

西藏察隅县竹瓦根镇地质灾害形成机制与成灾模式浅析

万忠焱^{1,*}, 王茂丽², 周鹏¹

(1. 西藏地勘局地热地质大队, 拉萨 850000; 2. 西藏地勘局第六地质大队, 拉萨 851400)

摘要: 地质灾害是一种危害性大、破坏性强的自然灾害, 本文针对竹瓦根镇发育的 9 处泥石流的形成条件、启动过程和 6 处崩塌的形成条件等因素对泥石流以及崩塌的成灾模式进行总结, 并对竹瓦根镇地质灾害链的诱发因素及灾害链成灾模式进行分析, 最终对整个竹瓦根镇地质灾害形成机制及成灾模式进行讨论分析。

关键词: 竹瓦根镇; 泥石流; 崩塌; 灾害链; 形成机制; 成灾模式

DOI: 10.48014/cesr.20221030001

引用格式: 万忠焱, 王茂丽, 周鹏. 西藏察隅县竹瓦根镇地质灾害形成机制与成灾模式浅析[J]. 中国地球科学评论, 2022, 1(2): 10-20.

西藏自治区察隅县地处西藏自治区东南部, 与缅甸、印度接壤, 是西藏自治区重要的边境县之一^[1], 竹瓦根镇隶属察隅县, 为县城所在地。受地壳运动不断抬升的影响, 加之桑曲的强烈侵蚀作用形成以高山峡谷为主的地形地貌, 具山高、谷狭、坡陡的特点, 强烈的新构造运动、地震因素以及相较西藏其他地区更加充沛的降雨导致竹瓦根镇周边地质灾害十分发育。经调查竹瓦根镇及周边共发育有 15 处地质灾害, 其中小型规模共计 9 处(泥石流 8 条、崩塌 1 处), 中型规模 3 处(泥石流 1 条、崩塌 2 处), 大型崩塌 2 处, 特大型崩塌 1 处, 共计威胁 374 户 2607 人, 受威胁资产约 40863 万元。本文基于竹瓦根镇及周边 1:1 万精细化调查项目, 通过对竹瓦根镇泥石流、崩塌及滑坡的形成机制与成灾模式的浅析, 综合分析其灾害链的形成机制, 对竹瓦根镇地质灾害防治及察隅县城后期总体规划具有指导作用, 对巩固边防稳定, 加强边防建设具有重要意义。

1 地质背景

竹瓦根镇位于冈底斯—喜马拉雅构造区、冈底

斯—念青唐古拉陆块、伯舒拉岭岩浆弧, 总体构成北西—南东构造线的复杂造山带, 各孟弄巴断裂(F11)及察隅断裂(F12)(图 1)在察隅县南部交汇。同时, 受地壳运动不断抬升加之桑曲的强烈侵蚀作用形成高山峡谷地形, 具山高、谷狭、坡陡的特点, 主要分为冰川地貌、构造剥蚀山地地貌、河流侵蚀堆积地貌及山麓斜坡堆积地貌。出露地层(图 1)主要为各类第四系(Q)、上石炭一下二叠统来姑组(C₂P₁l)变质砂岩及砂质板岩及中生代晚白垩世($\eta\gamma\beta K_2$)侵入岩花岗岩。竹瓦根镇区域范围内新构造运动比较强烈, 主要表现为共轭走滑断裂, 老构造重新活动使高原大幅度隆升, 同时受北西向、近南北向活动断裂的制约, 使隆升产生差异性, 形成了一系列的高山、断块山地和峡谷地貌, 差异性抬升形成特殊的第四纪地质环境, 使之成为崩塌、滑坡、泥石流多发区。较强烈的地震仍可能阶段性发生, 不但成为区内的一大灾害, 而且还不断孕育地质灾害, 甚至形成灾害链。

* 通讯作者 Corresponding author: 万忠焱, 654535420@qq.com

收稿日期: 2022-10-30; 录用日期: 2022-11-19; 发表日期: 2022-12-28

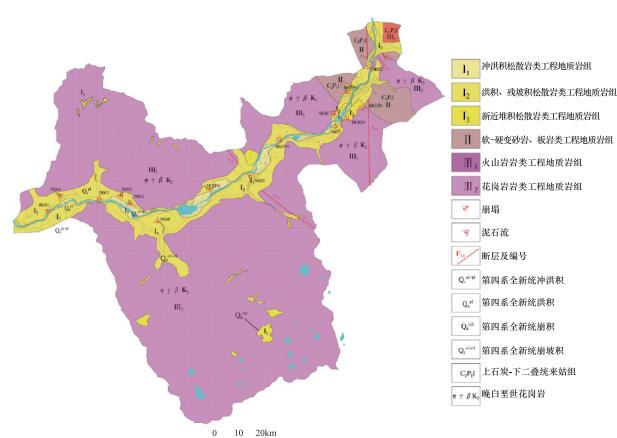


图 1 竹瓦根镇及周边工程地质简图

Fig. 1 Sketch map of engineering geological of Zhuwagen Town and its surrounding areas

2 地质灾害形成机制

2.1 泥石流形成基本条件

在西藏东南部地区泥石流是分布面积最广、发生频率最高、危害性最大的地质灾害,沿G317国道、G318国道、G214国道、S201省道、S306省道等均有分布^[2]。泥石流的形成因素是错综复杂的,一般而言,泥石流形成有三个基本条件,即地质条件、地形条件和水源条件,三大条件对泥石流形成有着重要的作用,缺一不可^[3]。

