

# 流域环境退化对山区铁路泥石流的影响机理研究

刘波<sup>1,2</sup>

(1.中国铁道科学研究院集团有限公司 铁道建筑研究所,北京 100081;

2.中国铁道科学研究院集团有限公司 高速铁路轨道系统全国重点实验室,北京 100081)

**摘要:** [目的] 深入评估广西百色市某泥石流成灾因子与致灾机理,为山区铁路泥石流灾害防治及风险预测提供科学依据。[方法] 基于现场调查、历史遥感影像分析等方法,分析山区铁路泥石流的发育特征与致灾因子,采用理论计算法反演2024年4月19日(“4·19”)泥石流,获取不同工况下暴雨洪峰流量、泥石流峰值流量、冲出固体物质量等动力学参数。[结果] ①该铁路泥石流为典型沟谷型泥石流,流域面积0.48 km<sup>2</sup>,主沟长度1.03 km,平均纵坡降319.42%,相对高差329 m,沟内物源发育,物源类型主要包括沟道物源、坡面物源和溜坍物源。②此次降雨形成的暴雨洪峰流量为6.23 m<sup>3</sup>/s,在叠加各种环境退化因素后,形成的泥石流峰值流量可达23.16 m<sup>3</sup>/s,是暴雨洪峰流量的3.72倍,一次冲出固体物质1.93×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,超出既有措施的拦截及排导能力。③近年来的林木砍伐、开挖便道、山林火灾和干旱气候等因素导致流域环境退化是导致该泥石流发生的主要原因。[结论] 流域环境退化是导致该泥石流形成的核心原因,计算反演的不同工况下泥石流流量等动力学参数与实际情况吻合,可为防治工程设计提供理论依据。

**关键词:** 泥石流; 山区铁路; 流域环境退化; 影响因子; 致灾机理

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2025)02-0124-12

**中图分类号:** P642.2

**文献参数:** 刘波.流域环境退化对山区铁路泥石流的影响机理研究[J].水土保持通报,2025,45(2):124-135. Liu Bo. Mechanism of watershed environmental degradation impacts on debris flows along mountainous railway [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(2): 124-135. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.02.014; CSTR:32312.14.stbctb.2025.02.014.

## Mechanism of watershed environmental degradation impacts on debris flows along mountainous railway

Liu Bo<sup>1,2</sup>

(1.Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences

Corporation Limited, Beijing 100081, China; 2.National Key Laboratory of High-Speed Railway

Track System, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China)

**Abstract:** [Objective] A comprehensive evaluation of the causative factors and mechanisms of debris flows in Baise City, Guangxi, China was conducted, in order to provide scientific basis for the prevention and risk prediction of railway debris flow disasters in mountainous areas. [Methods] Based on a field investigation, historical remote sensing image analysis, among other methods, the characteristics and disaster-causing factors of railway debris flow in mountainous areas were analyzed. The debris flow occurred on April 19th, 2024 (“4·19”) was theoretically calculated to obtain the dynamic parameters such as rainstorm peak discharge, debris flow peak discharge, and the quality of run-out solid materials under different working conditions. [Results] ① The railway debris in Baise City, Guangxi has a typical valley type flow, with a catchment area of 0.48 km<sup>2</sup>, a main gully length of 1.03 km, an average longitudinal slope of 319.42%, a relative height difference of 329 m, and well-developed material sources in the gully, including channel, slope, and landslide material sources. ② The peak discharge of the rainstorm caused by the “4·19” rainfall

收稿日期:2024-10-11

修回日期:2024-12-11

采用日期:2024-12-11

资助项目:中国国家铁路集团有限公司重点课题“既有山区铁路线下基础设施防洪能力评价技术研究”(N203G072);中国铁道科学研究院集团有限公司青年专项“老旧山区铁路泥石流致灾机理与综合防控对策”(2024YJ246)

第一作者:刘波(1994—),男(汉族),四川省广元市人,博士,助理研究员,主要从事铁路地质灾害方面的研究工作。Email:liubo@rails.cn.

was 6.23 m<sup>3</sup>/s. After the superposition of various environmental degradation factors, the peak discharge of the debris flow reached 23.16 m<sup>3</sup>/s, which was 3.72 times greater than the peak discharge of the rainstorm, and 1.934×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup> of solid materials move with this discharge at one time, which exceeds the interception and discharge capacity of existing measures. ③ In recent years, deforestation, excavation of access roads, forest fires, and arid climate have led to environmental degradation in the watershed, which are the main reasons for the occurrence of debris flow. [Conclusion] The environmental degradation is the core reason for the formation of debris flow in study area. The dynamic parameters such as the discharge of debris flow under different working conditions are consistent with the actual situation, which can provide a theoretical basis for the design of the prevention and control project.

**Keywords:** debris flow; mountainous railway; watershed degradation; impact factors; disaster-causing mechanism

中国早期的铁路受经济、技术条件的制约,部分山区铁路建设标准低,对泥石流灾害防治措施薄弱<sup>[1-2]</sup>。如宝成、成昆、鹰厦、丰沙等线路多采用桥梁或涵洞方式通过泥石流沟口,部分线路泥石流灾害时有发生,构成行车安全隐患<sup>[3-4]</sup>。同时,由于近年来气候变化异常、地质环境变化、人为活动加剧等因素影响,泥石流流域内物源储量显著增加,使得早期按照当时标准建设的山区铁路面临十分严峻的泥石流灾害问题。

山区铁路穿越区域通常地形起伏剧烈、岩性组合复杂、构造作用强烈,为泥石流的形成提供了良好的地质基础<sup>[5-6]</sup>。随着全球气候变暖趋势持续,中国极端气候异常突出,降雨时空分布不均,部分地区屡发生突破历史纪录、颠覆传统认知的极端天气事件,导致铁路、公路的泥石流灾害极其严重<sup>[7-9]</sup>。如 2023 年 7 月 29 日至 8 月 2 日,台风“杜苏芮”北上,残余环流造成京津冀地区历史罕见极端强降雨,北京市平均过程降雨量 277 mm,最大降雨量 745 mm,为 140 a 以来有仪器测量记录之最,导致北京某山区铁路 67 km 范围内发生 20 余处影响行车的泥石流灾害。铁路泥石流的物源条件主要受工程道路建设、林木砍伐、采砂采矿以及各类农耕等人为活动影响,这些活动改变了部分铁路沿线周边排水路径,扰动了泥石流流域内坡表岩土体的稳定,加剧了土壤侵蚀,为泥石流提供丰富的物质来源<sup>[10-11]</sup>。同时山区铁路泥石流是否致灾还受铁路与泥石流的相对关系控制,由于当时勘测手段的制约,部分老旧铁路选线不合理,线路以桥梁或涵洞方式通过泥石流沟口时,出现桥梁高度不够或涵洞过流能力不足的问题,严重威胁行车安全<sup>[12-13]</sup>。长期以来,学者们基于现场调查、遥感解译、地质钻探、物理模型试验和数值模拟等方法在泥石流成因机理、监测预警、危险性评估等方面形成了大量成果<sup>[14-16]</sup>,但由于泥石流灾害机理复杂,影响因素众

