

台风暴雨矿渣型泥石流形成机制 与动力特征

——以兴宁乌石坑沟泥石流为例

黄家华¹⁾, 冯文凯²⁾

1) 广西交通工程检测有限公司, 南宁, 530299;

2) 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都, 610059



Pre-pub. on line: www.
geojournals.cn/georev

内容提要:受台风“尤特”登陆影响,台风暴雨直接激发兴宁乌石坑沟特大矿渣型泥石流灾害,物源巨大,潜在危害极大。笔者等通过现场调绘及室内试验,对本次泥石流的形成机制及动力特征进行研究,旨在为此类泥石流致灾机理及危害性评价提供借鉴。研究表明,其独特的流域地形特点为泥石流形成的基本因素,以沟道堆积物为主的丰富矿渣型物源是基础条件,高强度的台风暴雨是直接激发因素,与矿山开采、矿渣随意堆放等人为因素共同作用扩大了灾害规模。泥石流形成过程与动力特征为前期强降雨—崩滑碎屑流—矿渣型泥石流—台风暴雨—沟道堵塞雍高—溃决、规模放大。

关键词:矿渣泥石流;台风暴雨;形成机制;动力特征;广东兴宁铁山嶂矿区

我国是世界上遭受台风侵袭最多、地灾最重的国家之一,而广东作为我国遭受台风袭击最多的省份,平均每年5~6个台风在广东沿海地区登陆影响范围覆盖全省及周边省份(张伟,2017),在台风影响区域内所带来的短历时持续超强降雨,即台风暴雨,为华南沿海地区诱发地质灾害的重要降雨型,众多学者对台风暴雨型泥石流灾害类型及降雨特点研究发现,台风暴雨诱发泥石流灾害有频率低、群发性、成灾快、危害大等特点(唐光良等,2009;燕丽萍,2009;岳丽霞,2012;刘艳辉等,2016;陈鸿志等,2016;吴义等,2021)。崔鹏等(2010)对台湾“莫拉克”台风暴雨灾害成因研究,认为高强度长历时的暴雨是直接激发因素,坡地过度开发、道路建设、河道不合理利用等人为因素加剧了灾情。刘艳辉等(2016)对“苏罗迪”台风暴雨型地质灾害时空特征研究发现,有空间集中群发性、强降雨当日即发性、大雨强小时滞后性三大特征。目前针对台风暴雨型泥石流的研究集中于其启动机制、危险度等方面(王一鸣等,2018a, b)。

以上研究多为台风暴雨对自然泥石流的研究,而其对人工泥石流的较少。矿渣型泥石流是由

矿产开采、不合理堆放的矿渣所引发的人工泥石流(张丽萍等,2001),在我国山区广泛分布,灾害频发,曾一度造成重大人员伤亡和巨大财产损失。纵观我国矿渣型泥石流的研究成果,多侧重于单体灾害的发育特征、危险性评价等方面(王文龙等,2003;陈华清等,2008;邓龙胜等,2009;徐友宁等,2015),目前尚处于初始阶段。然而置身于台风—暴雨—崩滑流灾害链区域的矿渣型泥石流形成过程及致灾特征具特殊性。目前有关台风暴雨矿渣型泥石流的研究鲜有报道(黄家华等,2016;赵丽娅等,2018)。因此以兴宁乌石坑沟泥石流为例,以泥石流孕灾地质环境为研究背景,对泥石流形成条件与机制研究,通过理论计算研究台风暴雨矿渣型泥石流的动力过程特征,为此类台风暴雨矿渣型泥石流致灾机理和防台减灾提供借鉴。

1 泥石流孕灾地质环境背景

1.1 地质环境背景

乌石坑沟位于广东省兴宁市合水镇上官村,属以南亚与中亚热带季风性湿润气候为主的山区气候,年平均气温21.0℃,全年降雨充沛,年平均降雨

注:本文为国家自然科学基金资助项目(编号:41977252,U2005205);地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室自主探索课题(编号:SKLGP2020Z001)的成果。

收稿日期:2022-09-03;改回日期:2023-02-14;网络首发:2023-02-20;责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2023.02.031

作者简介:黄家华,男,1988年生,硕士,高级工程师,主要从事岩土工程检测与监测及地质灾害防治工作;Email: 349995037@qq.com。

日数为 154 d,年平均降水量为 1488.9 mm,年最大降雨量 2250 mm(2006 年),日最大降雨量为 222.3 mm(2007 年),夏季多台风暴雨,降雨强度大、历时长,84.27%的降雨量和 83%的暴雨日出现在每年的 4~9 月。受断层构造带影响,流域内山脉主体呈北西高南东低,多为海拔 225~800 m 的低山丘陵地貌,最高海拔为 827 m,高差 600 m,沟谷纵坡降约为 214.3‰,河谷多呈“V”型,坡度 35°~45°,区内出露的地层以碎屑岩、残坡积物和松散堆积物为主。受构造剥蚀营造作用力、表生浅层建造作用,地形切割剥蚀明显,岩体裂隙发育、风化强烈,表层岩土结构松散;受矿山开发再造作用的影响,区内植被覆盖率低,广泛堆积松散物,主要为沟源矿渣堆砌、沟道河床矿渣淤积。从泥石流孕灾环境的气候水文条件和地质条件来看,研究区处于台风暴雨型泥石流高易发区的粤东低山丘陵区(唐光良等,2009;刘希林等,2009)。

该沟流域面积约为 5.44 km²,呈“蝌蚪”状,主沟长度约 5.03 km,形状呈“上游曲直、下游弯曲”,流域内支沟众多,水系呈树枝状,沟源与沟口相对高差 431 m,沟道平均坡降比 229‰,利于地表水汇聚。流域分为形成区、流通堆积区、次流通堆积区(图 1、表 1)。从孕灾环境的台风灾害链分类与区域特征分析,兴宁乌石坑沟流域是典型的台风—暴雨—滑坡—泥石流灾害链区域(王然等,2016),满足广东泥石流孕灾环境(刘希林等,2009),属泥石流高发区。

1.2 泥石流灾害

兴宁市铁山嶂矿开采始于 1958 年、止于 2005 年的一处中型富铁矿区,由于长期的缺乏监管而不合理堆放矿渣、挤占及堵塞排洪沟道,加大边坡坡度、增大沟床高差,致使矿区范围内植被破坏、水土流失严重,在雨季崩滑流地质灾害频发,该沟多次爆发泥石流,并逐渐演化形成高频率、小规模 of 典型矿渣型泥石流沟。2013 年第十一号超强台风“尤特”于 8 月 14 日 15 时在广东省阳江市阳西县沿海登陆,中心最大风力 14 级(42 m/s),最低气压为 955 hPa,是 21 世纪以来登陆广东的第三强台风(龙水等,2014),14~17 日台风过境期间,该流域遭遇极端强降雨,于 2013 年 8 月 17 日暴发特大型泥石流灾害,导致上游矿渣堆大面积失稳并堆满沟道,拦挡坝库容超过临界值,泥石流翻坝倾泻而下,沿途冲毁河堤、破坏公路、掩埋稻

