

西藏天摩沟泥石流物源演变特征

陈龙^{1,2,3}, 余斌³, 黄海^{1,2,3}, 刘建康⁴, 李元灵^{1,2}, 高波^{1,2}

CHEN Long^{1,2,3}, YU Bin³, HUANG Hai^{1,2,3}, LIU Jiankang⁴, LI Yuanling^{1,2}, GAO Bo^{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研究中心, 四川 成都 611734;

3. 成都理工大学环境与土木工程学院, 四川 成都 610059;

4. 西华大学应急学院, 四川 成都 610039

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

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

3. School of Environmental and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China;

4. School of Emergency Science, XiHua University, Chengdu 610039, Sichuan, China

摘要:天摩沟是西藏东南部典型的泥石流沟,分别于2007年、2010年和2018年暴发泥石流灾害,对当地居民和川藏公路造成多次危害。通过多期次遥感解译、现场调查、现场观测等手段确定历次泥石流事件前后物源分布和类型,运用GIS统计和剖面测绘,对比不同时期该泥石流沟物源面积平面和剖面上的变化,研究该沟物源的动态演变。天摩沟泥石流物源类型主要为冰碛型物源、崩滑型物源和侵蚀型物源。平面上,冰碛型物源面积最大,崩滑型物源最集中,侵蚀型物源延伸距离最远。剖面上,主沟道13°~23°物源变化最活跃,其中17°~23°为泥石流侵蚀型物源启动部位,13°~17°为泥石流侵蚀最剧烈部位。天摩沟物源动态演变特征为逐年雪崩堆积物的“汇聚快融”效应,以及该效应引发的沟道底部和两侧松散物质的失稳。具体表现为海洋性冰川前缘雪崩活跃,每年10月至次年6月雪崩堆积物在主沟内堆积并向下游延伸,最远可达1800 m;7—9月雪崩堆积物快速消融,释放出裹挟在雪崩堆积物中的松散物质,加速泥石流物源汇聚,并使沟道内径流量急剧增大,径流激增侵蚀主沟两侧老冰碛物,使其转化为泥石流物源。研究天摩沟泥石流的物源演变特征,可揭示帕隆藏布流域泥石流近期频发原因,为该区域泥石流流预警和防灾减灾工作提供参考。

关键词:泥石流;雪崩;物源;演变特征

中图分类号:P642.23 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2021)12-2089-09

Chen L, Yu B, Huang H, Liu J K, Li Y L, Gao B. Characteristics of debris flow source evolution in Tianmo Gully, Tibet. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(12): 2089–2097

Abstract: The Tianmo Gully debris flow in southeastern Tibet is a typical one, which broke out frequently in 2007, 2010 and 2018, causing harm to local residents and the Sichuan–Tibet highway for many times. The source materials distribution and types before and after debris flow events were drawn by means of multi-stage remote sensing interpretation, field investigation and field observation. GIS statistics and profile mapping were used to compare the changes of debris flow source materials area in plane and profile in different periods in the gully for the study of the dynamic evolution of the source materials. The source materials types of debris flow in Tianmo Gully are mainly moraine type, collapse type and erosion type. On the plane, moraine type source materials has the largest area, collapse type source materials is the most concentrated, and erosion type source materials extend the longest distance. On the profile, the source materials of the main channel varies most actively from 13° to 23°, among which, 17° to 23° is the starting site of debris

收稿日期:2021-07-20;修订日期:2021-11-01

资助项目:中国地质调查局项目《藏东昌都地区城镇灾害地质调查》(编号:DD20190644)、第二次青藏高原综合科学考察研究(编号:2019QZKK0902)和国家自然科学基金青年项目《泥石流对全衬砌排导槽的冲刷磨蚀机理研究》(批准号:41807300)

作者简介:陈龙(1988-),男,在读博士生,工程师,从事地质灾害的评价与监测预警研究。E-mail:ryandf_cl@163.com

flow erosion type, and 13° to 17° is the most intense site of debris flow erosion. The dynamic evolution of the source materials in Tianmo Gully is characterized by the "convergence and rapid melting" effect of avalanche accumulations year by year, and the instability of loose materials at the bottom and both sides of the channel. The avalanche accumulates in the main gully and extends downstream 1800 m from October to June of the next year. From July to September, the avalanche deposits are rapidly melted, releasing a large number of loose materials bound in the avalanche deposits and making the runoff in the gully increase sharply. The surge of runoff erodes the old moraines on both sides of the main ditch and converts them into debris flow sources. Research on the provenance evolution characteristics of debris flow in Tianmo Gully can reveal the reasons for the frequent occurrence of debris flow in Palongzangpo Basin, and provide reference for the early warning and disaster prevention and mitigation of debris flow in this region.

