“漏斗形”流域形态,沟源处冰川发育,沟内冰碛物丰富,且暴发过多次泥石流活动,同时具有冰川泥石流和降雨泥石流的特征,对沟口对岸国道 G318 造成极大危害,其形成条件、发育和演变特征具有一定代表性。基于前人研究成果,结合现场调查和走访,对比分析了天摩沟泥石流形成机制和成灾特征,为帕隆藏布流域泥石流调查和评价提供了理论支持,同时对川藏公路等生命干线的保护具有实际指导意义。

1 天摩沟流域概况

1.1 地质环境条件

天摩沟位于西藏林芝市波密县松绕村,流域面积

17.9 km², 东距波密县城 48.7 km, 西距林芝市 160.3 km。大地貌为构造侵蚀中高山峡谷地貌, 具有冰川谷和山麓洪积扇地貌单元, 属帕隆藏布左岸一级支流。天摩沟在区域构造上属雅鲁藏布江缝合带东侧, 冈底斯—拉萨陆块中嘉黎—嘎龙寺弧—弧碰撞带西端。帕隆藏布流域内主要构造轴线呈弧形展布, 次级褶皱、断裂构造轴线呈 NW—SE 向。天摩沟流域内断裂构造主要有 F1 正断层、F2 逆断层(图 1), 出露基岩为元古界片麻岩、侏罗纪石英闪长岩, 受断裂和冻融作用影响, 节理裂隙发育, 表面破碎。据《中国地震动峰值加速度区划图》(GB 18306—2015), 天摩沟所在区域地震动峰值加速度为 0.3g。

1.2 泥石流灾害史(截至 2018 年 8 月 31 日)

2007 年 9 月 4 日天摩沟暴发泥石流, 一次冲出固体物总量约 $76 \times 10^4 \text{ m}^3$, 造成 1 人死亡, 7 人失踪, 9 人受伤, 2 户民房被毁, 冲毁农田 2 hm², 松绕吊桥被毁, 国道 318 交通中断约 43 h。

2010 年 7 月 25—31 日天摩沟发生 4 次中性泥石流, 总冲出固体物质 $21 \times 10^4 \text{ m}^3$, 堵塞帕隆藏布 15 min, 450 m 国道和 76 m 比通桥被毁, 右岸遭受河水侵蚀后退 110 m。2010 年 9 月 5—8 日再次暴发泥石流, 松绕吊桥被完全摧毁。2010 年天摩沟泥石流造成国道 318 断道 16 d, 直接经济损失 1970 万元^[14-15]。

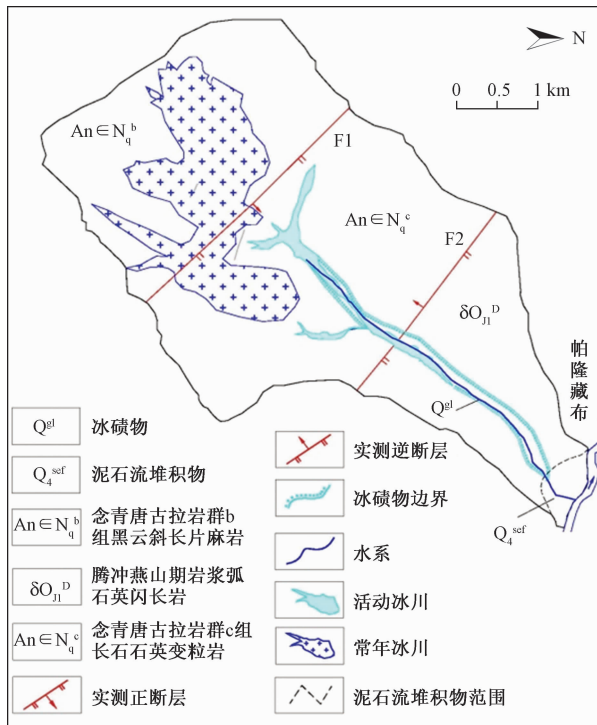


图 1 天摩沟流域地层与构造简图

Fig. 1 Simplified diagram showing strata and geological structures

2018 年 7 月 11 日天摩沟再次发生大型泥石流, 约 $18.7 \times 10^4 \text{ m}^3$ 泥石流物质短时间从沟内冲出, 堵断主河帕隆藏布, 直冲右岸国道 318 之上, 掩埋长约 220 m 公路(图 2), 断道 3 d, 1 辆面包车被毁(图 2a), 上游形成小型堰塞湖, 松绕村村道被淹没(图 2b), 帕隆藏布主河位置从右岸被迫改道至左岸。7 月 12 日晚沟内发生堵塞, 造成断流。7 月 13 日堵塞体溃决(图 2c), 暴发中型泥石流, 泥石流物质冲入帕隆藏布内, 未堵塞主河。7 月 15 日内陆续发生小—中型泥石流达 7~8 次(图 2d), 至此主河又从左岸迁移至靠近右岸, 导致下游河岸坡脚遭受河水掏蚀(图 2e)。8 月 1 日起塌岸加速, 8 月 2 日右岸坍塌顺公路长约 541 m, 宽 121 m, 两栋房屋和小范围农田被毁, 无人员伤亡。

