

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20210120003

川藏铁路沟谷型泥石流形成运动特征与工程危害研究*

李睿祺^{1,2,3}, 胡桂胜^{3,4}, 陈宁生^{3,4}, 杨志全^{1,2}, 韩征⁵

(1. 昆明理工大学公共安全与应急管理学院, 云南昆明 650093;

2. 云南省高校高烈度地震山区交通走廊工程地质灾害早期快速判别与防控重点实验, 云南昆明 650093;

3. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 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;

4. 高原科学与可持续发展研究院, 青海西宁 810016; 5. 中南大学土木工程学院, 湖南长沙 410075)

摘要: 拟建川藏铁路拉林铁路段山地灾害活跃, 沿线分布有大量的沟谷型泥石流沟, 由于其规模大、侵蚀强烈、具有重复性等特点, 时常对铁路和公路造成破坏, 并直接或间接的影响着拟建川藏铁路的建设, 甚至对铁路后期的安全运营造成威胁。考虑到拟建川藏铁路和G318的特殊性和重要性以及其时刻面临着泥石流灾害的威胁, 故采用野外考察、室内试验、遥感解译等相结合的方法, 对拟建川藏铁路沿线存在泥石流暴发痕迹的4条沟谷型泥石流沟的形成运动特征进行了研究, 分析了4条泥石流沟的危害特点, 结合泥石流运动参数和不同的危害特点提出了相应的防治方案。研究表明: (1) 江中浦曲、帮改娘沟、色比单嘎沟、协拉浦曲在形成条件上有利于泥石流灾害的形成和暴发。(2) 4条沟道的泥石流容重为 1.7 g/cm^3 左右, 均属稀性泥石流; 色比单嘎沟泥石流在规模上属大型, 其余3条沟泥石流在规模上均属特大型; 泥石流一次过流总量为 $8.61\text{ 万}\sim 1\,901.97\text{ 万 m}^3$; 固体冲出物质为 $3.91\text{ 万}\sim 829.95\text{ 万 m}^3$; 泥石流流速为 $5.2\sim 6.6\text{ m/s}$ 。(3) 通过过流能力分析发现, 协拉浦曲沟口G318断面存在明显的过流能力不足。(4) 基于泥石流特征参数及危害的分析, 对泥石流沟提出了相应的防治方案, 可为该段拟建铁路和公路的建设和后期安全运营等的防灾减灾提供借鉴。

关键词: 川藏铁路; 形成特征; 运动特征参数; 危害分析; 防治方案

中图分类号: P642.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)03-0432-09

Study on Formation and Motion Characteristics and Engineering Hazards of Gully Type Debris Flow in Sichuan Tibet Railway

LI Ruiqi^{1,2,3}, HU Guisheng^{3,4}, CHEN Ningsheng^{3,4}, YANG Zhiquan^{1,2}, HAN Zheng⁵

(1. Faculty of Public Safety and Emergency Management, Kunming University of Science and Technology, Kunming

650093, China; 2. Key Laboratory of Early Rapid Identification, Prevention and Control of Geological Diseases in

Traffic Corridor of High Intensity Earthquake Mountainous Area of Yunnan Province, Kunming 650093, China;

3. Key Lab of Mountain Hazards and Surface Processes, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese

Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 4. Academy of Plateau Science and Sustainability, Xining 810016,

China; 5. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China.)

* 收稿日期: 2021-01-20; 修回日期: 2021-02-05

基金项目: 国家重点研发计划课题(2018YFC1505202)、第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0902)、国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(41861134008)、中国科学院青年创新促进会项目(2020367)资助

作者简介: 李睿祺(1995—)男, 硕士研究生。主要从事山地灾害形成机理及防治技术。E-mail: 2390590939@qq.com

通讯作者: 胡桂胜(1984—)男, 副研究员, 博士。主要从事山地灾害工程防治研究。E-mail: huguisheng@imde.ac.cn

Abstract: Mountain disasters are active in the Lhasa-Nyingchi Railway section of the proposed Sichuan-Tibet Railway. There are a large number of valley-type debris flow gullies along the line. Due to their large scale, strong erosion, and repeatability, they often cause damage to railways and highways. It directly or indirectly affects the construction of the proposed Sichuan-Tibet Railway and even threatens the safety of the railway's later operation. Considering the uniqueness and importance of the proposed Sichuan-Tibet Railway and G318 and the threat of debris flow hazards at all times, an investigation has been conducted to study the characteristics of formation and movement of four gully type debris flow trenches along the proposed Sichuan-Tibet railway using a combination of field investigations, laboratory experiments, and remote sensing and interpretation. The hazard characteristics of four debris flow ditches are analyzed. Combining the movement parameters of debris flow and different hazard characteristics, corresponding prevention and treatment plans are proposed. The results show that: (1) Jiangzhongpu Meander, Banggainiang Gully, Sebi Danga Gully and Xielapu Meander contribute to the formation and eruption of debris flow disasters. (2) The bulk density of debris flow in four gullies is about 1.7 g/cm^3 , which belongs to sparse debris flow gully; the scale of debris flow in Sebi Danga Gully is large, and the scale of debris flow in the other three gullies is super large; the total amount of one-time flow of debris flow is between $86.1 \sim 19019.7$ thousand m^3 ; the amount of solid material is between $39.1 \sim 8299.5$ thousand m^3 ; the velocity of debris flow is between $5.2 \sim 6.6 \text{ m/s}$. (3) Through the analysis of discharge capacity, it is found that there is obvious insufficient discharge capacity at G318 section of the river valley of Xielapu Meander. (4) Based on the analysis of the characteristic parameters and hazards of debris flow, the corresponding prevention and control schemes for debris flow gullies are proposed, which can provide reference for disaster prevention and mitigation of the planned construction of railways and highways and later safe operation.