田、建筑物损毁,影响面积达 1.13 km²,危及资产达 15400 万元,直接威胁下游 4 个行政村 2173 人的生命财产安全(黄家华等,2016)。

2 泥石流形成条件与机制

2.1 地形地貌条件

根据流域沟谷特征、松散堆积物分布特征,将乌石坑沟谷划分为形成区、流通堆积区、次流通堆积区(图 1、表 1)。

形成区主要分布于上游 01 支沟与主沟交汇处以上范围内,在构造剥蚀切割与人为采矿、堆砌共同作用下,形成深切割地形,坡度为 30°~45°、高度为 50~160 m 的结构松散的矿渣堆砌体,沟床纵坡比较大,纵坡降为 283.02‰,岸坡横断面呈“V”型。流通堆积区即上游 01 支沟与主沟交汇处至 2#拦挡坝段,大量泥石流冲出物堆积在沟道中,沟谷切割深度约 1.0~5.5 m,形成宽 60~105 m 的沟床,泥石流沟谷呈“U”型,纵坡降为 79.98‰,相对较缓。次流通堆积区主要分布在 2#拦挡坝下游,该区地形平缓,河道宽浅,河床纵坡降为 30.23‰,纵坡降比较小,堆积为主。

从坡面的微地貌特征分析,在沟谷中上游区坡表植被覆盖率低,活动性冲沟呈“树枝”状发育显著,这种形态特征遇强降雨不仅利于快速汇集径流,而且便于启动松散物,进而易产生崩滑,固体物质源源不断补给排入沟道中。从沟谷的地貌特征及演化过程分析(李宁等,2020),乌石坑沟沟谷受地质环境演化过程与工程弃渣实施共同控制作用,形成了高陡的岸坡、平直且大坡降的沟床,为山地灾害的孕育提供了有利条件,既为坡面松散物和沟道堆积物启动提供有利的地形条件和强大的水动力条件,又为降雨形成的地表水在各支沟沟口汇水形成洪峰叠加的形成创造了条件,地形地貌特征决定了泥石流物源启动、发生发展的地形条件和水动力条件。

2.2 丰富又松散的物源条件

泥石流物源包括矿渣堆、沟道堆积物和坡面松

表 1 广东兴宁合水镇上官村乌石坑沟泥石流流域分区特征
Table 1 Topographic features of debris flow watershed zoning for Wushikenggou valley, Shangguan Village, Heshui Town, Xingning, Guangdong

分区	面积(m ²)	沟长(m)	高程范围(m)	高差(m)	纵坡降(‰)
形成区	4922	212	490~550	60	283.02
流通堆积区	196067	2213	313~490	177	79.98
次流通堆积区	70000	2845	225~311	86	30.23

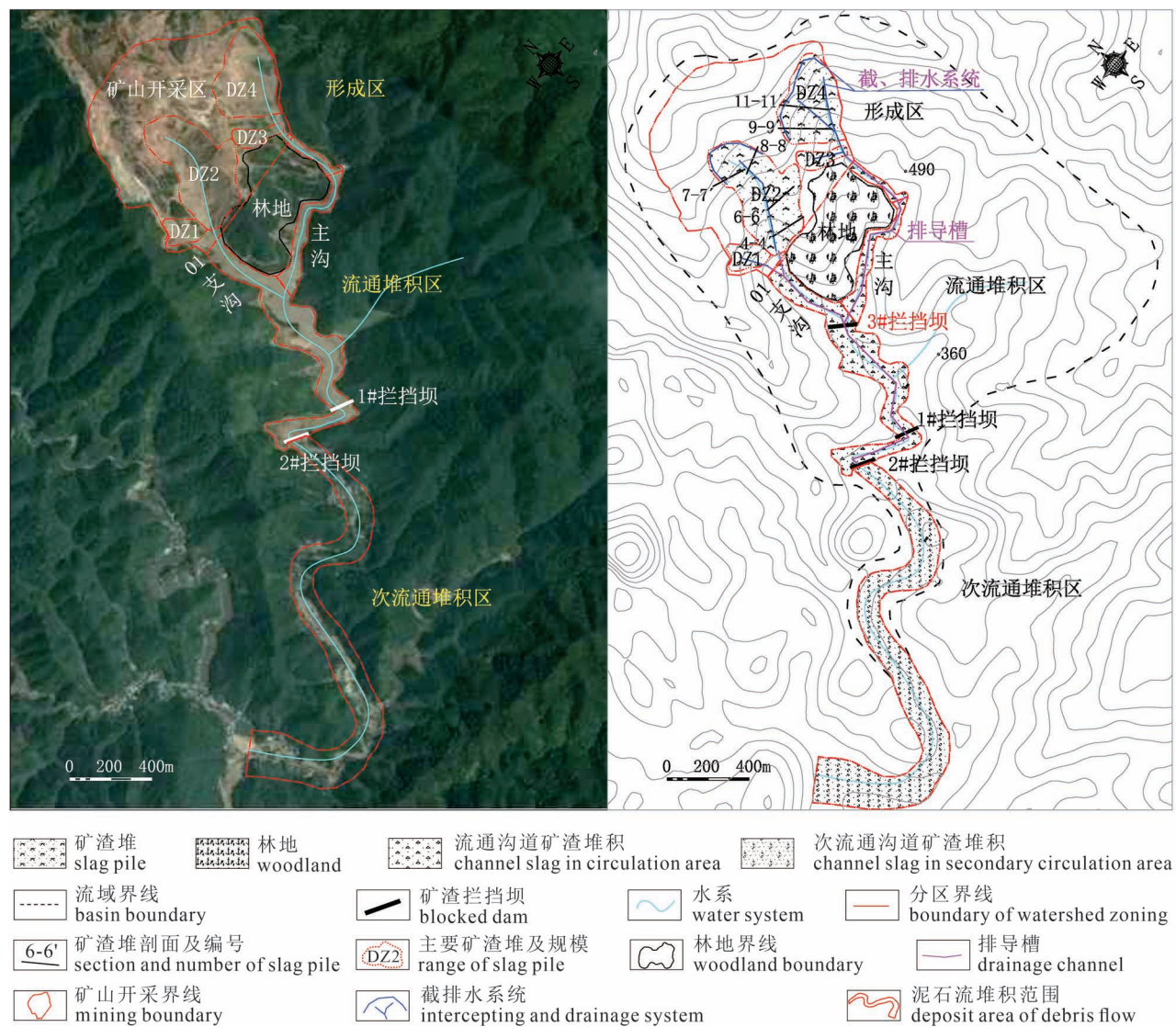


图 1 广东兴宁合水镇上官村乌石坑沟谷流域特征图

Fig. 1 The drainage area of Wushikeng Valley Watershed, Shangguan Village, Heshui Town, Xingning, Guangdong