2 “7.11”泥石流形成条件分析

2.1 降雨

2018 年 7 月 9 日波密县开始降雨, 白天降雨较小, 夜间雨势增大, 至 7 月 11 日泥石流暴发之后依然小雨持续, 7 月 13 日白天降雨较大, 后续小雨一直不断。参考天摩沟下游 22 km 处雨量监测站 7 月 8—17 日间降雨数据(图 3), 7 月 8 日开始降雨, 后续每日雨势增大, 至 7 月 10 日日降雨量达到最大值 38 mm, 泥石流暴发之后日降雨量有减小趋势, 7 月 15 日再次出现峰值(日降雨量 25.8 mm), 之后逐渐减小至雨停。参考前人关于该区泥石流启动降雨阈值研究成果^[16], 该区泥石流启动沟口日降雨量约为 23.9 mm, 小时降雨量为 3.3~3.6 mm, 相比其它区域该区泥石流启动雨量和激发雨强都明显偏低^[17]。7 月 11 日最大规模泥石流前期降雨量已超过启动降雨阈值 23.9 mm, 且为泥石流前后最大降雨, 从而引发“7.11”最大规模泥石流活动。

7 月 12 日降雨较 11 日再次增大, 引发沟岸坡面物源失稳堵塞沟道, 7 月 13 日持续降雨下发生溃决形成小型泥石流。7 月 15 日第二高降雨峰值依然超过降雨阈值 23.9 mm, 当日陆续暴发多次小型泥石流活动, 之后降雨渐小至停, 泥石流活动随即停止。总体上本次泥石流活动与降雨关系密切。

2.2 地形

天摩沟位于帕隆藏布江左侧凸岸, 流域上呈南西高、北东低地形特征, 流域形态似“漏斗形”, 流域面积约 17.9 km², 发育 1 条较大支沟, 主沟长 7.10 km, 平均沟床比降 286‰(不含堆积区), 形成区纵比降 413‰, 流域平均坡度 39.8°(不含堆积区), 主沟呈“V”型地貌。流



图 2 2018-07-11 泥石流成灾特征

Fig. 2 Disaster characteristics of the debris flow on July 11 of 2018

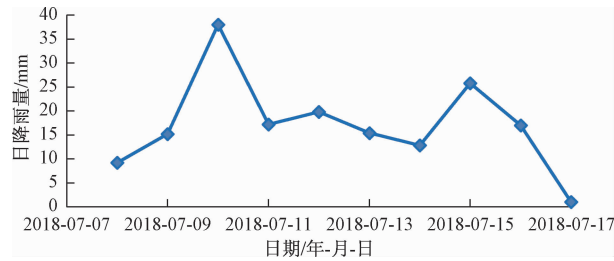


图 3 泥石流暴发前后日降雨量统计

Fig. 3 Daily rainfall statistics before and after debris flow outbreak

域沟口海拔 2 460 m,最高峰 5 560 m,相对高差达 3 100 m。沟谷上游海拔 3 800 m 以上发育有现代冰川,总面积 4.7 km²,沟源处悬冰川 3.87 km²,沟道内山谷冰川 0.83 km²。总体上流域具有高差大、纵比降较大、沟道狭窄、冰川发育的特点,陡峻的地形和冰川作用为泥石流发育提供了良好的势能条件。

2.3 物源

通过对 WorldView 遥感影像(2016 年 3 月 17 日,分辨率 0.5 m)解译(图 4),借鉴前人的物源计算公式^[18-19],“7.11”泥石流前天摩沟内分布滑坡堆积体 2 处,总面积 5.1 × 10⁴ m²,体积为 31.10 × 10⁴ m³;崩塌堆积体 2 处,总面积 0.9 × 10⁴ m²,体积 1.30 × 10⁴ m³;沟道堆积物 2 处,总面积 8.5 × 10⁴ m²,体积为 6.82 × 10⁴ m³;冰碛物 5 处,总面积 51.6 × 10⁴ m²,体积 775.50 × 10⁴ m³。流域内物源静储量为 814.7 × 10⁴ m³,动储量 85.64 × 10⁴ m³(表 1),冰碛物稳定性

