

齐云龙, 邓明枫. 川藏公路波密段九绒沟泥石流形成机制研究[J]. 灾害学, 2019, 34(3): 123-127. [QI Yunlong and DENG Mingfeng. Triggering mechanism of debris flows in Jiurong valley in Parlung Zangbo, Southeastern Tibet [J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(3): 123-127. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.03.023.]

川藏公路波密段九绒沟泥石流形成机制研究*

齐云龙¹, 邓明枫²

(1. 核工业西南勘察设计研究院有限公司, 四川 成都, 610061; 2. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都, 610041)

摘要: 川藏公路波密段沿着帕隆藏布展布。帕隆藏布流域是我国海洋性冰川集中分布的地区, 也是泥石流等地质灾害的强活动区。因流域内冰川分布范围不一, 泥石流发生受气温的影响程度存在较大差异。帕隆藏布下游无冰川流域内的泥石流与气温无关, 如帕隆藏布下游的加玛其美沟泥石流, 但中游以上的泥石流却与气温有关。该文以帕隆藏布中上游九绒沟 2014-2015 年内的 4 次泥石流为例, 详细分析了泥石流暴发前的降雨过程, 并对降雨和气温在泥石流启动中的作用机制进行了分析。研究发现, 3 次泥石流仅由暴雨激发, 其作用机制与常规暴雨泥石流类似, 即由降雨径流侵蚀地表物质产流, 为“低温+暴雨”模式; 而 2014 年 8 月 18 日泥石流与迅速升高的气温关系密切, 为“高温+降雨”模式, 其作用机制在于气温升高导致土体内部冰颗粒快速消融从而放大土体活性, 降雨径流侵蚀湿润的活动性土体而迅速产生泥石流。二者的差异在于高温迅速放大了冰碛物的活性, 增加了表层土体的含水量, 从而降低了泥石流产生所需要的降雨阈值。

关键词: 藏东南; 泥石流; 形成机制; 降雨; 高温

中图分类号: X43; X915.5; P694 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2019)03-0123-05
doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.03.023

川藏公路是四川通往西藏最重要的陆路通道, 沿途穿越横断山脉、念青唐古拉山脉和喜马拉雅山脉等三大山系和长江支流、澜沧江、怒江和雅鲁藏布江等四大水系^[1]。沿途高山环绕, 峡谷深切, 是我国地形落差最为巨大的地区。川藏公路沿途穿越金沙江缝合带、澜沧江缝合带和班公怒江蛇绿岩缝合带, 穿越穿越龙门山地震带、康定-甘孜地震带、雅鲁藏布江地震带, 构造运动强烈, 地震活跃。

强烈的构造运动和巨大的地形落差造就了川藏公路沿途频繁发育的地质灾害, 其中以川藏公路波密段的地质灾害最为发育、类型最齐全且规模最为巨大, 涵盖了崩塌、滑坡、溜沙坡、泥石流等多个地质灾害类型, 其中的泥石流更是以成因复杂、规模巨大而著称。据统计, 然乌至培龙段的 271.4 km 内, 有泥石流沟 67 条, 平均 4 条/km^[2], 这些泥石流中涵盖了米堆光谢错冰湖溃决泥石流, 培龙沟冰川泥石流, 古乡沟泥石流和天摩沟冰川暴雨泥石流, 以及加玛其美沟暴雨泥石流^[2]。

多年来, 对流域内的冰川型泥石流进行了大量的研究, 发现其发生与气温升高引发的冰川变化有关, 其中米堆泥石流是由冰崩涌浪引起光谢错冰湖溃决^[2-3], 溃决洪水冲刷土体启动, 培龙沟泥石流由冰川跃动诱发^[2,4], 古乡沟泥石流由大规模冰崩诱发^[2,5], 天摩沟泥石流由冰川融水和降雨联合作用诱发^[6]。但是, 由于冰层面积的迅速减少, 少冰川流域内泥石流启动能否用暴雨泥石流理论^[7-8]进行解释尚需要探讨。研究发现, 帕隆藏布流域下游加玛其美沟海拔较低, 冬季冻融作用弱, 夏季常年气温偏高, 也是当地的暴雨区, 该流域内泥石流的发生用暴雨泥石流理论能得到很好的解释^[2]; 随着海拔升高, 帕隆藏布流域上游部分流域虽然没有冰川分布, 但源区土体的冻融作用十分显著, 其是否能影响泥石流的发生呢。本文针对这一问题, 选取帕隆藏布流域中上游的九绒沟泥石流为研究对象, 基于流域 2014-2015 年至今发生的 4 次泥石流, 分析泥石流暴发前后的气温和降雨条件, 并研究这种相应条件下的形成机制。