2.1.1 充沛的水源

据现场调查,竹瓦根镇共发育9处泥石流(表1),且发生时间均在雨季。竹瓦根镇春季冰雪融水流量小,一般不会成为引发泥石流的水源;周围地下水不丰富,不构成引发泥石流的主要水源;据遥感解译及分析,周边冰湖基本稳定,溃决可能性小。

因此,暴雨形成的地表径流是引发泥石流的主要水源,暴雨是泥石流的主要激发因素。

受印度洋暖湿气流的影响,察隅县呈现出独特的亚热带气候,降雨充沛,降水量远远高于青藏高原其他地区^[1],且雨季开始早、结束晚,持续时间长,降水多。每年3月进入雨季,到10月雨季结束,多年平均降水量为801.5mm。降水量的月际分布呈现典型的“双峰型”,降水在3月中旬到4月出现一个高峰,7月至8月出现第二次高峰,日最大降水量为110mm,出现在2010年4月24日;最长连续降水日数达25天。降雨持续时间长,降水多成为竹瓦根镇泥石流的主要诱发因素。

2.1.2 丰富的物质来源

竹瓦根镇高山顶部气候高寒,寒冻风化作用十分强烈,局部岩体较为破碎,裂隙受其影响不断扩大加深,并产生新的风化裂隙,岩体完整性遭受破坏,进而崩落于沟道并解离成碎片、碎块及砂粒。广泛而持续的风化及运移作用,使得沟谷内坡积、残坡积及崩积松散碎屑物质分布较为广泛,构成了泥石流活动的物质基础。

2.1.3 有利的流域形态及沟床纵坡

竹瓦根镇泥石流多为山谷型泥石流流域特征,流域呈犁形、勺形或呈圈椅状,在平面上表现为两头大、中间小的形态特征。另外,沟床的曲直程度往往影响到泥石流的运动状态,顺直的沟床,泥石流一次排出量大,造床作用明显;而弯道多的沟床,或坡度突然急剧变缓,多形成泥石流运动中的阻塞地带,揭底冲刷作用更加强烈;沟床的纵坡降大小也影响着泥石流的形成及推动速度,泥石流沟床纵坡降在33%~994%。

表 1 竹瓦根镇泥石流地形特征统计表

Table 1 Statistical table of topographic characteristics of debris flow in Zhuwagen Town

编号	名称	流域面积(km ²)	沟顶高程(m)	沟口高程(m)	主沟长(km)	平均纵坡降(%)
N064	竹瓦根镇扎拉村阿森组泥石流	0.44	2973	2150	1.02	810
N063	上察隅镇路-下察隅镇路13#泥石流	14.6	4700	2152	5.75	441
N062	竹瓦根镇扎拉村扎拉组1#泥石流	0.27	3276	2374	0.91	994
N061	竹瓦根镇扎拉村扎拉组2#泥石流	1.06	3802	2180	2.21	734
N060	竹瓦根镇扎拉村扎给组泥石流	47	4815	2345	6.4	336
N059	竹瓦根镇扎拉村扎给组2#泥石流	1.8	4186	2439	2.4	728

续表

编号	名称	流域面积(km ²)	沟顶高程(m)	沟口高程(m)	主沟长(km)	平均纵坡降(‰)
N058	竹瓦根镇学尼村泥石流	11.92	4615	2350	7.17	367
N057	竹瓦根镇温泉宾馆泥石流	0.53	3815	2364	1.9	763
N056	竹瓦根镇县城拟建新区泥石流	0.47	3560	2388	1.44	849

2.1.4 新构造运动及地震

察隅县地处雅鲁藏布江缝合带和班公错—怒江结合带之间,发育一系列褶皱和断裂构造,地质情况复杂,由于喜马拉雅褶皱带不断上升,地质运动活跃,新构造运动及地震频发^[4]。新构造运动及地震是松散物质的缔造者和泥石流发生的催化剂。竹瓦根镇新构造运动主要表现为:地壳强烈的差异性隆升运动,使地形高差不断加大,水系迅速发育,河流下切作用增强,地形坡度加大,形成了对泥石流有利的沟谷形态及物质来源,以及水动力条件;而地震作用则破坏了山体的稳定,加速了固体物质的积累和转运过程,还会直接激发泥石流。

1950年8月15日在西藏东南部今林芝市墨脱、察隅县一带发生里氏8.6级大地震,这是新中国成立以来中国大陆地区发生的最强烈的地震。强烈的震动造成大规模的山崩、地裂、滑坡、泥石流,震中区多处发生“地爆”现象,导致江河堵塞、树木震倒、温泉消失、瀑布荡然无存,引起震区内大面积房屋倒塌,使震区人民遭受巨大灾难;2017年10月1日西藏林芝市察隅县发生3.7级地震,震源深度7km,未造成人员伤亡和财产损失;2017年11月18日06时34分,西藏林芝市米林县发生6.9级地震,震源深度10km,共引发余震300多次。