好,只有在大型泥石流铲刮下启动,相比之下崩滑类物源和沟道堆积物源在暴雨条件下更易于启动。丰富的物源是形成“7.11”泥石流的物质基础。

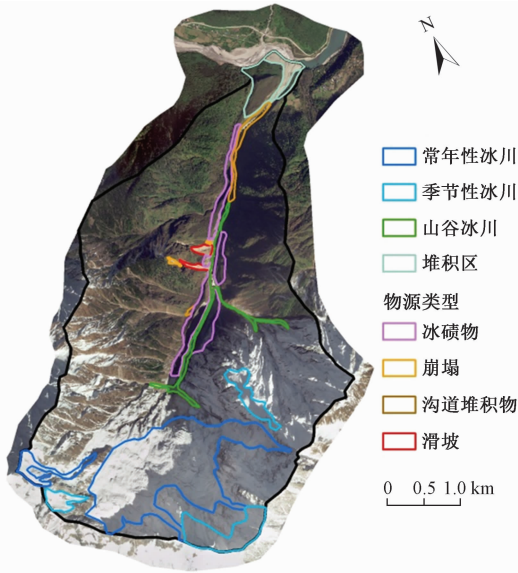


图 4 物源分布图(2016-03-17)

Fig. 4 Materials source map(2016-03-17)

3 泥石流成灾特征分析

3.1 泥石流物源变化特征

通过对 2006 年 4 月 30 日 QuickBrid 影像(分辨率 0.61 m)数据进行解译(图 5)和现场调查发现,主沟左岸没有发育滑坡型物源,崩塌和沟道堆积物源

也相对较少,整体上沟内物源发育程度一般,说明天摩沟在老泥石流活动之后处于间歇期,泥石流易发程度低。对比分析 2006 年影像解译结果发现,2016 影像显示主沟中部左岸新发育两处滑坡型物源,总面积 $5.2 \times 10^4 \text{ m}^2$,说明此两处沟岸物源参与了 2007 年或 2010 年泥石流,同时上部的小范围崩塌也可能是启动物源之一。根据文献[15],2007 年为沟源冰雪融水引发岩崩形成泥石流,2010 年为降雨条件下

该处物源堵塞主沟溃决形成泥石流。结合现场调查和无人机航拍对比前期相关照片,分析 2018 年泥石流为主沟上游岩崩碎屑率先启动形成大型泥石流。综合 3 年泥石流形成特征,该沟谷同时具有冰川泥石流和降雨泥石流的发育特征,启动物源与触发条件相关,为一典型冰川-降雨型泥石流沟谷,冰川泥石流和降雨泥石流交替出现,且冰川泥石流规模相对较大。

表 1 泥石流物源分布统计

Table 1 Statistical of materials sources

物源类型	物源编号	分布位置	静储量/ 10^4 m^3	动储量/ 10^4 m^3	稳定性	启动方式
崩塌	B1	中游左岸	0.30	0.07	欠稳定	暴雨冲刷、地震触发
	B2	中游左岸	1.00	0.10	欠稳定	暴雨冲刷、地震触发
滑坡	H1	中游左岸	13.40	1.39	基本稳定	暴雨冲刷、地震触发
	H2	中游左岸	17.70	1.88	基本稳定	暴雨冲刷、地震触发
沟道堆积	G1	中上游左岸	0.52	0.10	-	泥石流裹挟、铲刮
	G2	主沟中下游	6.30	0.61	-	泥石流裹挟、铲刮
冰碛物	M1	中游右岸	162.00	17.01	稳定	泥石流坡脚铲刮
	M2	上游右岸	175.50	18.43	稳定	泥石流坡脚铲刮
	M3	上游左岸	246.00	25.83	稳定	泥石流坡脚铲刮
	M4	中游左岸	22.50	2.40	基本稳定	泥石流坡脚铲刮
	M5	中下游左岸	169.50	17.82	稳定	泥石流坡脚铲刮

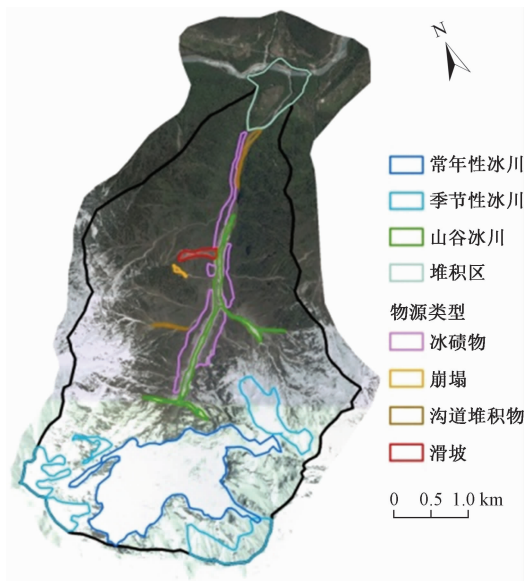


图 5 物源分布图(2006-04-30)