Keywords: Sichuan-Tibet Railway; formation feature; motion characteristic parameters; hazard analysis; prevention plan

引 言

拟建川藏铁路拉萨—林芝段(以下简称“拉林段”)与G318相邻,处于青藏高原东南部,位于雅鲁藏布江缝合带中部,沿线断裂发育,存在多条平行相近断层组合而成的断裂破碎带,新构造运动十分强烈,岩体遭受强烈的挤压破碎,地震频发。在气候上,沿线气候多变,蒸发量大,降雨小,昼夜温差大。以上因素导致拉林段泥石流灾害极其发育且频繁。

江中浦曲、帮改娘沟、色比单嘎沟、协拉浦曲位于拉林铁路段东方向林芝市境内,其沟道内松散物源发育,地形复杂,在实际考察中可看到明显的泥石流堆积物和泥石流的暴发痕迹,在4条泥石流沟沟口的交通工程处附近有不同程度的泥石流大颗粒冲出物存在。根据其流域面积、地形地貌、地理

位置等现场信息,初步推断在防治措施不完善的情况下,沟道暴发泥石流对G318的运营和拟建铁路的建设有着严重的影响。目前,很多学者对拟建川藏铁路泥石流灾害进行了一定研究,但在沿线泥石流的危害和防治研究上仍存在不足。李俊等^[1]在研究强降雨激发的扎木弄沟滑坡型泥石流中查明了物源总量、估算了发生类似灾害的规模、分析了灾害堵河和溃坝的可能性,为川藏铁路跨越易贡藏布提供了重要参考。霍欣^[2]通过实地调查和遥感解译,对藏东南察达泥石流的发育特征进行了研究,并分析对比了工程在泥石流处不同的穿越方案,其研究成果可为该地区相似条件下铁路车站站址的选择提供借鉴。罗锋^[3]结合卫星遥感影像解译、野外实地调查及GIS技术对川藏铁路冰川泥石流桥梁安全净空高度进行了研究,系统性地总结了冰川泥石流沟桥梁安全净空高度的计算体系与流程,为川藏铁路及其他冰川泥石流地区的泥石流危害定

量评价以及桥梁净空高度计算提供了参考。冯涛等^[4]通过室内室外多种方法对川藏铁路郭达山隧道泥石流对工程的影响进行了深入研究,给出了防治建议,为该地区的工程建设提供了参考。李孝攀等^[5]采用实地考察分析、灰色聚类理论、层次分析法等,对川藏铁路康定至昌都段地质灾害区域进行了危险性评价,对工程建设提出了科学建议。徐正宣等^[6]通过室内多种方法对宋家沟泥石流的发育特征及危险性进行了分析,查明了流域物源的来源和类型、泥石流的发育程度、泥石流的危险度等,为川藏铁路的防灾减灾提供了借鉴。刘曙光等^[7]通过对川藏铁路沿线冰水泥石流堆积体样本的试验分析,探索了川藏铁路冰水泥石流的流变及级配特性,对川藏铁路此类泥石流灾害的研究有着重大意义。

由于拟建川藏铁路的重要性的和环境特殊性,针对以上不足,本文将选取4条存在泥石流暴发痕迹的泥石流沟为研究对象,采用野外考察、室内试验、理论计算相结合的方法,对其形成运动特征进行计算分析,探讨其对公路、铁路的危害,结合危害的特点和泥石流运动特征参数提出对应的防治方案,为该段铁路建设和后期运营的防灾减灾提供科学依据。

1 研究区概况

江中浦曲(N29°09′54.88″,E93°27′32.81″)、帮改娘沟(N28°59′56.37″,E93°13′59.46″)、色比单嘎沟(N28°08′40.25″,E93°54′58.77″)、协拉浦曲(N29°10′38.71″,E93°57′19.90″)位于西藏自治区林芝市境内,西邻山南市,沟口与拟新建铁路或G318相交(图1)。各流域内支沟发育,地形起伏大,属高山峡谷地貌。地势总体上呈西高东低的特点,流域最大面积达165 km²,最大相对高差达2 955 m,均属典型的“V”字形沟谷型泥石流沟。

