

2016 年帕隆藏布流域群发性泥石流的 活动特征及成因分析

李元灵^{1,2}, 王军朝^{1,2}, 陈龙^{1,2}, 刘建康^{1,2}, 杨东旭^{1,2}, 张佳佳^{1,2}

(1. 中国地质科学院 探矿工艺研究所, 成都 611734; 2. 中国地质调查局 地质灾害防治技术中心, 成都 611734)

摘要:帕隆藏布流域山高谷深、构造强烈、冰川广布, 区域内冰川泥石流数量多、规模大、分布密、暴发频率高。2016 年 9 月 5 日, 流域内几条泥石流集中暴发, 造成较为严重的财产损失, 并阻碍了 G318 国道的正常通行。为研究本次群发性泥石流的成因, 指导泥石流的监测预警工作, 在实地调查的基础上, 分析了泥石流的地形地貌条件、物源条件、水热条件。分析结果表明: 本次暴发泥石流的沟谷具有良好的地形条件, 流域高差大, 沟道纵比降大, 尤其沟谷上游因冰川作用而形成的冰蚀围谷利于水源、物源的聚集。泥石流以沟源处的松散冰碛物为主要物源。此外, 北岸比通沟泥石流因沟岸崩滑物源丰富、沟道狭窄, 形成多处堵点, 产生堵溃放大效应。南岸赤担隆巴泥石流则沟道宽缓, 崩滑物源较少。本次群发性泥石流的诱发因素主要为强降雨。泥石流暴发前两日出现强降雨, 使得沟内松散物质含水量增加, 趋近饱和, 稳定性降低。泥石流暴发当日再次出现强降雨, 直接激发了泥石流。经对暴发当日小时雨量分析, 认为比通沟泥石流由凌晨 2 点的集中降雨启动, 但由于沟道堵塞严重, 龙头数小时后才到达沟口。赤担隆巴由当日 11 点的集中降雨启动, 随后顺沟下泄, 堆积于老扇之上, 形成灾害。经分析, 沟口观测的激发本次泥石流的小时雨量为 3.3~3.6 mm, 推测主要形成区激发泥石流的小时雨量为 7.6~8.3 mm。

关键词:群发性泥石流; 帕隆藏布流域; 藏东南; 临界雨量; 堵溃

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)06-0397-06

Characteristics and Geneses of the Group-Occurring Debris Flows Along Parlung Zangbo River Zone in 2016

LI Yuanling^{1,2}, WANG Junchao^{1,2}, CHEN Long^{1,2},
LIU Jiankang^{1,2}, YANG Dongxu^{1,2}, ZHANG Jiajia^{1,2}

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

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

Abstract: Parlung Zangbo River Basin has the features of high mountains, intensive tectonism and widespread glacier. The glacial debris flows along Parlung Zangbo River Basin was large in number and scale with dense dissemination and high frequency. The group-occurring debris flow caused heavy losses of property and blocked the G318 Road on September 5th, 2016. In order to investigate the cause of the debris flow and strengthen disaster monitoring, geography, sources of debris flows and hydrodynamic conditions were analyzed. The results indicated that the debris flows were easily formed because of the favorable landform, giant gaps among different elevation, great longitudinal river slopes and deeply ice eroded valley. The unconsolidated glacial sediments are the main sources of debris flow in this area. In addition, as with a less wide gully and a more abundant provenance of collapse and landslide, the debris flow block-outburst occurred frequently on north bank while the debris flow gully on the south bank occurred less with a contrary condition of the inducement. The predominant triggering factor of this group-occurring glacial debris flow was the heavy rainfall. The antecedent rainfall had saturated the provenance which was then initiated by the following heavy rain. The Bitong Valley debris flow occurred at 2:00 am through research. However, it reached the Parlung Zangbo River Basin a few hours later because of being blocked. The debris flow in Chidanlongba Valley started at 11:00 am and then rushed out the gully and deposited on the old alluvial fans. The hourly rainfall

which triggered the debris flow measured in the piedmont was 3.3~3.6 mm, the estimated hourly rainfall was 7.6~8.3 mm in the debris flow initiated area.