Fig. 5 Materials source map(2006-04-30)

该沟谷在经历了 3 次泥石流活动后沟内物源发生了较大变化,主要表现为滑坡型物源和沟道堆积型物源的增加,如左岸新发育的两处滑坡物源。通过对比分析两期遥感影像物源解译结果(表 2)发现,2006 年之前沟内物源相对较少,在之后的 4 个水文年中发生 3 次泥石流活动,2010 年泥石流后(2016 年影像解译),截至 2018 年泥石流活动,沟内物源明显增加。表

2 表明:滑坡型物源面积增加 $0.8 \times 10^4 \text{ m}^2$,沟道堆积物源面积增加 $4.9 \times 10^4 \text{ m}^2$,崩塌型物源面积增加 $0.5 \times 10^4 \text{ m}^2$,冰碛物物源面积减少 $1.8 \times 10^4 \text{ m}^2$,变化量分别为 18.2%、71.4%、136.1%、-3.4%。2007 年和 2010 年泥石流改变了沟内物源分布情况,产生大量物源,新增的物源大部分都转化为沟道堆积物源或排泄至主河。

表 2 物源变化统计

Table 2 Statistical of changes in materials source

物源类型	面积/ 10^4 m^2		面积变化/ 10^4 m^2	面积变化比例/%
	2006	2016		
崩塌	0.7	0.9	0.2	28.57
滑坡	4.4	5.2	0.8	18.18
沟道堆积物	3.6	8.5	4.9	136.11
冰碛物	53.4	51.6	-1.8	-3.37

3.2 泥石流挤压河道特征

通过查阅相关资料发现,关于天摩沟 2007 年之前暴发泥石流的记载很少,但通过解译和现场调查发现沟口存在一老泥石流堆积扇(图 6a),证明该沟谷为一老泥石流沟。通过对两期遥感影像的堆积区进行对比解译,结合现场调查发现 2006 年天摩沟沟口河道平均宽度 53 m。2007 年泥石流堆积区覆盖在老泥石流堆积区之上并且向两侧扩大,总面积 $39.7 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。2010 年泥石流堆积区在 2007 年泥石流堆积区上并没

有向两侧扩展,泥石流物质更多地冲到河谷之中(图6b),泥石流过后主河被挤压至右岸,强烈地侵蚀右岸比通沟堆积区,沟口河道最窄处33 m,最宽处150 m,堆积区总面积约 $10 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。2018年泥石流与2010年泥石流相似,堆积区向两侧扩展(总面积 $7 \times 10^4 \text{ m}^2$)很少,泥石流主要冲至右岸国道318上和主河之中(图6),河水从左岸侧蚀部分2010年泥石流物

质,使得河道重新回到左岸,因后续泥石流活动,河道最终又回到右岸位置,4次泥石流活动中河道最大偏移距离190 m。2018年泥石流活动中河道历经多次变道,2010年泥石流同2018年泥石流均为主泥石流加后续多阵次较小规模泥石流,由此判断2010年河道也被泥石流挤压变道多次,从而使得河流侧蚀部位和强度都发生变化,对河岸稳定性造成影响。