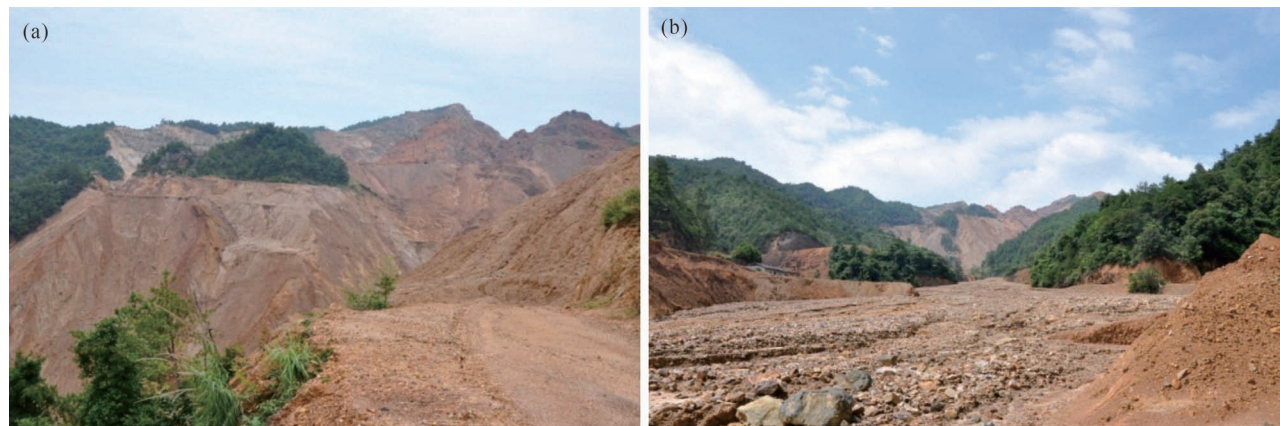


图 2 泥石流物源特征:(a) 矿渣堆物源;(b) 沟道堆积物源

Fig. 2 Charators for the sources in the debris flow: (a) source of slag pile; (b) source of deposits



图 3 矿渣堆(场)变形破坏特征

Fig. 3 Deformation and failure characteristics of slag

散物(图 2),主要分布于形成区和流通堆积区。通过测量、钻探和密度及颗粒级配等原位测试与室内试验来探明物源体量及物理性质,据统计,总量约为 $732.2\times10^4\text{ m}^3$,各占百分比为 17.7%、81.9%、0.4%。

(1)矿渣堆特征。经过长期的矿产开采及矿渣排放活动,导致松散固体物质成分混杂且分布面积广、规模大,流域内出现了植被破坏、水土流失严重等生态环境恶化现象。研究表明(黄家华等,2016),上游沟源主要堆积 4 处矿渣堆(图 1 中 DZ1~4 区),广泛分布于上游主沟右岸和右岸支沟两岸,且基本无防护措施,方量约 $129.8\times10^4\text{ m}^3$ 。其主要成分为碎块石砂土,母岩成分以石英砂岩、千枚岩为主,粒径分布不均匀,以粒径 0.5~7 cm 为主,约占总量的 60%~70%,结构松散,坡面受风化与侵蚀作用强烈,为降雨入渗软化土体、运移土颗粒继而土体结构改变奠定了基础,在持续降雨条件下进而导致土体强度降低并最终失稳发生崩滑流灾害。现场调查,矿渣堆自然稳定角超过饱和状态下碎石土的内摩擦角,且无治理措施,目前处于蠕动变形~强变形阶段(图 3),遇强降雨极易被水流冲刷、搬运至沟谷中,形成暴雨—崩滑—碎屑流或泥石流的补给方式。通过对形成区主要矿渣堆典型断面稳定性分析,结合矿渣堆物质成分、组成及其变形破坏特征,采用综合取值法获取强度参数,利用条分法计算并评价矿渣堆稳定性,结果(表 2)表明,矿渣堆在自重工况下处于基本稳定或欠稳定状态,极端降雨条件下处于不稳定状态。

(2)沟道堆积物源特征。研究区上游矿渣崩滑体在长期的流水或洪水冲刷作用下被搬运、堆积于

表 2 不同矿渣堆稳定性特征

Table 2 Stability characteristics of kinds of slag

剖面	工况	选取抗剪强度	下滑力 (kN)	抗滑力 (kN)	稳定系数	稳定性评价
4	自重	4.3,30	14439.92	15618.55	1.08	基本稳定
	自重+暴雨	0.0,27	15432.83	13802.08	0.89	不稳定
6	自重	4.3,30	14328.46	15193.41	1.06	基本稳定
	自重+暴雨	0.0,27	15437.16	13600.75	0.88	不稳定
7	自重	4.3,28	9852.29	11039.40	1.12	基本稳定
	自重+暴雨	0.0,25	10516.32	9819.22	0.93	不稳定
8	自重	5.2,30	7943.08	7939.88	1.00	欠稳定
	自重+暴雨	3.3,27	8822.15	7467.13	0.85	不稳定
9	自重	4.2,27	16768.28	18289.83	1.09	基本稳定
	自重+暴雨	0.0,27	17614.02	16350.38	0.93	不稳定
11	自重	5.2,30	61420.54	66513.54	1.08	基本稳定
	自重+暴雨	3.3,27	64170.76	60514.28	0.94	不稳定

沟道中,形成宽度为 35~105 m、厚度 18.4~31.3 m 的沟道堆积物源,可提供的固体物源总量约 $600.0\times10^4\text{ m}^3$ 。其主要成分为矿渣碎块石夹杂大量泥砂,颗粒级配曲线(赵丽娅等,2018)表明,颗粒范围较大,75%以上含量在 0.1~15 cm 范围内,粒径 $d\geq2\text{ mm}$ 的砾粗颗粒含量约占总量的 90%,粒径 $d\leq1\text{ mm}$ 的细粒含量约占总量的 5%,以粗颗粒为主,细颗粒含量甚少,空隙大、渗透性能好,具有更好排水能力,遇降雨水在松散固体物质中快速通过,因而降雨入渗难以增加沟道物源的孔隙水压力和达到其饱和状态,因此,泥石流起动需更大的降雨强度和更丰富的降雨量。

(3)坡面松散层物源特征。泥石流松散物质的补给还包括沟谷两岸第四系松散堆积层及道路或沟道旁弃渣。遇极端降雨条件,这些松散物质排入沟道中,一定程度堵塞沟道为泥石流发生提供物质条件,此类可启动的物源量达总物源的 40%左右,物源量约为 $2.4\times10^4\text{ m}^3$ 。

2.3 台风暴雨的水力条件

短历时持续强降雨是台风汛期泥石流形成的主要诱发因素(冯杭建等,2013),引发泥石流既需雨强提供强大的水动力(渗流),又需激发泥石流的降雨阈值(地表径流或洪流)。台风影响地区泥石流发生与降雨强度有强相关性,超大短历时(1 h)雨强是台风暴雨型泥石流启动的直接激发因素(王一鸣等,2018a),超过临界降雨强度 60 mm/h(局部地区临界雨强为 43 mm/h,与边坡的坡度大小相关,对坡度大于 35°的陡边坡影响最为明显)极易引发泥石流(唐光良等,2009);降雨量直接影响地表径流流量、间接影响边坡稳性,为崩滑流的发生提供水动力

条件,在前期(1~10 d)有效降雨量大于 200 mm 或当日降雨量大于 200 mm 的情况下泥石流发生的可能性很大(唐光良等,2009;冯杭建等,2013;张伟,2017)。