* 收稿日期: 2019-01-16 修回日期: 2019-04-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(41402283)

第一作者简介: 齐云龙(1982-), 男, 黑龙江望奎人, 高级工程师, 主要从地质灾害形成与防治技术研究. E-mail: qite2000@163.com

1 区域概况

1.1 区域背景

川藏公路波密段沿着帕隆藏布江干流展布,帕隆藏布江是雅鲁藏布江的一级支流,其干流发源于伯舒拉岭处的来古冰川,顶端海拔 4 900 m,途经 266 km 后到达与雅鲁藏布江汇口,落差 3 360 m,平均比降 1.26%。帕隆藏布干流为典型的“香肠式”河道,包含了然牛踏沟段、松宗兴空段和通麦段等多个峡谷地段,以及然乌湖、松宗、波密-古乡等多个宽谷地段。

区域位于印度板块和欧亚板块碰撞挤压作用的接触地区,喜马拉雅基底推覆构造体的北侧,受该推覆体的强烈挤压,帕隆藏布流域一带构造复杂,新构造运动强烈,地震活动频繁。据统计,对流域影响最大的地震为 1950 年发生在察隅县的 8.5 级大地震,而现在每年均有小规模地震发生。

青藏高原是一个巨大的台地,阻挡了从印度洋过来的暖湿气流,气流在高原边界处爬升时逐步冷却形成丰富的降水区,如在喜马拉雅山南坡的乞拉朋齐是降水最集中的地区。在西藏东南部,印度洋暖湿气流可以通过雅鲁藏布江及其支流向高原内部输送,在该地区形成一个舌状的多雨区^[9]。根据数据统计,帕隆藏布干流的降雨分配极不均匀,整个流域的年降雨量变化于 400~2 000 mm。丰富的降水加上巨大的地形差异在藏东南地区形成了我国面积最大的海洋性冰川区,根据遥感解译结果,1988 年,2002 年和 2010 年流域内的冰川面积分别为 3 556.72 km², 3 193.09 km² 和 2 381.47 km²,冰川面积年均退缩 25.97 km^[10]。

1.2 流域概况

九绒沟位于帕隆藏布流域中上游东侧(图 1),流域面积 7.36 km²,沟口海拔 3 173 m,最高海拔位于流域东侧,高程 5 296 m。主沟分为南北两支,沟道处比降 175‰~833‰;从沟口向源头延伸约 2.6~2.8 km 至 4 300 m 左右到源区坡面。流域源头区域为一个巨大的坡面,高陡的耸立,比降 578‰~1 250‰,且多集中在 850~950‰左右,即源区坡面多集中在 40°~43°。

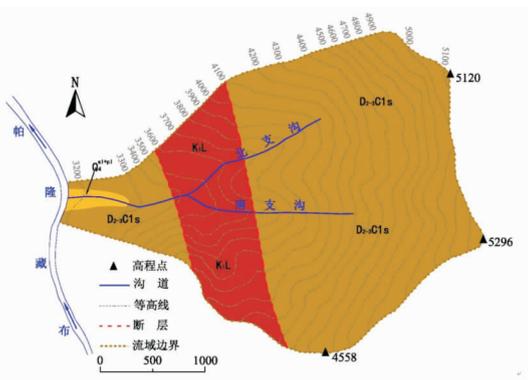


图 1 九绒沟流域地形地质概况

流域中游被两条平行的小断层穿过,将出露的岩性分为三部分,下部和上部为灰岩、白云岩并夹杂变质的砂岩和板岩,中部为黑云母二长花岗岩。流域岩性总体以硬质岩为主,导致源区能以高陡坡面存在。