多,目前既有动力学参数计算方法仍具有一定的经验性。因此,亟须开展极端降雨、地质环境变化等因素作用下山区铁路泥石流致灾机理与动力学参数计算方法研究。

2024 年 4 月 19 日,广西百色市某山区铁路隧道出口在强降雨作用下暴发泥石流,导致线路中断行车 14 h,对线路运维造成严重损失。本文以广西百色市某山区铁路泥石流为研究对象,首先分析了该泥石流沟的发育特征与演化过程,其次开展了“4·19”降雨作用下泥石流动力学参数反演计算,最后从多个角度开展了灾害成因分析,研究成果可为中国山区铁路沿线泥石流的防灾减灾提供支撑。

## 1 工程地质条件

由图 1 可见,广西百色市某山区铁路泥石流流域面积约 0.48 km<sup>2</sup>,流域最高点位于东南侧山脊,高程 887 m,最低点为泥石流出口,位于隧道出口右侧,高程 558 m,相对高差 329 m。流域主沟总长度 1.03 km,主沟平均纵坡降 319.42‰,发育 7 条支沟以及若干条小型冲沟。

根据调查,该泥石流流域可划分为物源形成区和流通堆积区。其中,形成区支沟发育,沟谷横断面呈“V”形,水力侵蚀较为严重,汇水条件良好,沟谷深切,山高坡陡,两岸坡度 20°~40°,沟床纵坡较大,植被稀疏,有利于地表降雨及冲刷物质的集中汇聚。流通堆积区主要位于主沟沟道内,沟道宽度约 3~8 m,整体较为平缓,最大高程 658 m,最小高程 558 m,相对高差约 100 m,总长度约 668 m,纵坡降约 149.70‰。沟道整体以淤积为主,局部陡坎处以冲刷为主,流通堆积区两侧岸坡发育多处坡面溜坍。

泥石流物质受沟内原有多道拦沙坝的拦挡后,剩余物质仍然具有较大冲击力,原排导槽排导能力不足,且泥石流冲出方向与线路呈约 45°相交,导致大

量泥石流物质冲出排导槽并冲上线路,掩埋线路约 200 m(其中隧道内约 50 m)。

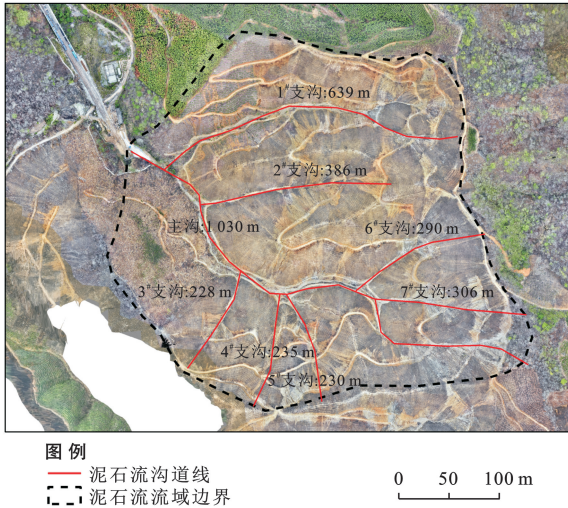


图 1 广西百色市某山区铁路泥石流地形地貌特征

Fig.1 Topographic and geomorphological characteristics of railway debris flow in mountainous area of Baise City, Guangxi Zhuang Autonomous Region

### 1.1 地形地貌

该泥石流灾害点位于广西百色市田林县,地处南盘江与右江水系分水岭—九巍峨山系,总体上属构造侵蚀、剥蚀中低山地貌,山脉延绵,峰峦起伏,山坡陡峻,地形切割强烈,山间冲沟发育。林木采伐前地表植被茂密,以尾叶桉等经济林木和灌木为主,局部为农作物。

该泥石流流域形态呈“桑叶形”,沟谷呈不对称“V”字形,谷底段宽 3~8 m,沟口狭窄处宽 2~3 m 左右。流域内 20°~30°坡度的斜坡面积占比在 70%,20°~40°斜坡面积占比 96%,地表面积约为 0.63 km<sup>2</sup>,是投影面积的 1.31 倍,边坡容易破坏失稳,为泥石流提供物源。

### 1.2 地质条件

该泥石流位于马朗至根龙复式褶皱地带,为北西向构造系(右江系)。受印支期构造运动影响较为严重,地质构造发育,NE,SW 向强烈挤压应力致使三叠系地层破坏强烈,形成一系列 NW 向褶皱及断裂,其中以九巍峨向斜的规模最大,导致岩石风化节理及构造裂隙广泛发育。

根据调查,流域内地表覆盖物主要为第四系坡残积层(Q<sub>4</sub><sup>dl+el</sup>)冲洪积层(Q<sub>4</sub><sup>dl+pl</sup>),下部基岩为三叠系兰木组(T<sub>2</sub><sup>1</sup>)砂岩和泥岩,岩性较软,风化剧烈,结构松散,遇水易软化,尤其是遇短历时强降雨时,易形成含泥沙、石块的特殊洪流,为泥石流提供物源。

### 1.3 物源条件

根据现场调查,该泥石流流域内几乎全域均可

为泥石流补给物源,根据坡表松散情况划分为强烈侵蚀区和一般侵蚀区,见图 2。据调查,沟内强烈侵蚀区域共有 43 处,总面积约为 0.2 km<sup>2</sup>,占整个流域面积的 39.58%,其平均厚度约 2 m,估算松散区域物源量约 4.00×10<sup>5</sup> m<sup>3</sup>。流域其余区域为一般侵蚀区域,占流域面积的 60.42%,这部分区域主要通过坡面表层径流为泥石流提供物源补给,其可启动物源平均厚度约 0.3 m,估算潜在破坏区域物源量约 5.60×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>。二者之和为流域内可启动物源总储量,约为 4.56×10<sup>5</sup> m<sup>3</sup>。