研究区在地质构造上位于雅鲁藏布江缝合带中部,新构造运动活跃。毗邻藏中地震带,地震频发,其地震动峰值加速度为0.2g~0.3g。各流域出露地层岩性以花岗岩、片岩、片麻岩等为主,受构造运动的挤压和高原强风化等作用,区内岩体破碎,松散物质发育。

研究区主要位于高原温带半湿润季风气候区和藏东南温暖半湿润高原季风气候区,年平均降雨

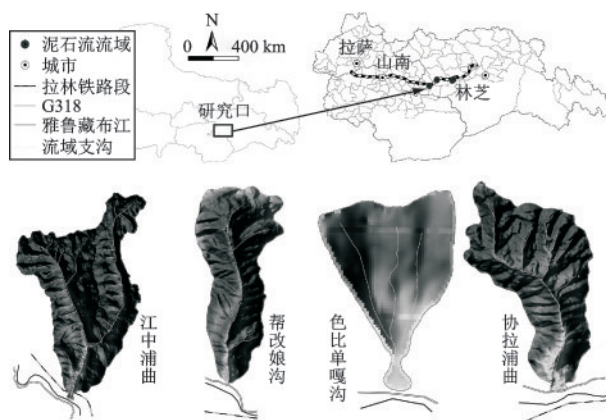


图1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

量大于600 mm,雨水集中在5~9月,年平均最高气温约为16.4℃,年平均最低气温约为4.2℃,具有无霜期长、日照充足等特点。

2 泥石流形成特征

泥石流形成特征对于研究泥石流的形成和发展尤为重要,可从地形、水源、物源方面进行分析。

(1) 地形特征

通过遥感解译和现场调查查明流域的地形特征见表1,从表1中可以看出4条流域均具有山高谷深、地形陡峻的特点,既有利于集中降雨径流,也有利于周围山坡固体物质的汇集,其地形地貌有利于泥石流的形成和发展。

(2) 水源特征

流域以冰川融水和降雨为主要的的水源来源,通过遥感影像分析,江中浦曲、帮改娘沟、协拉浦曲顶部冰川覆盖面积依次达68.0、14.9、9.1 km²,在全球气候变暖的趋势下,冰川消融量呈现出增长的趋势,在其沟道内存在明显的常流水。根据中国气象网数据和《中国暴雨统计参数图集》^[8](2005)显示,流域所处的林芝市年最多降雨量为985 mm,年最大日降雨量为42.9 mm,朗县的年最大24 h雨量均值为40 mm。因此,研究区在水源特征上具备泥石流发生的条件。

(3) 物源特征

受构造运动和气候的影响,研究区内不良地质体发育,松散物源较多。在流域顶部分布有大量的寒冻风化碎屑残积物,其稳定性和抗剪强度极差,极容易被降雨和冰川融水径流侵蚀和带动。在流域中下部分布有大量的不良地质体,易引发崩塌、

滑坡等灾害,更有可能堵塞沟道,引起泥石流的堵塞,导致泥石流流量放大,扩大灾害规模。在流域沟道中沟道物源极为丰富,多为不良地质体运动和泥石流运动堆积的产物,沟道物源的补充可进一步改变泥石流的容重,增强泥石流的破坏和运输能

力,增加下游的风险。

根据以上可以看出,研究区具备地形复杂、水源丰富、物源量多的特点,在地势、水源、物源上的耦合效应强,暴发泥石流灾害的可能性大,时刻威胁着附近的居民、交通干线、工程设施等的安全。

表 1 地形特征

Table 1 Topographic feature table

沟名	地理位置	最高海拔/m	沟口海拔/m	相对高度/m	流域面积/km ²	主沟长度/km	沟床比降/%	坡度/(°)
江中浦曲	林芝市米林县卧龙镇江中村	5 200	3 102	2 088	165.0	26.00	7.9	30~60
帮改娘沟	林芝市朗县卓村	5 998	3 043	2 955	67.7	18.00	15.4	30~60
色比单嘎沟	林芝市米林县黑乡	4 200	2 980	1 020	2.1	1.74	49.9	40~60
协拉浦曲	林芝市米林县黑乡	5 400	3 025	2 375	26.5	17.40	13.4	30~60

3 泥石流运动特征参数计算

泥石流特征参数包括容重、流速、峰值流量、一次泥石流总量、泥石流最大冲刷深度、最大冲起高度、一次泥石流最大堆积厚度与最大堆积长度等,是了解和防治泥石流必须确定的力学参数^[9]。

3.1 泥石流容重

由于泥石流容重实测难度大,因此4条沟泥石流容重的确定采用《泥石流灾害防治工程勘查规范》中基于泥石流沟易发程度数量化评分的泥石流容重确定方法和基于黏粒含量的泥石流容重计算法(式(1))来综合确定泥石流容重^[10-12]。通过野外实地采取泥石流堆积物样品,然后采用室内物理筛分及马尔文试验测量样品中黏粒含量,试验结果如图2所示,计算结果见表2。