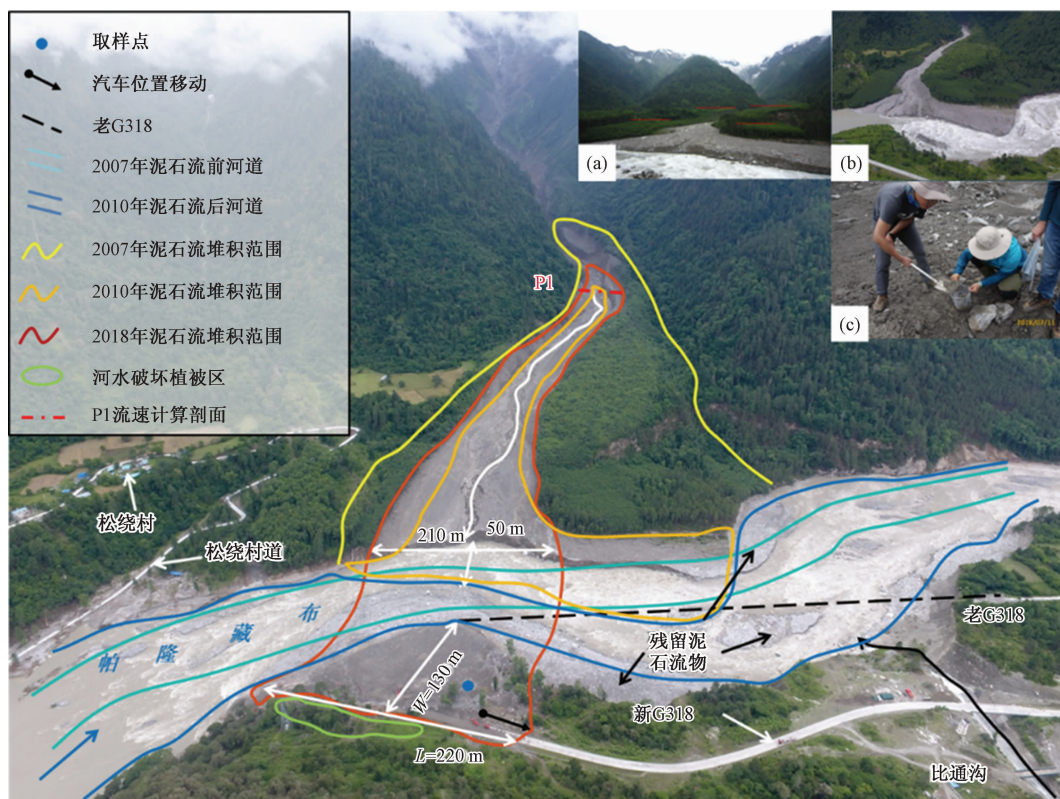


图6 泥石流堆积区挤压河道

Fig. 6 Debris flow accumulation area squeezes the river course

3.3 泥石流流速特征

根据现场调查发现,天摩沟2018年7月11日泥石流物质大部分堆积在河流右岸老泥石流堆积物和国道318上,在天摩沟口堆积区上堆积物相对较少,泥石流冲出沟口后高速运动冲过帕隆藏布,撞击到右岸比通沟口堆积区公路旁的陡坎后停止运动。此外,根据现场经历者回忆,当时一辆小型面包车经过此处时被高速泥石流挤压的河水冲到国道318上后向两侧扩展流动,汽车漂浮在水中被旋转推移运动约60 m(图6),历时2 s。由此说明此次天摩沟泥石流流速快。通过对右岸堆积区泥石流物质取样(图6c)计算其容重为 2.10 g/cm^3 ,为黏性泥石流。

选取沟口P1剖面进行流速计算(图6),此位置泥位较稳定,易于获取数据,泥痕高度25~30 m,平均

27 m(图7c),采用此区黏性泥石流流速通用计算公式^[20]以最大泥痕高度30 m计算出天摩沟“7.11”泥石流流速为 15.0 m/s 。

$$V_c = \frac{1}{n_c} \cdot H_c^{2/3} \cdot I_c^{1/2} \quad (1)$$

式中: V_c ——泥石流断面平均流速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$;

n_c ——黏性泥石流的河床糙率,用内插法查表可得;

H_c ——泥石流计算断面平均泥深/m;

I_c ——泥石流水力坡度/ $\%$,一般用沟床纵坡代替。

参考前人有关2007和2010泥石流流速计算结果^[15](表3)对比分析可得:2018年泥石流流速介于2007年泥石流和2010年泥石流之间,天摩沟泥石流为黏性泥石流,流体有阵性,流速快、破坏力强。

表 3 天摩沟泥石流流速

Table 3 Velocity of debris flow in the Tianmo gully

参数	取值或计算结果
$1/n_c$	3.57
I_c	0.19
H_c/m	30.0
$V_c(2018)/(m \cdot s^{-1})$	15.0
$V_c(2010)/(m \cdot s^{-1})$	12.7
$V_c(2007)/(m \cdot s^{-1})$	30.8

4 泥石流形成机制及发展趋势

4.1 泥石流形成机制

天摩沟“7.11”泥石流与 2007 年泥石流类似,诱发因素主要为降雨^[21-22],在 2018 年 7 月 8—10 日降雨共计 90 mm,达到泥石流启动临界阈值。天摩沟内植被茂密,降雨作用下坡面径流冲刷沟内和坡面碎屑物质的作用相对较弱,主沟内两岸坡面物源启动相对较少。天摩沟内冰川分布范围大(图 7a),降雨条件下主要促使了沟源悬冰川和沟道内山谷冰川进一步消融,导致沟内径流增大。通过仔细对比泥石流流前后天摩沟内现场照片,沟道两岸无明显大范围失稳现象,本