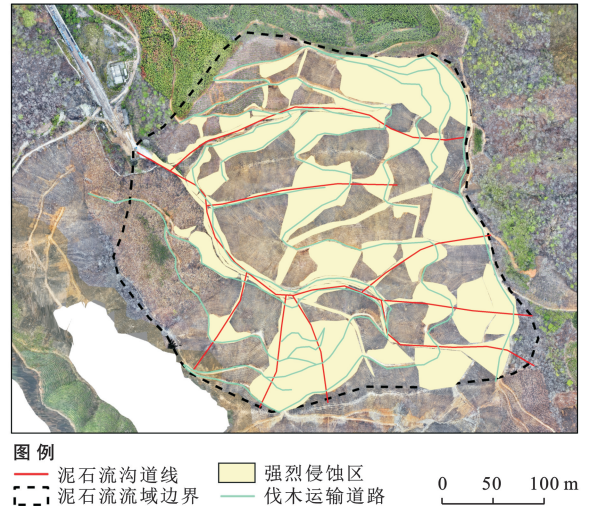


图 2 研究泥石流影响区域分布图

Fig.2 Distribution map of influencing area in investigated debris flow

沟内物源类型包括沟道物源、坡面物源和溜坍物源,主要分布于主沟及支沟沟道内、沟道两侧岸坡以及伐木运输通道两侧边坡,各类物源间也有密切的转化关系,发生泥石流时,坡面物源和溜坍物源很容易转化为沟道物源。

1.3.1 坡面物源 坡面物源包括灰烬泥沙层坡面物源以及道路外侧径流冲刷物源(图 3),该泥石流流域内早期植被茂密,坡体结构完整,坡表种植有桉树等经济作物。但砍伐导致坡面丧失了其冠层对降雨的截留作用,之后 2024 年 4 月初的山火又导致坡表可燃物(植被、枯枝落叶层和半分解层)燃烧后与表层混合形成灰烬泥沙层。当降雨量大于灰烬泥沙层吸水能力时,灰烬泥沙层饱和形成泥流,泥流向下流动过程中,细颗粒物不断加入,显著降低了粗颗粒沉降速度,导致泥流密度增大,其侵蚀能力和搬运能力较清水均显著增加,造成坡面侵蚀加剧。

除此之外,伐木运输通道盘山修建导致坡面形态被截断,坡体表面径流的泥流将汇入伐木运输通道,大量水流向低处汇集,并将导致通道的路基边坡坡面产生局部径流冲刷沟槽,这些沟槽在水动力作用下又不断下切,为泥石流提供丰富的物质来源。



a 火烧形成的灰土层



b 坡面径流



c 径流深切沟槽



d 径流深切沟槽

图 3 研究区典型坡面泥石流物源

Fig.3 Material source of debris flow in typical slopes of study area

1.3.2 溜坍物源 该泥石流流域内溜坍物源广泛发育(图 4),主要包括两种,第一种是泥石流向下拉槽及侧向侵蚀导致两岸边坡失稳破坏形成,主要分布于主沟及支沟两岸。第 2 种溜坍物源主要分布于伐木运输通道内侧,其成因主要是修建伐木运输通道时随意切坡导致内侧坡体形成不稳定边坡,在降雨

作用下,这些边坡将失稳而进行滑动,形成坡面溜坍为泥石流提供物源。根据测算,该泥石流流域内共建有伐木运输道路总长度约 8.43 km,道路修建过程中切坡后无支护措施导致道路内侧坡体剖面形成潜在溜坍区域,流域内仅此类物源量就有约  $9.00 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。



a 支沟出口坡面溜坍



b 公路内侧坡面溜坍

图 4 研究区典型溜坍物源

Fig.4 Material source of typical topsoil slip in study area

1.3.3 沟道物源 沟道物源主要为堆积在沟道的块碎石土,成分为松散的块碎石夹泥沙及大量树根和火烧树干(图 5),主要是一部分坡面物源及溜坍物源在暴雨作用下经泥石流搬运转化形成。该泥石流的沟道物源在主沟及支沟内都有广泛分布,是泥石流的主要物源之一,其动储量主要包括沟底拉槽下切可能被侵蚀的部分及沟道两岸边坡失稳形成的堆积体受冲刷从而参与泥石流的部分。

综上所述,极松散区域物源总量约  $4.00 \times 10^5 \text{ m}^3$ ,

主要来源于道路修建形成的内外侧不稳定边坡及主、支沟沟道,而伐木导致的地表截水能力下降则间接诱发了边坡失稳、加剧了坡面冲刷效应,山火产生的灰烬层加剧了汇流作用,以上 3 种因素产生的物源量分别约为  $2.80 \times 10^5$ ,  $8.00 \times 10^4 \text{ m}^3$  和  $4.00 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。而较松散区域物源主要为植被砍伐导致的表层水土流失,物源量为  $5.60 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。因此,受道路修建、植被砍伐及山火影响产生的物源量所占比例分别为 61.40%, 29.82% 和 8.77%。



a 主沟沟道物源



b 沟内树根



c 支沟沟道物源



d 支沟沟道下切侵蚀

图 5 支沟沟道物源及支沟下切侵蚀特征

Fig.5 Materials source and erosion characteristics in tributary channel

## 1.4 降雨条件

该泥石流沟位于亚热带季风气候区,多年平均降雨量为 832.6~1 547.7 mm,降雨具明显的季节性,每年 5—8 月为雨季,大雨、暴雨是最主要的降雨形式,其雨量占全年的 49.6%~69.0%。根据研究点雨量监测站历史降雨数据统计,2009 年 1 月 1 日至 2024 年 4 月 24 日期间,该地区日降雨量超过 50,60,70,80,90 mm 的次数分别有 32,21,16,12,4 次,最大日均降雨量为 126.3 mm,最大小时雨量均值为 58 mm。

## 2 流域环境退化过程

### 2.1 历史泥石流灾害

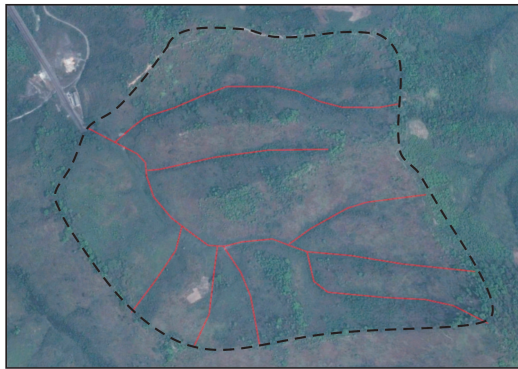
据资料调查,该沟曾在 2008 年发生小规模泥石流,冲出物规模约  $260 \text{ m}^3$ ,泥石流冲出物堵塞线路右侧截水沟。之后未发生大型泥石流灾害,直至 2024 年 4 月 19 日,在多种不利条件耦合作用下,该沟暴发泥石流,一次冲出泥石流物质约  $1.50 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,泥石流上道掩埋线路长度约 100 m,厚度约 1.00~1.50 m,上道量约  $3.00 \times 10^3 \text{ m}^3$ 。沟口设置的两道拦沙坝(距