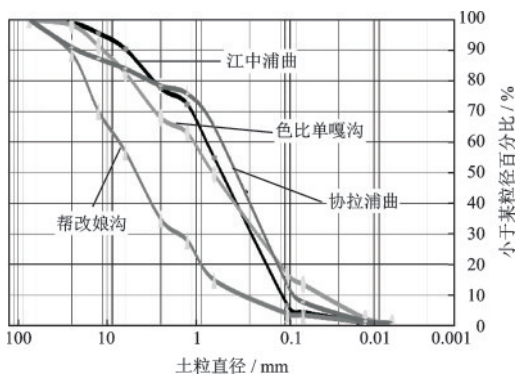


图 2 沟道样品粒径级配曲线

Fig.2 Particle size distribution of the channel sample

$$\gamma_c = -1.32 \times 10^3 x^7 - 5.13 \times 10^2 x^6 + 8.91 \times 10^2 x^5 - 55x^4 + 34.6x^3 - 67x^2 + 12.5x + 1.55 \quad (1)$$

式中, γ_c 为泥石流容重(g/cm^3); x 为泥石流堆积物中黏粒占粒径小于60 mm部分的含量。

表 2 泥石流容重数量化评分和公式计算结果

Table 2 Quantitative scoring and formula calculation results of debris flow bulk density

沟名	判断综合得分	容重/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	黏粒含量/%	容重/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
江中浦曲	100	1.69	0.45	1.61
帮改娘沟	102	1.70	0.41	1.60
色比单嘎沟	100	1.69	0.84	1.65
协拉浦曲	98	1.68	0.65	1.63

考虑到野外采取的样本在长时间的雨水冲刷中导致黏粒含量偏少,根据拟合公式计算结果可能与真实容重存在一定偏差,并且该区域已有的泥石流容重参考值很少,因此,结合野外调查结果(4条沟道均为低频泥石流沟),综合判定选取两种方法中结果较大的值—数量化评分结果作为泥石流容重的最终确定值。根据结果,4条流域泥石流容重小于 $1.80 \text{ g}/\text{cm}^3$,均属稀性泥石流沟。

3.2 泥石流峰值流量

根据水源条件,色比单嘎沟属暴雨型泥石流沟,其余3条属暴雨、冰川混合型泥石流沟,不同类型的泥石流沟,其峰值流量的确定方法不同,暴雨、冰川混合型泥石流沟除考虑暴雨洪峰流量外还需

考虑冰川消融量。

3.2.1 暴雨洪峰流量

根据“小流域暴雨洪峰流量计算方法”设计并计算不同频率下流域的暴雨洪峰流量(公式(2)),计算结果见表3^[13]。

表3 暴雨洪峰流量计算结果

沟名	频率 $P/\%$	$\bar{H}_{24}/$ mm	C_{v24}	C_s	流域集 水面积 F/km^2	河流 长度 L/km	河道平 均坡度 $J/\%$	暴雨洪 峰流量/ $(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$
江中 浦曲	1	40	0.4	1.4	165.0	25.96	79	233.36
	2							196.46
	5							149.71
	10							112.14
帮改 娘沟	1	35	0.4	1.4	67.7	18.38	154	97.81
	2							81.76
	5							61.44
	10							45.13
色比 单嘎 沟	1	40	0.4	1.4	2.1	1.74	499	24.71
	2							20.61
	5							15.37
	10							11.69
协拉 浦曲	1	40	0.4	1.4	62.5	17.40	134	110.51
	2							93.20
	5							71.26
	10							53.62

$$Q_p = 0.278\psi \frac{s}{\tau^n} F \quad (2)$$

式中, Q_p 为频率为 P 的暴雨洪水设计流量(m^3/s); ψ 为洪峰径流系数 $\psi=f(\mu, \tau^n)$; μ 为入渗强度(mm/h); $\tau^n=f(m, s, J, L)$, L 为沟道长度(km); J 为河流平均坡度; τ 为流域汇流时间(h); m 为汇流参数; s 为暴雨雨力(mm/h); n 为暴雨指数; F 为流域面积(km^2)。

历年24 h最大降雨量均值(H_{24})和变差系数(C_{v24})数据是通过波密县气象站1960年以来的数据分析所得,历年6 h和1 h的最大降雨量均值(H_6 、 H_1)和变差系数(C_{v6} 和 C_{v1})则是根据近年来的观测资料统计分析,并参考类似研究区的西南山区资料综合确定。

3.2.2 冰川消融洪峰流量

通过遥感解译研究区的冰川坡度、冰川面积,

暴雨型冰川消融峰值流量采用经验公式(式(3))计算,计算结果见表4^[14]:

$$Q_g = F_1(0.5H + 2.1) \quad (3)$$

式中, Q_g 为冰川消融洪峰流量; H 为降雨量(mm); F_1 为冰川面积(km^2)。

表4 冰川消融洪峰流量

沟名	频率 $P/\%$	冰川坡 度/ $(^\circ)$	冰川面 积/ km^2	流域面 积/ km^2	冰川消融洪峰 流量/ $(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$
江中 浦曲	1	33.00	68.00	5.78	547.28
	2				507.01
	5				454.48
	10				410.70
帮改 娘沟	1	35.00	14.90	4.26	119.92
	2				111.09
	5				99.58
	10				89.99
协拉 浦曲	1	32.50	9.10	3.30	73.24
	2				67.85
	5				60.82
	10				54.96