参照兴宁市地区的研究成果(刘希林等,2009),该区域泥石流临界降雨量指标:1 h 最大降雨量平均值为 53.1 mm/h,24 h 最大降雨量平均值为 139.9 mm/h,超过临界雨量即有可能触发泥石流。在台风尤特过境期间,研究区遇短历时(14~17 d)持续强降雨,据兴宁、水口等雨量站记录日降雨量为 145.1~222.3 mm,4 d 累积雨量达 200~400 mm,此降雨量远超该区域激发泥石流的临界雨量指标。

2.4 形成机制分析

研究区矿渣堆、坡面松散物在水土物理化学作用、降雨冲刷及下渗水动力作用下失稳破坏,进而形成丰富又松散的崩滑碎屑物,以及沟道碎屑流及老泥石流堆积物是泥石流形成的主要物源基础,台风暴雨迅速汇聚并形成显著地表径流为泥石流的形成和规模加大提供了水源及洪峰流量,是矿渣型泥石流再次启动向下游运移、冲刷、铲刮、掏蚀及溃决后流量放大成灾的激发因素。

研究区流域位于粤北中低山区,沟汇水面积较大,岸坡高陡,活动性冲沟呈“树枝”状发育显著,时常出现台风暴雨,属于成灾高发区。该流域上游存在大量高陡裸露的松散矿渣堆坡体,前期台风降雨,不仅不断入渗坡体、运移细小颗粒进一步改变其微观结构,土体基质吸力不断降低,随着地下水位升高,孔隙水压力增加,矿渣堆坡体岩土体有效应力降低、强度降低,坡体多处于地下水渗流状态,表现为大部分坡体保持基本稳定状态,仅形成区上游局部坡体失稳破坏并启动泥石流;还对坡面松散物侵蚀和冲刷,产生碎屑流或坡面泥石流下滑至沟道中,遇强降雨沟谷汇水形成山洪向下游搬运,随沟道坡降比与宽度的变化沿途堆积,日积月累,极大丰富了沟道物源,形成了高频、小规模矿渣型泥石流。前期降雨量不足以启动大规模泥石流,但矿渣堆积物不断增加侵占、堵塞沟道,阻滞沟道泄洪,前期台风降雨诱发的崩滑流约占总物源的 82%,为爆发溃决型泥石流创造了条件。

遇超大短历时雨强的台风暴雨,降雨量远超地表水下渗量,导致矿渣堆及沟道物源表面形成显著地表径流(即地面水位高于原地面,坡体多处于饱和状态),地表径流冲刷、切向拖拽力作用不仅加速

坡体整体同步失稳破坏,表现为区域上大量崩滑碎屑流集群式启动,这些固体物质在地表径流及山洪共同作用下转化为有效物源汇入沟道参与泥石流活动;还造成矿渣型泥石流再次启动向下游冲刷、铲蚀、深切沟道,上游崩滑流物质在重力和外力作用下不断向下运移,直至主沟与支沟交汇处(研究区主沟与支沟大角度交汇且地势平缓,加上流通区沟道狭窄且弯曲易形成堰塞坝)停积雍高形成泥石堰塞坝体,其结构松散且碍沟道泄洪,加上流域特征整体呈现“漏斗”状,以致山洪汇水易形成巨大的洪峰流量和高压流体,表现出强大的侵蚀搬运能力,故坝体极易被冲溃,瞬间导致泥石流流量放大。

3 泥石流动力过程特征

3.1 泥石流动力特征参数计算

3.1.1 泥石流流速计算

依据希性泥石流的流速计算公式:

$$V_c = \frac{1}{\sqrt{\gamma_H \varphi + 1}} m_c \sqrt[3]{R^2 I} \tag{1}$$

式中: V_c 为泥石流流速, m/s, γ_H 为泥石流中固体颗粒容重(2.65 t/m³)(黄海等,2022), φ 为泥沙修正数(0.59); m_c 为巴克诺夫糙率系数 8.8; R 为水力半径(m),一般可用平均泥深 H 代替; I 为泥石流水力梯度;结果见表 3。

3.1.2 泥石流洪峰流量计算

雨洪法按 100 a 一遇的暴雨强度进行泥石流流量计算,最大洪峰量采用手册推荐的推理公式(式 1)计算,根据公式查取暴雨均值 H_{1p} 、汇流参数等流参数等相应的数据,求解设计洪峰流量 Q_B :采用图解法,建立 $Q_B-\tau$ 和 Q_B-t 关系曲线,两条曲线的交点即为所求值 Q_B 、及相应的 τ (图 4)。

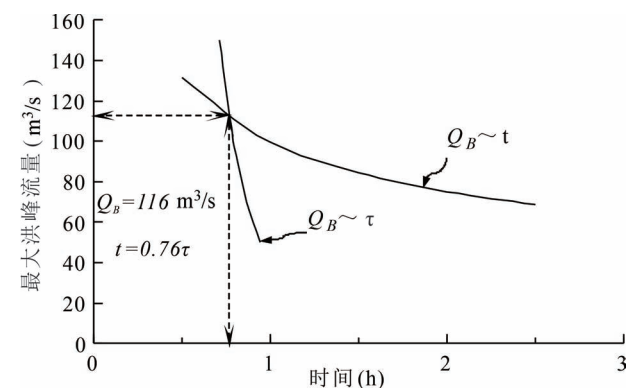


图 4 100 年一遇最大洪峰流量
Fig. 4 Maximum peak flow once in 100 years

$$Q_B = 0.278(\frac{S_p}{\tau^n} - f) F \tag{2}$$

式中: S_p 为某频率的雨力 (mm/h); n 为暴雨参数; f 为平均后损率; τ 为汇流时间 (h),

$$\tau = 0.278 \times \frac{L}{m \cdot \sqrt[3]{J} \cdot \sqrt[4]{Q_B}}$$

L 为主沟长度 (km); F 为流域面积 (km²); m 为汇流参数; J 为坡降 (‰)。

按求得的 Q_B 、 τ 利用推理公式法广东省综合概化洪水过程线表所列,求得相应于 τ 时段净雨形成的主洪峰过程曲线,图 5 可以看出区内泥石流沟谷主洪峰流量过程曲线呈“单峰”状,主洪峰过程历时约为 1.3 h,与现场调查访问结果基本吻合。

3.1.3 泥石流峰值流量计算

根据现有沟域面积、暴雨强度、沟域植被发育分布情况和径流系数等参数进行计算,采用修正雨洪法计算公式(东川公式)。

$$Q_C = Q_B(1 + \varphi) D_C \tag{3}$$

式中: Q_C 为频率 P 的泥石流洪峰值流量 m³/s; Q_B 为频率 P 的暴雨洪水设计流量 m³/s; D_C 为泥石流堵塞系数;结果见表 3。

3.1.4 泥石流流体冲击力计算

依据泥石流规范附录 I 中推荐的泥石流流体整体冲击力计算公式(铁二院公式):