离线路 40 m)被泥石流掩埋,防护网被冲毁(距离线路 30 m),排水沟被掩埋。

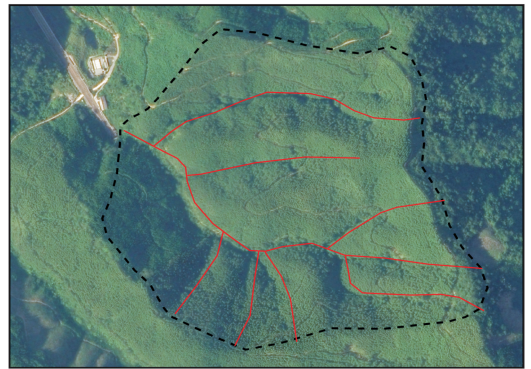
### 2.2 流域环境退化过程

#### 2.2.1 植被砍伐 根据调查,2009 年以前,未种植经

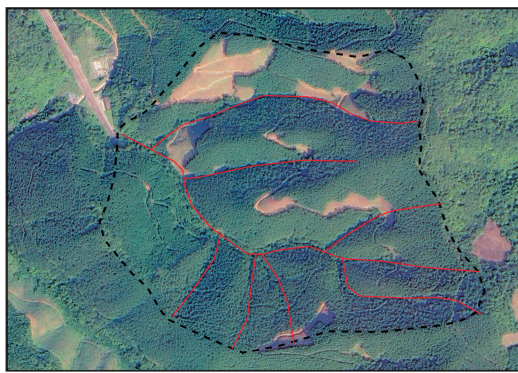
济林之前,该区域表面植被环境良好,坡面完整。该区域于 2009 年 12 月种植桉树,2023 年 10 月初开始对其进行间歇性采伐,至 2024 年 2 月 3 日基本砍伐结束,采伐过程见图 6a—6f。



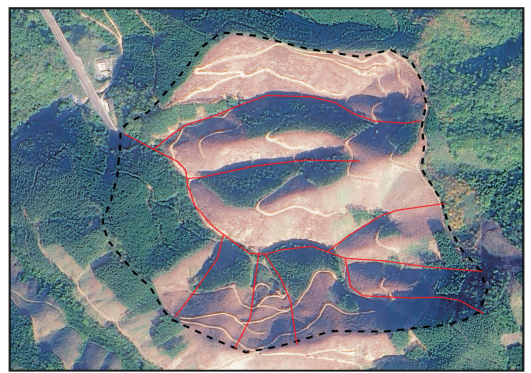
a 未种树前影像(20090322)



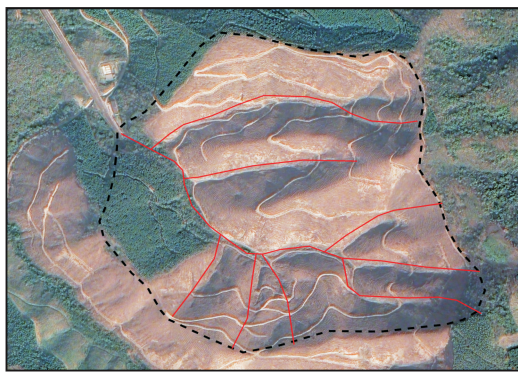
b 砍伐前影像(20231002)



c 砍伐期间影像(20231016)



d 砍伐期间影像(20231209)



e 砍伐后影像(20240203)



f 山火后影像(20240402)

图例 — 泥石流沟道线    - - - 泥石流流域边界

0 50 100 m

注:图 a 来自 Landsat 7 卫星影像,分辨率为 15 m,图 b—f 均来自吉林一号卫星影像,分辨率为 0.75 m。

图 6 泥石流沟砍伐前后流域内环境变化影像

Fig.6 Satellite images of environmental changes in watershed before and after logging in debris flow gullies

不同时期采伐面积占流域面积的比例如图 7 所示。2023 年 10 月 16 日砍伐比例为 12.66%,2023 年 10 月 21 日砍伐面积为 19.15%,2023 年 12 月 9 日砍伐面积为 65.64%,至 2024 年 2 月 3 日砍伐面积达 89.04%,基本完成了林木砍伐,至泥石流发生前,再

对流域内受山火影响的剩余林木进行了砍伐,导致流域内林木砍伐面积达 99.81%。

2.2.2 突发山火 2024 年 4 月 1 日,流域内发生山火,导致原坡体表面的枯枝落叶层烧毁殆尽,在坡表面形成一层灰烬层(图 8),林火高温导致土壤性质劣化,更

易发生侵蚀,进一步为泥石流提供物质条件。同时,流域内剩余林木受山火炙烤后,也被砍伐殆尽并弃于坡表,进一步降低了流域内植被对降雨的截流能力。

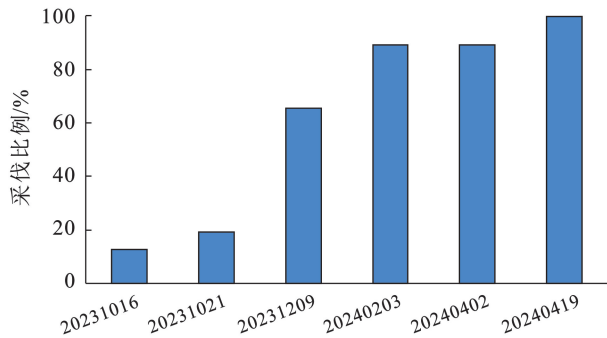


图 7 泥石流流域内不同时间采伐比例

Fig.7 Logging proportion in debris flow basin at different times

### 2.3 既有防护工程失效

2008 年小规模泥石流后,在沟口上游约 100 m 的两冲沟中心交汇处主沟上游 32 m,支沟上游 29 m 处各新建一道拦沙坝,顶部设柔性防护网或钢格栅,

分别位于主沟沟口上方约 100 m 处(主沟 2<sup>#</sup>坝)和 1<sup>#</sup>支沟上方(支沟 1<sup>#</sup>坝)。2019 年,在主沟沟道下游(即距线路中心斜长约 77 m 处)增设了一道混凝土拦沙坝(主沟 1<sup>#</sup>坝),宽 8 m,高 3 m,两侧有 3 m 宽翼墙,上部有钢格栅(见图 9)。

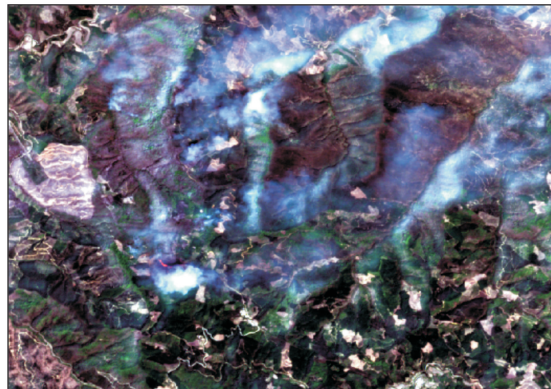


图 8 泥石流流域山火情况

(2024 年 4 月 3 日,数据来自吉林一号卫星影像)