根据近几年的观测,九绒沟所在位置的年降雨量约 700~800 mm,降雨多集中在每年 6~9 月。根据遥感影像,仅在流域沟口堆积扇上有乔木分布,主要为松木和青杠树;沟口堆积台地到海拔 4 200 m 为灌丛带,灌丛分布密度随海拔高度增加而递减;海拔 4 200 m 以上为裸露的基岩或岩屑堆(图 2),厚度估计在 2~4 m 以下。根据遥感影像,流域内无冰川分布,但由于流域源区在 5 000 m 左右,气温低,冬季降水入渗土体后结冰导致岩屑堆内的冰颗粒胶结作用显著,土体稳定性较好(图 3)。夏季中,土体中冰颗粒接收太阳辐射后消融,表层土体中的冰颗粒接收太阳辐射能力强,消融快;但气温梯度在土体中迅速衰减,导致深层土体中的冰颗粒因表层覆盖而消融缓慢。



图 2 九绒沟源区概况



图 3 九绒沟源区的冻结状物源

2 泥石流事件

据调查,1980 年代,九绒沟内已无冰川分布,泥石流多次暴发,但规模不大^[11]。由于九绒沟位于帕隆藏布 V 型谷地段,沟道出口与 318 国道的过水路面高程一致,道路下方即为帕隆藏布。现场考察时可见帕隆藏布在该位置明显被束窄,水流变得湍急。峡谷段水流侵蚀搬运能力强,表明九绒沟泥石流一次泥石流规模不大,但频率较高。

2010 年后最初几年,九绒沟泥石流较为平静,沟口由规整的浆砌块石护底。2014 年开始,泥石流几乎每年都会暴发,但规模总体不大(图 4)。由于

流域附近没有居民区, 只能根据过往车辆向路政部门报告时间, 导致泥石流暴发时间确定一直较为困难。经过多方收集, 最终收集到 2014 年后的 4 次泥石流, 其暴发的大致时间和大概规模见表 1。

表 1 九绒沟泥石流基本特征

序号	编号	时间	行流时间/min	规模/ m^3
1	DF1	2014 年 8 月 18 日 22: 30	25	3000 ~ 4000
2	DF2	2014 年 8 月 23 日 01: 30	10	800 ~ 1000
3	DF3	2015 年 8 月 4 日 23: 00	15	1500 ~ 1800
4	DF4	2015 年 8 月 20 日 09: 00	20	2000 ~ 2500



图 4 九绒沟泥石流堆积区

3 降雨过程分析

为了清晰的表现出泥石流发生前的激发降雨过程, 在给出的降雨过程线中, 需要合理设定降雨过程线的起点。对发生在 12: 00 以后的泥石流, 以当日的 0 点为起点; 对发生在 00: 00 ~ 12: 00 的泥石流, 以前 1 d 的 12: 00 为起点, 则泥石流起动时刻都位

于 24 h 降雨曲线的后半段。基于此种设定, 4 次泥石流发生前的降雨过程和累计降雨过程线见图 5。

根据泥石流暴发前的降雨历时和降雨强度(图 5), 4 次泥石流可以分为三类: ① 泥石流由短历时降雨激发, 累计降雨量很低; DF1 泥石流暴发前 1 h 内雨强很低, 仅 0.5 mm/h, 之后雨强增加到 4.5 mm/h, 但累计降雨量仅为 5.5 mm。② 泥石流由短历时降雨激发, 累计降雨量中等; DF3 暴发当日上午有明显的降雨过程, 泥石流暴发前 1 h 内无降雨, 但泥石流暴发前出现了暴雨, 雨强达到 6.5 mm/h, 累计降雨量 14.5 mm。③ 泥石流由长历时降雨激发, 累计降雨量较大。DF2 和 DF4 暴发前数小时内均为持续降雨过程, 但雨强差异较大, DF2 发生的激发降雨为 7 mm/h, 而 DF4 发生时的降雨量较小; 二者的累计降雨量均较高, 达到 30 ~ 50 mm 以上。

4 泥石流成因机制

DF1 的激发降雨仅为持续 1 h 雨强 4.5 mm/h 的降雨, 而其他 3 次泥石流暴发之前均出现过相近雨强但持续时间更长的降雨, 如 DF2 暴发之前有持续 1 h 雨强 5 mm/h 的降雨, DF3 暴发前持续 2 h 雨强 4 mm/h 的降雨, 而 DF4 暴发前有持续 3 h 雨强 4 ~ 4.5 mm/h 的降雨。但是, 这些降雨并未激发泥石流, 而是在更长时间的降雨后发生的, 这显示, 除了降雨作用, DF1 的发生存在另外的影响因素, 比如气温过程。这 4 次泥石流也可以据此分为 2 类。