Key words: debris flow; avalanche; source materials; evolution characteristic

西藏东南部帕隆藏布流域因独特的地形、地质、冰川和气候条件泥石流频发^[1],例如古乡沟、培龙沟、米堆沟、冬茹弄巴沟、比通沟、天摩沟等^[2-8]。泥石流灾害使该区域国道 G318 断路,对地方基础设施建设、经济发展和居民生产生活造成巨大危害^[9-11]。通常认为泥石流的形成须具备地形条件、物源条件和水源条件^[12-14]。其中物源条件直接影响到泥石流的暴发频率、规模、容重等^[15],因此,泥石流物源量是评价泥石流易发性的重要指标。目前对于泥石流物源演变的计算方法主要有两类。第一类方法是通过现场调查建立经验公式或预测模型进行计算的。如蒋忠信^[16]运用灰色系统模型预测泥石流物源动储量的变化;乔建平等^[17]基于沟道断面几何形态计算泥石流物源量,宋志等^[18]通过逐一精细化调查计算泥石流的物源量,还有学者通过调查获取泥石流形成区滑坡灾害的面积和体积,从而建立物源体积估算模型^[19-20];铁永波^[21]在四川贡嘎山磨西河流域开展现场观测,提出了冻融循环条件下冰碛补给型物源汇集的三阶段模式。第二类方法是通过多期次遥感解译物源分析物源量变化^[22-24]。随着遥感和 GIS 技术不断成熟,Crowley 等^[25]用遥感解译结合侵蚀模型计算出物源量;Chen 等^[26]对比群发性泥石流事件前后各地理参数对泥石流物源的影响;Kumar 等^[27]用多期遥感影像和 DEM 研究喜马拉雅山南麓冰川前缘消融形成泥石流的过程。综上,泥石流物源的演变特征需要进行精细测量或多期遥感影像对比,但因藏东南地区泥石流形成区沟道海拔高且狭窄,传统手段测绘难度大,目前对于该区泥石流形成区物源变化的研究较少。

据历史资料,天摩沟于 2007 年 9 月、2010 年 7 月、2010 年 9 月和 2018 年 7 月发生泥石流灾害,除地形和水源条件以外,物源积累可能是重要原因。

笔者于 2016 年、2017 年、2018 年和 2021 年对西藏天摩沟进行现场调查,结合多期光学遥感解译和现场观测对物源进行解译和实体勾绘,旨在查清 2018 年泥石流事件前后物源分布,运用 GIS 软件统计物源量变化,对该沟物源特征与动态演变过程进行研究,为研究区冰川泥石流的防灾减灾提供科学依据。

1 天摩沟泥石流概况

天摩沟位于西藏自治区林芝市波密县古乡松绕村,帕隆藏布左岸(图 1)。沟口对岸为国道 G318 公路,东距波密县约 48.7 km,西距通麦大桥 29.5 km。该沟分别于 2007 年 9 月 4 日、2010 年 7 月 25 日、2010 年 9 月 4 日和 2018 年 7 月 11 至 17 日多次暴发泥石流灾害(表 1)^[29-32]。

波密县年平均降雨量为 800~1000 mm,2016 年 9 月 5 日帕隆藏布流域比通沟、赤担隆巴沟和角隆沟群发性泥石流激发小时雨强为 7.6~8.3 mm^[33]。

天摩沟流域西南高东北低,形态为漏斗形,主沟右岸发育一条支沟。流域沟口海拔 2460 m,最高峰 5420 m,相对高差 2960 m。流域面积为 17.9 km²,主沟长度为 7.10 km,主沟纵比降为 417‰(包

表 1 天摩沟泥石流历次灾害事件
Table 1 Statistics of previous disaster events of Tianmo Gully

时间	一次性冲出 方量/m ³	造成危害
2007 年 9 月 4 日	76.0×10 ⁴	1 人死亡,7 人失踪,9 人受伤,2 户民房被毁,冲毁农田 2 hm ²
2010 年 7 月 25—31 日	21.0×10 ⁴	堵塞帕隆藏布 15 min,450 m 国道和 76 m 比通桥被毁
2010 年 9 月 5—8 日	45×10 ⁴	国道 318 断道 16 d,直接经济损失 1970 万元
2018 年 7 月	18.7×10 ⁴ ^[32]	淤埋国道 318 近 220 m