Keywords: group-occurring debris flows; Parlung Zangbo River Zone; south-eastern Tibet; critical rainfall; block-outburst

帕隆藏布流域位于西藏东南部,是我国海洋性冰川的主要分布地区^[1]。由于该区域地质构造复杂、新构造运动活跃、山高谷深、降水充沛及现代冰川活跃,导致流域内发生的冰川泥石流数量多、规模大、分布集中、暴发频率高、危害大^[2]。近几十年来,帕隆藏布流域内频频暴发的泥石流灾害严重影响着当地居民的生活,并阻碍 G318 的正常通行。国内学者亦对该区域的泥石流分外关注,开展了大量的研究工作,分析该区域泥石流形成的气象背景、地貌条件、泥石流启动特征等。20 世纪 50 年代为修建川藏公路,以齐树春为代表的工程技术人员和西藏自治区交通厅科学研究所的专家对帕隆藏布流域的冰川泥石流进行了探索研究,积累了大量基础资料,对冰川泥石流也形成了初步认识;60、70 年代,以中科院兰州冰川冻土研究所的施雅风^[3]、杜榕桓^[4]等为主的研究人员进行了半定位观测研究,并对区内的冰川泥石流进行了广泛的考察研究,提出了著名的古乡冰川泥石流流速计算公式;70 年代中期—90 年代,中科院成都山地灾害与环境研究所和兰州冰川冻土研究所等对区内泥石流进行了较为全面的考察、勘测和研究,较为透彻地分析了冰川泥石流的形成机制及发展趋势,提出了川藏公路西藏境内沿线的泥石流流速计算公式^[5];2000 年以来,成都山地灾害与环境研究所在区内持续开展观测及研究工作,得到了不少研究成果^[6]。

区内泥石流一直较为活跃,尤其在目前全球变暖的气候条件下,区内冰川强烈消融,释放出大量松散冰碛物及冰雪融水,为泥石流活动提供了良好的条件。近年来,区内泥石流时有发生。2016 年 9 月 5 日,帕隆藏布流域古乡段相邻几条泥石流沟集中暴发,造成较为严重的财产损失,并阻碍了 G318 国道的正常通行。这几条泥石流暴发时间及空间上均高度集中,分析此次群发性泥石流事件,利于掌握该区域泥石流灾害的现状,推测其发展趋势,指导该区泥石流的监测预警工作,为防灾减灾工作提供支撑,对川藏铁路及高等级公路的修建有重要参考价值。

1 区域概况

帕隆藏布位于西藏自治区东南部,属青藏高原强烈切割的边缘山地,山高谷深,地形坡度大。地跨冈底斯陆块、雅鲁藏布江结合带、喜马拉雅陆块东部南

迦巴瓦构造结,为一强烈挤压、碰撞、旋扭走滑、急剧伸展隆升、地质构造极其复杂的造山带。近 3 Ma 以来的地壳垂直隆升速率达 3 mm/a^[5]。帕隆藏布流域范围内主要断裂为嘉黎断裂,沿帕隆藏布河谷展布,总体走向近东西向,呈向北凸出的弧形。该区域地震活动频繁,20 世纪 40 年代至今发生 3 级以上地震近 200 余次^[7]。地层上归属于藏滇地层大区,岩浆岩、变质岩相对发育,未变质的沉积岩零星出露。高山区基岩裸露,岩性以花岗岩、片麻岩为主,坡麓为崩坡积物,河谷为冲洪积物。帕隆藏布流域海洋性冰川发育,由于朝向不同,两岸沟谷地貌特征及冰川发育特征存在明显差异。流域北岸为阳坡,沟谷内冰川因接受更多日照而更易消融,沟谷上游多发育有冰斗和冰蚀围谷,围谷内堆积有大量冰碛物,沟谷下游沟道狭窄,岸坡陡立;南岸为阴坡,日照相较于北岸要少,因而消融量少,冰川运动更为强烈,因而南岸沟谷多为冰川 U 型谷。区内降雨充沛,主要受益于来自印度洋的暖湿气流。波密县城年均降雨多在 800~1 000 mm。在通麦、东久一带,由于逆江而上的印度洋气流受高山阻截,形成多雨、暴雨区,年降水量可达 1 127 mm。基于帕隆藏布流域上述地貌、地质、气象水文等特征,该区域泥石流形成条件好,暴发频次高、规模大^[8]。

