

干流公路桥涵堵塞对泥石流灾害的风险放大效应

杨静萍, 陈宁生, 杨志全, 彭泰鑫, 田树峰, 黄娜

Risk amplification effect caused by main stream road bridges and culverts blockages due to debris flow

YANG Jingping, CHEN Ningsheng, YANG Zhiqian, PENG Taixin, TIAN Shufeng, and HUANG Na

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202312008>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于数值模拟的群发性泥石流危险性评价

Risk assessment of mass debris flow based on numerical simulation: An example from the Malu River basin in Min County

曹鹏, 侯圣山, 陈亮, 冯振, 王立朝, 李昂, 刘军友 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 100-109

喜德县中坝村火后泥石流发育特征及预警避险

Study on the development characteristics of post-fire debris flow and its early warning risk aversion in Zhongba Village, Xide County

殷万清, 金涛, 胡卸文, 曹希超, 杨相斌, 黄健 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 61-69

泥石流致灾因子敏感性分析——以四川都江堰龙溪河流域为例

Sensitivity analysis of debris flow to environmental factors: a case of Longxi River basin in Dujiangyan, Sichuan Province

李彩侠, 马煜, 何元勋 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 32-39

基于不同评价单元和灾害熵的泥石流危险性分析

Hazard analysis of debris flows based on different evaluation units and disaster entropy: A case study in Wudu section of the Bailong river basin

李小龙, 宋国虎, 向灵芝, 罗亮, 唐良琴, 沈娜, 梁梦辉 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 107-115

基于高分遥感影像的泥石流潜在形成区识别方法探讨

Probing into the techniques recognizing potential debris flow formation regions

苏轶君 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 22-31

基于面积高程和面积坡度积分的泥石流物质供给能力分析

The material supply ability analysis of debris flows based on area-hypsometric integral and area-gradient integral

张静, 田述军, 侯鹏鹏 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 9-16



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202312008

杨静萍, 陈宁生, 杨志全, 等. 干流公路桥涵堵塞对泥石流灾害的风险放大效应 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(5): 120-132.

YANG Jingping, CHEN Ningsheng, YANG Zhiqian, et al. Risk amplification effect caused by main stream road bridges and culverts blockages due to debris flow[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(5): 120-132.

干流公路桥涵堵塞对泥石流灾害的风险放大效应

杨静萍^{1,2}, 陈宁生^{2,3,4}, 杨志全¹, 彭泰鑫^{2,5}, 田树峰², 黄 娜²

(1. 昆明理工大学公共安全与应急管理学院, 云南昆明 650093; 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 610299; 3. 长江大学地球科学学院, 湖北武汉 430100; 4. 高原科学与可持续发展研究院, 青海西宁 810016; 5. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 2020 年 8 月 17 日, 四川省平武县亚者造祖村干流沿岸 4 条沟相继暴发泥石流, 导致 G247 国道多处断道和垮方, 九绵高速项目部及民工驻地等多处遭受巨大损毁, 泥石流裹挟的大量漂木汇入干流后, 引发下游公路桥涵堵塞并回水淹没村庄, 放大了灾害风险。为了避免类似灾害再次发生, 灾后基于野外调查和遥感解译等手段, 探讨了此次泥石流灾害风险特征, 并重点分析了干流公路桥涵堵塞对泥石流灾害的风险放大效应。结果表明: (1) 亚者造祖村“8·17”泥石流为低频次大规模群发性泥石流, 暴发频率约为 50 年一遇。阿祖沟和杂排沟泥石流在规模上属特大型, 麻石扎三号沟和夺补河五号沟泥石流在规模上属大型, 堆积扇受灾面积约为 $16.66 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。(2) 干流公路桥涵布设不当, 导致泥石流裹挟的大量漂木堵塞桥涵, 形成堰塞体, 致使受灾面积增大了 $16.78 \times 10^4 \text{ m}^2$, 风险范围扩大了约 1 倍。(3) 对于植被覆盖良好的湿润山区, 干流公路桥涵修建时应适当增大桥墩之间的轴向间距, 给河道预留出一定的宽度和运行空间, 避免因漂木堵塞放大泥石流灾害风险。研究可为类似山区干流公路桥涵合理规划及泥石流相关防治预警工作提供参考。

关键词: 泥石流; 桥涵; 漂木; 堵塞; 风险

中图分类号: P642.23

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2024)05-0120-13

Risk amplification effect caused by main stream road bridges and culverts blockages due to debris flow

YANG Jingping^{1,2}, CHEN Ningsheng^{2,3,4}, YANG Zhiqian¹, PENG Taixin^{2,5}, TIAN Shufeng², HUANG Na²

(1. Faculty of Public Safety and Emergency Management, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water Resources, Chengdu, Sichuan 610299, China; 3. School of Earth Sciences, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China; 4. Institute of Plateau Science and Sustainable Development, Xining, Qinghai 810016, China; 5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: On August 17, 2020, debris flows successively occurred in four ravines along the main stream of Yazhezaozu Village, Pingwu County, Sichuan Province. This event resulted in multiple collapses and interruptions along the G247 national

收稿日期: 2023-12-07; 修订日期: 2024-01-31

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金项目(42361144880); 青海省自然科学基金项目(2024-ZJ-904); 国家重点研发项目课题(2023YFC3008301); 国家资助博士后计划(GZC20232571)

第一作者: 杨静萍(1998—), 女, 云南大理人, 硕士研究生, 主要从事山地灾害评价与预测研究。E-mail: 2199625815@qq.com

通讯作者: 陈宁生(1965—), 男, 四川成都人, 博士, 二级研究员, 博士生导师, 主要从事山地灾害形成机理与防治研究工作。

E-mail: chenysh@imde.ac.cn

highway, and extensive damage to the Jiumian expressway project site and laborer residences, among other areas. A significant volume of driftwood carried by the debris flow converged into the main stream, leading to the blockage of downstream road bridges and culverts, causing backflow and village flooding, thereby exacerbating the disaster risk. To prevent similar disasters in the future, post-disaster investigations using field surveys and remote sensing interpretations explored the characteristics of this debris flow disaster's risk. A primary focus was placed on analyzing the risk amplification effect caused by blockages in main stream road bridges and culverts due to debris flow. The results indicated: (1) The '8.17' debris flow in Yazhezaozu Village was a low-frequency, large-scale, rare, and extensive group occurrence, with an eruption frequency of approximately once every 50 years. The debris flows in Azu Gully and Zapai Gully were extremely large-scale, while Mashizha No. 3 Gully and Duobu River No. 5 Gully were large-scale, with an affected debris fan area of about 16.66×10^4 square meters. (2) Improper layout of main stream road bridges and culverts resulted in the blockages of driftwood carried by the debris flow, forming dammed bodies, increasing the affected area by 16.78×10^4 square meters, and enlarging the risk range by about 1-fold. (3) In well-vegetated, moist mountainous areas, when constructing main stream road bridges and culverts, it is advisable to appropriately increase the axial spacing between bridge piers, allowing for a certain width and operational space in the river channel. This will prevent the amplification of debris flow disaster risks caused by driftwood blockages. This study aims to provide guidance for the reasonable planning of main stream road bridges and culverts in similar mountainous areas and relevant prevention and early warning of debris flows.