次泥石流主要启动物源为沟源右侧高位的基岩崩塌(图 7)。该处物源分布高程为 4 450 ~ 4 750 m,遭受强烈的冻融风化作用,岩体结构破碎,主沟上游冰川融水对其不断冲刷使其稳定性不断降低,同时雨水和融水顺结构面等裂隙进入岩体内部,在孔隙水压力作用下最终失稳,固体物质、冰雪融水和坡面雨水同时汇入沟内向下运动。同时,随着冰川融水流量增大,山谷冰川加速消融(图 7b),两者水量汇集沟道内,在山谷冰川未完全消融前已从上游开始启动沟道物质形成泥石流。泥石流在运动过程中强烈下切侵蚀沟道(图 7c),裹挟原沟道泥石流堆积物和山谷冰川一起运动,同时铲刮沟道两侧斜坡坡脚和冰碛垄物质参与泥石流活动^[23],剩余未消融的冰块被携带出沟口堆积在河流右岸国道之上(图 7d),泥石流物质堆积于原天摩沟堆积区之上,堆积最高点距河面 37 m(图 7e)。帕隆藏布河水被推挤至国道北侧比通沟口堆积物上,河水将堆积区部分植被冲倒贴于地面(图 7f)。相比于支沟,天摩沟主沟更易于形成泥石流,本次泥石流主要为坡面物源率先启动,继而启动沟道松散物源,进而演变为整个流域内的泥石流活动。



图 7 天摩沟“7.11”泥石流启动物源

Fig. 7 Initating material sources of the debris flow on July 11 in the Tianmo gully

2018年7月11日泥石流冲出物共分为3部分(图6):①右岸公路上堆积物,现场实测扇长130 m,扇宽220 m,均厚8 m,按照堆积形状为三角形计算方量约114 400 m³;②左岸沟口堆积物,本次沟口泥石流堆积区与原堆积区重合,未向两侧扩展,剔除河道中部分堆积区面积,根据2016年影像勾绘的堆积区面积为44 780 m²,厚度1 m,方量为44 780 m³;③河水冲走堆积物,河宽50 m,沟口长度210 m,堆积物均厚2 m,方量约21 000 m³。总计方量180 180 m³。

现场堆积区取样筛分结果(图8)表明,堆积物黏粒(粒径小于0.005 mm)含量较低,粒径小于2 mm的细粒含量40.8%,粒径小于10 mm颗粒含量为58.6%,总体细粒物质含量较高。累计曲线较平缓,堆积物颗粒组成较宽,分选差,流体性质呈黏性特征。

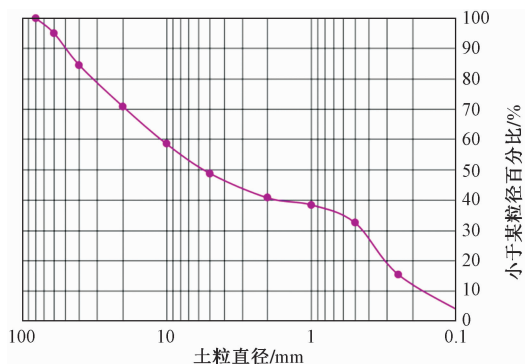


图8 泥石流堆积物颗粒级配图

Fig. 8 Particle size distribution of debris flow deposits

4.2 发展趋势

根据3.1节物源变化分析,2007—2018年多次泥石流均和沟内丰富的物源有直接关系。天摩沟在“7.11”泥石流后沟内地形陡峭,主沟纵比降大,易于形成泥石流^[24-25]。源区海拔高,冻融风化作用十分强烈,岩体产屑速率快,物源积累快。此外,该区冰川整体处于退缩状态,1990—2010年冰川退缩速率达0.91 km²/a^[26]。天摩沟内山谷冰川年内变化非常大,直接导致冰川融水流量增大,可直接冲刷沟道物源,雨水的促进作用下相比于降雨泥石流更容易启动,或者启动泥石流所需激发雨强更低。综合判断,天摩沟依然具有暴发大型泥石流的可能性,其活动性依然以高频为主。

5 结论

(1)遥感解译天摩沟“7.11”泥石流前物源滑坡堆积体2处,崩塌堆积体2处,沟道堆积物2处,冰碛物4

处,静储量为814.7 × 10⁴ m³,动储量85.64 × 10⁴ m³,丰富的物源为物质基础,陡峻的地形提供了势能,加之位于冻融风化强烈的高海拔位置,在降雨激发下形成泥石流。

(2)天摩沟经历了3次泥石流后沟内物源发生了较大变化,2016年物源在2006年基础上滑坡型物源面积增加0.8 × 10⁴ m²,沟道堆积物源面积增加4.9 × 10⁴ m²,崩塌型物源面积增加0.2 × 10⁴ m²,冰碛物物源面积减少1.8 × 10⁴ m²,变化量分别为18.2%、136.1%、28.6%、-3.4%,主要表现为滑坡崩塌等斜坡类物源向沟道堆积型物源的转化。

(3)帕隆藏布河道受到天摩沟泥石流不同程度挤压,最大偏移距离190 m,主河在靠近左右岸的位置上不断变化,甚至在同一期泥石流中变换多次,使得河流侧蚀部位和强度都发生变化,对河岸稳定性造成影响。