2 泥石流活动特征

2016 年 9 月 5 日,位于帕隆藏布流域古乡段的比通沟、赤担隆巴、角隆沟同时暴发泥石流,其中比通沟泥石流致使电塔架设施工工棚损毁、G318 短时中断,赤担隆巴泥石流致使当地居民发电设施被毁,道路被淤埋,造成一定经济损失。本次暴发泥石流的地理位置如图 1 所示。由于比通沟、赤担隆巴泥石流分别位于帕隆藏布南北两岸,在地形地貌、物源特征等方面均具有各自的特性,也代表着帕隆藏布该段南北两岸的泥石流的特征,且二者暴发规模较大、致灾较重,以下论述比通沟与赤担隆巴的泥石流活动特征及成因。

2.1 比通沟泥石流

2016 年 9 月 5 日清晨 6:30,比通沟泥石流暴发,部分泥石流冲出物跃上距沟底 4.6 m 的钢桥,淤埋公路,阻碍了 G318 的通行(图 2),并损毁了左岸的电力施工工棚,所幸未造成人员伤亡。在汇入主河前,泥石流强烈磨蚀新修筑的排导槽,在排导槽表面形成

约 5~10 cm 深的凹槽,致使混凝土内钢筋裸露出来,对排导槽的使用寿命造成不良影响。

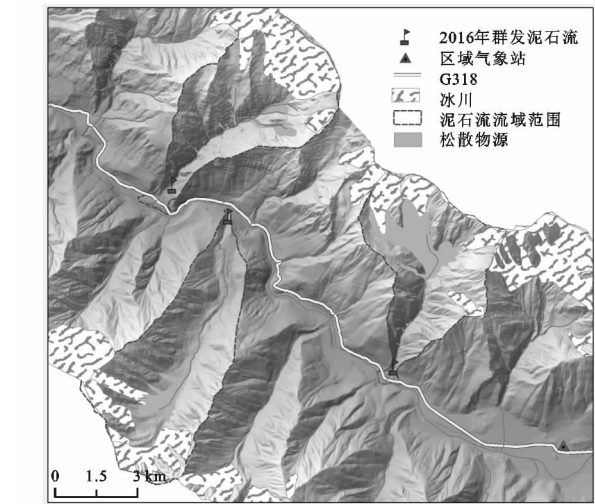


图 1 研究区位置



图 2 比通沟泥石流跃上钢桥淤埋公路

根据实地调查及试验,测算得泥石流的容重为 $\gamma_c = 1.8 \text{ t/m}^3$,为粘性泥石流。选定出山口处稳定沟道,根据粘性泥石流流速的通用计算公式(1),计算该处泥石流流速 $V_c = 8.77 \text{ m/s}$,按公式(2)计算峰值流量为 $447.27 \text{ m}^3/\text{s}$,按公式(3)计算其本次过流总量为 2.01 万 m^3 。

$$V_c = \frac{1}{n_c} H_c^{2/3} I_c^{1/2}$$

(1)

表 1 泥石流基本特征

名称	流域面积/ km ²	沟长/ km	纵比降/ ‰	峰值流量/ (m ³ · s ⁻¹)	一次性冲出方量/ 10 ⁴ m ³	暴发时间 (年-月-日 时刻)
比通沟	23.7	7.1	321.7	447.27	2.01	2016-09-05 6:30
赤担隆巴	27.5	8.0	214.0	267.64	2.2	2016-09-05 1:30
角隆沟	21.7	6.2	233.9	67.2	0.8	2016-09-05

3 泥石流成因分析

3.1 地形地貌条件

地形地貌条件是泥石流形成的必要条件,控制着泥石流的启动、搬运与堆积^[9]。帕隆藏布流域地貌上属深切割高山峡谷地貌,山势险峻、河流深切,为泥石

$$Q_c = W_c \cdot V_c$$

(2)

$$Q = K \cdot T \cdot Q_c$$

(3)

式中: V_c 为泥石流流速; n_c 为粘性泥石流的沟床糙率; H_c 为平均泥深; I_c 为泥位纵坡率; Q_c 为峰值流量; W_c 为过流断面面积; Q 为过流总量; T 为泥石流历时; K 取 0.037 8。