Keywords: debris flow; bridges and culverts; driftwood; blockage; risk

0 引言

我国西南地区山地范围广,地形地貌复杂,地质构造运动活跃,早期多次强震导致岩体破碎,产生了大量松散固体物质,加之山区降雨充沛且较为集中,为泥石流的形成和发育提供了极为有利的条件^[1-3]。泥石流是水与细颗粒组成的液相和砂石组成的固相物质的两相流^[4-5],是山区常见地质灾害类型之一,具有暴发突然、运动速度快、危害范围广等特点^[6-7]。作为一种强烈的地表剥蚀现象,泥石流通常意义上被认为发生在生态环境差、植被覆盖度低的山区,但强震产生的滑坡为泥石流的形成提供了物源基础^[8-9],使得一些植被覆盖良好的湿润气候地区也会暴发大规模泥石流灾害,这些区域的泥石流在运动过程中还会携带大量漂木,漂木极易在沟道缩窄处堵塞聚集,形成不稳定的漂木堵塞体,堵塞体溃决后会导致泥石流流量急剧增大,加重灾情^[10-12]。如:2003年7月云南德宏特大泥石流^[13],2013年7月四川汶川草坡乡泥石流^[14]和七盘沟特大泥石流^[15]等,就有大量漂木伴随泥石流的运动倾泻而出,给当地造成严重损失。

以往关于泥石流风险的研究,风险区主要集中在泥石流沟口堆积扇位置^[16],而对于泥石流堆积扇外的区域风险研究较少,且通常认为物源主导泥石流风险的放大,泥石流物源量增多,规模增大,风险随之增大^[17-19]。对于直接汇入干流的支沟泥石流,除了在泥石流堆积扇

范围内受灾外,有时还会联系着干流的堰塞和洪水灾害。如:2010年8月12日,四川省绵竹市清平乡文家沟暴发特大泥石流^[20],泥石流冲入绵远河后将主河局部堵塞,导致河流改道淹没了下游右岸的大量房屋,形成的堰塞湖回水淹没上游道路、民房等基础设施,最终造成5人遇难、1人失踪。对于陡峭的河谷地区,桥涵是公路工程中的重要结构,但其在方便人们交通出行的同时也会增大泥石流灾害风险。具体来说,公路桥涵的设计通常会考虑正常的水流和气候条件,但在遭遇泥石流灾害时,特别是对于一些植被覆盖良好的地区,泥石流汇入主河后不仅会影响河道形态和泥沙供应,同时也会将沿途刮铲的漂木引入河道,漂木在遇到桥涵或河流断面狭窄处极易造成堵塞,引发上游水位上涨,增大邻近地区洪水淹没风险^[21-23]。

2020年8月17日,在连续多日强降雨的影响下,四川省平武县亚者造祖村暴发了大规模群发性泥石流灾害,导致G247国道多处断道和垮方,九绵高速项目部、民工驻地等多处遭受巨大损毁。泥石流汇入主河后,由泥石流裹挟的大量漂木将下游正在修建的高速公路桥涵堵塞,导致主河水流运动受阻回淤,淹没了干流右岸本不在泥石流堆积扇范围内的32户97间居民房屋,扩大了受灾范围。灾害最终造成了4人死亡,直接经济损失达6000万元。本文以亚者造祖村“8·17”群发性泥石流为研究对象,探讨了此次群发性泥石流灾害风险特征,并重点分析了干流公路桥涵对泥石流灾害的风险放

大效应,旨在为今后类似山区干流公路桥涵的合理规划以及泥石流相关防治预警工作提供参考。

1 研究区概况

平武县位于四川省绵阳市西北部,青藏高原向四川盆地过渡边缘地带,位居长江二级支流涪江上游地区,此次泥石流发生地点为平武县白马藏族乡亚者造祖村,暴发泥石流的 4 条沟为:阿祖沟、麻石扎三号沟、夺补河五号沟、杂排沟,沟口与九寨沟至绵阳高速公路(以

下简称“九绵高速”)和 G247 国道相交。研究区主要河流为夺补河,发源于王郎自然保护区,全长 108 km,总落差为 2 485 m,河床平均比降为 23‰,平均流量为 41 m³/s,平均径流总量为 13×10⁸ m³/a,4 条泥石流沟分布于夺补河两侧(图 1)。区内地形北高南低,最高山顶高程 4 000 m,谷底高程 2 200 m,相对高差 1 800 m。两岸岸坡较陡,呈现出“四周高、中间低”的地形地貌特征,极有利于雨水的汇集和泥石流的形成运移。通过现场调查和遥感解译查明 4 条泥石流沟地形地貌特征见表 1。