(4)根据现场调查泥石流泥痕计算2018年泥石流流速为15.0 m/s,综合2007年和2010年泥石流流速特征,判断天摩沟泥石流为黏性泥石流,流速快破坏力强。

(5)2018年7月11日主泥石流主要是因降雨加剧冰川消融引发主沟源右侧岩崩从而启动形成泥石流,与2007年泥石流成因相似;后续泥石流活动为堵溃形成呈多期阵性特征,与2010年泥石流相似。该沟谷同时具有冰川泥石流和降雨泥石流的发育特征,不同时期的泥石流有不同的表现形式,为一典型冰川—降雨型泥石流沟谷,冰川泥石流和降雨泥石流交替出现,且冰川泥石流规模相对较大。

(6)天摩沟在今后一定时间段内依然具有暴发大型泥石流的可能性,其活动性依然以高频为主,危害大,建议进行防治,降低其对G318和上下游居民的危害。

致谢:李鸿儒硕士、曾宪阳硕士在现场调查中给予了帮助,刘建康博士、李元灵工程师为文章提供了相关资料,在此谨表示衷心的感谢!

参考文献:

- [1] 何易平,胡凯衡,韦方强,等. 川藏公路帕隆藏布流域段泥石流活动特征[J]. 水土保持学报,2001,15(3):76-80. [HE Y P, HU K H, WEI F Q, et al. Characteristics of debris flow in Polongzangbu basin of Sichuan-Tibet highway[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15(3): 76-80. (in Chinese)]
- [2] 胡桂胜,陈宁生,邓明枫,等. 西藏林芝地区泥石流类型及形成条件分析[J]. 水土保持通报,2011,31

- (2):193-197. [HU G S, CHEN N S, DENG M F, *et al.* Classification and initiation conditions of debris flows in Linzhi area, Tibet[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31(2): 193-197. (in Chinese)]
- [3] 胡桂胜,陈宁生,邓虎. 基于GIS的西藏林芝地区泥石流易发与危险区分析[J]. 水土保持研究, 2012, 19(3): 195-199. [HU G S, CHEN N S, DENG H. Analysis of debris flow—prone and dangerous area in nyingchi of Tibet based on GIS[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(3): 195-199. (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. [Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, The Traffic Department of the Tibet Autonomous Region. Debris flow and environment in Tibet[M]. Chengdu: Chengdu Science and Technology University Publishing House, 1999. (in Chinese)]
- [5] DENG M F, CHEN N, LIU M. Meteorological factors driving glacial till variation and the associated periglacial debris flows in Tianmo Valley, south-eastern Tibetan Plateau[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2017, 17(3): 345-356.
- [6] 陈宁生,周海波,胡桂胜. 气候变化影响下林芝地区泥石流发育规律研究[J]. 气候变化研究进展, 2011, 7(6): 412-417. [CHEN N S, ZHOU H B, HU G S. Development rules of debris flow under the influence of climate change in Nyingchi[J]. Advances in Climate Change Research, 2011, 7(6): 412-417. (in Chinese)]
- [7] 刘建康,程尊兰. 西藏古乡沟泥石流与气象条件的关系[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(9): 45-49. [LIU J K, CHENG Z L, Meteorology conditions for frequent debris flows from Guxiang valley in Tibet, China[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(9): 45-49. (in Chinese)]
- [8] 邓养鑫. 冰碛转化为冰川泥石流堆积过程及其沉积特征[J]. 沉积学报, 1995, 13(4): 37-48. [DENG Y X. Process of accumulation and characteristics of glacial debris flow deposits transformed by moraine[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1995, 13(4): 37-48. (in Chinese)]
- [9] 中国科学院水利部-成都山地灾害与环境研究所, 西藏自治区交通科学研究所. 川藏公路典型山地灾害研究[M]. 成都:成都科技大学出版社, 1999. [Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, The Traffic Department of the Tibet Autonomous Region. A study of typical mountain hazards along Sichuan-Tibet Highway[M]. Chengdu: Chengdu Science and Technology University Publishing House, 1999. (in Chinese)]
- [10] 铁永波,李宗亮. 冰川泥石流形成机理研究进展[J]. 水科学进展, 2010, 21(6): 861-866. [TIE Y B, LI Z L. Progress in the study of glacial debris flow mechanisms[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(6): 861-866. (in Chinese)]
- [11] 杜榕桓,章书成. 青藏高原东南部冰川泥石流的特征[J]. 冰川冻土, 1981, 3(3): 10-16. [DU R H, ZHANG S C. Characteristics of glacial mud—flow in South—Eastern Qinghai—Xizang Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1981, 3(3): 10-16. (in Chinese)]
- [12] 李鸿琰,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): 1-9. [LI H L, CAI X X. The glacial debris flow of China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1989, 9(6): 1-9. (in Chinese)]
- [13] 高波,王军朝,张佳佳,等. 帕隆藏布流域(波密-索通)典型冰碛物-崩滑型物源冰川泥石流发育特征分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(19): 176-182. [GAO B, WANG J Z, ZHANG J J, *et al.* Analysis of the development characteristics of typical glacial debris flow that has materials source of moraine and colluvial or slide deposits in the Parlun river (Bomi-Suotong)[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(19): 176-182. (in Chinese)]
- [14] GE Y, CUI P, SU F, *et al.* Case history of the disastrous debris flows of Tianmo watershed in Bomi County, Tibet, China: Some mitigation suggestions[J]. Journal of Mountain Science, 2014, 11(5): 1253-1265.
- [15] WEI R, ZENG Q, 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.
- [16] 李元灵,陈龙,王军朝,等. 2016年帕隆藏布流域群发性泥石流的活动特征及成因分析[J]. 水土保持研究, 2018, 25(6): 397-402. [LI Y L, CHEN L, WANG J C, *et al.* Characteristics and geneses of the group-occurring debris flow along Parlun Zangbo river