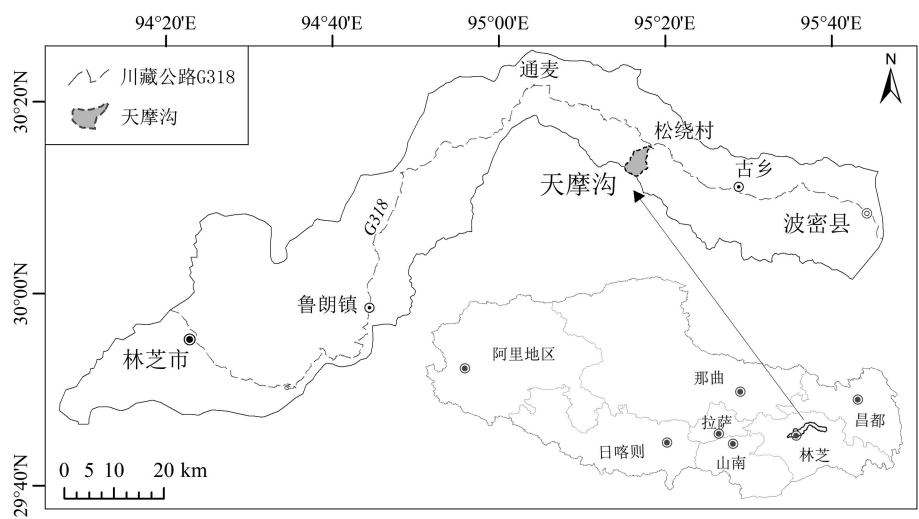


图 1 天摩沟地理位置(据参考文献[28]修改)
Fig. 1 Geographic location of Tianmo Gully

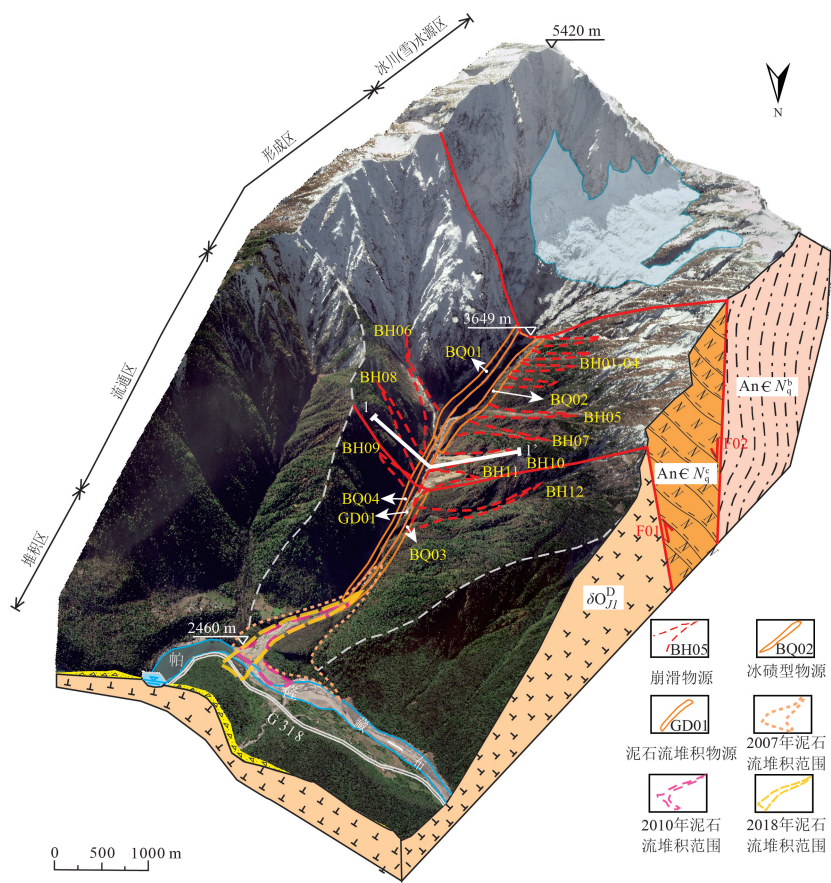


图 2 天摩沟泥石流三维地质图

Fig. 2 Three-dimensional geological map of Tianmo Gully

δO_{J1}^D —腾冲燕山期岩浆弧石英闪长岩; $An \in N_q^b$ —念青唐古拉岩群 b 岩组黑云斜长片麻岩; $An \in N_q^c$ —念青唐古拉岩群 c 岩组长石石英变粒岩

括堆积区),堆积区纵比降 100‰。流域内冰川高程为 4017~5414 m,面积为 4.04 km²(图 2)。天摩沟地区属于冈底斯拉萨地块雅鲁藏布江缝合带东侧和嘉黎-嘉隆庙弧形碰撞带西端。主要出露腾冲燕山期岩浆弧 δO_{J1}^D 石英闪长岩、 $An \in N_q^b$ 念青唐古拉岩群 b 岩组黑云斜长片麻岩、 $An \in N_q^c$ 念青唐古拉岩群 c 岩组长石石英变粒岩。流域内发育 2 条断层,根据现场调查和 1:25 万区域基础地质资料,隶属于嘉黎断裂,F01 断层为逆断层,在沟道形成 2 处滑坡。F02 断层为正断层,在流域内形成基岩陡脊,岩体破碎,表面呈强风化状态(图 3)。

2 泥石流物源特征

2.1 研究方法

利用 2006 年 4 月 30 日(Landsat7)和 2016 年 3 月 17 日(Landsat8)2 期影像,对比天摩沟沟道内物源类型和面积变化。通过视频监控,观测自 2020 年 7 月—2021 年 6 月不同月份雪崩堆积物在主沟内堆积延伸的范围。辅以 2016 年 6 月、2017 年 9 月、2018 年 5 月和 7 月多次现场调查复核,测量出主沟内雪崩堆积物的延伸部位。统计出沿主沟道物源面积与主沟纵坡度之间的关系,对比泥石流事件前后物源类型和主沟横剖面。由此研究天摩沟物源演变特征。

2.2 物源类型特征

据遥感解译,天摩沟内主要分布物源 17 处(表 2),其中崩滑型物源 12 处,冰碛型物源 4 处,沟道堆积物源 1 处(图 2)。此 17 处物源因冰崩、降雨、温度变化等外因启动形成泥石流,是天摩沟历次泥石流的主要物质来源。

(1) 冰碛型物源

冰碛型物源分布于沟道形成区至流通区两岸,推测历史上该沟山谷冰川发育,冰川前进,在沟道两岸形成高低 2 期侧碛垄,目前侧碛垄延续至流通区,高程分布于 3649~2540 m,垄顶纵坡度约为 289‰,侧碛垄临空面斜坡天然休止角为 36°~37°。