2.2 泥石流启动过程

据调查,竹瓦根镇泥石流灾害分为泥石流、水石流等两种类型,其中以水石流型为主。泥石流类共发育3处,占泥石流灾害总数的33.3%。固体冲出物由土、砂、石混杂组成,颗粒差异较大,典型泥石流类如竹瓦根镇学尼村泥石流和竹瓦根镇扎拉村扎拉组2号泥石流;水石流类共发育6处,固体冲出物质由砾石、块碎石及砂砾等组成,多以大颗粒块碎石为主。9处泥石流流域内主沟道整体纵坡降均较大,平均669‰,其中700‰~1000‰共7条,占比77.8%,陡立的沟道纵坡能提供充足的水动力条

件,以启动沟道内大粒径块碎石形成灾害。据调查,竹瓦根镇泥石流均为暴雨沟谷型泥石流,泥石流沟物源启动并形成泥石流一般要经历坡面物源启动→沟道汇聚堆积→揭底侵蚀三个阶段。

2.2.1 坡面松散体启动

竹瓦根镇泥石流沟坡面物源的启动主要包括松散土体的失稳启动及破碎岩体的崩落启动两种类型。

松散土体启动:暴雨或持续降雨入渗导致土质斜坡非饱和土体中孔隙被水充填,基质吸力逐渐减小或丧失,土体潜在破坏面上孔隙水压力增高,随孔隙水压力的不断增大,坡积土由于有效应力降低而出现剪切变形,雨水进一步入渗,形成贯通剪切面,导致土体失稳破坏,并随洪水启动。

破碎岩体崩落启动:竹瓦根镇周边沟谷切割深,山体坡度陡,寒冻、风化等作用十分强烈,局部岩体较为破碎。暴雨条件下,在坡面冲刷、动水压等作用下破碎岩体易脱离母体并崩落,部分堆积于沟道内造成沟道堵塞,部分随洪水启动参与泥石流活动。

2.2.2 沟道汇聚堆积

按照水动力条件泥石流分为暴雨型、溃发型、冰雪融水型、泉水型等4类。据调查,竹瓦根镇发育的9处泥石流沟形成的主要水动力条件为暴雨,均属于暴雨型泥石流,在暴雨冲刷、流水掏蚀等作用下,沟道两侧斜坡破碎岩体及松散物质崩塌、滑移至沟道或平缓区堆积,坡面松散物质到达沟道后一部分被沟道洪流携带走,其余残余堆积于沟道,成为泥石流物源。

2.2.3 揭底启动

当沟道累积的残余松散物质达到一定体量时,堆积体后缘沟道汇流形成的沟道流量达到一定数值,沟道堆积物会在揭底侵蚀作用下形成相对高容重的泥石流流体,并向下游运动,即“消防水管效

应”,最后冲出沟口造成灾害。

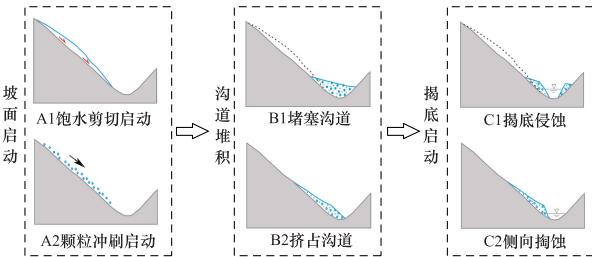


图 2 泥石流形成过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of formation process of debris flow

2.3 泥石流成灾模式

泥石流地质灾害根据其形成的自然及地质背景条件,固体物源的类型和分布,泥石流的启动条件、运动特征、堆积特征以及危害情况可分为不同类型成灾模式。

2.3.1 “崩滑-碎屑流-泥石流”模式

竹瓦根镇范围内以学尼村泥石流(图3A)为例,在地震及其他因素的影响下,沟域中上部引发高位崩塌或滑坡从而形成碎屑流,顺沟道流动堆积,将沟床整体抬高,堆积终端形成陡坎(坡)。这类堆积物厚度一般数十至百余米不等,结构疏松,分选性差,堆积最长可达数千米。后期强降雨,洪水以揭底侵蚀、侧蚀、溯源侵蚀等方式裹挟物源形成泥石流,这类泥石流物源量丰富,“拉槽”扩展特征明显,具有洪水向泥石流的转换过程,多以大型、特大型泥石流为主。我们将这类泥石流成灾模式划分为“崩滑-碎屑流-泥石流型”,这类泥石流主要特点为物源量极其丰富,初期由洪水向泥石流转换,泥石流规模逐渐增大。竹瓦根镇该类型泥石流以学尼村泥石流及上察隅镇路-下察隅镇路13#泥石流最为典型。

2.3.2 “堵溃”模式

在竹瓦根镇以南的县城拟建新区泥石流(图3B)在地震及风化卸荷等其他因素影响下,滑坡、崩塌体堆积于沟道内,形成堰塞体,一般降雨形成的沟水多从坝体渗漏,而固体物质均被挡在坝内。在强降雨条件下,洪水迅速汇集,形成堰塞湖,从坝顶溢出,并产生“拉槽”“管涌”等现象,最终溃决,暴发泥石流。我们这类泥石流成灾模式划分为“堵溃



图 3 竹瓦根镇泥石流特征图

Fig. 3 Characteristics of debris flow in Zhuwagen Town

型”泥石流。

这种泥石流的特点是溃决后的泥石流规模放大、流速快、破坏力强,其后再发生的泥石流一般规模渐小;水流(水石流)转化为泥石流,泥石流形成初期,堰塞体上游沟道内多以洪水或水石流为主,待堰塞体溃决后,大量物源补充进来,进而转化为泥石流;堰塞体溃决后泥石流的持续特征明显,堰塞体溃决后,两侧斜坡上的崩滑体失去支撑,不断下滑补充物源,泥石流将持续很久。