- zone in 2016 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25 (6): 397 - 402. (in Chinese)]
- [17] 任云,胡卸文,王严,等. 四川省九龙县色脚沟火后泥石流成灾机理[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45 (6): 150 - 156. [REN Y, HU X W, WANG Y, *et al.* Disaster mechanism of the Sejiao post-fire debris flow in Jiulong County of Sichuan [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45 (6): 150 - 156. (in Chinese)]
- [18] 乔建平,黄栋,杨宗佶,等. 汶川地震极震区泥石流物源动储量统计方法讨论[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2012, 23(2): 1 - 6. [QIAO J P, HUANG D, YANG Z J, *et al.* Statistical method on dynamic reserve of debris flow's source materials in meizoseismal area of Wenchuan earthquake region [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2012, 23(2): 1 - 6. (in Chinese)]
- [19] 张佳佳,刘建康,高波,等. 藏东南嘎龙曲冰川泥石流的物源特征及其对扎墨公路的影响[J]. 地质力学学报, 2018, 24(1): 106 - 115. [ZHANG J J, LIU J K, GAO B, *et al.* Characteristics of material sources of galongqu glacial debris flow and the influence to Zhamo road [J]. Journal of Geomechanics, 2018, 24 (1): 106 - 115. (in Chinese)]
- [20] 泥石流灾害防治工程勘察规范: DZ/T 0220 - 2006 [S]. 北京: 国土资源部, 2006. [Specification of geological investigation for debris flow stabilization: DZ/T 0220 - 2006 [S]. Beijing: Ministry of Land and Resources, 2006. (in Chinese)]
- [21] 余忠水,德庆卓嘎,罗布次仁,等. 西藏波密县天摩沟“9·4”特大泥石流灾害成因初步分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2009, 20(1): 6 - 10. [YU Z S, DE QING Z G, LUO BU C R, *et al.* Preliminary analysis about the cause of “9.4” debris flow disaster in Tianmo gou, Bomi, Tibet [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2009, 20(1): 6 - 10. (in Chinese)]
- [22] 张金山,谢洪,王小丹,等. 西藏尖姆普曲泥石流[J]. 灾害学, 2015, 30(3): 99 - 103. [ZHANG J S, XIE H, WANG X D, *et al.* Debris-flow of Jianmupuqu ravine in Tibet [J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(3): 99 - 103. (in Chinese)]
- [23] 高波,任光明,王军,等. 四川汶川高家沟泥石流形成条件与启动机理研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(4): 1 - 5. [GAO B, REN G M, WANG J, *et al.* Study on formation conditions and initiation mechanism of Gaojia gully's debris flow in Wenchuan County [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25(4): 1 - 5. (in Chinese)]
- [24] 符文熹,聂德新,任光明,等. 中国泥石流发育分布特征研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1997, 8(4): 40 - 44. [FU W X, NIE D X, REN G M, *et al.* The study on debris flow's distribution regularity in China [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1997, 8(4): 40 - 44. (in Chinese)]
- [25] 罗荣章,徐则民. 怒江东月各特大泥石流流域几何形态学特征[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(6): 141 - 147. [LUO R Z, XU Z M. Basin morphology characteristics of the giant debris flow in the Dongyue gully near the Nujian River [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(6): 141 - 147. (in Chinese)]
- [26] 向灵芝,刘志红,柳锦宝,等. 1980 - 2010 年西藏波密地区典型冰川变化特征及其对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2013, 35(3): 593 - 600. [XIANG L Z, LIU Z H, LIU J B, *et al.* Variation of glaciers and its response to climate change in Bomi County of Tibet autonomous region in 1980 - 2010 [J]. Journal of Glaciers and Geocryology, 2013, 35(3): 593 - 600. (in Chinese)]

编辑:汪美华