Fig.8 Situation of wildfires in debris flow basin

(April 3, 2024, data from the Jilin-1 satellite image)



a 主沟 1<sup>#</sup>坝



b 主沟 2<sup>#</sup>坝



c 支沟 1<sup>#</sup>坝



d 沟口排导槽

图 9 沟内防治工程淤堵情况

Fig.9 Blockage characteristics of control projects in drainage canal

根据调查,受此次泥石流影响,主沟 1<sup>#</sup>坝整体结构完好,但上部钢格栅缠绕大量树根,坝前淤积约

1.3 m 厚,坝后淤积深度与坝顶齐平;主沟 2<sup>#</sup>坝整体结构完好,顶部被动拦挡网被冲毁,坝后淤积深度与

坝顶齐平;支沟 1# 坝坝身及上部被动拦挡网均被冲毁,坝前处纵坡降较大,冲刷导致基岩裸露,坝后部分淤积,沟口排导槽被全部淤满。

## 2.4 发展阶段评价

该泥石流的灾害史表明早期其为低频泥石流,但植被砍伐、伐木运输通道修建以及山火等外界因素作用,导致沟内地表裸露、蓄水能力降低、松散物源量增加、水土保持能力劣化,诱发泥石流的激发雨量降低,其发生频率可能变为高频,且一次冲出固体物质将显著增加,因此判定该泥石流当前发展阶段进入旺盛发育期。

## 3 泥石流灾害反演

### 3.1 计算工况

如前所述,该泥石流沟在其历史演化过程中,其流域内植被情况、汇水条件、物源条件等均发生了较大变化,大致可分为 3 个阶段:①早期,沟内未修建道路时,沟内坡面完整,水土保持能力较强,泥石流流体中固体物质含量较低。②之后,由于修建便道、伐木等因素影响,沟道内原有地质环境遭受破坏,水土保持能力下降,可启动物源量显著增加。③在遭受山火以后,植被进一步破坏,同时林火高温导致坡面表层土壤松散,极易被侵蚀,进一步增大了泥石流的固体物质含量。因此,根据该泥石流流域的环境演化过程设置 3 种工况开展反演计算(如表 1 所示)。

首先采用西南地区暴雨洪峰流量公式计算此次降雨产生的洪水峰值流量。之后采用泥石流流量公式计算不同工况下泥石流流体的峰值流量,计算过程中考虑不同工况下泥石流的泥沙系数及堵塞系数。最后计算泥石流一次冲出固体物质总量,并对沟口排导槽的过流能力进行验证。

表 1 泥石流流域环境退化不同阶段的计算工况

Table 1 Calculation conditions for different stages of watershed environmental degradation of debris flow

工况	描述	时间段
工况 1	初始状态	2023 年 10 月 1 日前
工况 2	便道修建及伐木后	2023 年 10 月 1 日至 2024 年 4 月 1 日
工况 3	山火后	2024 年 4 月 1 日后

### 3.2 暴雨洪峰流量

针对西南地区特点,首先采用暴雨洪峰流量公式对此次“4·19”暴雨的峰值流量进行计算:

$$Q_p = 0.278FC_1\alpha_p y_m \quad (1)$$

式中: $Q_p$  为暴雨洪峰流量(mm/h); $F$  为流域面积( $\text{km}^2$ ); $C_1$  为产流系数,根据《桥渡水文》,该地区土类别为 II 类土,叠加前期降雨,产流系数取值为 0.75; $\alpha_p$  为设计暴雨强度(mm/h),由于流域面积  $F \leq 10 \text{ km}^2$ ,计算公式为:

$$\alpha_p = 6n_1 S_p \quad (2)$$

式中: $S_p$  为该次触发泥石流最大小时降雨量( $H_{1p}$ ),取 35.5 mm; $n_1$  为短历时暴雨衰减指数,广西位于第 II 分区,取 0.45; $y_m$  为径流函数,根据《桥渡水文》<sup>[17]</sup> 中的表 5—18 查取,表中:

$$\lambda = \frac{t}{\tau} \quad (3)$$

$$\gamma = 0.36\alpha_p^{0.4}\tau \quad (4)$$

$$\tau = \frac{L_s^{0.72}}{1.2A_s^{0.6}I_s^{0.21}F^{0.24}\alpha_p^{0.24}} \quad (5)$$

式中: $\tau$  为流域汇流时间; $A_s$  为阻力系数,取 2.8; $L_s$  为主沟长度,取 1.03 km; $I_s$  为沟道平均纵比降,取 319.42‰。计算结果如表 2 所示。结果表明,在该次降雨条件下,流域汇水形成的山洪峰值流量为 6.23  $\text{m}^3/\text{s}$ 。

表 2 工况 3 暴雨洪峰流量计算结果

Table 2 Calculation results of peak discharge induced by rainstorm under working condition 3

流域面积 ( $F$ )/ $\text{km}^2$	产流系数 ( $C_1$ )	暴雨强度( $\alpha_p$ )/ ( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )	小时雨力( $S_p$ )/ ( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )	阻力系数 ( $A_s$ )	历时 1/6~1 h 暴雨系数( $n_1$ )	流域汇流 时间( $\tau$ )/h	径流函数 ( $y_m$ )	峰值流量( $Q_p$ )/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )
0.48	0.75	113.77	35.5	2.8	0.45	0.223	0.783	6.23

### 3.3 泥石流洪峰流量

由于泥石流是暴雨在沟内汇聚并沿途挟带沟内松散固体物质形成,同时狭窄沟道还存在堵塞放大效应,因此泥石流洪峰流量的计算需同时考虑泥沙修正系数及堵塞放大系数,泥石流洪峰流量采用下式计算:

$$Q_c = D_c(1 + \varphi)Q_p \quad (6)$$

式中: $Q_c$  为泥石流峰值流量( $\text{m}^3/\text{s}$ ); $Q_p$  为暴雨洪峰流量( $\text{m}^3/\text{s}$ ); $\varphi$  为泥沙修正系数,与泥石流重度有

关,取值查《泥石流灾害防治工程勘查规范》(DZ/T 0220—2006)表 G.2。由于缺乏试验数据,工况 1 和工况 2 的泥石流容重  $\gamma$  取值首先通过上述规范表 G.1 计算得到泥石流易发程度评分分别为 44, 73, 之后查表 G.2 得到泥石流容重分别为 13.00  $\text{kN}/\text{m}^3$ , 15.02  $\text{kN}/\text{m}^3$ 。工况 3 的泥石流容重根据现场简易容重试验获取(图 10),取上、中、下游试验的平均值,约为 14.78  $\text{kN}/\text{m}^3$ 。最后查表得 3 种工况的泥沙系数