竹瓦根镇范围内纵坡陡、流域小的泥石流沟成灾类型基本属于该模式,除竹瓦根镇县城拟建新区泥石流外,扎拉村扎拉组1#、2#泥石流及扎拉村阿森组泥石流也属于该类型泥石流。

2.3.3 “坡面型”模式

竹瓦根镇温泉宾馆泥石流(图3C),在前期降雨充分的条件下,松散土体内部饱水,地下水变成有压水流,同时表层根系网状结构或土体表层硬壳结构受到破坏,松散土体饱水后骨架变形、塑化、液化后发生破坏最终形成泥石流。我们将这种泥石流成灾模式划分为“坡面型”泥石流。

这种泥石流的特点是:一般发育在坡度较陡($20^{\circ}\sim 40^{\circ}$),坡面较长,且较为平整,坡积层较薄(<3m),下浮基岩透水性较差的斜坡上;坡面型泥石流无明显主沟道,无明显流通区、形成区与堆积区,沟短坡陡,规模较小,流域面积一般较小,堆积物多为一次性搬运;在坡面泥石流发生时,由于土体结构

性破坏,土体在坍滑过程中形成下挫、上拉,顺坡面下滑,无固定流路,不会在同一部位重复发生,随机性大,可知性低。

在竹瓦根镇范围内“坡面型”泥石流只在竹瓦根镇温泉宾馆后山发育。

2.3.4 泥石流灾害承载模式统计

竹瓦根镇内发育泥石流 9 处(表 2),根据统计,“崩滑-碎屑流-泥石流型”型泥石流有 3 处,“堵溃”型泥石流 5 处,“坡面”型泥石流 1 处。

表 2 竹瓦根镇泥石流特征及成灾模式统计表

Table 2 Statistics of debris flow characteristics and disaster mode in Zhuwagen Town

编号	名称	规模	易发性	成灾模式
1	竹瓦根镇扎拉村阿森组泥石流	小型	轻度易发	“堵溃”型
2	上察隅镇路-下察隅镇路 13# 混石流	小型	易发	“崩滑-碎屑流-泥石流”型
3	竹瓦根镇扎拉村扎拉组 1# 泥石流	小型	轻度易发	“堵溃”型
4	竹瓦根镇扎拉村扎拉组 2# 泥石流	小型	轻度易发	“堵溃”型
5	竹瓦根镇扎拉村扎给组泥石流	小型	轻度易发	“崩滑-碎屑流-泥石流”型
6	竹瓦根镇扎拉村扎给组 2# 泥石流	小型	轻度易发	“堵溃”型
7	竹瓦根镇学尼村泥石流	中型	易发	“崩滑-碎屑流-泥石流”型
8	竹瓦根镇温泉宾馆泥石流	小型	轻度易发	“坡面”型
9	竹瓦根镇县城拟建新区泥石流	小型	轻度易发	“堵溃”型

3 崩塌形成机制与成灾模式

3.1 崩塌形成基本条件

地形地貌、地层岩性与地质构造是崩塌形成的基本条件,而降水、地下水作用、地震作用、风化作

用以及人类工程活动对崩塌的形成发展具有重要的促进作用^[1]。竹瓦根镇范围内共发育有 6 处崩塌(表 3),主要发育于花岗岩地区,个别发育于变质砂岩及松散堆积斜坡地段。根据现场调查结果来看,崩塌发育主要受地形地貌、斜坡地层岩性、地质构造以及外营力作用等综合因素影响形成。

表 3 竹瓦根镇崩塌基本特征情况表

Table 3 Basic Characteristics of collapse in Zhuwagen Town

编号	名称	分布高程(m)	斜坡坡度(°)	斜坡坡向(°)	地层岩性
B028	察隅县城-古玉乡 10# 崩塌	2400	80	315	花岗岩
B029N	竹瓦根镇嘎巴村下嘎巴组崩塌	2800	75	135	板岩
B030	上察隅镇路-下察隅镇路 3# 崩塌	2150	67	121	碎石土
B055N	竹瓦根镇吉公社区通噶摩崖造像崩塌	3625	48	300	花岗岩
B056N	竹瓦根镇吉公社区荣辉电焊部崩塌	2600	55	320	花岗岩
B057N	竹瓦根镇学尼村深圳龙岗吊桥崩塌	2305	72	320	块碎石土

3.1.1 地形地貌

陡峭的地形是崩塌发育的基础。竹瓦根镇受桑曲河流强烈侵蚀作用,河谷两岸形成高陡的地形结构,相对高差达 2790 余米,重力卸荷作用强,为危岩体崩落提供了良好的临空条件及势能场。

3.1.2 地层岩性

竹瓦根镇斜坡坡表出露基岩主要为花岗岩及砂板岩等较硬岩-硬岩,具有较大的抗剪强度及抗风化能力,形成的自然斜坡高陡,岩体在冻融、风化等作用下,易发生脆性破坏,为边坡变形破坏提供了物质基础;斜坡下侧及坡脚沿桑曲有大量第四系堆