2.2 赤担隆巴泥石流

同日中午 11 点,位于帕隆藏布南岸的赤担隆巴暴发泥石流,损毁多个小型发电设施,摧毁转经房,淤埋道路(图 3),致使当地居民无法出行,对其生活造成严重影响。据实地调查,沟道内泥痕 3 m,沟道沿途多处宽缓处可见大量巨石、块石架空堆积,靠沟道内侧块石块径较大,往外侧逐渐减小。由于主沟道方向在出山口处以近直角的角度由向北转为向西,泥石流未沿原沟道冲出,而是翻过沟道,堆积于老扇之上,新堆积扇宽 60 余米。部分泥石流冲出物质直抵主河,运动过程中掏蚀河堤形成凹槽,由于主河水流速度较大,未在河岸出现大量堆积、挤压主河的现象。



图 3 赤担隆巴泥石流淤埋公路

根据上文所述方法,计算得出山口处泥石流流速 $V_c = 6.56 \text{ m/s}$,峰值流量为 $Q_c = 267.64 \text{ m}^3/\text{s}$,过流总量约 2.2 万 m^3 。本次群发泥石流的基本信息如表 1 所示。

流的形成提供了良好的地形地貌条件。

比通沟流域形态呈漏斗状(图 4),利于地表径流的汇流集中。流域面积 23.7 km^2 ,主沟长 7.1 km 。流域最高点高程为 $5\,560 \text{ m}$,沟口与帕隆藏布交汇处高程为 $2\,429 \text{ m}$,流域相对高差为 $3\,131 \text{ m}$,巨大的流域高差为泥石流活动提供了良好的地势条件。沟道

平均纵比降 321.7‰,物源区和流通区平均纵坡降约为 464.4‰。沟域两侧地势陡峭,平均坡度大于 32°,沟道纵坡降较大,尤其是主沟上游段及各支沟纵坡降都在 450‰以上,有利于降雨的汇集。比通沟物源区呈宽 U 型谷,利于物源的积累聚集。流通区沟道狭窄,呈 V 型谷,易形成堵溃,从而增加泥石流的峰值流量。根据实地调查,流通区下段约 500 m 长沟道内产生堵溃点 5 处,对比无人机航拍影像及遥感影像,推测沟道内堵溃点达数十处。这使泥石流在冲出的过程中,不断地产生“堵溃循环”,从而使得泥石流物质逐级积累,规模增大。这也是本次比通沟暴发泥石流规模不大,龙头却足以跃上沟口钢架桥的原因。

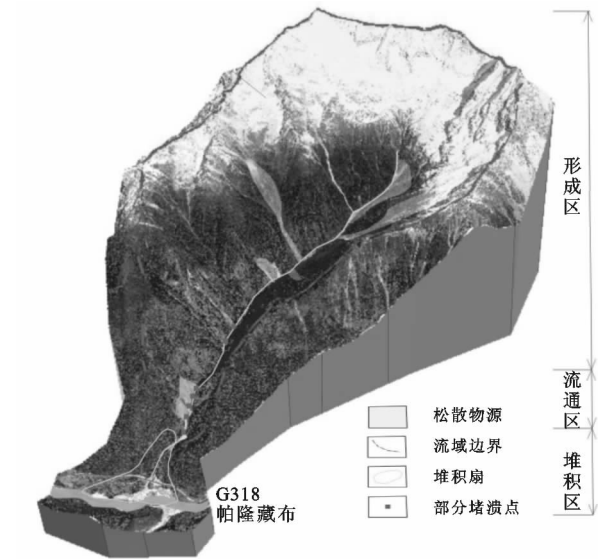


图 4 比通沟泥石流流域全貌

赤担隆巴流域形态近矩形(图 5),流域面积 27.5 km²,主沟长 8 km,主沟道上下游坡度较为一致,平均纵比降 233.9‰,为泥石流发育提供良好的地势条件。沟源处发育有冰蚀围谷,利于物源、水源的聚集。沟谷上下游均呈宽 U 型谷,沟道整体较为宽缓,泥石流暴发后多顺沟下泄,不易产生堵溃。沟道两岸山坡坡度较为一致,约 30°。流域后缘较为平缓,沟道纵剖面呈直线。因而从地貌特征来看,赤担隆巴流域发育程度较高,但仍具有形成泥石流的地形条件。