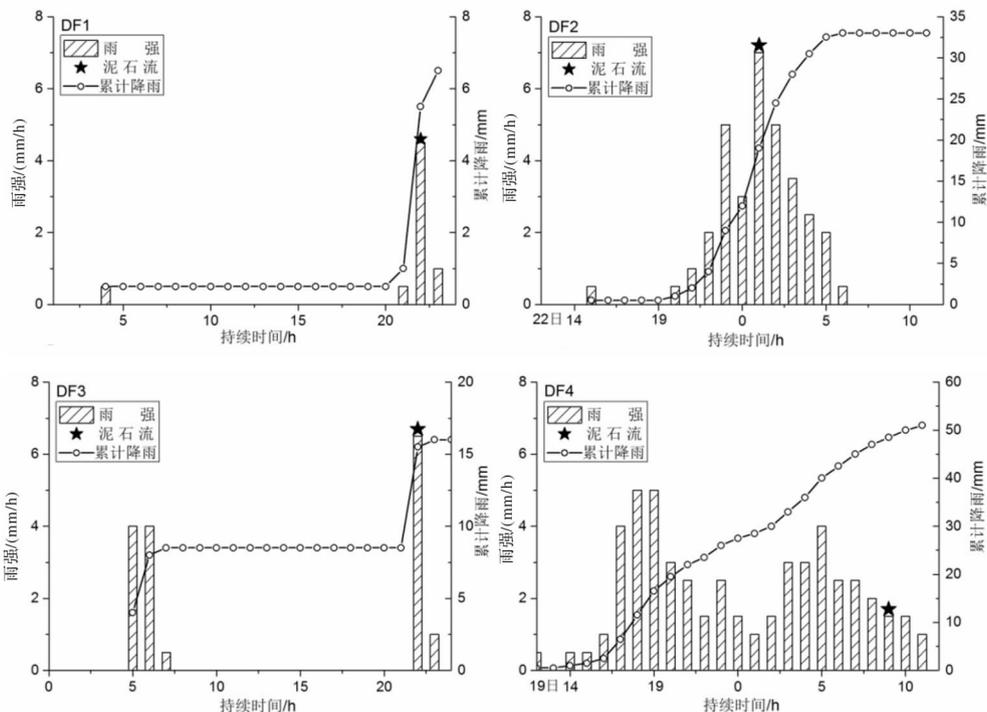


图 5 4 次泥石流暴发的降雨过程线

4.1 “低温 + 暴雨”模式

九绒沟源区海拔高, 风化作用以物理风化为主, 化学风华弱; 源区基岩风化后形成的岩屑难以在陡坡位置堆积, 转而沿基岩表面滑动, 并在缓坡和沟道内堆积。由于基岩裸露面积大, 降雨在基岩表面难以下渗, 转而直接形成地表径流。由于源区坡度大, 径流侵蚀能力强, 径流沿基岩表面进入岩屑堆, 首先在岩屑堆顶部侵蚀细颗粒形成小股泥石流, 进而沿运动过程中进一步放大从而转化为泥石流。

暴雨起动泥石流机制的研究较多, 其主要受控于径流量、坡度和表面土体的颗粒组成等因素^[8,12], 泥石流多发生在丰富的降雨过程中, 如九绒沟泥石流的 DF2 和 DF4 均由长历时降雨激发, 累计降雨量达到 30 ~ 50 mm 以上, 而 DF3 由最高的峰值降雨激发, 前期也有一定的降雨量, 累计降雨也达到 15 mm。

4.2 “高温 + 小雨”模式

DF1 暴发前 1 h 开始降雨, 峰值雨强为 4.5 mm/h。相比而言, DF1 的激发降雨比其他三场泥石流(DF2、DF3 和 DF4)的峰值雨强都低, 但泥石流规模却较其他场次更大, 这与暴雨泥石流规模受降雨强度和持续时间影响的研究成果相悖^[13-14]。现场调查发现, 负责道路清运的武警同志表示泥石流当天下午异常炎热, 高温解冻可导致源区冻结的土体迅速活化。为此, 笔者收集了本次泥石流暴发前后的降雨和气温过程, 并进行分析。