3.2.3 泥石流峰值流量

基于以上计算结果,根据配比法(式(4)),考虑堵塞情况,选用堵塞系数计算暴雨泥石流峰值流量,以及根据经验公式(式(5))计算冰川暴雨泥石流峰值流量,计算结果见表5、6^[15]。

$$Q_c = (1 + \phi) Q_p \cdot D_c \quad (4)$$

$$Q_d = (Q_b + Q_g)(1 + \phi_c) d \quad (5)$$

式中, Q_c 为频率为 P 的泥石流峰值流量(m^3/s); Q_p 为频率为 P 的暴雨洪水设计流量(m^3/s); D_c 为泥石流堵塞系数,根据实际调查情况,通过查表法获取; ϕ 为泥石流泥沙修正系数; Q_d 为频率为 P 的暴雨、冰川型泥石流峰值流量(m^3/s); Q_b 为暴雨洪峰流量(m^3/s); Q_g 为冰川消融洪峰流量(m^3/s); d 为冰川消融洪峰系数; ϕ_c 为泥沙修正系数(无量纲)。其中, $\phi = (\gamma_c - \gamma_w) / (\gamma_H - \gamma_c)$, γ_c 为泥石流容重(g/cm^3), γ_w 为清水的重度(g/cm^3), γ_H 为泥石流中固体物质比重(g/cm^3)。

根据峰值流量计算结果,不同频率下色比单嘎沟所暴发的泥石流灾害等级处在中型与大型之间,其余3条沟均远超特大型泥石流灾害等级标准。

表5 不同频率暴雨泥石流峰值流量

Table 5 Table of peak flow rates of heavy rain and debris flow at different frequencies

沟名	频率 P/%	容重/ (g·cm ⁻³)	修正 系数	堵塞 系数	泥石流洪峰 流量/(m ³ ·s ⁻¹)
	1	1.75	1.83	2.59	181.24
色比单	2	1.67	1.68	2.51	138.83
嘎沟	5	1.55	1.50	2.40	92.22
	10	1.47	1.40	2.33	65.40

表6 不同频率冰川暴雨泥石流峰值流量

Table 6 Table of peak flow of glacial rainstorm and debris flow with different frequencies

沟名	频率 P/%	修正 系数	冰川消融洪 峰系数 <i>d</i>	泥石流洪峰流量/ (m ³ ·s ⁻¹)
	1	1.77		8 008.28
江中	2	1.63	5.78	6 644.98
浦曲	5	1.46		5 101.08
	10	1.36		4 122.44
	1	1.79		1 665.37
帮改	2	1.65	4.26	1 357.07
娘沟	5	1.47		1 011.67
	10	1.38		792.36
	1	1.79		1 086.09
协拉	2	1.65	3.30	875.74
浦曲	5	1.47		641.25
	10	1.38		492.02

3.3 一次泥石流总量和冲出固体物质

结合流域情况,选用适用于连续性泥石流的五边形法(式(6))来估算一次泥石流过流总量,然后基于计算结果,通过式(7)求取一次泥石流冲出固体物质,计算结果见表7^[16-17]。

$$W_c = \frac{19TQ_c}{72} \quad (6)$$

$$W_s = C_v W_c = (\gamma_c - \gamma_w) W_c / (\gamma_s - \gamma_w) \quad (7)$$

式中, W_c 为一次泥石流总量; T 为根据经验估取泥石流历时; W_s 为通过计算断面的固体物质实体总量(m³); C_v 为泥石流中土体的体积浓度;其它符号同前。

3.4 泥石流流速

通过前文已知4条流域均属于稀性泥石流沟,故泥石流流速 V_c 采用《泥石流灾害防治工程勘查规

表7 不同频率下泥石流一次总量和固体物质总量

Table 7 List of total amount of debris flow and total solid materials at different frequencies

沟名	频率 P/%	行流 时间/s	泥石流一次 总量/万 m ³	固体物质 总量/万 m ³
	1		1 901.97	829.95
江中	2	9 000	1 578.18	612.14
浦曲	5		1 211.51	381.81
	10		979.08	261.09
	1		316.42	139.99
帮改	2	7 200	257.84	101.57
娘沟	5		192.22	61.74
	10		150.55	41.06
	1		8.61	3.91
色比单	2	1 800	6.59	2.68
嘎沟	5		4.38	1.46
	10		3.11	0.88
	1		206.36	91.30
协拉	2	7 200	166.39	65.55
浦曲	5		121.84	39.14
	10		93.48	25.50

范^[12]推荐的稀性泥石流常用流速计算方法(式(8))进行计算,计算结果见表8。

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

式中, γ_H 为泥石流固体物质比重(t/m³), φ_c 为泥沙修正系数; n 为清水河床糙率系数(查水文手册); R 为水力半径(m); I_c 为流域比降。