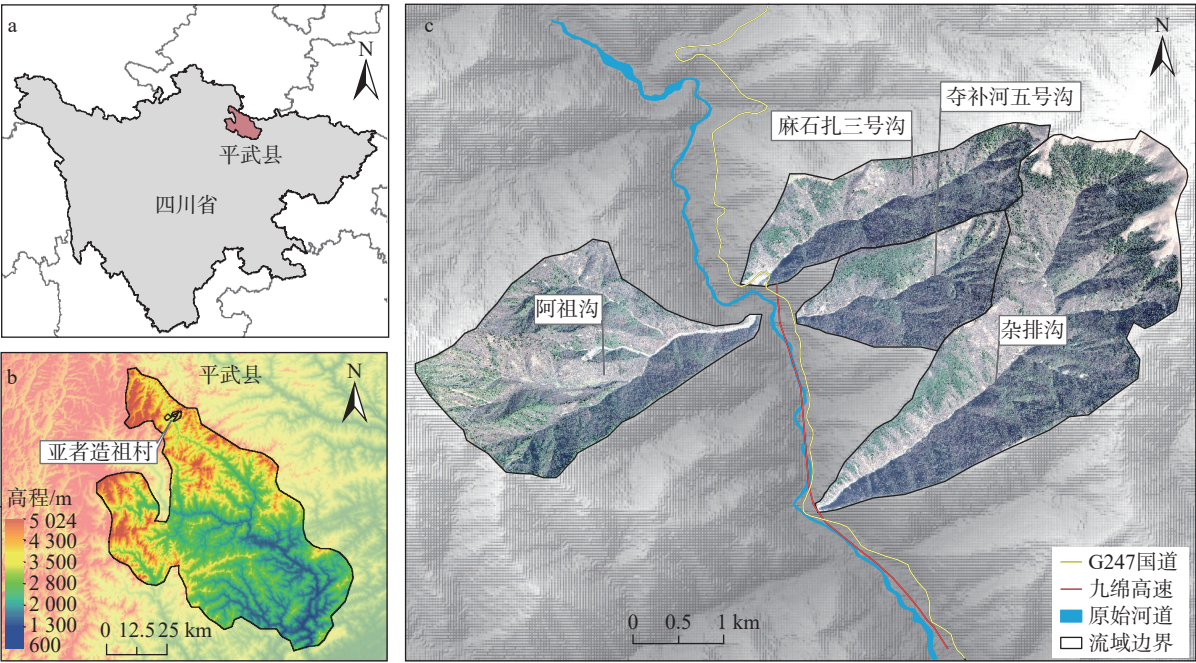


图 1 研究区概况图

Fig. 1 Overview of the study area

注: a 为研究区地理位置; b 为研究区高程; c 为 4 条沟相对位置。

表 1 研究区 4 条泥石流沟地形地貌特征参数
Table 1 Topographic and geomorphologic characteristics
parametes of four debris flow gullies in the study area

流域名称	流域面积 /km ²	主沟长度 /km	平均纵 比降/‰	最高海拔 /m	最低海拔 /m	最大高差 /m
阿祖沟	4.10	3.10	244	3 110	2 353	757
麻石扎三号沟	2.43	3.20	294	3 302	2 361	941
夺补河五号沟	1.80	2.54	311	3 147	2 357	791
杂排沟	6.16	5.45	223	3 543	2 330	1 213

研究区位于四川盆地与龙门山结合部位,受活动断裂带影响较大,新构造运动强烈,地震频发。区内有松潘—较场地震带和龙门山地震带两条大型断裂构造通过,松潘—较场地震带带内曾发生过 7 级以上地震 4 次,最大为 1933 年茂县叠溪 7.5 级地震;2008 年 5 月 12 日在龙门山中岩断裂发生的 8.0 级汶川特大地震,平

武县境内沿断裂沿线的平通—响岩—南坝—石坎一线成为极震区^[24],2017 年 8 月 8 日发生在阿坝州九寨沟县的 7.0 级地震对研究区也产生了极大影响。早期频繁的地震活动,导致区内地层遭受强烈切割挤压而破碎,山体稳定性遭到严重破坏,产生了大量松散固体物质,为泥石流的形成提供了极为丰富的物源条件^[25]。

研究区属亚热带季风气候区,降雨充沛且较为集中,多年平均降雨量为 806.0 mm,降雨最多的是 1 155.4 mm(1955 年),最少的是 480.8 mm(1986 年),月最大降雨量为 442.5 mm(1976 年 8 月),日最大降雨量为 151 mm(1993 年 5 月 27 日),时最大降雨量为 72.7 mm(1993 年 5 月 27 日 19 时),10 分钟最大降雨量为 30.0 mm(1993 年 5 月 27 日 19 时 27 分),降雨雨强大是引发区内泥石流灾害发生的重要因素(图 2)。根据平武县气

象局提供资料显示,2020年8月10日20时—8月17日14时,平武县白马藏族乡累计降雨量为250.20 mm,比常年8月份同比增加219.95%,结合历史降雨资料对比,此次降雨强度超50年一遇。

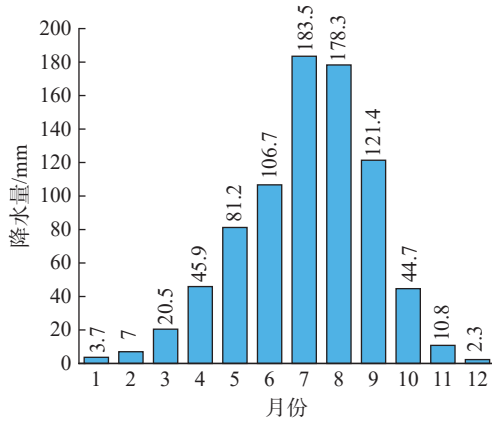


图2 平武县多年月平均降水量

Fig. 2 Annual average monthly rainfall in Pingwu County

2 数据来源与方法

2.1 数据来源

本研究数据包括:像元分辨率为12.5 m×12.5 m的研究区ALOS(advanced land observation satellite)DEM数据(<https://search.asf.alaska.edu/#/>),作为Fast Flood模拟时的基础地形数据;从美国地质调查局(USGS)下载的研究区2020年7月19日(灾前)和2020年8月20日(灾后)的Landsat系列遥感影像(分辨率15 m),用于研究区灾害前后植被覆盖度的提取。为了获取亚者造祖村“8·17”群发性泥石流灾害基本特征,灾后(2022年5月)对研究区开展了详细野外调查。调查时通过选取沟道内典型断面确定泥石流最大泥痕高度(泥深)以及顶部和底部断面的宽度,同时调查了泥石流的危害形式、建筑物破坏、沟道侵蚀、桥涵堵塞情况等。另外,在4条泥石流沟堆积扇位置采集了泥石流样品,对粒径小于60 mm的堆积物进行颗粒级配分析。最后,通过对当地灾害目击者的访谈,了解了泥石流历史及灾害现场的基本情况。

2.2 参数计算

2.2.1 泥石流容重

通过室内物理筛分与马尔文试验测量野外调查时采取的泥石流堆积样品中的黏粒含量,试验结果如图3所示。4条沟泥石流容重采用基于黏粒(粒径<0.005 mm)含量的容重计算法^[26]确定:

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

式中: γ_c ——泥石流容重/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$);

x ——泥石流土样中的黏粒含量/%。

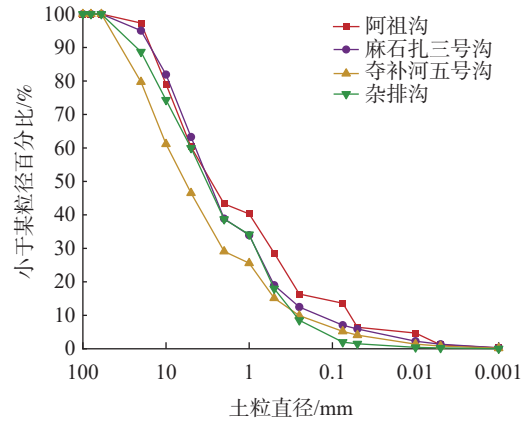


图3 颗粒级配分析曲线

Fig. 3 Particle size distribution analysis curve

2.2.2 泥石流流量

根据水源条件,4条泥石流沟均为暴雨型泥石流,通过查询《四川省中小流域暴雨洪水计算手册》中的降雨量等值线图,分别获取研究区1 h和6 h平均雨强($\bar{H}_1=20 \text{ mm}$, $\bar{H}_6=30 \text{ mm}$)及其相对应的变异系数($C_{v1}=0.55$, $C_{v6}=0.52$),再计算不同重现期下降雨强度数据。按式(2)计算泥石流洪峰流量:

$$Q_c = (1 + \varphi_c) Q_w D_c \quad (2)$$

式中: Q_c ——泥石流洪峰流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

Q_w ——暴雨洪水设计流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

D_c ——泥石流堵塞系数;

φ_c ——泥石流流量增加系数。

一次泥石流过程总量和一次泥石流冲出固体物质总量采用《泥石流灾害防治工程勘察规范(试行)》(T/CAGHP 006—2018)中推荐的公式^[27]计算:

$$Q = 0.264 T Q_c \quad (3)$$

$$Q_H = Q(\gamma_c - \gamma_w) / (\gamma_H - \gamma_w) \quad (4)$$

式中: Q ——泥石流一次过程总量/ m^3 ;

T ——泥石流历时/s;

Q_c ——泥石流洪峰流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

Q_H ——泥石流一次冲出固体物质总量/ m^3 ;

γ_c ——泥石流容重/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$);

γ_w ——清水容重/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$);

γ_H ——泥石流固体物质容重/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)。

野外调查时通过选取 4 条泥石流沟泥痕相对清晰的位置进行断面测量,确定泥石流最大泥痕高度(泥深)以及顶部和底部断面的宽度,采用形态调查法^[27]计算泥石流洪峰流量:

$$Q'_c = W_c V_c \quad (5)$$

式中: Q'_c ——泥石流断面峰值流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

W_c ——泥石流过流断面面积/ m^2 ;

V_c ——泥石流断面平均流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);

2.3 泥石流堵河分析

根据陈德明堵河判别公式^[28],对研究区 4 条泥石流沟堵河程度进行计算。当 C_γ 值等于或大于 1.44(临界值)时,主河可能被堵塞。

$$C_\gamma = \frac{\gamma_c Q_c V_c \sin \alpha}{\gamma_m Q_m V_m} \quad (6)$$

式中: γ_c ——泥石流容重/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$);

γ_m ——主河堆积密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$);

Q_c ——泥石流峰值流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

Q_m ——主河洪峰流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

V_c ——泥石流流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);

V_m ——主河流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);

α ——泥石流沟与主河顺流方向夹角/($^\circ$)。

2.4 Fast Flood 模拟

本文运用 Fast Flood 模型模拟干流有桥涵和无桥涵两种情况下洪水淹没情况,该模型主要控制方程如下:

$$AF(x) = Q_{af} \quad (7)$$

$$h_{af} = \left(\frac{q_{af}}{\Delta x} \frac{n}{\sqrt{i}} \right)^{\frac{3}{5}} \quad (8)$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} = 0 = g \frac{dz}{dx} + g \frac{d\left(\frac{1}{2}h^2\right)}{dx} - gn \frac{u_x |\vec{u}|}{h^{\frac{2}{3}}} \quad (9)$$

$$\frac{\partial u_y}{\partial t} = 0 = g \frac{dz}{dx} + g \frac{d\left(\frac{1}{2}h^2\right)}{dx} - gn \frac{u_y |\vec{u}|}{h^{\frac{2}{3}}} \quad (10)$$

$$(h_{i+1})^{\frac{5}{3}} = (h_i)^{\frac{5}{3}} + dt \left(\frac{d((h_i)^{\frac{5}{3}} u_x)}{dx} + \frac{d((h_i)^{\frac{5}{3}} u_y)}{dy} + \max(0, R-1) \right) \quad (11)$$

式中: $AF(x)$ ——流量累计量/ m^3 ;

Q_{af} ——稳态流量/ m^3 ;

h_{af} ——流量推算的流体高度/ m ;

n ——曼宁系数;

Δx ——网格单元宽度/ m ;

i ——地形坡度/%;

R ——降雨率;

u ——流体速度/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

h ——水流高度/ m ;

g ——重力加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)。

3 结果与分析

3.1 泥石流规模特征

亚者造祖村“8·17”泥石流为低频稀性大规模群发性泥石流。根据对当地村民(46岁)的调访,并结合其回忆父母曾给予的泥石流相关活动信息,该村民表示研究区 1976 年发生“松潘—平武”地震后,在强降雨作用下暴发过一次特大泥石流灾害,直至 2020 年没有暴发过其他泥石流。同时,结合雨洪法和形态调查法计算结果(表 2, 表 3),判断此次群发性泥石流暴发频率约为 50 年一遇。根据泥石流相关运动特征计算结果,阿祖沟、麻石扎三号沟、夺补河五号沟、杂排沟泥石流容重分别为: 1.68 g/cm^3 、 1.71 g/cm^3 、 1.65 g/cm^3 、 1.61 g/cm^3 ,均小于 1.80 g/cm^3 ,为稀性泥石流。根据《泥石流灾害防治工程勘查规范(试行)》(T/CAGHP 006—2018)^[27]中的泥石流规模等级分类,按雨洪法计算得到的 4 条泥石流沟 50 年一遇峰值流量结果,麻石扎三号沟和夺补河五号沟泥石流峰值流量分别为 $134.97 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $108.46 \text{ m}^3/\text{s}$,在规模上属大型;阿祖沟和杂排沟泥石流峰值流量分别为 $232.71 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $218.44 \text{ m}^3/\text{s}$,在规模上属特大型。