(2) 崩滑型物源

崩滑物源主要分布于形成区两岸,集中于海拔 3549~2725 m 范围内,尤其是 F02 断层部位和两岸斜坡坡面局部汇水部位,由于冻融侵蚀和侵蚀切脚,斜坡残积物、坡积物和冰碛物失稳形成崩塌或滑坡,松散物质堆积至沟道底部成为崩滑型物源。

(3) 侵蚀型物源

从遥感解译看,天摩沟形成区和流通区沟底堆积多期泥石流洪积物,2018 年 7 月 11 日泥石流事件中,形成区沟道下切可达十余米,仍然未下切至基岩,推测沟道泥石流堆积物仍有一定厚度,可能被启动参与泥石流。

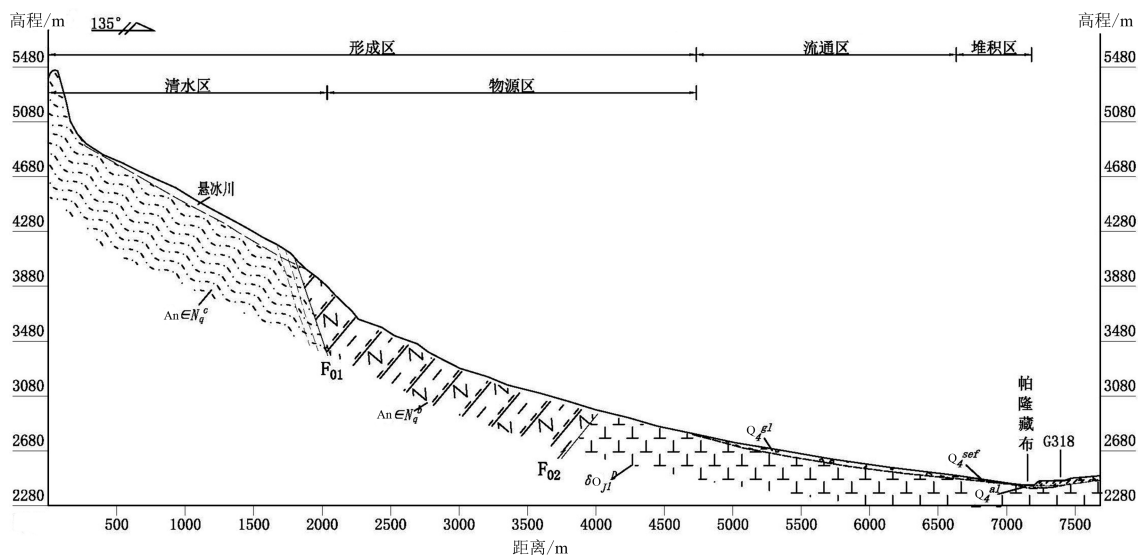


图 3 天摩沟泥石流工程地质纵剖面

Fig. 3 Engineering geological profile of Tianmo Gully

δO_{J1}^D —腾冲燕山期岩浆弧石英闪长岩; $An \in N_q^b$ —念青唐古拉岩群 b 岩组黑云斜长片麻岩; $An \in N_q^c$ —念青唐古拉岩群 c 岩组长石石英变粒岩; Q_4^{gl} —第四系冰碛物; Q_4^{al} —第四系冲积物; Q_4^{sef} —第四系泥石流洪积物

表 2 天摩沟泥石流物源概况

Table 2 Overview of debris flow sources in Tianmo Gully

编号	2006 年物源面积/m ²	2016 年物源面积/m ²
BH01	6922	10306
BH02	11968	16150
BH03	8161	10925
BH04	5645	9589
BH05	147273	145492
BH06	104333	105089
BH07	34919	28231
BH08	43402	33541
BH09	107796	107955
BH10	13770	41714
BH11	4991	5147
BH12	27979	60903
GD01	46901	51703
BQ01	22506	22634
BQ02	107457	112427
BQ03	118073	119632
BQ04	333004	287305
合计	1145099	1168743

2.3 物源分布特征

在 2 期遥感影像中实体勾绘上述 3 类主要物源面积,从平面上对比 12 处崩滑型物源,有 10 处面积增大,2 处面积减小,其中 BH08 面积增大 27945 m²,

BH10 面积增大 32924 m²,GD01 面积减小 45699 m²,这 3 处物源是泥石流事件之后物源变化最大的部位(图 4)。崩滑物源增大是因为沟道下蚀,对沟道两侧斜坡造成“掏蚀坡脚”作用,崩滑物源失稳导致面积增大。沟道物源减小是因为沟道内水流汇聚,水位抬升,形成“消防水管”效应,水流剧烈下蚀和侧蚀,启动沟道内的泥石流堆积物,使沟道物源面积减小。

从上下游对比物源面积与主沟坡度的关系可以看出,BQ01 物源延伸长度 1.64 km,坡度由 33°延伸至 15°,面积平均减少 1086 m²/km。BH05 和 BH06 位于坡度 17°之处,面积分别减少 6688 m²和 9861 m²。BH08 和 BH10 位于坡度 13°之处,面积分别增加 27945 m²和 32924 m²(图 5)。13°~23°是物源面积变化最剧烈的部位,其中 17°~23°沟道物源和崩滑物源减少,推测该段为泥石流启动部位。主沟 13°~17°部位物源面积增加,推测该段泥石流侵蚀导致崩滑物源面积剧增。