分别为 0.223, 0.459, 0.549;  $D_c$  是泥石流堵塞系数, 通过上述规范表 I.1 查取。

基于以上公式计算了 3 种工况下泥石流洪峰流量, 结果如表 3 和图 11 所示。

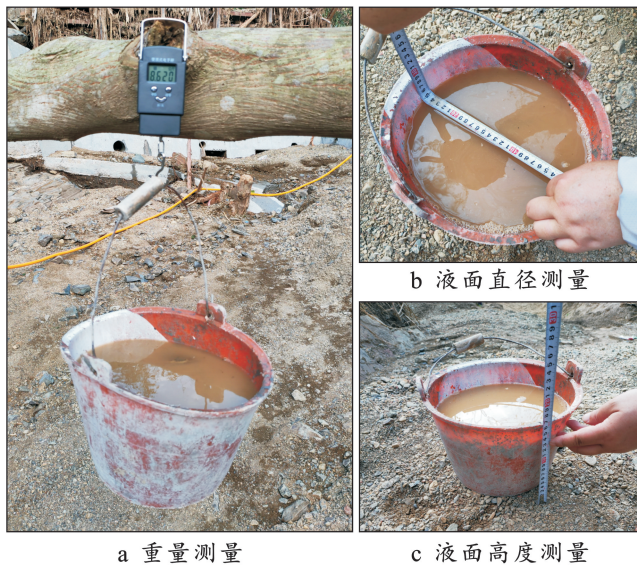


图 10 现场简易泥石流容重试验

Fig.10 Simple on-site test on bulk density of debris flow

表 3 泥石流洪峰流量计算取值

Table 3 Parameter values for peak discharge calculation of debris flow

工况	容重/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	泥沙系数	堵塞系数	泥石流洪峰流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )
工况 1	13.00	0.223	1.6	12.19
工况 2	15.02	0.459	2.0	18.18
工况 3	15.78	0.549	2.4	23.16

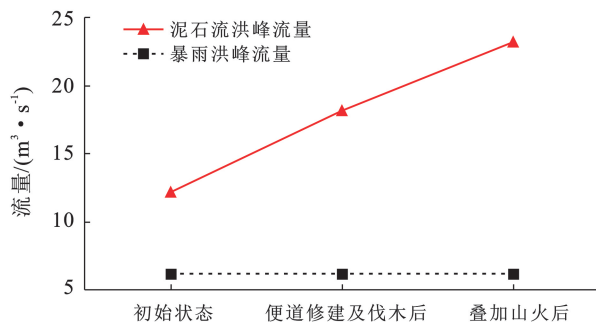


图 11 次降雨作用下泥石流峰值流量

Fig.11 Peak flow of debris flow under influence of single rainfall

(1) 在初始状态下, 由于沟内坡体表面完整性较好, 岩土体所受扰动较小, 若发生泥石流, 则其流体主要为高含沙水流, 容重较低, 泥石流洪峰流量为  $12.19 \text{ m}^3/\text{s}$ , 仅为暴雨洪峰流量的 1.96 倍。

(2) 在修建伐木运输通道及砍伐树木后, 流域内

松散固体物质显著增加导致泥石流容重增大, 泥沙系数相应增大, 同时沟道内树木及溜坍体增多也增大了沟道的堵塞系数, 因此工况 2 的泥石流洪峰流量达到  $18.18 \text{ m}^3/\text{s}$ , 是暴雨洪峰流量的 2.92 倍。

(3) 叠加山火之后, 坡表松散物质进一步增加, 导致坡面径流作用及侵蚀效应增强, 流域内残留树干增多, 导致该工况下泥石流洪峰流量达到  $23.16 \text{ m}^3/\text{s}$ , 是暴雨洪峰流量的 4.14 倍。

### 3.4 泥石流一次冲出固体物质总量

泥石流一次冲出固体物质总量基于下式计算:

$$W_s = (\gamma_s - \gamma_w)(\gamma_c - \gamma_w) \frac{19}{72} T Q_c \quad (7)$$

式中:  $W_s$  为一次泥石流冲出固体物质总量( $\text{m}^3$ );  $\gamma_s$  是泥石流中固体物质容重( $\text{kN}/\text{m}^3$ ), 取  $26.50$ ;  $\gamma_w$  是清水容重( $\text{kN}/\text{m}^3$ ), 取  $10$ ;  $\gamma_h$  是泥石流容重( $\text{kN}/\text{m}^3$ ), 取工况 3 的容重  $15.02$ ;  $T$  为泥石流历时(s), 结合走访调查工况 3 的泥石流历时为  $150 \text{ min}$ , 泥石流流量过程线可采用矩形概化, 则泥石流历时与泥石流洪峰流量成反比, 对应工况 1 和工况 2 的泥石流历时分别为  $79, 118 \text{ min}$ ;  $Q_c$  为泥石流峰值流量( $\text{m}^3/\text{s}$ )。

泥石流一次冲出固体物质总量计算结果如图 12 所示, 初始状态、便道修建及伐木后、叠加山火后 3 种工况下, 泥石流一次冲出固体物质质量分别为  $5.40 \times 10^3, 1.03 \times 10^4, 1.93 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 表明伐木、便道修建及山火等因素将显著改变沟道内水土保持条件, 增大沟内固体物质质量来源。

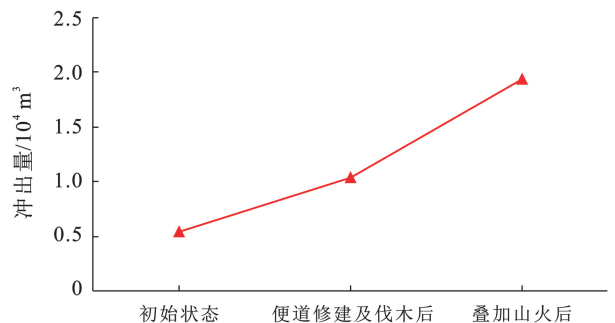


图 12 不同工况下泥石流一次冲出固体物质总量

Fig.12 Total run out solid materials of single debris flow under different conditions

现场调查此次泥石流冲出沟口的物质质量约为  $1.50 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 略小于计算值, 主要是因为沟道内两道拦沙坝及树根和树干起到了一定的拦蓄作用。

### 3.5 排导槽过流能力分析

根据档案资料显示, 1997 年所建排导槽的过水断面为梯形, 高度  $1.8 \text{ m}$  (含  $0.3 \text{ m}$  安全超高), 底宽  $2.4 \text{ m}$ , 顶宽  $2.7 \text{ m}$ , 安全高度以下过流面积为  $3.83 \text{ m}^2$ 。泥石流流速采用中稀性泥石流公式计算:

$$V_c = \frac{1}{\sqrt{\gamma_H \varphi + 1}} \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} \quad (8)$$