3.2 泥石流成灾特征

亚者造祖村“8·17”群发性泥石流灾害风险沿干流两岸呈星扇状分布,干流公路桥涵堵塞致使风险范围扩大了约 1 倍。研究区地处河谷地带,地形狭窄,真正适宜居住的“开阔平地”极少,受地形条件限制,九绵高速项目部将临时驻地修建在地势相对平缓的老泥石流堆积扇上,由于研究区植被覆盖度较高、泥石流隐蔽性强,忽视了泥石流的危害。2020 年 8 月 17 日,阿祖沟、麻石扎三号沟、夺补河五号沟、杂排沟不同程度地暴发泥石流,其中,阿祖沟泥石流规模及其造成的损失最为巨大。结合现场调查和遥感解译结果,阿祖沟泥石流堆积扇面积约为 $5.95 \times 10^4 \text{ m}^2$,堆积高度约为 2.5 m,堆积体积为 $14.88 \times 10^4 \text{ m}^3$,阿祖沟泥石流发生后,直接将位于沟口正下方的项目驻地夷为平地,民工驻地和钢筋加工中心遭到严重损毁(图 4)。夺补河五号沟泥石流堆积扇面积约为 $3.43 \times 10^4 \text{ m}^2$,堆积高度约为 1.3 m,堆积体积

表 2 研究区 4 条泥石流沟雨洪法相关参数计算结果

Table 2 Calculation results of storm flood method related parameters in four debris flow gullies in the study area										
流域	$P/\%$	ψ	τ/h	n	$s/(\text{mm}\cdot\text{h}^{-1})$	D_c	$Q_w/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	$Q_c/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	$Q/(10^4\text{ m}^3)$	$Q_H/(10^4\text{ m}^3)$
阿祖沟	1	0.91	0.97	0.8	59.20	2.8	63.26	302.82	19.19	7.91
	2	0.90	1.01	0.8	51.60	2.6	52.35	232.71	14.74	6.08
	5	0.87	1.08	0.79	42.00	2.4	39.16	160.70	10.18	4.20
麻石扎三号沟	1	0.94	1.07	0.8	59.20	2.8	35.57	174.58	8.30	3.57
	2	0.93	1.12	0.8	51.60	2.6	29.61	134.97	6.41	2.76
	5	0.91	1.19	0.79	42.00	2.4	22.41	94.27	4.48	1.93
夺补河五号沟	1	0.94	0.90	0.8	59.20	2.8	30.42	140.24	6.66	2.63
	2	0.93	0.94	0.8	51.60	2.6	25.33	108.46	5.15	2.03
	5	0.92	1.00	0.79	42.00	2.4	19.19	75.84	3.60	1.42
杂排沟	1	0.93	1.58	0.8	59.20	2.8	65.48	282.62	17.91	6.30
	2	0.92	1.65	0.8	51.60	2.6	54.50	218.44	13.84	4.87
	5	0.90	1.76	0.79	42.00	2.4	41.17	152.30	9.65	3.39

注: ψ 为洪峰径流系数, τ 为流域汇流时间, s 为暴雨雨力。

表 3 研究区 4 条泥石流沟形态调查法相关参数计算结果

Table 3 Calculation results of morphological survey method related parameters in four debris flow gullies in the study area								
流域	$x/\%$	$\gamma_c/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	R/m	W_c/m^2	$V_c/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$Q'_c/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	$Q'/(10^4\text{ m}^3)$	$Q'_H/(10^4\text{ m}^3)$
阿祖沟	1.15	1.68	2.0	41.00	8.40	344.39	16.37	6.79
麻石扎三号沟	1.37	1.71	2.2	16.28	9.64	156.86	7.45	3.20
夺补河五号沟	0.82	1.65	1.7	13.86	8.77	121.47	5.77	2.27
杂排沟	0.52	1.61	2.0	21.76	8.51	185.18	11.73	4.12

注: R 为水力半径。

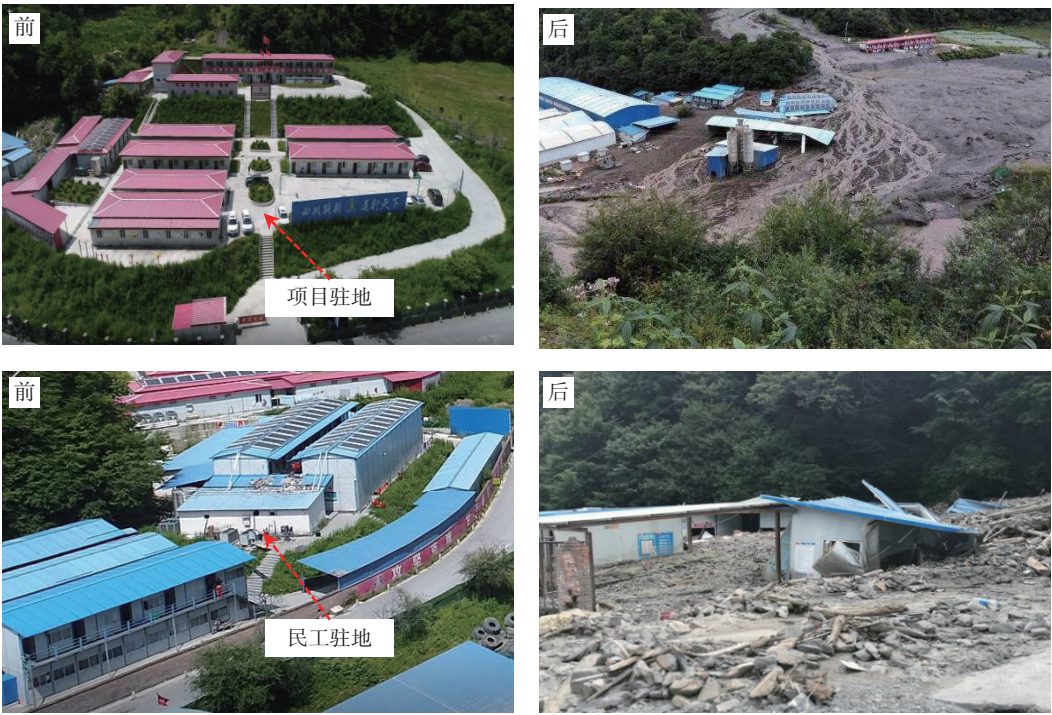


图 4 阿祖沟堆积扇位置受灾前后对比

Fig. 4 Comparison of accumulation fan positions in Azu debris flow gully before and after the disaster

为 $4.45\times10^4\text{ m}^3$, 其危害对象主要为九绵高速预制梁场、拌合站以及白马隧道洞口驻地。此次群发性泥石流灾害造成了 4 人死亡, 九绵高速项目部直接经济损失达 3 000 万元(表 4)。此次群发性泥石流具有极其强大的搬运能力和冲击力, 泥石流在运动过程中不断沿途掏蚀沟床松散堆积物, 侵蚀两岸坡脚, 致使其流量、规模不