2.4 物源特征小结

(1)从物源分布看,天摩沟沟道内最主要的物源为沟道内老冰碛物存量物源,且从主沟上部现代冰川坡脚延伸至流通区,形态为两级冰碛垄。崩滑物源主要位于两级冰碛垄,有少部分位于主沟两侧

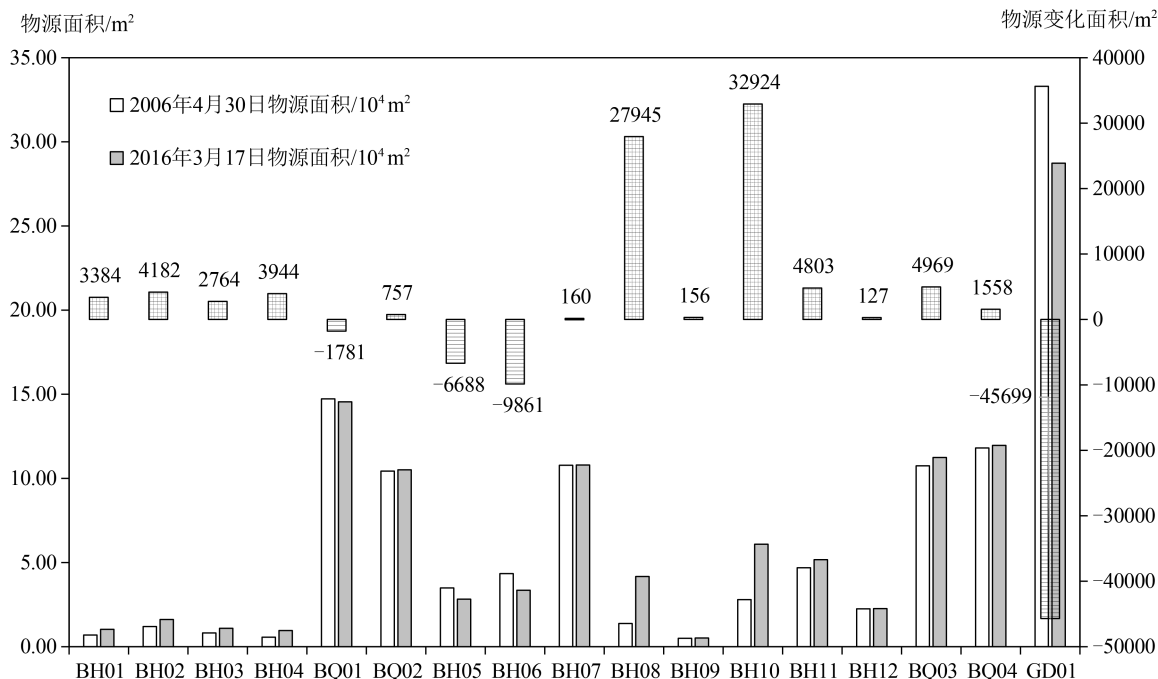


图 4 物源变化统计

Fig. 4 Statistics of source materials change

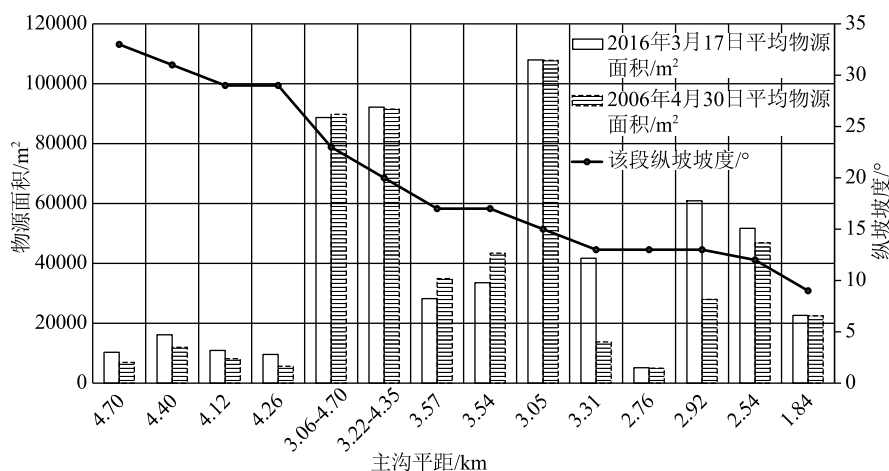


图5 天摩沟沿沟道两侧物源分布

Fig. 5 Distribution map of source materials along both sides of Tianmo Gully

冲沟和斜坡。沟道物源堆积在沟道底部,自上至下延伸至堆积区。

(2)从物源纵向分布看,物源在纵坡 $13^{\circ} \sim 23^{\circ}$ 变化活跃,且 $17^{\circ} \sim 23^{\circ}$ 为泥石流启动部位, $13^{\circ} \sim 17^{\circ}$ 为泥石流侵蚀最剧烈部位。

3 泥石流物源动态演变

3.1 2018 年 7 月 11 日泥石流物源补给机制

2017 年冬季—次年 5 月,天摩沟形成区主沟内堆积大量雪崩堆积物,堆积最远时可自冰川坡脚沿主沟道堆积 1800 m,随着夏季 6—7 月升温,雪崩堆积物自底部和两侧先融化,形成局部塌陷直至完全融化(图 6)。随着沟道内大面积雪崩堆积物急速消