表 3 泥石流动力学特征参数统计表

Table 3 Statistics on the kinetic parameters of the debris flow

断面编号	位置	流速 (m/s)	暴雨洪峰流量 Q_B (m ³ /s)	泥石流峰值流量 Q_C (m ³ /s)	一次泥石流过流总量 (m ³)	一次泥石流固体物质冲出物 (m ³)	面积 (m ²)
1	01 支沟上游	3.72	36.44	73.32	5.28×10 ⁴	2.66×10 ⁴	0.67
2	01 支沟下游	2.66	31.42	63.23	4.81×10 ⁴	2.42×10 ⁴	0.90
3	主沟上游	3.50	31.54	95.19	4.52×10 ⁴	2.28×10 ⁴	0.62
4	主沟中上游	3.12	42.95	129.63	6.16×10 ⁴	3.09×10 ⁴	1.02
5	主/支沟交汇处	4.14	100.61	239.43	11.14×10 ⁴	4.21×10 ⁴	2.63
6	1#拦挡坝	3.41	104.26	330.82	15.72×10 ⁴	5.81×10 ⁴	3.40
7	2#拦挡坝	2.74	116.02	368.93	17.53×10 ⁴	6.48×10 ⁴	3.62

断面编号	位置	整体冲击力 (kN)	单块石块最大冲击力 (kN)	冲起高度 (m)	爬高 (m)	沟长 (m)	坡降 (‰)	泥深 (m)
1	01 支沟上游	34.29	244.09	0.33	0.53	0.71	311.27	1.75
2	01 支沟下游	17.64	197.39	0.33	0.53	1.55	162.58	1.73
3	主沟上游	30.42	259.26	0.68	1.08	0.85	378.67	1.75
4	主沟中上游	24.18	231.11	0.68	1.08	1.21	336.45	1.75
5	主/支沟交汇处	37.45	342.73	0.65	1.04	1.61	224.84	2.00
6	1#拦挡坝	25.38	170.33	0.60	0.95	2.36	175.00	1.80
7	2#拦挡坝	16.40	136.90	0.38	0.61	2.43	131.69	1.60

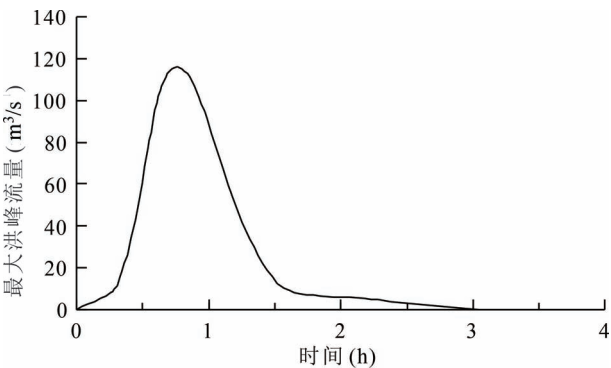


图 5 100 年一遇主洪峰过程曲线

Fig. 5 The main peak curves once in 100 years

$$\delta = \lambda \frac{\gamma_\alpha}{g} V_c \sin \alpha \tag{4}$$

式中: g 为重力加速度 (m/s²),取 $g=9.8 \text{ m/s}^2$; γ_α 为建筑物受力面与泥石流冲击力方向的夹角 (°); λ 为建筑物形状系数,矩形取 1.33;结果见表 3。

3.2 泥石流运动和堆积过程特征

为探究泥石流在沟段的运动和堆积过程特征,通过上述计算方法确定的泥石流流速及流量变化特征对乌石坑沟台风暴雨矿渣型泥石流运动过程特征进行深入分析,从图 6、图 7 与表 3 可以看出,泥石流流速波动规律与泥石流洪峰流量及流量与流体冲击力突变特征基本一致:在冲沟或支沟/主沟交汇处形成的叠加放大效应,即由 4 断面到 5 断面(流速由 3.12 m/s 增到 4.12 m/s;暴雨洪峰流量由 42.95 m³/s 增到 100.61 m³/s 到,增加 2.3 倍;流量由 129.63 m³/s 增到 239.43 m³/s 到,增加近 2.0 倍;整体冲击力及单块石块最大冲击力由 24.18 kN 增到 37.45 kN、231.11 kN 增到 342.73 kN,增加近 1.5 倍)。根据现场调查及遥感图像分析,各支沟沟道形成的高含泥砂洪水不断揭底侵蚀、铲蚀沟道堆积物,与形成区活动性冲沟形成的泥石流汇集后卷入大量碎石泥砂向下游运移,在中游 01 支沟与主沟交汇处停积雍高形成泥石堰塞坝体,因其

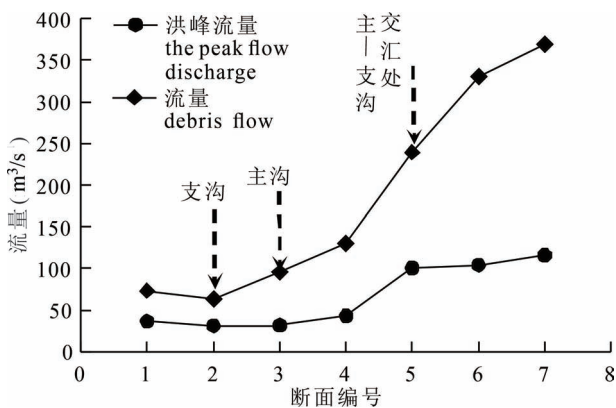


图 6 泥石流流速变化曲线

Fig. 6 Variation curve of debris flow velocity

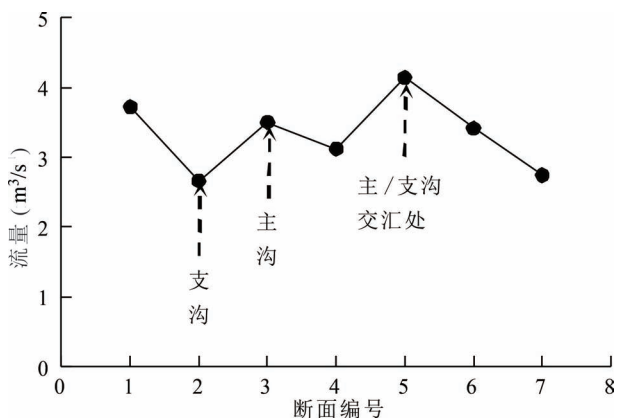


图 7 泥石流流量变化曲线

Fig. 7 Variation curve of debris flow peak

结构松散且碍沟道泄洪,山洪迅速汇聚形成巨大的洪峰流量和高压流体,表现出强大的侵蚀搬运能力,进而坝体极易被冲溃,瞬间导致泥石流流量放大,形成第一次的洪峰叠加效应,并持续向下游以滚动或滑动和下切的层移式运动,表现出强大的冲刷侵蚀、输移铲刮能力,冲蚀切割深度1~4.5 m,随沟道坡降比降低至250‰以下与宽度的变化沿途堆积,在主沟中下游形成宽度约35~105 m、深超过258 m的沟道堆积物(图8a—c)。