表 4 研究区 4 条泥石流沟堆积扇特征及危害对象

Table 4 Characteristics and vulnerable objects of accumulation fans in four debris flow gullies in the study area				
流域	堆积扇面积/(10 ⁴ m ²)	平均堆积厚度/m	堆积体积/(10 ⁴ m ³)	主要危害对象
阿祖沟	5.95	2.5	14.88	九绵高速项目部驻地、民工驻地、钢筋加工中心 G247国道
麻石扎三号沟	3.14	1.5	4.72	
夺补河五号沟	3.43	1.3	4.45	九绵高速预制梁场、拌合站、白马隧道洞口驻地 G247国道、在建九绵高速、沟口民宿
杂排沟	4.14	2.3	9.52	

断扩大,4 条泥石流沟分布在干流两侧,群发性泥石流灾害风险沿干流两岸呈星扇状分布。

根据陈德明等^[28]堵河判别公式计算结果(表 5)以及结合现场实际调查情况,泥石流冲出沟口汇入主河后,并未直接造成干流堵塞,因此,不存在堰塞湖及其溃决洪水对下游造成威胁。正常情况下,4 条泥石流沟仅在其堆积扇范围内构成危害,受灾面积共计约为 16.66×10⁴ m²。但实际调访时了解到此次群发性泥石流除了在堆积扇范围内受灾外,堆积扇外距离杂排沟沟口约 300 m 处的下游村庄也遭受了严重影响(图 5)。

表 5 泥石流堵河相关参数与计算结果

Table 5 Related parameters and calculation results of debris flow blocking river							
流域	$Q_c/(m^3 \cdot s^{-1})$	$\gamma_c/(g \cdot cm^{-3})$	$V_c/(m \cdot s^{-1})$	$\alpha/(^{\circ})$	$J/\%$	C_γ	堵河情况
阿祖沟	232.71	1.68	8.40	60	244	1.19	不堵
麻石扎三号沟	134.97	1.71	9.64	120	294	0.81	不堵
夺补河五号沟	108.46	1.65	8.77	80	311	0.65	不堵
杂排沟	218.44	1.61	8.51	120	223	1.09	不堵

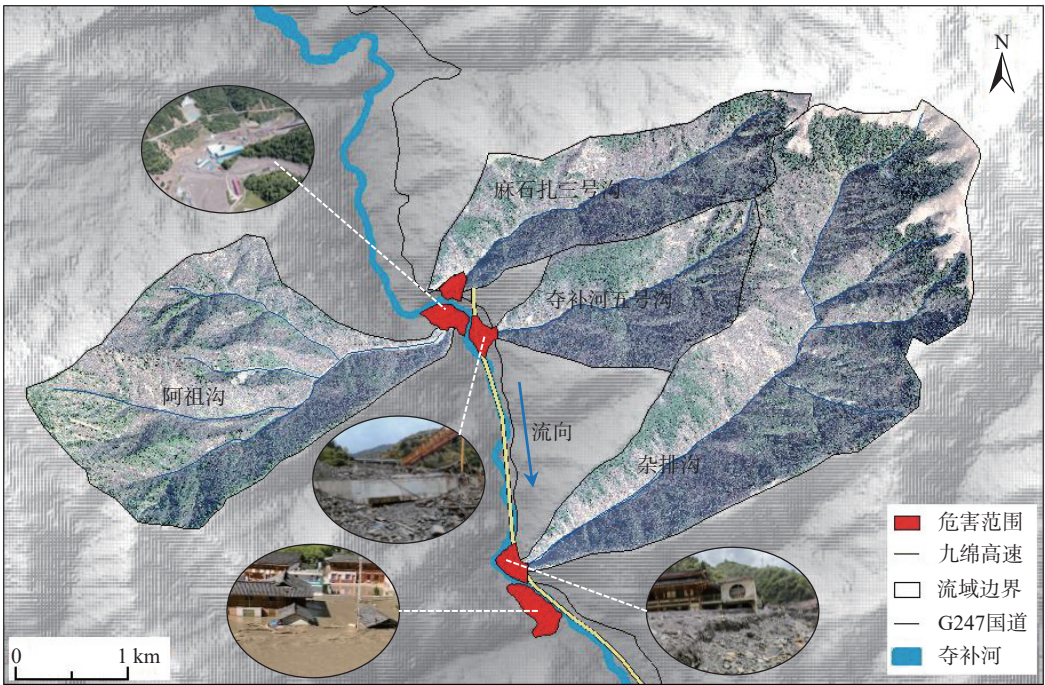


图 5 研究区受灾范围示意图

Fig. 5 Schematic diagram of disaster scope in the study area

泥石流发生时,杂排沟沟口下游约有 500 m 的公路距离和干流方向基本一致,九绵高速公路路基宽 24.5 m,每个桥涵由 6 个桥墩构成,桥墩直径为 1.2 m,桥墩之间的轴向间距为 3 m。干流河道平均宽度为 21 m,多个桥墩直接修建于主河道内,大大减小了河道有效流动面

积,加之上游大量漂木运动到桥涵位置后因受阻而不断汇聚造成堵塞,导致主河水流运动受阻回淤,受灾面积扩大了约 16.78×10⁴ m²,风险范围扩大了约 1 倍。

3.3 漂木堵塞公路桥涵导致泥石流灾害风险放大

亚者造祖村“8·17”群发性泥石流冲出物中的大量

漂木汇入主河道引起的次生灾害是导致泥石流风险进一步放大的重要原因。根据调访现场村民,其表示在泥石流发生前,研究区已连续降雨长达一个月之久,8月17日之前,洪水均能通过干流河道顺流而下,并未出现溢流情况。泥石流发生后,由于泥石流裹挟的大量漂木汇入主河运动到下游公路桥涵位置后因受阻而不断汇聚造成堵塞,形成堰塞体,引发主河回淤—漫坝—溢流,导致干流右岸本不在泥石流堆积扇范围内的32户97间居民房屋受损,约 $2.4\times 10^4\text{ m}^2$ 农作物受灾,直接经济损失增加了3000万元,扩大了此次群发性泥石流灾害范围,放大了泥石流灾害风险(图6)。