表8 泥石流排导设施断面流速

Table 8 List of flow velocity of transverse profile of the debris flow drainage facility

沟名	比降	泥深/ m	糙率	Φ	流速/ (m·s ⁻¹)
江中浦曲	0.174	3.3	10	0.65	5.5
帮改娘沟	0.141	4	10	0.65	5.7
色比单嘎沟	0.249	3.2	10	0.65	6.6
协拉浦曲	0.158	2.4	10	0.65	5.2

3.5 泥石流最大冲起高度与冲压力

因以往发生过泥石流的痕迹无法调查,也无法通过访问核实,故按照《泥石流灾害防治工程勘查规范》^[12]附录I提供的计算公式来计算泥石流动力学特征,计算公式如下,结果见表9。

表9 泥石流动力学特征

Table 9 List of debris flow dynamic characteristics

沟名	流速/ (m·s ⁻¹)	容重/ (kg·m ⁻³)	最大 W/t	泥石流 冲起 高度/m	块石 整体冲 压力/Pa	块石 冲击力/ kN
江中浦曲	5.5	1640	18.25	1.54	49 610.0	976.82
帮改娘沟	5.7	1650	22.61	1.66	53 608.5	1 126.84
色比单 嘎沟	6.6	1670	54.48	2.22	72 745.2	2 025.54
协拉浦曲	5.2	1650	13.03	1.38	44 616.0	780.51

(1) 泥石流最大冲起高度:

$$\Delta H_c = \frac{V_c^2}{2g} \quad (9)$$

式中, ΔH_c 为泥石流最大冲起高度(m); V_c 为泥石流平均流速(m/s); g 为重力加速度, 取 9.8 m/s^2 。

(2) 泥石流整体冲击力:

$$\delta = \lambda \frac{\gamma_c}{g} V_c^2 \sin a \quad (10)$$

式中, δ 为泥石流整体冲击力(Pa); γ_c 为泥石流容重(kN/m^3); V_c 为泥石流流速(m/s); g 为重力加速度, 取 9.8 m/s^2 ; a 为建筑物受力面与泥石流冲击力方向的夹角, 取 90° ; λ 为建筑物形状系数, 圆形建筑物取 1.0, 矩形建筑物取 1.33, 方形建筑物取 1.47。

(3) 泥石流块石冲击力:

$$F = \gamma g V \sin a \sqrt{\frac{W}{C_1 + C_2}} \quad (11)$$

式中, F 为石块冲击力(N); V 为石块运动速度, 可用泥石流流速代替; a 为石块运动方向与受力面的夹角; γ 为动能折减系数, 对圆形端属正面撞击, 取 0.3; W 为石块重量(t); C_1 、 C_2 为石块、桥墩的弹性变形系数, 取之和为 0.005; g 为重力加速度, 取 9.8 m/s^2 。

根据计算结果, 设置防治工程需满足以上所计算的泥石流最大冲起高度、泥石流整体冲击力和块石冲击力参数值, 否则若暴发泥石流灾害, 可能出现泥石流溢出、防治工程被毁、道路淤埋等现象。

4 泥石流危害分析

根据以上泥石流参数的计算结果分析泥石流对工程的危害特点, 主要包括流体性质危害分析、工程断面危害分析、堆积扇危害分析。

4.1 流体性质危害分析

从流体性质上泥石流可分为稀性泥石流和黏性泥石流, 从前文中已知 4 条流域泥石流性质均属于稀性。稀性泥石流一般呈现为固液两相混合紊流状^[18], 具有侵蚀能力强、阻力小、下切强烈等特点, 对 4 个流域交通工程的危害多表现为冲刷破坏工程基础, 淤埋标高过低的道路面。

4.2 工程断面危害分析

根据前文的计算结果和实际测量的公路和铁路过泥石流沟口的断面数据(图 3)等对 $P=1\%$ 工况下的过流能力进行计算分析, 计算结果见表 10。

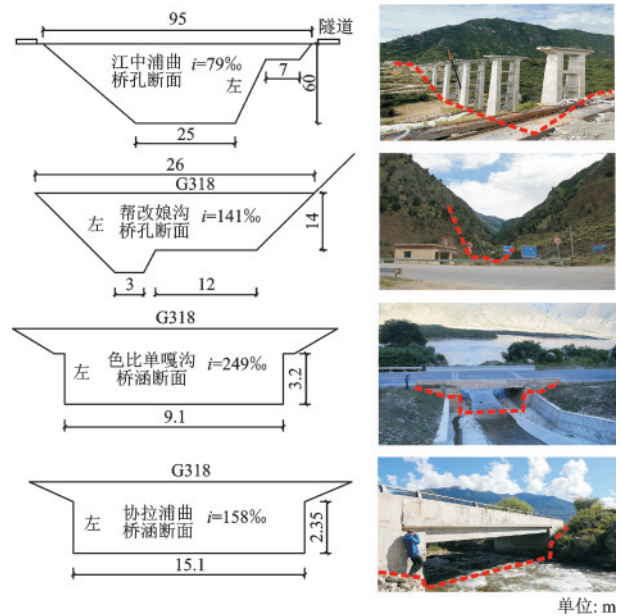


图3 沟口断面

Fig.3 Cross Section of Mizokou

表10 桥孔过流能力

Table 10 List of carrying capacity of the bridge holes

沟名	容重/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	过流断面 面积/ m^2	比降 $I/\%$	流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	过流能力/ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)
江中浦曲	1.72	3 600	79	5.5	19 800.00
帮改娘沟	1.73	364	154	5.7	2 074.80
色比单嘎沟	1.75	29.12	249	6.6	192.19
协拉浦曲	1.73	35.49	134	5.2	182.54