3.2 物源条件

该区域由于地质构造活动剧烈、冰川作用、寒冻风化及冻融风化作用强烈等原因,松散物质储量丰富^[8]。该区域泥石流物源包括冰碛物源、崩滑物源、

沟道物源、坡面物源几类。帕隆藏布流域海洋性冰川广布,使得该区域内冰碛物分布广、规模大,冰碛物厚度达数十米甚至数百米。而近代以来受全球气候变暖的影响,现代冰川剧烈消融、退缩,冰川中的固体物质不断地释放出来,补充泥石流松散物源。并且,现代冰川前缘冰碛物结构松散、稳定性差,尤在冰雪融水或大气降水条件下易失稳转化为泥石流物质。因而,冰碛物源是该区域泥石流的主要物源。

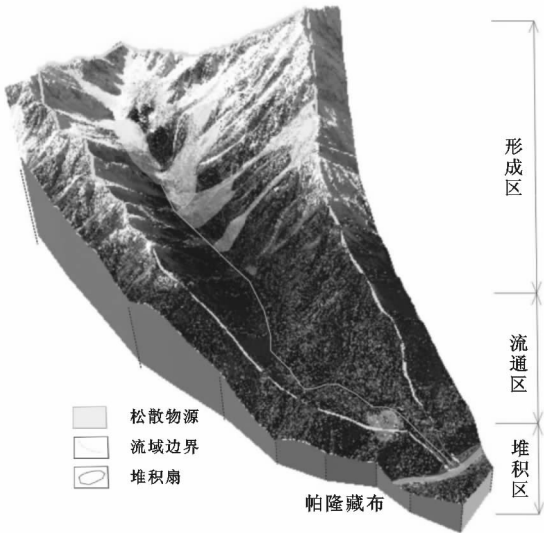


图 5 赤担隆巴泥石流流域全貌

通过实地调查及遥感影像调查对本次群发性泥石流的物源进行调查,查明比通沟与赤担隆巴泥石流物源类型及其总量和动储量。调查发现,比通沟泥石流的物源以沟源处冰斗内巨厚松散的冰碛物源为主(表 2)。冰碛物磨圆差、无分选、未胶结,经沟道侵蚀形成高陡临空面(图 6),稳定性差,易在降雨或冰雪融水作用下失稳进入沟道,参与泥石流活动。沟道两岸可见大量崩滑物源,虽规模不大,但由于流通区沟道狭窄,崩滑物源进入沟道后造成多处堵塞(图 8),产生堵溃放大效应,对泥石流活动的影响较大。统计比通沟泥石流物源如表 2 所示。

赤担隆巴泥石流松散冰碛物源占其物源总量的大部分(表 2)。沟源处左岸现代冰川冰碛物前缘高陡,易失稳进入沟道参与泥石流活动(图 7)。赤担隆巴泥石流沟道宽缓,两岸山坡坡度相对较缓,植被茂密,因而沟道两岸的坡面物源及崩滑物源较少,少量沟道松散物质在泥石流的冲刷下参与泥石流活动(图 9)。

表 2 泥石流物源统计 10⁴ m³

名称	崩滑物源		坡面物源		沟道物源		冰碛物源		小计	
	总量	动储量	总量	动储量	总量	动储量	总量	动储量	总量	动储量
比通沟	8.59	2.58	6	1.8	6.61	1.98	117.24	35.17	138.44	41.53
赤担隆巴	147.51	44.25	6.52	0.72	2.43	0.86	288.46	86.54	444.92	132.37