漂木堵塞干流公路桥涵后带来的风险放大效应主要体现在两个方面:(1)堰塞现象带来的风险放大效

应。泥石流运动过程中裹挟的漂木汇入干流后在桥涵处积聚,形成堰塞体,大大减小河道有效流动面积,导致水流运动受阻,泄流能力降低,引发上游洪峰高度上升,增大邻近地区洪水淹没风险。亚者造祖村“8·17”群发性泥石流灾害就是干流桥涵的堰塞现象导致灾害风险放大的一个典型例子。(2)结构破坏带来的风险放大效应。干流公路桥涵通常能承受正常的水流冲击,但在山洪、泥石流发生时,庞大的冲击力可能超出桥涵设计承载能力,加之大量漂木、石块等堆积在干流桥涵位置会对桥涵结构施加额外的作用力,加剧桥墩周围的局部冲刷,可能会导致桥涵的破坏甚至垮塌,进一步加剧灾害风险。“8·17”泥石流发生后,九绵高速项目部及时将主河进行了改道(图7),并对河道的宽度及坝高进行了

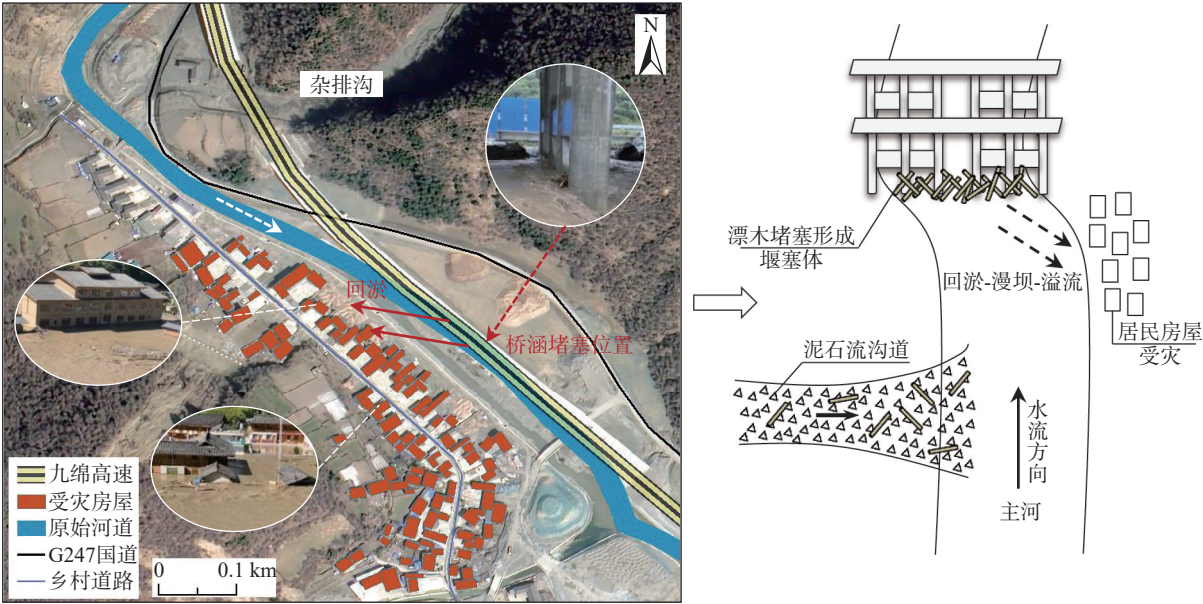


图6 干流桥涵堵塞回水淹没村庄示意图

Fig. 6 Schematic diagram of village inundation due to backwater from main stream bridges and culverts blockage



图7 干流公路桥涵与主河位置

Fig. 7 Location of road bridges and culverts with respect to main river

注: a 为主河改道前; b 为主河改道后。

一定程度的改进,可避免再次发生泥石流时因下游桥涵堵塞而加剧灾情。

野外调查时发现了大量堆积于泥石流沟道内的漂木(图 8),堆积漂木的形状和尺寸较为复杂,有单纯主枝干,也有带分枝或根系等相对复杂的漂木,基本形状普遍为长条形圆柱状,堆积漂木尺寸大约在 0.3~3.5 m 不等,直径大多在 5~40 cm 范围之内。为了对比泥石流发生前后流域内植被变化,通过美国地质调查局(USGS)下载了研究区 2020 年 7 月 19 日(灾前)和 2020 年 8 月 20 日(灾后)Landsat8 OLI 遥感影像(分辨率

15 m),并基于 ENVI 5.3 软件计算得到研究区泥石流流发生前后的归一化植被指数(NDVI)(图 9)。结果显示,泥石流发生前流域内植被覆盖度较高,导致泥石流隐蔽性强。前期长历时强降雨使得大量植被失稳滑动,加之泥石流运动过程中不断沿途刮铲,沟道内的树木植被遭到严重破坏,使得大量漂木成为了此次泥石流灾害的一部分物源。基于灾害前后植被覆盖度,利用 ArcGIS 计算得到 4 条泥石流沟灾后植被损毁面积共计约 1.38 km²,计算过程可能与实际过程存在一定偏差,但泥石流发生后大量植被损毁,漂木含量增大趋势明显。