表 10 数据表明, 在 $P=1\%$ 的工况下, 江中浦曲、帮改娘沟、色比单嘎沟泥石流峰值流量均小于桥孔的过流能力; 在 $P=10\%$ 的工况下, 协拉浦曲泥石流峰值流量大于桥孔的过流能力。因此, 在桥孔

过流能力上,协拉浦曲目前的工程设置容易导致桥孔断面过流不足。

4.3 堆积扇危害分析

4个流域的公路或铁路均建立在泥石流堆积扇上,因此泥石流堆积扇比降和工程在堆积扇所处位置与交通线路的安全运营密切相关。通过遥感解译,江中浦曲堆积扇平均比降约为16%、帮改娘沟约为25%、色比单嘎沟约为28%、协拉浦曲约为12%,均大于7%的坡降,因此4个流域对交通线路的危害主要表现为冲刷。

根据卫星影像解译和现场调查,江中浦曲沟口拉林铁路段工程位于流域流通区和堆积扇顶部交界处,在该处泥石流流速较快,冲刷能力强^[19]。铁路在该处以桥梁方式通过,与铁路面几乎无接触,

故泥石流对拉林铁路段危害多表现为对桥墩和墩台基础的冲、撞破坏以及岸坡基础工程冲刷侵蚀。帮改娘沟沟口G318工程位于堆积扇中部,此处工程与泥石流接触面广且泥石流流速较快,冲淤能力强,容易大面积受到泥石流的正面冲击,被泥石流强烈的冲刷和淤积。

色比单嘎沟和协拉浦曲沟口G318工程位于堆积扇下部,在此处堆积扇比降较小,泥石流扩散至此处已消耗大部分能量,流速较小,因此泥石流危害多表现为道路面强烈的淤埋

5 防治方案

结合以上泥石流运动参数及危害分析,针对流域不同的危害特点提出不同的防治方案(表11)^[20]。

表11 沟道防治方案

Table 11 Schemes of the channel controlling plan

沟名	公路或铁路通过沟道方式	危害特点	防治模式
江中浦曲	以明线桥梁方式通过堆积扇顶部	泥石流对桥墩和墩台基础的冲、撞破坏以及岸坡基础工程冲刷侵蚀	建议在上游设置格栅坝,拦挡大颗粒物质,防冲撞破坏;扇顶附近根据泥石流流动力学参数设置双边宽浅排导槽,内设浅坝,增阻消能;桥墩下部及墩台基础采用橡胶表面柔性材料,进一步防止冲撞破坏;增设岸坡护提,防止泥石流对岸坡基础的冲刷掏蚀,影响隧道进出口基础面
帮改娘沟	以明线桥梁方式通过堆积扇中部	受泥石流大面积的正面冲击,遭受强烈的冲刷和淤埋	建议在上游设置格栅坝,拦挡大颗粒物质;在扇腰附近设置箭头状导流堤和混泥土双边宽浅排导槽,使泥石流束流归槽,并在排导槽内设置多级浅槛,降低泥石流的侵蚀能力;对桥墩下部使用橡胶表面柔性材料
色比单嘎沟	以明线桥涵方式通过堆积扇下部	主要受到泥石流强烈的淤埋危害和主河汛期侵蚀危害	建议在已有的防治工程基础上,在流域上游增设一座格栅坝,拦挡泥石流大颗粒;在扇顶和扇腰区域增设箭头状导流堤,并定期及时清理沟道,防止沟道堵塞
协拉浦曲	以明线桥涵方式通过堆积扇下部	主要受到泥石流强烈的淤埋危害和主河汛期侵蚀危害	建议在上游设置两座格栅坝,削流减容并拦挡大颗粒物质;在扇顶和扇腰附近增设箭头状导流堤,对泥石流进行束流;在堆积扇扇缘处设置双边长深排导槽,保障泥石流的顺利排泄;在上游、中游增设监测预警措施

6 结论

(1)在泥石流形成特征上,4条流域的地形、水源、物源均利于泥石流的形成和暴发。

(2)综合确定江中浦曲、帮改娘沟、色比单嘎沟、协拉浦曲泥石流容重依次为1.69、1.70、1.69、1.68 g/cm³,均属稀性泥石流沟;色比单嘎沟泥石流

规模属大型,其余3条沟泥石流均属特大型;泥石流一次总量最大可达1 901.97万 m³、316.42万 m³、8.61万 m³、206.36万 m³;固体冲出物质最大可达829.95万 m³、139.99万 m³、3.91万 m³、91.30万 m³;泥石流流速为5.5、5.7、6.6、5.2 m/s。