泥石流在向下游运动过程中,在下游1#拦挡坝处沟道突然90°弯曲与拦挡作用的影响,在此形成第二次的洪峰流量叠加放大效应:即由5断面到6断面(流量由239.43 m³/s 增到330.82 m³/s 到,增加近1.5倍),由于沟道坡降比降低,泥石流流速降低,沟床因堆积而抬高(图8d—f),最大堆积厚度达31.3 m;在洪水与泥石流更强烈的冲刷侵蚀下,使得沟道大量的堆积物翻坝倾泻而下(图8f),冲击作用力一旦超过坝体承受力,极易发生泥石流溃坝,泥石流规模将被再次放大。

4 泥石流活动趋势

4.1 泥石流活动时长

按式(5)计算本次泥石流

最大历时:

$$T = \frac{Q}{K Q_C} \tag{5}$$

式中: K 由流域汇水面积(5.44 m²)确定,故 $K = 0.113$, Q 取175.53 m³, Q_C 取368.93 m³/s,由上式计算得泥石流可能最大历时为4204 s。

据泥石流流动力学特征参数统计表(表3),泥石

表 4 泥石流沟危险性评价

Table 4 Evaluation of risk degree of Wushikeng debris flow

评价因子	实际值	转换因子	危险因子等级划分				转换值
			1.0	0.7	0.3	0.0	
堆渣规模($\times 10^4 \text{ m}^3$)	129.80	B_1	> 100	100~50	50~20	≤ 20	1.0
沟谷纵坡降比(%)	8.70	B_2	> 30	30~20	20~10	≤ 10	0.0
流域面积(km^2)	5.44	B_3	> 50	50~30	30~10	≤ 10	0.0
渣堆稳定性	75.00	B_4	> 70	70~50	50~25	≤ 25	1.0
渣堆补给长度与主沟长比(%)	0.54	B_5	> 0.7	0.7~0.4	0.4~0.2	≤ 0.2	0.7
河流弯曲程度	1.36	B_6	> 1.3	1.3~1.15	1.15~1.05	≤ 1.05	1.0
沟道堵塞度	0.44	B_7	> 0.8	0.8~0.5	0.5~0.3	≤ 0.3	0.3
24h最大降雨量(mm)	110.00	B_8	> 100	100~60	60~30	≤ 30	1.0
泥石流发生频率(年·次 ⁻¹)	3.00	B_9	< 1.0	2~5	5~10	> 10	0.7

表 5 B 判断矩阵及一致性检验

Table 5 B judgment matrix and consistency check

因子	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
B_1	1	1	4/3	3/2	3/2	7/5	10/9	5/2	5/3
B_2	1	1	4/3	3/2	3/2	5/3	10/7	5/4	3/4
B_3	3/4	3/4	1	1	8/7	6/5	5/4	5/4	1
B_4	2/3	2/3	1	1	1	8/7	3/2	4/5	6/7
B_5	2/3	2/3	7/8	1	1	9/8	6/5	5/8	3/2
B_6	5/7	3/5	5/6	7/8	8/9	1	4/5	3/4	3/2
B_7	9/10	7/10	4/5	2/3	5/6	5/4	1	2/3	1
B_8	2/5	4/5	4/5	5/4	8/5	4/3	3/2	1	4/3
B_9	3/5	4/3	1	7/6	2/3	2/3	1	3/4	1

$\lambda_{\max}=9.5985$; $CI=(\lambda_{\max}-n)/(n-1)=0.0748$; $RI=1.46$; $CR=CI/RI=0.0512<0.1$ 。



图 8 泥石流运动、堆积特征:(a) 支沟沟源冲刷侵蚀特征;(b) 支沟上游沟道冲刷切割特征;(c) 主沟下游堆积特征;(d) 沟道特征;(e) 沉泥库特征;(f) 库坝特征

Fig. 8 Hazard characteristics of debris flow: (a) erosion characteristics of branch gully source; (b) scouring and cutting characteristics of upstream channel of branch ditch; (c) accumulation characteristics at the downstream of the main ditch; (d) characteristics of deposits; (e) capacity characteristics of blocked dam; (f) present situation of blocked dam

流重度为 1.61 t/m^3 ,峰值流量为 $368.93\text{ m}^3/\text{s}$,属于特大型稀性泥石流。流域内崩滑比(崩滑体面积/流域面积)为 28.6% ,形成区完整系数(崔鹏等, 2010)(流域面积/主沟长度平方)为 0.489 ,说明流域具丰富的物

源条件、强大的汇流和水动力条件。本次泥石流平均侵蚀厚度(冲出量/流域面积)为 0.048 m ,平均里程的冲出量为 $6.4\text{ m}^3/\text{m}$,表明本次泥石流有极强的深切侵蚀破坏能力、历时长等活动特征。

4.2 暴雨强度指标

由下式计算暴雨强度指标(刘希林等,2009):

$$R = K \left[\frac{H_{24}}{H_{24(D)}} + \frac{H_1}{H_{1(D)}} + \frac{H_{1/6}}{H_{1/6(D)}} \right] \tag{6}$$

式中: K 为前期降雨量修正系数(1.2), $H_{24}, H_1, H_{1/6}$,指 24 h、1 h、10 min 最大雨量(222、55、21), $H_{24(D)}, H_{1(D)}, H_{1/6(D)}$ 该区可能发生泥石流的 24 h、1 h、10 min 限界雨量(100、40、12),可计算得暴雨强度指标

$R = 6.41 \in (4.2, 10)$,发生机率 $0.2 \sim 0.8$ 。

4.3 危险性评价与发展阶段

(1)评价指标、模型与权重。选取堆渣规模(B_1)、沟谷纵坡降比(B_2)、流域面积(B_3)、渣堆稳定性(B_4)、渣堆补给长度与主沟长比(B_5)、河流弯曲程度(B_6)、沟道堵塞度(B_7)、24 h 最大降雨量、泥石流发生频率(B_9)等 9 项指标(表 4),建立基于层次分析法对泥石流危险度评价的数学模型,获得评价因子的判断矩阵(表 5)。将泥石流危险性各评价因子的权重记为(黄家华等,2016):

$$W_{B_i} = (W_{B_1}, W_{B_2}, W_{B_3}, W_{B_4}, W_{B_5}, W_{B_6}, W_{B_7}, W_{B_8}, W_{B_9}) = (0.2171, 0.1663, 0.1083, 0.0879, 0.0866, 0.0731, 0.0718, 0.1117, 0.0772)^T。$$

(2)危险度评价结果。危险度评价公式:

$$H_{\text{单}} = \sum_{i=1}^n B_i W_{B_i} \tag{7}$$

式中: i 为评价因子个数; B_i 为各评价因子赋值; W_{Bi} 为各评价因子 i 的权重。将各项指标代入公式(7)计算泥石流危险度 $H_{\text{单}}$ 为 0.6260,属高度危险。

(3)发展阶段。据野外调查、边坡稳定性评价及运动特征,乌石坑沟上游区侵蚀速度及能力远大于下游区,矿区及沟道松散物质储量大,矿渣堆坡度超过 35°,多处于基本稳定—不稳定状态,综合判定该泥石流处于青年期阶段,实际情况与上述判定评价结果相吻合。