融,再遇到持续降雨天气,主沟径流流量激增,不断侵蚀沟道,最终在坡度较陡部位侵蚀启动沟道物源,随后在沟道两侧产生崩塌滑坡,参与泥石流活动。

由形成区 1—1' 的剖面测量(图 7)可见,2018 年 5 月 2 日的沟道底部宽度为 70 m,沟道横剖面为典型的 U 形,沟底高程为 2751 m。2018 年 7 月 17 日沟道底部宽度为 23 m,沟道横剖面为 V 形,沟底高程降低至 2730 m,下切 21 m,沟道两侧陡峭。

3.2 天摩沟物源周期性汇集

杨威等^[34]通过监测判断,自 20 世纪 70 年代以来,该区冰川经历了严重的物质损耗与退缩;向灵芝等^[35]研究显示,波密地区 1980—2010 年冰川总体受温度持续上升的影响不断退缩;吕儒仁等^[36]和

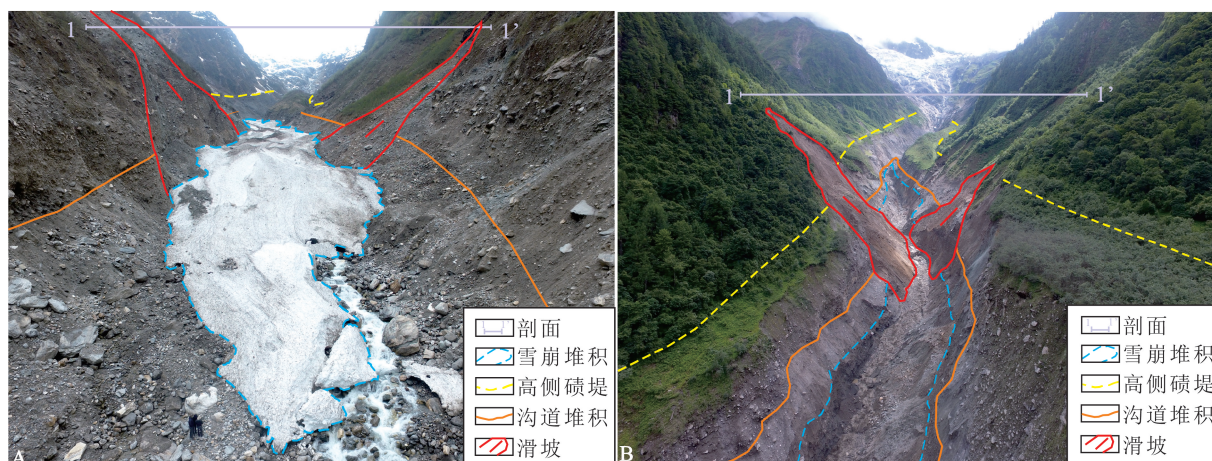


图6 天摩沟形成区物源分布(A为2018年5月2日拍摄,B为2018年7月17日拍摄)

Fig. 6 Source materials distribution in the formation area of Tianmo Gully

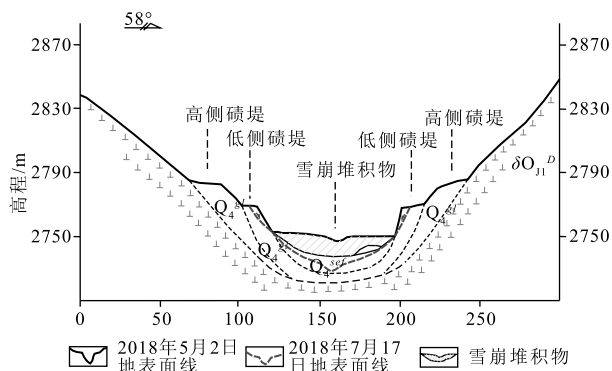


图7 泥石流形成区剖面(地层代号注释同图3)

Fig. 7 Section of debris flow formation area

郑本兴^[37]对四川贡嘎山的研究显示,冰川冰舌地段由于温度变化,冰川消退,容易产生泥石流灾害。海洋性冰川退缩会造成前缘松散物质增多,径流增大,有利于泥石流发生。

由天摩沟2018年5月和7月泥石流事件和现场观测2020年7月—2021年6月沟道内雪崩堆积物可以看出,雪崩堆积物自冰川坡脚开始堆积,每年6月底7月初延伸最远,延伸距离可达1800 m,7—9月快速消融,有些年度雪崩堆积物完全消融引发泥石流灾害,11月雪崩堆积物自冰川坡脚仅仅延伸200 m左右(图8)。

天摩沟内海洋性冰川前缘活跃的特征为每年冬季至次年春季雪崩频发。一方面雪崩堆积物在夏季短期内产生“汇集快融”效应,汇集数百米的雪崩堆积物在狭窄沟道内随着温度上升快速消融,使沟道内径流激增,容易侵蚀主沟两岸老冰碛物,形