(3)4条泥石流沟危害均以冲刷为主,通过过流能力分析,江中浦曲、帮改娘沟、色比单嘎沟对沟口公路、铁路的影响较小,而协拉浦曲沟口G318桥孔

过流能力不满足 $P=10\%$ 工况下的泥石流峰值流量,其危险性较大。

(4)根据流域不同的危害特点、公路、铁路在堆积扇所处的不同位置以及各流域泥石流暴发的不同特征参数,针对性的提出了各流域的防治方案,可为该段公路、铁路的建设和安全运营的防灾减灾提供科学依据。

参考文献:

- [1] 李俊,陈宁生,欧阳朝军,等.扎木弄沟滑坡型泥石流物源及堵河溃坝可能性分析[J].灾害学,2017,32(1):80-84,116.
Li J, Chen N Sh, Ouyang Ch J, et al. Volume of loose materials and the analysis of possibility of blocking and dam break triggered by debris flows in Zhamunonggou [J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(1): 80-84, 116. (in Chinese)
- [2] 霍欣.藏东南察达泥石流的发育特征及对拟建车站的影响[J].现代地质,2020,35(1):1-9.
Huo X. Development characteristics of chada debris flow in Southeast Tibet and its influence on the proposed station [J]. Geoscience, 2020, 35(1): 1-9. (in Chinese)
- [3] 罗锋.川藏铁路某冰川泥石流桥梁安全净空高度研究[J].铁道标准设计,DOI: 10.13238/j.issn.1004-2954.202006100001.
Luo F. Case study on the safe clearance height of bridge project crossing a glacial debris flow of Sichuan-Tibet Railway [J]. Railway Standard Design, DOI: 10.13238/j.issn.1004-2954.202006100001. (in Chinese)
- [4] 冯涛,刘建国,游勇,等.川藏铁路郭达山隧道受泥石流影响分析与防治[J].铁道建筑,2020,60(11):80-83.
Feng T, Liu J G, You Y, et al. Analysis and prevention measures against debris flow for Guodashan Mountain Tunnel of Sichuan-Tibet Railway [J]. Railway Engineering, 2020, 60(11): 80-83. (in Chinese)
- [5] 李孝攀,李远富,周先虎,等.川藏铁路康定至昌都段地质灾害区域危险性评价[J].铁道标准设计,2017,61(6):58-62.
Li X P, Li Y F, Zhou X H, et al. Evaluation of regional geological hazards risks on Kangding to Changdu sec-

tion of Sichuan-Tibet Railway [J]. Railway Standard Design, 2017, 61(6): 58-62. (in Chinese)

- [6] 徐正宣,袁东,刘志军,等.川藏铁路宋家沟泥石流发育特征及危险性分析[J].长江科学院院报,2020,37(10):165-170,176.
Xu Zh X, Yuan D, Liu Zh J, et al. Development characteristics and risk assessment of debris flow in Songjia Gully along Sichuan-Tibet Railway [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(10): 165-170, 176. (in Chinese)
- [7] 刘曙亮,张继春.川藏铁路冰水泥石流流变及级配特性试验研究[J].中国铁路,2019(2):101-106,113.
Liu Sh L, Zhang J Ch. Experimental study on rheological and grading characteristics of glaciofluvial debris flow along Sichuan-Tibet Railway [J]. China Railway, 2019(2): 101-106, 113. (in Chinese)
- [8] 水利部水文局.中国暴雨统计参数图集[M].北京:中国水利水电出版社,2006.
Hydrology Bureau of the Ministry of Water Resources. Atlas of rainstorm statistical parameters in China [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2006.
- [9] 陈宁生,杨成林,周伟,等.泥石流勘查技术[M].北京:科学出版社,2011.
Chen N Sh, Yang Ch L, Zhou W, et al. Investigation technology for debris flows [M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese)
- [10] 罗守敬,张国华.北京月玉沟潜在泥石流特征及其动力学指标[J].中国地质灾害与防治学报,2016,27(1):44-48.
Luo Sh J, Zhang G H. Exploration and analysis of movement condition of Yueyugou potential debris flow [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2016, 27(1): 44-48. (in Chinese)
- [11] 陈宁生,崔鹏,刘中港,等.基于黏土颗粒含量的泥石流容重计算[J].中国科学E辑:技术科学,2003,33(增1):164-174.
Chen N Sh, Cui P, Liu Zh G, et al. Calculation of debris flow capacity based on clay particle content [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2003, 33(Sup 1): 164-174. (in Chinese)
- [12] 泥石流灾害防治工程勘察规范(试行):T/CAGHP 006—2018[S].北京:中国地质灾害防治工程行业协会,2018.

(本文责编:池营营)

(下转第462页)