5 结论

(1)台风暴雨矿渣型泥石流的形成机制为:研究区的孕灾环境及流域地形条件有利,降雨量及物源又丰富,前期台风降雨削弱物源地岩土体强度进而启动矿渣堆(场),崩滑碎屑流物大量汇集形成以沟道堆积物为主的物源特征(已为高频、小规模矿渣型泥石流),超大短历时雨强的台风暴雨迅速汇集在物源表层并形成显著地表径流,激发大量崩滑碎屑流集群式启动转化为有效物源参与泥石流活动,最终形成台风暴雨矿渣型泥石流,台风暴雨成为此次泥石流大规模爆发的直接因素和动力条件。

(2)台风暴雨矿渣型泥石流的动力特征较为典型,表现为坡面台风暴雨汇水并地表径流、物源地崩滑碎屑流、沟道停积堵溃雍高、溃决加速冲刷、深切铲刮下游、流体流量放大,泥石流翻坝下泄,冲毁两侧河堤公路及房屋、掩埋稻田,冲击破坏效益强烈。

(3)综合泥石流的暴雨强大指标 $R=6.41$ 、发生机率 0.2~0.8 和危险度 $H_{\text{单}}$ 为 0.6260,该泥石流处于青年期阶段,属高度危险泥石流。该流域台风暴雨时有发生,极有可能再次暴发大规模泥石流,其危害及影响范围更大,将危及到下游 4 个行政村及双溪口的安全,应进行泥石流的防治研究。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

陈鸿志, 苏志满, 徐林荣, 杨情情. 2016. 2013 年尤特台风诱发广东高速公路泥石流活动特征及危害. 自然灾害学报, 25(1): 65~73.

陈华清, 徐友宁, 张江华. 2008. 小秦岭大湖峪矿渣型泥石流的物源特征及其危险度评价. 地质通报, 27(8): 1292~1298.

崔鹏, 陈树群, 苏凤环, 张建强. 2010. 台湾“莫拉克”台风诱发山地灾害成因与启示. 山地学报, 28(1): 103~115.

邓龙胜, 范文, 熊炜. 2009. 矿渣型泥石流发育特征及危险性评价. 工程地质学报, 17(3): 415~420.

冯杭建, 唐小明, 周爱国. 2013. 浙江省泥石流与降雨历时关系研

究及应用检验. 自然灾害学报, 22(1): 159~168.

黄海, 马东涛. 2022. 泥石流容重的内涵诠释及其对灾害防治的启示. 地质论评, 68(1): 205~216.

黄家华, 冯文凯, 艾国海, 吴刚. 2016. 兴宁乌石坑沟特大矿渣型泥石流灾害特征及危险性评价. 科学技术与工程, 16(2): 1671~1815.

李宁, 唐川, 龚凌枫, 杨成长, 陈明, 甘伟. 2020. 急陡沟道泥石流启动特征模型试验研究——以汶川县福堂沟为例. 地质学报, 94(2): 634~647.

刘希林, 燕丽萍, 尚志海. 2009. 基于区域临界雨量的广东省泥石流灾害易发区预测. 水土保持学报, 23(6): 71~74.

刘艳辉, 温铭生, 苏永超, 许凤雯. 2016. 台风暴雨型地质灾害时空特征及预警效果分析. 水文地质工程地质, 43(5): 119~126.

龙水, 李秋胜, 王云杰. 2014. 强台风“尤特”近地风特性实测分析. 自然灾害学报, 23(6): 70~78.

唐光良, 孙宁, 刘瑞华. 2009. 华南沿海地区泥石流的类型特征及其动力机制分析. 热带地理, 29(5): 450~453.

王然, 连芳, 余瀚等, 史培军, 王静爱. 2016. 基于孕灾环境的全球台风灾害链分类与区域特征分析. 地理研究, 35(5): 836~850.

王文龙, 李占斌, 张平仓. 2003. 神府东胜煤田开发中人为泥石流形成条件分析. 水土保持研究, 10(2): 83~85.

王一鸣, 殷坤龙. 2018a. 台风暴雨型泥石流启动机制. 地球科学, 43(S2): 263~270.

王一鸣, 殷坤龙. 2018b. 台风暴雨型泥石流单沟危险度研究. 水文地质工程地质, 45(3): 124~130.

吴义, 胡志生, 刘冬, 张玉中. 2021. 温州市突发性地质灾害发育特征及防治对策. 地质论评, 67(z1): 5~6.

徐友宁, 陈华清, 杨敏, 柯海玲, 张江华, 刘瑞萍, 乔冈. 2015. 采矿废渣颗粒粒径对矿渣型泥石流起动的控制作用——以小秦岭金矿区为例. 地质通报, 34(11): 1993~2000.

燕丽萍. 2009. 广东省泥石流灾害综合分析. 热带地理, 29(4): 335~339.

岳丽霞. 2012. 浙江省泥石流形成及成灾特点. 山地学报, 23(1): 87~92.

张丽萍, 唐克丽. 2001. 矿山泥石流. 北京: 地质出版社.

张伟. 2017. 广东省台风降雨型地质灾害特征分析. 西部资源, (3): 133~136.

赵丽娅, 韩丽君, 樊妹芳, 张启新, 周爱红. 2018. 台风暴雨型矿山泥石流的形成条件及启动模式. 地质论评, 64(4): 947~955.

Chen Hongzhi, Su Zhiman, Xu Linrong, Yang Qingqing. 2016&. Characteristics and damage of debris flow events along Guangle expressway during typhoon Utor, 2013. Journal of Natural Disasters, 25(1): 65~73.

Chen Huaqing, Xu Youning, Zhang Jianghua. 2008&. Source charactersand risk assessment of mine slagtype debris flows in the Dahu valley, Xiaoqinling, China. Geological Bulletin, 27(8): 1292~1298.

Cui Peng, Chen Shuqun Su Fenghuan, Zhang Jianqiang. 2010&. Formation and mitigation countermeasure of geohazards caused by Moare typhoon in Taiwan. Journal of Mountain Science, 28(1): 103~115.

Deng Longsheng, Fan Wen, Xiong Wei. 2009&. Development features and risk of inducing slag debris flow at Daxicha gully. Journal of Engineering Geology, 17(3): 415~420.