为了分析气温在此次泥石流中的作用, 需要收集距离泥石流发生位置最近的气象站的气温数据, 最终收集到了距离九绒沟沟口 36 km 的米堆光谢错冰湖湖岸的气温数据(高程 3 850 m)。由于九绒沟泥石流物源主要存在于海拔 4 200 m 以上的裸露带, 按照几何运算, 求得九绒沟 4 200 m 以上部分的质心点位于海拔 4450 m, 按照帕隆藏布地区通用的气温垂直递减率 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ^[15] 换算得到源区位置的日平均气温和最高气温过程(图 6)。同时, 图 6 也给出了在这一时段内每 1 d 内的最大 1 h 降雨强度。

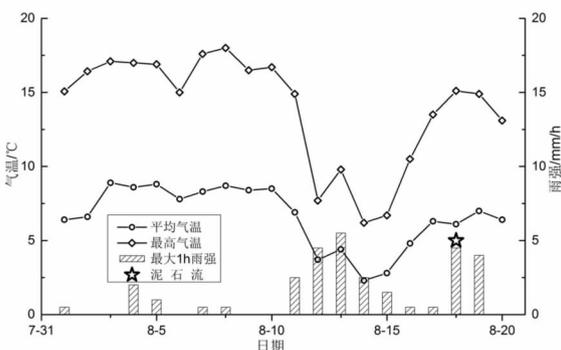


图 6 DF1 暴发前后九绒沟源区的气温和峰值降雨过程

根据图 6 可以看出, 2014 年 8 月 18 日暴发前, 气温有显著升高, 在叠加短时降雨(4.5 mm/h)作用后, 泥石流发生了, 其控制性作用为“高温 + 降雨”, 这种机制可表述为:

(1) 九绒沟源区海拔高, 岩屑堆内孔隙大, 孔隙内富含冰颗粒后使得土颗粒粘结成整体, 强度较高^[16], 前期气温导致表层消融但深度依然处于冻结状态;

(2) 泥石流发生前期, 气温偏低, 流域源区的平均气温接近 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 夜晚的温度应在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下, 白天降雨残留在表层土体中的水分逐渐转化冰颗粒, 增加颗粒间的胶结与强度, 降低土体活动性, 但气温在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近波动, 表层土体内新产生的冰颗粒的胶结左右有限;

(3) 随后, 气温迅速升高, 表层土体内新产生的冰颗粒逐渐消融, 颗粒粘结强度降低^[16], 土体活动性增加, 且孔压和含水量增加^[17]; 特别是受冰颗粒胶结而具有陡坡的岩屑堆在消融作用下可能只能滑动并产流;

(4) 表层土体的消融使土体含水量偏高, 源区而来的降雨地表径流在经过解冻后湿润表层土体时侵蚀并产生泥石流。

相比而言, 虽然 8 月初一直高温, 但降雨强度较低, 说明只靠源区冻结土体的消融尚不足以引发泥石流, 或即使引发泥石流, 其规模也很小, 以堆积为主。中旬以后, 虽然雨强显著增加, 但气温降低的非常显著, 最低平均气温降低到 $2.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 若按照气温垂直递减率 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, 则海拔 4 600 m 以上的平均气温已降低到 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下; 考虑到冻结土体表层由未冻土覆盖, 其内部温度可能更低, 土体尚处于冻结状态, 活动性低, 因此, 即使雨强较高, 也没有泥石流发生。

5 结论

藏东南帕隆藏布流域是我国海洋性冰川和泥石流集中分布的地区, 泥石流的发生往往受降雨和气温的双重影响, 其受气温的影响程度主要与冰川分布面积有关。而在一些没有冰川分布的高海拔流域, 气温仍然对泥石流发生具有重要影响。

帕隆藏布流域中上游的九绒沟 2014 - 2015 年的 4 次泥石流的起动机制可分为 2 类。3 次泥石流直接由暴雨激发, 表现为持续降雨与较高的累计降雨量, 起动方式为径流冲刷起动泥石流, 其作用机制与常规的暴雨泥石流相同, 为“低温 + 暴雨”模式。2014 年 8 月 18 日的泥石流发生在气温回升以后, 为“高温 + 降雨”模式, 其机制为: 高温导致土体中冰颗粒消融而转化为湿润的活动性物源, 降雨径流在经过湿润活动性物源时侵蚀土体从而产生泥石流。由于高温导致土体活性显著增加且土体处于湿润状态, 在叠加后期短历时低累计降雨后即可产生泥石流。