式中: $V_c$  为断面平均流速(m/s); $\gamma_H$  为泥石流固体物质比重( $t/m^3$ ),取 2.65; $\frac{1}{n}$  为清水河床糙率系数,取 12; $R$  为水力半径(m),取水深 1.5 m; $I$  为沟道水力坡度(‰),取设计断面最低纵坡 52.6‰。根据以上公式计算,原排导槽最缓处平均流速可达 2.86 m/s,过流流量为 10.93  $m^3/s$ ,大于初始状态下泥石流洪峰流量,表明原该沟设计结果满足初始状态下泥石流过流要求,但小于工况 2 及工况 3 的泥石流洪峰流量(分别为 18.18  $m^3/s$  和 23.16  $m^3/s$ ),因此无法满足修建道路、种植桉树及伐木、山火等因素综合作用后形成的泥石流过流要求。

### 3.6 计算验证

选取沟口典型断面对泥石流洪峰流量进行校核(图 13),断面清水河床糙率系数取 9,沟道水力坡度取断面纵坡 68.42‰,水力半径取泥痕高度 1.4 m,根据式(8)计算得流速为 2.34 m/s。通过现场测量该断面宽度约 7.5 m,泥石流过流面积为 10.5  $m^2$ ,乘以流速得泥石流峰值流量为 24.57  $m^3/s$ ,与前述工况 3 泥石流峰值流量计算结果误差仅 6.09%,表明上述计算结果可靠性较好。



图 13 泥石流断面宽度及泥痕测量

Fig.13 On-site measurement of debris flow section width and mud marks

## 4 泥石流成因分析

### 4.1 不良地质条件

该泥石流流域内发育多条冲沟,相对高差最大达 329 m,山体平均坡度约 33°,有利于雨水的快速汇集,增强泥石流流速及冲击力,加剧了地表径流冲刷作用。流域内地表覆盖大量第四系坡残积层碎石土,土质松散,下部基岩以泥岩和砂岩为主,岩性较软,遇水易软化,可为泥石流提供丰富的物质来源。研究区位

于马朗至根龙复式褶皱地带,地质构造发育,导致岩石风化节理及构造裂隙发育,极易风化破碎。

### 4.2 流域环境退化

4.2.1 林木砍伐 现场查勘及资料调查发现,泥石流发生区域所处林区自 2023 年 9 月底开始进行大面积采伐(采伐面积达 50.82  $hm^2$ ),导致周边山体、斜坡植被覆盖率极低,泥土大面积裸露,非常不利于该区域的水土保持。

4.2.2 开挖便道 现场调查发现,该林区山体上开挖有多条用于林木砍伐、运输用的便道,由于开挖时随意切坡,形成了大量不稳定人工挖、填方边坡。在降雨的影响下,容易发生坡面溜坍破坏,为泥石流提供了物源条件。

4.2.3 山林火灾 2024 年 4 月 1 日至 2 日该林区发生的山火,过火面积达 7.66  $hm^2$ (其中,桉树幼林 6.58  $hm^2$ ,杂木林 1.08  $hm^2$ ),林火造成坡表植被部分或完全烧毁,丧失了植被对降雨的截留作用。同时林火高温导致土壤抗剪强度降低、斥水性增强、渗透性降低,造成坡面表层土壤松散,易被侵蚀,进一步恶化了坡面土体的水土保持能力。

4.2.4 干旱气候 泥石流暴发前 4 个月全县降雨偏少,仅为平均值的 50%至 60%,持续降雨偏少,导致山体土壤板结、土地缺乏黏性、土层干裂、泥沙松动,为泥石流的产生提供了大量松散固体物质的物源条件。

### 4.3 降雨作用

依据根龙雨量站记录(距泥石流沟口约 800 m),4 月 19 日 21 时至 20 日 1 时的小时降雨量分别为 0, 35.5, 24.1, 27.9, 1.3 mm,累计 88.8 mm,达到大暴雨等级。最大小时雨量均值 35.5 mm(19 日 22 时 00 分),最大 10 min 雨量均值 18.9 mm(19 日 21 时 53 分),其 10 min 降雨量柱状图如图 14 所示。

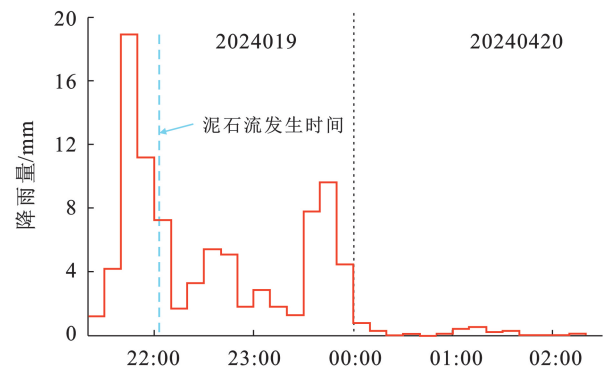


图 14 泥石流发生前后根龙站 10 min 降雨量  
Fig.14 10 min rainfall at Genlong Station before and after debris flow occurrence

同时,在泥石流发生前(4月17日晚至18日凌晨),研究区还有一次中雨至大雨等级的降雨过程,日降雨量累计达33.9 mm,致使该地区土壤在19日晚的强降雨前,坡面已被充分浸润,导致岩土体抗剪强度下降,蓄水能力减弱。4月19日21:50流域出现最大10 min雨强,达18.9 mm,22:00时出现最大小时雨强,达35.5 mm,直接导致该次泥石流暴发,22:03时泥石流从沟口上道,23:50时降雨出现第二道峰值,达9.7 mm,沟内再次冲出大量泥石流物质。至4月20日01:00时,降雨过程基本结束,累计降雨量达88.8 mm,达到了大暴雨等级,反映了当时的降雨时间短,强度大。

综上所述,研究区的不良地质地形环境为泥石流的形成提供了基础条件,林木砍伐、开挖便道、山林火灾、干旱气候等因素导致流域内环境发生显著变化,流域内坡体水土保持能力下降,物源补给能力增强,导致诱发泥石流形成的暴雨阈值明显下降,起到了显著的流量放大效应,因此流域环境变化是导致此次泥石流形成的重要原因。同时,前期降雨及此次短时强降雨直接诱发了此次泥石流。

## 5 结论

(1) 本研究泥石流为沟谷型泥石流,具备暴发泥石流的基本地质条件。近年来林木砍伐、开挖便道、山林火灾和干旱气候等因素导致流域环境退化是导致此次泥石流的主要原因。

(2) 对研究区不同工况泥石流流量的反演结果表明,“4·19”降雨形成的暴雨洪峰流量为 $6.23 \text{ m}^3/\text{s}$ 。在叠加了各种环境演变因素后,形成的泥石流峰值流量可以达到 $23.16 \text{ m}^3/\text{s}$ ,是暴雨洪峰流量的3.72倍,一次冲出固体物质 $1.93 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,超出既有措施的拦截及排导能力,导致泥石流冲出沟口。

(3) 当前,部分山区铁路面临严重的流域环境退化问题,有必要对类似条件的山区铁路上方汇水沟谷开展专项调查评估与风险研判,完善雨量监控方案与预警阈值,采取针对性措施科学防控。

## 参考文献(References)

- [1] 曾宪海. 铁路地质灾害防控面临的挑战与对策[J]. 中国铁路, 2024(1): 7-14.  
Zeng Xianhai. Challenges and countermeasures for prevention and control of railway geological disasters [J]. China Railway, 2024(1): 7-14.
- [2] 王士革, 崔鹏, 谢洪, 等. 山区铁路建设中的泥石流灾害与防治对策[J]. 工程地质学报, 2000, 8(4): 400-403.  
Wang Shige, Cui Peng, Xie Hong, et al. Hazard of debris

flow during the construction of railway in mountains and strategic [J]. Journal of Engineering Geology, 2000, 8(4): 400-403.