Feng Hangjian, Tang Xiaoming, Zhou Aiguo. 2013&. Study on relationship between rainfall duration and occurrence of debris flow in Zhejiang Province and its application examination. Journal of

- Natural Disasters, 22(1): 159~168.
- Huang Hai, Ma Dongtao. 2022. The physical connotation of debris flow density and the enlightenment to geohazards mitigation. *Geological Review*, 68(1): 205~216.
- Huang Jiahua, Feng Wenkai, Ai Guohai. 2016&. Mineslag debris flows disaster characters from Wushikeng Ravine in Xinning and risk assessment. *Science Technology and Engineering*, 16(2): 1671~1815.
- Li Ning, Tang Chuan, Gong Lingfeng, Yang Chengzhang, Chen Ming, Gan Wei. 2020. An experimental study of starting characteristics of steep channel debris flow: A case study of the Futang gully in the Wenchuan County. *Acta Geologica Sinica*, 94(2): 634~647.
- Liu Xilin, Yan Liping, Shang Zhi-Hai. 2009&. Prediction of debris flow hazardprone areas based on regional critical rainfall in Guangdong Province. *Journal of Soil and Water Conservation*, 23(6): 71~74.
- Liu Yanhui, Wen Mingsheng, Su Yongchao, Xu Fengwen. 2016&. Characteristics of geo-hazards induced by typhoon rainstorm and evaluation of geohazards early warning. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 43(5): 119~126.
- Long Shui, Li Qiusheng, Wang Yunjie. 2014. Measurement and analysis of the surface layer wind field characteristics of violent typhoon. *Journal of Natural Disasters*, 23(6): 70~78.
- Tang Guangliang, Sun Ning, Liu Ruihua. 2009&. Analysis of characteristics and dynamics of debris flow in coastal areas of South China. *Tropical Geography*, 29(5): 450~453.
- Wang Ran, Lian Fang, Yu Han, Shi Peijun, Wang Jingai. 2016&. Classification and regional features analysis of global typhoon disaster chains based on hazardformative environ ment. *Geographical Research*, 35(5): 836~850.
- Wang Wenlong, Li Zhan bin, Zhang Pingcang. 2003&. Analysis on forming condition of debris flows caused by human activities in Shenfu - Dongsheng coal field. *Research of Soil and Water Conservation*, 10(2): 83~85.
- Wang Yiming, Yin Kunlong. 2018a&. Initiating Mechanism of Typhoon -Triggered Debris Flow. *Earth Science*, 43(S2): 263~270.
- Wang Yiming, Yin Kunlong. 2018b&. A study of the typhoon-triggered debris flow hazard degree of a single gully. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 45(3): 124~130.
- Wu Yi, Hu Zhisheng, Liu Dong, Zhang Yuzhong. 2021. Development characteristics and prevention countermeasures of sudden geological disasters in Wenzhou. *Geological Review*, 67(z1): 5~6.
- Xu Youning, Chen Huaqing, Yang Min, Ke Hailing, Zhang Jianghua, Liu Rruiping, Qiao Gang. 2015&. Controlling role of particle sizes of mining waste residues in the initiation of mine debris flow. *Geological Bulletin of China*, 34(11): 1993~2000.
- Yan Liping. 2009&. Analysis on debris flow hazard in Guangdong Province. *Tropical Geography*, 29(4): 335~339.
- Yue Lixia. 2012&. Cause and damaging characteristic of debris flow in Zhejiang Province. *Journal of Mountain Science*, 30(1): 87~92.
- Zhang Liping, Tang Keli. 2001#. Keli Mine Debris Flow. Beijing: Geological Press.
- Zhang Wei. 2017&. The analysis on charact eristics of geological hazards induced by typhoon rainfall in Guangdong Province. *Western Resources*, (3): 133~136.
- Zhao Liya, Han Lijun, Fan Shufang, Zhang Qixin, Zhou Aihong. 2018&. Formation condition and starting mode of mine debris flow in typhoon rainstorm. *Geological Review*, 64(4): 947~955.

Formation mechanism and dynamic characteristics of mine-slag debris flow in typhoon rainstorm —Take Wushikeng gully in Xingning as an example

HUANG Jiahua¹⁾, FENG Wenkai²⁾

1) *Guangxi Traffic Engineering Inspection Co., Ltd, Nanning, 530299;*

2) *Chengdu University of Technology, Chengdu, 610059*

Objectives: Typhoon rainstorm is an important rainfall type that induces geological disasters in the coastal areas of South China. Affected by the landfall of typhoon “Utor”, the typhoon rain directly triggered the extra-large slag-type debris flow disaster in Wushikeng Gully in Xingning, which caused huge material sources and great potential harm. At present, the research on the slag debris flow in typhoon and rainstorm is still at the initial stage, mainly focusing on its formation mechanism, disaster characteristics and other aspects. There are problems such as narrow research scope, single method and few achievements. Therefore, it is of great significance to study the formation mechanism and dynamic characteristics of the slag debris flow in typhoon and rainstorm for the disaster mechanism and hazard evaluation of such debris flow.

Methods: We collected, sorted and analyzed the geological environment background. The Wushikeng Valley in Xingning is a typical typhoon-rainstorm-landslide-debris flow disaster chain area, which is a high incidence area of debris flow. The volume and physical and mechanical parameters of the material source were explored through measurement, drilling, density and particle grading in-situ tests and laboratory tests. The channel deposits accounted for 81.9% of the total material source. In combination with the material composition and deformation and

damage characteristics of the slag pile, the stability of the slag pile was calculated and evaluated by the slice method. We collected and analyzed the rainfall data during the typhoon period. The rainfall and rainfall intensity exceeded the critical rainfall index for triggering debris flow in the region. Calculated the dynamic characteristic parameters of debris flow such as flow velocity, flow rate and fluid impact force and their change rules, further analyzed the characteristics of debris flow movement and accumulation process, and quantitatively analyze and evaluate the debris flow activity trend from the aspects of debris flow activity duration, rainstorm intensity index and risk assessment.

Results: The formation mechanism of slag type debris flow in typhoon rainstorm; its unique watershed topographic characteristics are the basic factors for the formation of debris flow, the rich slag type material source mainly composed of channel deposits is the basic condition, the high intensity typhoon rainstorm is the direct trigger factor, and the joint action of mine mining, random stacking of slag and other factors has expanded the disaster scale. The formation process and dynamic characteristics are summarized as follows: early heavy rainfall-landslide debris flow-slag debris flow-typhoon rainstorm-channel blocked and highed-collapse and scale enlargement. The comprehensive debris flow has a strong rainstorm index $R=6.41$, occurrence probability of $0.2\sim0.8$ and hazard degree H of 0.6260 . The debris flow is in the youth stage and belongs to highly dangerous debris flow. Typhoon and rainstorm often occur in this basin, and it is very likely that large-scale debris flow will break out again. Its harm and impact range is larger. Therefore, the prevention and control of debris flow should be studied.

Conclusions: This paper takes the debris flow in Wushikeng Gully in Xingning as an example, takes the geological environment of debris flow as the research background, studies the formation conditions and mechanism of debris flow, and studies the dynamic process characteristics of the slag debris flow in typhoon rainstorm through theoretical calculation. Typhoons and rainstorms occur from time to time in the basin, and it is very likely that large-scale debris flows will erupt again, therefore research on the prevention and control of debris flow should be carried out, which provides a reference for the disaster mechanism of such debris flow and the prevention and mitigation work in similar disasters.

Keywords: slag debris flow; typhoon and rainstorm; formation mechanism; dynamic characteristics; Tieshanzhang mining area in Guangdong

Acknowledgements: This research was funded by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41977252, U2005205) and the State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection Independent Research Project (No. SKLGP2020Z001)

First author: HUANG Jiahua, male, born in 1988, master, senior engineer, mainly engaged in geotechnical engineering detection and monitoring and geological disaster prevention; Email: 349995037@qq.com

Manuscript received on: 2022-09-03; Accepted on: 2023-02-14; Network published on: 2023-02-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2023.02.031 **Edited by:** LIU Zhiqiang