积体分布,结构较为松散,在坡体结构遭到破坏条件下,易诱发崩塌灾害。

3.1.3 节理裂隙

构造裂隙、节理的发育,破坏了岩体完整性,并对斜坡岩体变形破坏起控制性作用。当岩体重力卸荷作用大于岩体强度抗力作用时,由于岩体内部应力调整,节理、裂隙等软弱结构部位将发生位移变形,不但岩体中的节理、裂隙会扩展,新的裂隙也将发生、发展,加之其他因素的影响,边坡将逐步变形进而失稳破坏。

3.1.4 其他自然因素

岩石的强烈风化、裂隙水的冻融、植物根系的楔入等,都能促使斜坡岩体发生崩塌现象。但大规模的崩塌多发生在暴雨、久雨和强震之后。这是因为降雨渗入岩体裂隙后,一方面会增加岩体的重量,另一方面能使裂隙中的充填物或岩体中的某些软弱夹层软化,并产生静水压力及动水压力,使斜坡岩体的稳定性降低;或者由于流水冲掏坡脚,削弱斜坡的支撑部分等,都会促使斜坡岩体产生崩塌现象。地震能使斜坡岩体突然承受巨大的惯性荷载,因而往往能促成大规模的崩塌。

3.1.5 人类工程活动

人类不合理的工程活动,如公路路堑开挖过高、开挖坡度过陡,也常引起边坡发生崩塌。由于开挖,导致岩体中软弱构造面暴露,使部分被切割的岩体失去支撑,引起崩塌;或土质斜坡开挖打破原始坡体应力平衡,对坡体结构造成了一定破坏,引起崩塌。此外,如坡顶弃方荷载过大或不妥当的爆破施工,也常促使斜坡发生崩塌现象。

3.2 崩塌破坏成灾模式

据不同的斜坡结构特征,竹瓦根镇范围内崩塌的破坏成灾模型主要有:滑移式、倾倒式和坠落式崩塌三类。

3.2.1 滑移式崩塌

桑曲两侧支沟沟道中、下游两岸土质斜坡分布区,坡脚受沟内洪水长期掏蚀,导致斜坡形态及应力状态的改变,在自身重力及降雨入渗等条件下斜坡整体失稳发生崩塌现象,我们将这种崩塌破坏成

灾模式划分为滑移式崩塌。以竹瓦根镇吉公社区荣辉电焊部崩塌(图4)为例,由于地质构造及河流侵蚀作用,在桑曲东南岸形成高陡岩质边坡,受内外营力作用影响,岩体节理裂隙发育,多被切割为块状、碎块状,且发育一组中陡倾坡外控制性结构面,在重力及水动力等作用下块体沿中陡倾坡外结构面向临空面滑移并崩落。

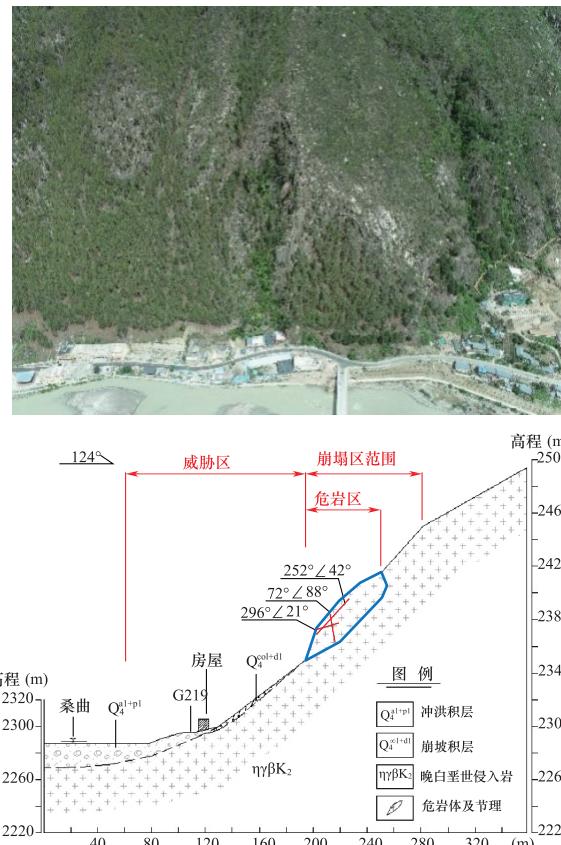


图4 吉公社区荣辉电焊加工部崩塌及剖面图

Fig. 4 Collapse and profile of Ronghui electric welding processing department in Jigong Community

3.2.2 倾倒式崩塌

以竹瓦根镇嘎巴村下嘎巴组崩塌(图5)为例,由于构造应力作用,在桑曲西北岸察隅县幼儿园北侧陡崖发育两组近垂直相交近的陡立结构面,将岩体竖向切割,且基岩岩体多有突悬现象及孤峰,在自重长期作用、风化、冻融及水动力等作用下,节理裂隙逐渐扩张,一旦拉应力超过连接处岩体抗拉强度,拉裂缝将会迅速向下扩展,最终导致突出岩体沿陡立结构面向临空面倾倒式破坏崩落,我们将其划分为倾倒式崩塌。