图 6 比通沟沟源处冰碛物源

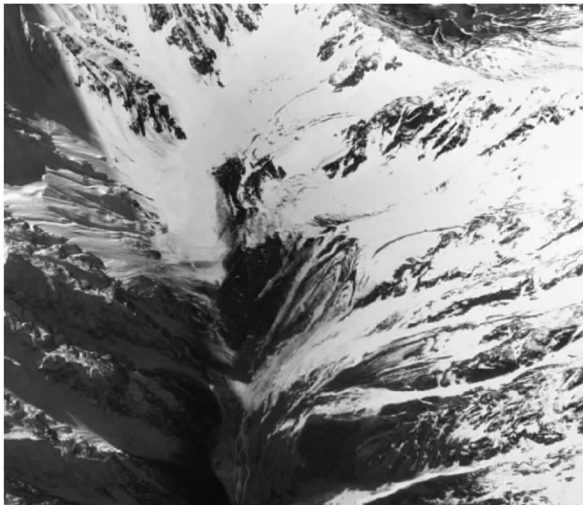


图 7 赤担隆巴沟源处冰碛物源



A 沟道狭窄崩滑物丰富 B 沟岸崩滑物源堵沟

图 8 比通沟泥石流崩滑物源



A 沟道宽缓崩滑物源较少 B 沟道物源

图 9 赤担隆巴泥石流崩滑物源与沟道物源

3.3 水动力条件

分析泥石流的水动力条件,应选取泥石流沟口及沟源处气象站所获的气象数据进行研究^[10]。然而,研究区内区域气象站较少,仅在帕隆藏布河谷有零星

分布,当前无高山气象观测站^[11]。比通沟沟口建有区域气象站(站名:古乡 U4027),但由于其未完整获取泥石流暴发当天的气象数据,因此选择其附近的古乡 U4023 区域气象站所获取的数据进行分析(气象站位置如图 1 内标注所示)。

本次群发性泥石流前期的日平均温度及日降雨变化过程如图 10 所示。泥石流暴发前,区内温度持续下降,但接连出现强降雨,可见本次泥石流的主要诱发因素为强降雨。本次群发性泥石流暴发前发生一次降雨过程,尤其泥石流暴发前两日研究区内出现强降雨,沟口气象站收集到的累计降雨 21.8 mm。研究区当前无高山气象站,参照前人根据古乡沟沟口观测站(海拔 2 530 m)与沟源高山站(海拔 3 750 m)降雨量观测数据建立的降雨随高程变化规律^[12],对比此次暴发泥石流的主要形成区(海拔 3 500~4 000 m 一带)与沟口高差,推测主要形成区前两日累计降雨约 50 mm 左右。充沛的前期降雨使得沟内松散物质含水量增加,趋近饱和,稳定性降低,为后续泥石流的暴发做好了水源与物源的准备。泥石流暴发当天,再次出现强降雨,沟口日降雨 23.9 mm,推测形成区降雨达 55 mm,短时强降雨使得沟内物源启动,暴发泥石流。

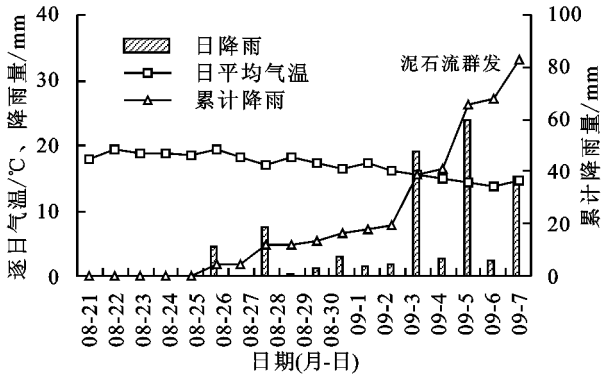


图 10 泥石流暴发前后日平均气温和日降雨

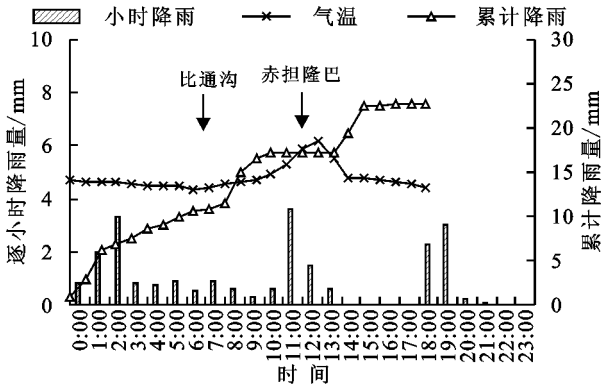


图 11 泥石流暴发当日小时降雨

图 11 为泥石流暴发当日小时降雨分布情况。9 月 5 日 6:30 比通沟暴发泥石流,沟口气象站收集到的小时降雨仅 0.5 mm,但凌晨 2 点沟口的小时降雨

为 3.3 mm,为泥石流暴发前当日最大小时降雨量。如前文所述比通沟的地形条件及物源条件特征,其沟道存在多处堵溃点,因而认为凌晨 2 点时,沟源处的短时强降雨导致冰斗内的冰碛物源启动,形成泥石流,但由于沟道狭窄,沟岸崩滑物源丰富,形成数十处堵点,泥石流运动过程中产生“堵溃循环”,泥石流物质逐级停滞累积,最终延迟至 6:30 泥石流龙头冲出沟口。因此,本次比通沟泥石流的激发小时雨量沟口观测值为 3.3 mm,按照上文同样方法,推测主要形成区小时雨量约为 7.6 mm。