参考文献:

- [1] 姚令侃, 邱燕玲, 魏永幸. 青藏高原东缘进藏高等级道路面临的挑战[J]. 西南交通大学学报, 2012, 47(5): 719-734.
- [2] 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 西藏自治区交通厅科学研究所. 西藏泥石流与环境[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1999b.
- [3] 李德基, 游勇. 西藏波密米堆冰湖溃决浅议[J]. 山地学报, 1992, 10(4): 219-224.
- [4] 朱平一, 程尊兰, 游勇. 川藏公路培龙沟泥石流输砂堵江成因探讨[J]. 自然灾害学报, 2000, 9(1): 80-83.
- [5] 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.
- [6] DENG M, 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 & Earth Systemences*, 2017, 17(3): 345-356.
- [7] Iverson R M., Reid M E, LaHusen R. G. Debris flows mobilization from landslides [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 1997, 25: 85-138.
- [8] Tognacca C, Bezzola G R and Minor H E. Threshold criterion for debris-flow initiation due to channel bed failure[C]// *Proceedings Second International Conference on Debris Flow Hazards Mitigation, Prediction and Assessment*, edited by: Wieczorek, G. F., Taipei, 2000: 89-97.
- [9] 高登义. 雅鲁藏布江水汽通道考察研究[J]. 自然杂志, 2008, 30(5): 301-303.
- [10] 刘洋. 基于RS的西藏帕隆藏布流域典型泥石流灾害链分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
- [11] 罗德富, 毛济周, 朱平一, 等. 川藏公路南线(西藏境内)山地灾害及防治对策[J]. 1996.
- [12] 王洋. 沟床物质起动力形成泥石流的临界条件[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
- [13] 庄建琦, 崔鹏, 葛永刚, 等. 降雨特征与泥石流总量的关系分析[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(4): 77-83.
- [14] 郭晓军, 李泳, 崔鹏. 降雨对泥石流源地土体活动的指数式放大效应[J]. 山地学报, 2013, 31(4): 406-412.
- [15] 李巧媛, 谢自楚. 高原区气温垂直递减率的分布及其特点分析——以青藏高原及其周边地区为例[J]. 石河子大学学报(自科版), 2006, 24(6): 719-723.
- [16] Davies M C R, Hamza O and Harris C. The effect of rise in mean annual temperature on the stability of rock slopes containing ice-filled discontinuities [J] *Permafrost Periglac.*, 2001, 12: 137-144.
- [17] Bommer C, Fitze P and Schneider H. Thaw-consolidation effects on the stability of Alpine talus slopes in permafrost [J] *Permafrost Periglac.*, 2012, 23: 267-276.

Triggering Mechanism of Debris Flows in Jiurong Valley in Parlung Zangbo, Southeastern Tibet

QI Yunlong¹ and DENG Mingfeng²

(1. Nuclear Industry Southwest Survey and Design Institute Co., LTD, Chengdu 610061, China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract: The Sichuan-Tibet highway stretches along with the Parlung Zangbo river, where the temperate glacier and debris flows are highly concentrated. As the distribution of glacier is uneven in each catchment, debris flows are more or less affected by air temperature which enhances glacier retreat. In the downstream of Parlung Zangbo, the occurrence of debris flows in non-glacier catchment is found to be not correlated with air temperature fluctuation, such as which in Jiama valley; however, debris flows in the middle and upper Parlung Zangbo could be affected by air temperature. In this paper, 4 debris flows occurred in 2014~2015 in Jiurong Valley of the upper Parlung Zangbo are applied to analyze the rainfall process before debris flows and the effect of rainfall and air temperature on debris flow occurrence. The research shows 3 debris flows were generated by rainfall and the mechanism is similar with the normal storm induced debris flows, which is “low air temperature + storm” type. Debris flows occurrence on Aug. 18th, 2014 is highly correlated with the mushrooming air temperature. The effect of “high air temperature + rainfall” lied in soil activity was greatly amplified because the mushrooming air temperature drove internal ice particle ablation and a surface layer with high water content, resulting into less rainfall threshold required to generate surface runoff and the following debris flows.

Key words: Southeastern Tibet; debris flows; triggering mechanism; rainfall; temperature