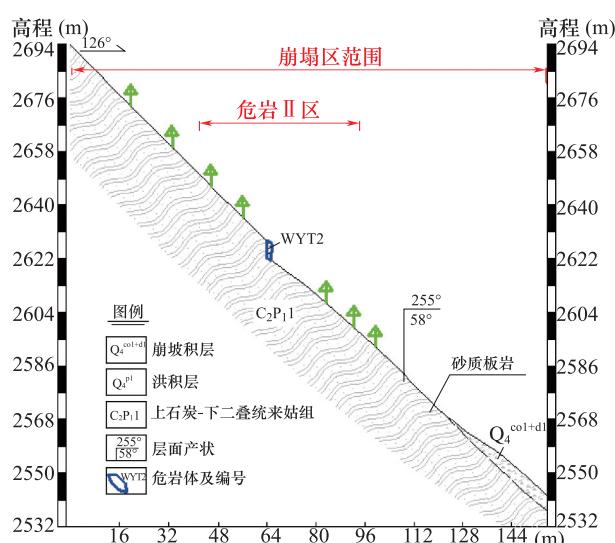
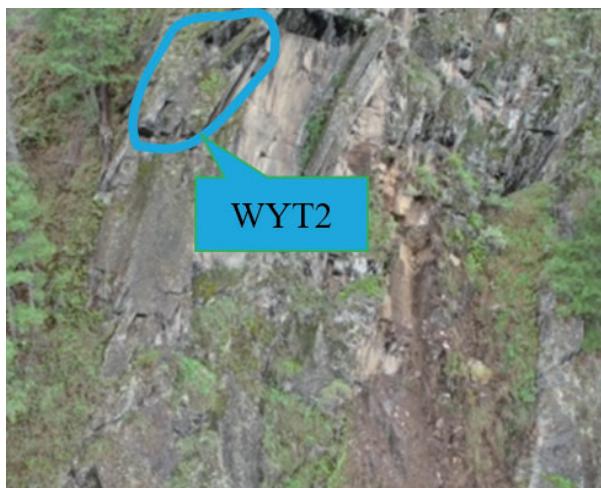


图 5 竹瓦根镇嘎巴村下嘎巴组崩塌及剖面图

Fig. 5 Collapse and profile of formation in Xiagaba Group, Gaba Village, Zhuwagen Town

3.2.3 坠落式崩塌

察隅县城—古玉乡路 10 # 崩塌(图 6)紧邻 G219 国道,在 G219 国道修建过程中对其斜坡坡脚进行开挖,导致道路内侧地形陡立,局部已形成凹岩

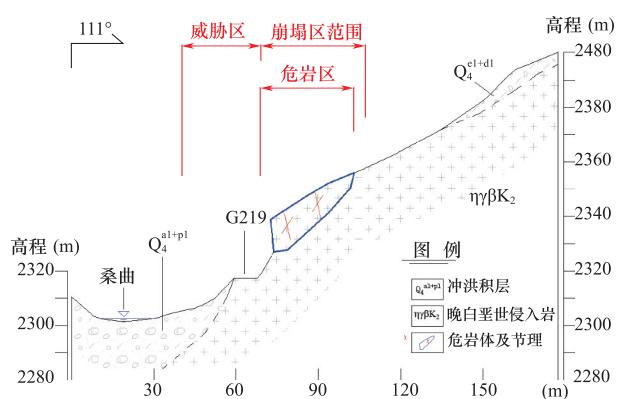


图 6 察隅县城—古玉乡路 10 # 崩塌及剖面图

Fig. 6 Collapse and profile of 10 # in Chayu County-Guyuxiang Road

腔或陡立土质边坡。凹岩腔上侧岩块在风化卸荷及自重条件下易沿原有结构面拉断坠落;土质陡坡由于降雨坡面冲刷导致细颗粒被带走形成凹腔,凹腔上部土体在自重、降雨及震动等条件下易崩塌坠落,我们将其划分为坠落式崩塌。

3.2.4 崩塌灾害成灾模式统计

竹瓦根镇共发育崩塌 6 处(表 4),根据统计,有倾倒式崩塌 1 处、滑移式崩塌 2 处、坠落式崩塌 3 处。

表 4 竹瓦根镇崩塌成灾模式统计表

Table 4 Statistics of collapse disaster mode in Zhuwagen Town

编号	名称	规模	稳定性	成灾模式
B028	察隅县城—古玉乡 10 # 崩塌	中型	不稳定	坠落式
B029N	竹瓦根镇嘎巴村下嘎巴组崩塌	大型	基本稳定	倾倒式
B030	上察隅镇路-下察隅镇路 3 # 崩塌	中型	不稳定	坠落式
B055N	竹瓦根镇吉公社区通噶摩崖造像崩塌	特大型	不稳定	滑移式

续表

编号	名称	规模	稳定性	成灾模式
B056N	竹瓦根镇吉公社区荣辉电焊部崩塌	大型	不稳定	滑移式
B057N	竹瓦根镇学尼村深圳龙岗吊桥崩塌	小型	基本稳定	坠落式

4 地质灾害链

4.1 灾害链诱发因素

泥石流、滑坡等地质灾害的形成与暴发不是孤立的,也不是偶然的,而是在水文、气象、地质及其他诱因的共同作用下形成和暴发的^[1]。按照诱发因素划分,地质灾害链包括内动力地质灾害链、外动力地质灾害链、人为活动地质灾害链和复合型地质灾害链^[5]。