- [3] 陈俊虎, 丁玉寿. 成昆线利子依达泥石流[J]. 铁道建筑, 1982, 22(12): 14-18.  
Chen Junhu, Ding Yushou. Liziyida debris flow in Cheng-Kun railway [J]. Railway Engineering, 1982, 22(12): 14-18.
- [4] 徐雨晴, 何吉成. 1951—1996年中国铁路泥石流灾害的时空特征[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1): 337-342.  
Xu Yuqing, He Jicheng. Spatial and temporal characteristics of debris flow of China railways in 1951—1996 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(1): 337-342.
- [5] 李朝安, 王良玮, 廖凯, 等. 山区铁路沿线泥石流灾害预警研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊2): 3810-3816.  
Li Zhan'an, Wang Liangwei, Liao Kai, et al. Study of early warning mechanism of debris flow along railway line in mountainous areas [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(Suppl. 2): 3810-3816.
- [6] 刘波, 胡卸文, 何坤, 等. 西藏洛隆县巴曲冰湖溃决型泥石流演进过程模拟研究[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(5): 150-160.  
Liu Bo, Hu Xiewen, He Kun, et al. Characteristics and evolution process simulation of the Baqu gully debris flow triggered by ice-lake outburst in Luolong County of Tibet, China [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(5): 150-160.
- [7] 王海芝, 曾庆利, 许冰, 等. 北京“7·21”特大暴雨诱发的地质灾害类型及其特征分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(2): 125-132.  
Wang Haizhi, Zeng Qingli, Xu Bing, et al. Types and characteristics of geological disasters induced by the “7·21” rainstorm in Beijing [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(2): 125-132.
- [8] 鲜一丁. 成昆铁路龙门沟泥石流流动力学特征及危险性评估[J]. 铁道建筑, 2024, 64(8): 156-161.  
Xian Yiding. Dynamic characteristics and risk assessment of debris flow in Longmen gully on Chengdu-Kunming railway [J]. Railway Engineering, 2024, 64(8): 156-161.
- [9] Li Yamei, Zou Qiang, Hao Jiansheng, et al. Risk assessment of debris flows along the Karakoram highway (Kashgar-Khunjerab section) in the context of climate change [J]. International Journal of Disaster Risk Science, 2023, 14(4): 586-599.
- [10] 李健. 山区铁路地质灾害监测技术及应用[J]. 铁道建筑, 2024, 64(5): 140-146.

- Li Jian. Monitoring technology and application of geological hazards in mountainous railway areas [J]. Railway Engineering, 2024,64(5):140-146.
- [11] Liu K F, Li H C, Hsu Y C. Debris flow hazard assessment with numerical simulation [J]. Natural Hazards, 2009, 49(1):137-161.
- [12] 刘科,李云鹏,郇亚军,等.成昆铁路 K295 泥石流灾害特征分析及治理对策研究[J].隧道建设(中英文), 2023,43(7):1246-1256.
- Liu Ke, Li Yunpeng, Li Yajun, et al. Characteristics analysis of debris flow disaster in K295 of Chengdu-Kunming railway and its control countermeasures [J]. Tunnel Construction, 2023,43(7):1246-1256.
- [13] 姚令侃.铁路泥石流工程灾害形式及概率分析[J].路基工程,1996(2):38-43.
- Yao Lingkan. Disaster forms and probability analysis of railway debris flow engineering [J]. Subgrade Engineering, 1996(2):38-43.
- [14] 崔鹏,邹强.山洪泥石流风险评估与风险管理理论与方法[J].地理科学进展,2016,35(2):137-147.
- Cui Peng, Zou Qiang. Theory and method of risk assessment and risk management of debris flows and flash floods [J]. Progress in Geography, 2016,35(2):137-147.
- [15] 杨昶,铁永波,张宪政,等.我国泥石流数值模拟研究历程及发展趋势[J].水土保持学报,2023,37(5):1-11.
- Yang Chang, Tie Yongbo, Zhang Xianzheng, et al. Research history and development trend of numerical simulation of debris flow in China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(5):1-11.
- [16] 周公旦,崔鹏,吴宏伟,等.山地灾害大尺度动力学模拟实验平台[J].中国科学院院刊,2024,39(8):1458-1467.
- Zhou Gongdan, Cui Peng, Wu Hongwei, et al. Large-scale experimental platform for dynamic simulation of mountain hazards (LEADS) [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2024,39(8):1458-1467.
- [17] 铁道部第三勘测设计院.铁路工程设计技术手册:桥渡水文[M].北京:中国铁道出版社,1993.
- Ministry of Railways No.3 Survey and Design Institute. Technical Manual for Railway Engineering Design: Bridge Crossing Hydrology [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1993.

(上接第 123 页)

- [20] 杨进怀,吴敬东,祁生林,等.北京市生态清洁小流域建设技术措施研究[J].中国水土保持科学,2007,5(4):18-21.
- Yang Jinhuai, Wu Jingdong, Qi Shenglin, et al. Technical practices for building clean small watershed in Beijing [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2007,5(4):18-21.
- [21] 郭娜.北京市山区小流域生态清洁程度影响因素分析[D].北京:北京林业大学,2016.
- Guo Na. Analysis of influencing factors of ecological cleanliness in small watersheds in mountainous areas of Beijing [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.
- [22] 孙艳红.延庆县小流域综合治理模式及效益评价研究[D].北京:北京林业大学,2011.
- Sun Yanghong. The research on comprehensive management model and benefits evaluation of small watershed in Yanqing [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011.
- [23] 陈凤,潘政,翟亚明,等.不同坡度下侵蚀性降水对土壤理化性质的影响[J].中国水土保持,2024(3):55-60.
- Chen Feng, Pan Zheng, Zhai Yaming, et al. The effect of erosive precipitation on physical and chemical properties of soil in different slopes [J]. Soil and Water Conservation in China, 2024(3):55-60.