成崩滑物源。另一方面,雪崩发生时将沟顶海洋性冰川铲刮和冻融风化剥蚀产生的松散物质集聚在形成区沟道中,通过多年积累起到“集聚物源”的作用(图9)。

4 结论

(1)从2018年7月11日泥石流事件分析,物源在纵坡 $13^{\circ}\sim 23^{\circ}$ 变化活跃,且 $17^{\circ}\sim 23^{\circ}$ 为泥石流启动部位,沟道内老泥石流堆积物容易被启动; $13^{\circ}\sim 17^{\circ}$ 为泥石流侵蚀最剧烈部位,该段地层破碎,沟岸两侧斜坡坡陡,可能由于切坡脚新增崩滑型物源。

(2)从年际尺度看,每年10月至次年6月天摩沟形成区内雪崩于沟道内堆积;次年7—9月雪崩堆积物快速消融。雪崩的“汇集快融”和“集聚物源”效应,有利于泥石流发生。

(3)从泥石流物源条件角度分析,该沟近期仍然可能暴发泥石流灾害,尤其在7月至9月温度上升时期,需要引起地方政府和过往行人车辆警惕。

致谢:感谢成都理工大学黄亮、邹任洲和田海硕士在野外调查和室内资料整理过程中的辛勤付出,感谢成都理工大学席贺伟、朱青松和唐垚硕士在野外观测站建设安装过程中的给予的帮助。

参考文献

- [1] 唐邦兴,杜榕桓,康志成,等.我国泥石流研究[J].地理学报,1980,35(3): 259-264.
- [2] 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.
- [3] 施雅风,杨宗辉,谢自楚,等.西藏古乡地区的冰川泥石流[J].科学通报,1964,6: 542-544.

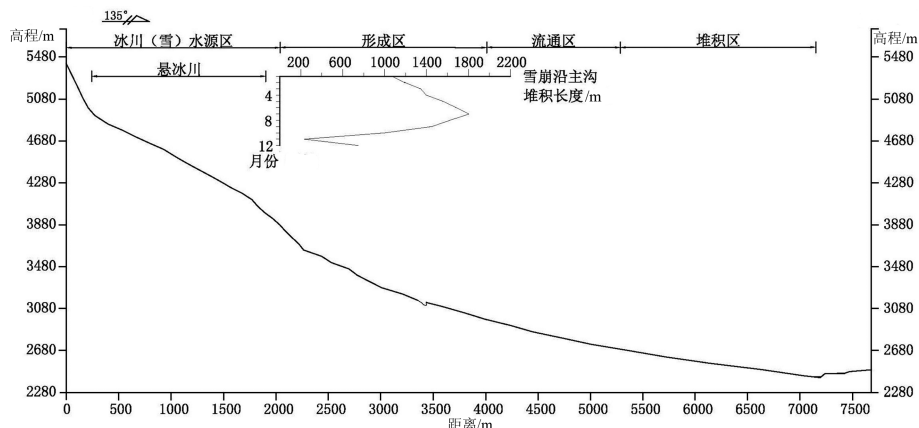


图8 沿主沟雪崩堆积月份变化

Fig. 8 Month variation of avalanche accumulation along the main gully

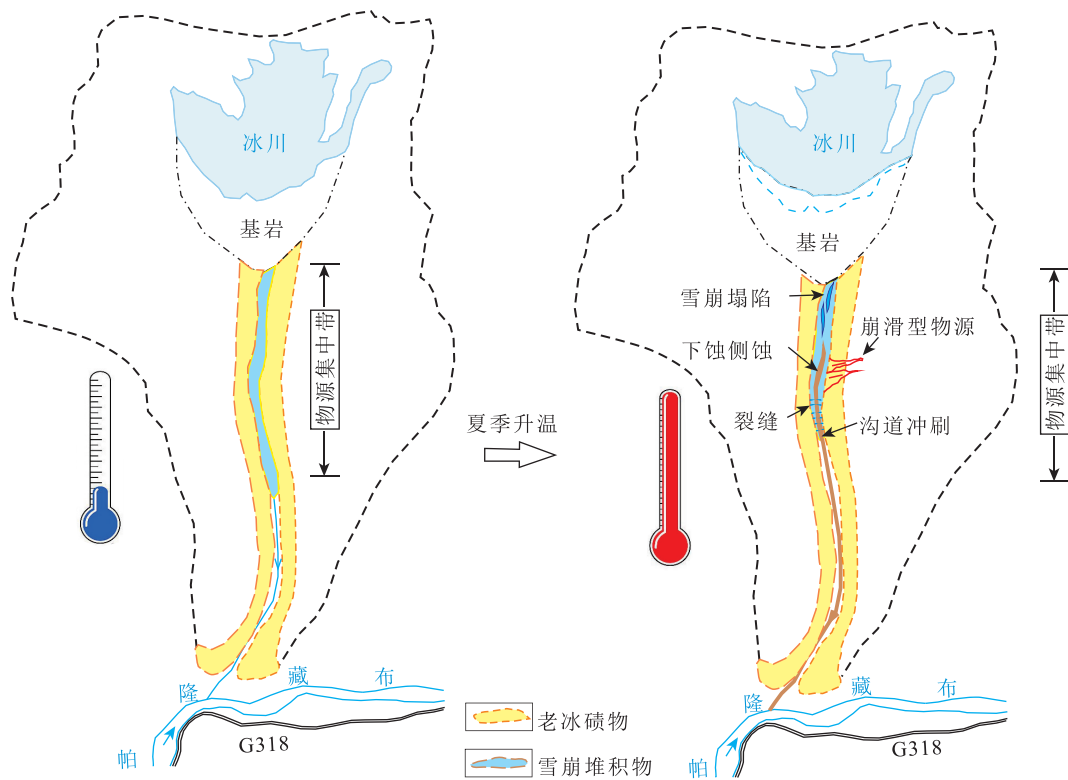


图9 夏季升温天摩沟物源动态演变示意图

Fig. 9 Diagram of dynamic evolution of source materials in Tianmo Gully under summer warming