竹瓦根镇所在的桑曲河流域地质灾害链发生特征主要表现为桑曲河两岸岩体在风化卸荷、降雨及地震等条件下崩落并堆积于沟道内,一定程度堵塞沟道并成为泥石流物源;暴雨诱发山洪,对中、下游两侧土质岸坡脚不断掏蚀,进而诱发沟岸滑坡及崩塌,塌滑体成为泥石流物源。在有松散物源条件下,后期持续强降雨易诱发泥石流,威胁沟口村民、房屋及公路等。竹瓦根镇学尼村泥石流及扎拉村扎给组泥石流沟口桑曲主河道转弯且沟口堆积扇

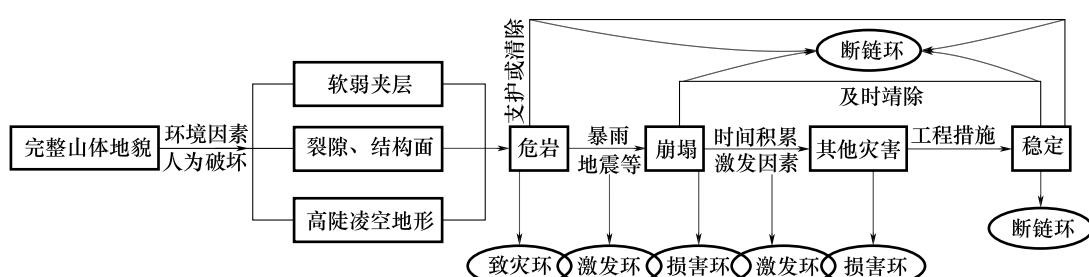
处河道明显变窄,沟口上游侧河床宽阔且有大量河沙沉积,推测该两处泥石流曾爆发过巨型泥石流,冲出固体物质淤埋沟口并造成桑曲河道堵塞,后期在河水的不断渗流及管涌作用下河道逐渐疏通(图7)。由于两条泥石流沟沟顶均有冰湖分布,推测为早期冰湖溃决诱发巨型泥石流,并导致发生冰湖溃决-泥石流-堰塞湖灾害链。



图 7 泥石流堵塞河道

Fig. 7 Debris flow blocking river

综上所述,竹瓦根镇所在的桑曲流域地质灾害链式发生特征较为突出,多为内营力及外动力相结合的复合型地质灾害,灾害链基本为:风化卸荷、降雨-崩塌、滑坡-泥石流灾害模式(图8)。

图 8 竹瓦根镇地质灾害链示意图(据文献^[6]修改)Fig. 8 Schematic diagram of geological hazard chain in Zhuwagen Town(modified from literature^[6])

4.2 灾害链形成机理

竹瓦根镇灾害链基本为:风化卸荷、降雨-崩塌、滑坡-泥石流灾害模式,其形成可分为崩塌及滑坡的诱发、泥石流启动和泥石流成灾3个阶段,以学尼村泥石流为例进行简要分析。

4.2.1 崩塌及滑坡的诱发

在构造应力作用下学尼村泥石流流域边坡岩体结构面发育,局部岩体破碎,受陡倾沟内结构面控制,岩体在风化卸荷、降雨及地震等条件下易崩落并堆积于沟道内,一定程度堵塞沟道并成为泥石流物源(图9A)。

在较长时间和较大强度的降雨条件下引发沟道内暴发洪水，并对土质岸坡坡脚不断进行冲刷掏蚀，导致岸坡坡脚处形成陡立临空面，同时地表漫流入渗后的堆积体强度减弱，斜坡体的自稳能力相应降低，当沟道的侧蚀和底蚀达到一定程度后，前部土体先行启动，出现小规模滑塌（图 9B），失稳后的滑坡体迅速被洪水带走。伴随沟道下切的加深或洪水水位上涨后侧向拉槽强度加大，中部、中前部土体相继发生蠕动变形，地表出现多条张拉裂缝，向土体深部发育成多级滑动面，并逐渐贯通，直至失稳破坏。滑坡变形破坏后，滑坡体堆积于沟道内堵塞沟道并成为泥石流物源，为泥石流灾害的发生提供了一定的物源条件。这个阶段需要在流域内有较大面积的有利于滑坡的山坡坡度（ $20^{\circ} \sim 40^{\circ}$ ），这部分山坡不仅可能发生滑坡，也能使滑动的滑坡体运动到沟道中，为泥石流提供直接的物源，该阶段的主要降雨特征为较长时间和较大的降雨强度。



图 9 学尼村泥石流照片

Fig. 9 Photos of debris flow in Xueni Village

4.3.2 泥石流启动

当较大强度的降雨在流域内形成山洪后，沟岸及沟道内崩滑体提供的松散堆积体启动形成泥石流。这个阶段需要较大的流域汇水面积形成足够流量的洪水，也需要在沟床内有较大的沟床坡度，较大的沟床坡度不仅使洪水有足够的动力冲刷起

动沟道固体物质，也使固体物质更容易被洪水起动。学尼村泥石流流域清水区汇水面积达到 5.63 km^2 ，流通区沟道纵坡降平均在 531% 左右，两岸斜坡坡度 $30^{\circ} \sim 50^{\circ}$ ，局部近直立，在长时间和大强度的降雨条件下，良好的地表汇水及流通条件，会导致学尼村泥石流的迅速启动。

4.2.3 泥石流成灾

泥石流启动后沿沟道流动至沟口处，并产生冲击和淤埋作用，威胁沟口居民、房屋及公路等（图 9C）。沟口处由于地形变缓或不断受阻挡，泥石流冲出物流速逐渐减小，直至停止；当泥石流一次性冲出物冲出量过大且沟口无足够的宽缓地带停积时，冲出物则将快速冲入主河道并堵塞形成堰塞湖，易造成堰塞湖溃决的二次灾害，对下游居民及建（构）筑物等有较大威胁。