9 月 5 日 11:30 赤担隆巴暴发泥石流,沟口气象站收集到 11:00 的小时雨量为 3.6 mm,推测主要形成区小时雨量为 8.3 mm,与上文分析的比通沟泥石流激发雨量相近,认为当日 11:00 的短时强降雨导致赤担隆巴沟源处的冰碛物源启动,形成泥石流。由于沟道宽缓顺直,沟岸崩滑物源较少,未产生沟道堵塞,泥石流直接顺沟下泄,堆积于老扇之上。泥石流冲出沟口的时间延迟较短。

4 结论

(1) 北岸比通沟泥石流运动特征以堵溃为主。因堵溃放大效应而形成较高的峰值流量,一方面使其龙头部分能够从深切的沟道中翻出,淤埋公路及工棚,形成灾害。南岸赤担隆巴泥石流则直接顺沟下泄,冲出山口后淤埋发电设施及道路,形成灾害。

(2) 本次暴发的泥石流均拥有的良好地形及物源条件。比通沟流域形态呈“漏斗”状,利于水源、物源向沟道内聚集,同时也储存了大量的松散冰碛物源。主沟纵比降大,为泥石流运动提供了良好的地势条件。流通区沟道狭窄,崩滑物源发育,沟道内存在数十处堵点,使泥石流产生堵溃放大效应,增加泥石流峰值流量,提高其致灾能力。赤担隆巴沟源处发育有冰蚀围谷,同样储存有大量松散冰碛物源。冰蚀围谷坡度较陡,利于物源、水源聚集,启动泥石流。主沟纵比降较大,沟道宽缓顺直,沟岸崩滑物源较少,利于泥石流运动、下泄。

(3) 本次群发性泥石流的主要诱发因素为强降雨。泥石流暴发前两日出现强降雨,使得沟内松散物质含水量增加,趋近饱和,稳定性降低,为后续泥石流的暴发做好了水源与物源的准备。泥石流暴发当日再次出现强

降雨,沟口气象站收集到的累计降雨 23.9 mm,推测沟源处降雨达 55 mm,集中强降雨直接激发了泥石流。经对暴发当日小时雨量进行分析,结合比通沟地形及物源特征,认为其由凌晨 2:00 的集中降雨启动,但由于沟道堵塞严重,龙头数小时后才到达沟口。赤担隆巴则由 11:00 的集中降雨启动,随后顺沟下泄,堆积于老扇之上。经分析,沟口观测的激发本次泥石流的小时雨量为 3.3~3.6 mm,推测主要形成区激发泥石流的小时雨量约为 7.6~8.3 mm。

致谢:特别感谢加拿大 Laval 大学方向博士给予本文的热情指导。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 朱平一,罗德富,寇玉贞. 西藏古乡沟泥石流发展趋势[J]. 山地研究, 1997, 15(4):296-299.
- [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, 9(6):542-544.
- [4] 杜榕桓,王立伦,钱宗麟. 西藏古乡沟冰川泥石流堆积特征[C]//中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊. 北京:科学出版社, 1984.
- [5] 吕儒仁. 西藏泥石流与环境[M]. 成都:成都科技大学出版社, 1999.
- [6] 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.
- [7] 钟大赉,丁林. 青藏高原的隆起过程及其机制探讨[J]. 中国科学:地球科学, 1996, 26(4):289.
- [8] 程尊兰,朱平一,党超,等. 藏东南冰湖溃决泥石流灾害及其发展趋势[J]. 冰川冻土, 2008, 30(6):954-959.
- [9] 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):861-865.
- [10] 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.
- [11] 徐小飞,马东涛,何德伟,等. 贡嘎山地区泥石流形成的水热组合分析[J]. 山地学报, 2007, 25(4):431-437.
- [12] 余忠水,德庆卓嘎,马艳鲜,等. 西藏波密天摩沟“9·4”特大泥石流形成的气象条件[J]. 山地学报, 2009, 27(1):82-87.
- [13] 朱平一,何子文,汪春阳,等. 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.