- [4] 杜榕恒,章书成. 青藏高原东南部冰川泥石流特征[J]. 冰川冻土, 1980, 3(3): 10-16.
- [5] 吕儒仁,唐邦兴,朱平一,等. 西藏泥石流与环境[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1999: 1-134.
- [6] 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所. 中国泥石流[M]. 北京: 商务印书馆, 2000.
- [7] 康志成,李焯芬,马蔼乃,等. 中国泥石流研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [8] 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): 193-221.
- [9] 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): 45-55.
- [10] Chen L, Wang J C, Liu J K, et al. Discussion on the characteristics and calculation method of material source for the debris flow in Tian Mo Gully[C]//5th International Conference debris flows: disasters, risk, forecast, protection. Tbilisi, Georgia, 2018.
- [11] Zhang J J, Liu J K, Chen L, et al. Conditions and mechanism for formation of glacial debris flow in Parlung Zangbo, SE Tibetan Plateau[C]//5th International Conference debris flows: disasters, risk, forecast, protection. Tbilisi, Georgia, 2018.
- [12] 吴积善,康志成,田连权,等. 云南蒋家沟泥石流观测研究[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [13] 张杰坤. 泥石流研究综述[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1994, 5(4): 1-8.
- [14] 费祥俊,舒安平,著. 泥石流运动机理与灾害防治[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [15] 余斌,唐川. 泥石流动力特性与活动规律研究[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [16] 蒋忠信. 泥石流固体物质储量变化的定量预测[J]. 山地研究, 1994, 12(3): 155-162.
- [17] 乔建平,黄栋,杨宗佑,等. 汶川地震极震区泥石流物源储量统计方法讨论[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2012, 23(2): 1-6.
- [18] 宋志,巴仁基,刘宇杰. 四川康定母猪笼沟泥石流形成特征与物源定量计算[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2012, 23(3): 39-45.
- [19] 方群生,唐川,程霄,等. 汶川震区泥石流流域内滑坡物源量计算方法探讨[J]. 水利学报, 2015, 46(11): 1298-1307.
- [20] 卜祥航,唐川,蒋志林,等. 强震区岷江沿岸泥石流物源体积估算模型与演变特征[J]. 工程地质学报, 2016, 24(1): 73-85.
- [21] 铁永波. 冻融条件下冰碛补给型泥石流物源汇集过程与灾变初探[J]. 灾害学, 2012, 27(4): 12-16.
- [22] 方群生,唐川,王毅,等. 汶川极震区泥石流流动储量与总物源量计算方法研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(6): 1008-1014.
- [23] 常鸣,唐川,蒋志林,等. 强震区都江堰市龙池镇泥石流物源的遥感动态演变[J]. 山地学报, 2014, 32(1): 39-45.
- [24] 蒋志林,朱静,常鸣,等. 汶川地震区红椿沟泥石流形成物源量动态演化特征[J]. 山地学报, 2014, 32(1): 81-88.

- [25] Crowley J K, Hubbard B E, Mars J C. Analysis of potential debris flow source areas on Mount Shasta, California, by using airborne and satellite remote sensing data [J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 87(2/3): 345–358.
- [26] Chen C Y, Yu F C. Morphometric analysis of debris flows and their source areas using GIS[J]. Geomorphology, 2011, 129(3/4): 387–397.
- [27] Kumar A, Bhambri R, Tiwari S K, et al. Evolution of debris flow and moraine failure in the Gangotri Glacier region, Garhwal Himalaya: Hydro-geomorphological aspects [J]. Geomorphology, 2019, 333: 152–166.
- [28] 王军朝, 刘建康, 陈龙, 等. 国道 G318(林芝段)地质灾害调查研究成果图集[M]. 成都: 成都地图出版社, 2018.
- [29] 高波, 张佳佳, 王军朝, 等. 西藏天摩沟泥石流形成机制与成灾特征[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(5): 144–153.
- [30] Ge Y G, Cui P, Su F H, 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.
- [31] Wei R Q, Zeng Q L, 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.
- [32] Deng M F, Chen N S, 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(5): 345–356.
- [33] 李元灵, 王军朝, 陈龙, 等. 2016年帕隆藏布流域群发性泥石流的活动特性及成因分析[J]. 水土保持研究, 2018, 25(6): 397–402.
- [34] 杨威, 姚檀栋, 徐柏清, 等. 青藏高原东南部岗日嘎布地区冰川严重损耗与退缩[J]. 科学通报, 2008, 53(17): 2091–2095.
- [35] 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.
- [36] 吕儒仁, 高生淮. 贡嘎山海螺沟冰川冰舌地段的泥石流[J]. 冰川冻土, 1992, 14(1): 73–80.
- [37] 郑本兴. 贡嘎山区全新世冰川变化与泥石流发育的关系[J]. 山地研究, 1994, 12(1): 1–8.