5 结论及建议

5.1 结论

(1) 竹瓦根镇充沛降水和强烈的新构造运动及地震成为竹瓦根镇泥石流的主要诱发因素。在竹瓦根镇共发育有 9 条泥石流，根据自然及地质背景条件、物源的类型和分布、启动调节、运动特征等将竹瓦根镇泥石流划分为“崩滑-碎屑流-泥石流型”“堵溃”型泥石流和“坡面”型泥石流三类。

(2) 竹瓦根镇高陡的地形结构以及地层岩性、解理裂隙发育特征和自然因素，加之频繁的人类工程活动，成为竹瓦根镇崩塌的主要因素，崩塌主要成灾模式为滑移式崩塌、倾倒式崩塌和坠落式崩塌三类。

(3) 按照诱发因素划分，竹瓦根镇地质灾害链基本为风化卸荷、降雨-崩塌、滑坡-泥石流灾害模式，其机理为崩塌及滑坡的诱发-泥石流启动-泥石流成灾的成灾机理。

5.2 建议

(1) 竹瓦根镇及周边共有地质灾害隐患点 15 处，其中 12 处无任何工程防治措施，包括极高风险 1 处，应尽快开展立项及工程治理；高风险 4 处，其中 2 处崩塌建议进行工程治理，2 处泥石流建议进

行专项监测;中风险 7 处,其中 2 处典型泥石流建议进行工程治理,其余 5 处建议在不断完善群测群防体系的基础上,分期实施提升“群专结合”专业化水平,应加强动态核查与监测预警工作。在治理工程完成之前,应尽可能提升监测预警水平,加大监测预警频次,尤其是主汛期和地质灾害预警信息发布后。已治理 3 处地质灾害隐患点中竹瓦根镇嘎巴村巴拉沟防治工程局部有损坏,建议对该治理工程局部损坏处及时进行修复;竹瓦根镇嘎巴村下嘎巴组崩塌未治理处危岩区仍存在安全隐患,应尽快进行补充勘察设计;竹瓦根镇学尼村泥石流现工程已失效,应重新进行专项勘察与设计。

(2)新规划的 G219 路线从察隅县竹瓦根镇通过,道路的修建势必会切坡,由于竹瓦根镇斜坡坡脚大部地区为残坡积土层覆盖,自然斜坡状态时岩土体工程特性差,稳定性较差,在人工扰动后,易发生失稳,因此,应做好开挖前防治预案及开挖后支护措施。

致谢:感谢审稿专家在论文成文过程中提出的宝贵意见和建议。

利益冲突:作者声明无利益冲突。

参考文献(References)

- [1] 西藏自治区地方志编纂委员会. 察隅县志[M]. 拉萨:中国藏学出版社,2020.
- [2] 何果佑,白武军,向天葵,等. 浅析西藏东南部地区地质灾害的形成机理与分布规律[J]. 资源环境与工程,2012,26(5):483-488.
<https://doi.org/10.16536/j.cnki.issn.1671-1211.2012.05.037>
- [3] 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
- [4] 中共察隅县委办公室. 察隅年鉴(2019)[M]. 郑州:中州古籍出版社,2020.
- [5] 韩金良,吴树仁,汪华斌. 地质灾害链[J]. 地学前缘,2007,14(6):11-23.
<https://doi.org/10.3321/j.issn.1005-2321.2007.06.003>
- [6] 李明,唐红梅,叶四桥. 典型地质灾害链式机理研究[J]. 灾害学,2008,23(1):1-5.
<https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-811X.2008.01.001>
- [7] 万忠焱,刘思杨,陈超,等. 竹瓦根镇及周边 1:1 万精细化调查成果报告[R]. 西藏自治区地质矿产勘查开发局地热地质大队,2022.

Analysis on the Formation Mechanism and Disaster Mode of Geological Hazards in Zhuwagen Town, Chayu County, Tibet

WAN Zhongyan^{1,*}, WANG Maoli², ZHOU Peng¹

(1. Geothermal Geological Brigade of Tibet Geological Exploration Bureau, Lhasa 850000, China;

2. The Sixth Geological Brigade of Tibet Geological Exploration Bureau, Lhasa 851400, China)

Abstract: Geological disaster is a kind of natural disaster which is highly hazardous and destructive. This paper summarizes the disaster formation mode of debris flow and collapse according to the formation conditions and initiation process of the nine debris flow and the formation conditions of the six collapse in Zhuwagen Town, and analyzes the triggering factors and disaster formation mode of the geological disaster chain in Zhuwagen Town, and finally discusses and analyses the formation mechanism and disaster formation mode of the whole geological disasters in Zhuwagen Town.

Keywords: Zhuwagen Town; debris flow; collapse; disaster chain; formation mechanism; disaster mode

DOI: 10.48014/cesr.20221030001

Citation: WAN Zhongyan, WANG Maoli, ZHOU Peng. Analysis on the formation mechanism and disaster mode of geological hazards in Zhuwagen Town, Chayu County, Tibet [J]. Chinese Earth Sciences Review, 2022, 1(2): 10-20.

Copyright © 2022 by author(s) and Science Footprint Press Co., Limited. This article is open accessed under the CC-BY License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