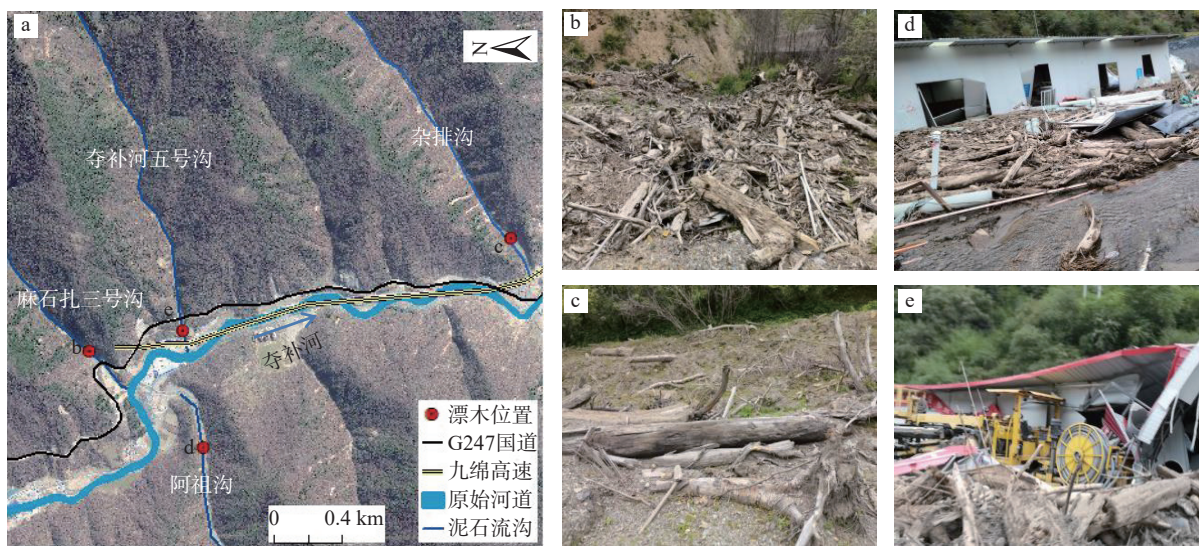


图 8 野外调查时沟道内堆积的大量漂木

Fig. 8 Driftwood accumulated in debris flow gully during field survey

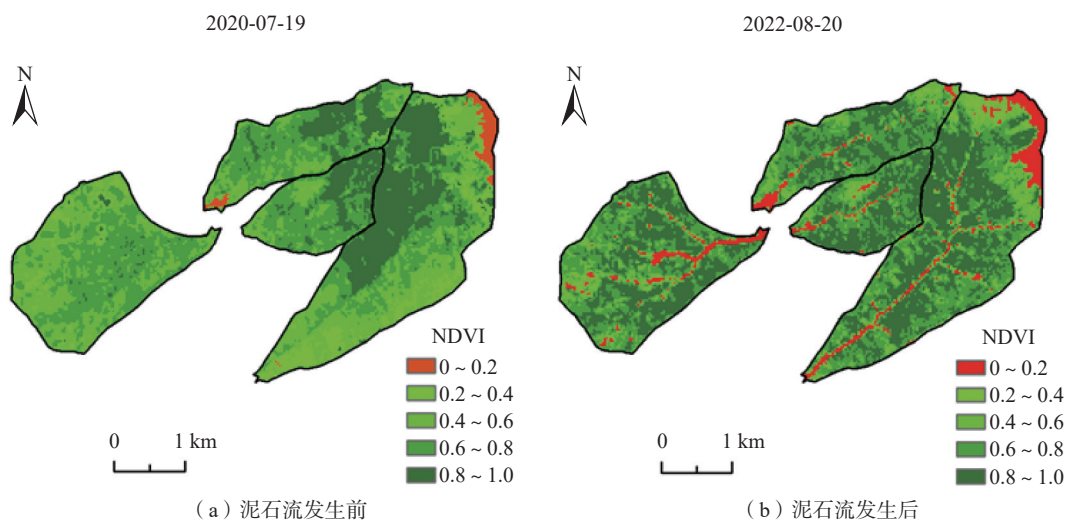


图 9 4 条泥石流沟植被覆盖度对比

Fig. 9 Comparison of vegetation coverage in four debris flow gullies

3.4 基于 Fast Flood 模拟桥涵堵塞过程分析

本文运用 Fast Flood 模型模拟了干流有桥涵和无桥

涵两种不同情况下的洪水淹没情况。首先导入像元分辨率为 12.5 m×12.5 m 的研究区 DEM 数据,对导入的地

形数据进行土地利用和渗透分析,根据灾害发生时河道实际情况,绘制了宽 21 m、高 3.5 m 的河道,最后输入河流流量和降雨数据,模拟干流在没有桥涵的情况下洪

水运动过程。基于上述步骤,在干流河道内桥涵堵塞位置设置宽 23 m、高 6 m 的坝体,模拟干流在有桥涵且被堵塞的情况下洪水运动过程,模拟结果如图 10 所示。

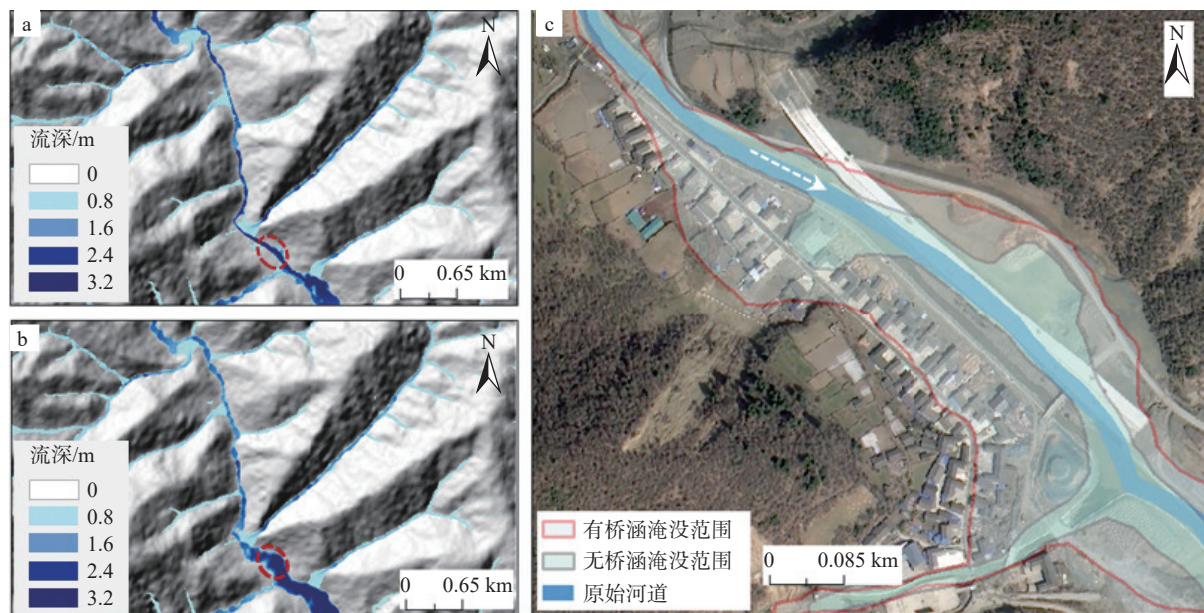


图 10 Fast Flood 模拟结果

Fig. 10 Comparison of Fast Flood simulation results

注: a 为干流无桥涵时淹没范围; b 为干流有桥涵时淹没范围; c 为淹没范围对比。

从图 10a 可以看出,在无桥涵的情况下,水流会沿着河道顺流而下,河道内水流深度为 2.4 ~ 3.2 m,出现了轻微溢流,溢流深度为 0.4 ~ 0.6 m,溢流面积约为 $0.91 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。从图 10b 看出,在有桥涵堵塞的情况下,由于水流运动受阻,出现大面积回淤,淹没了干流右岸大部分房屋。亚者造祖村水流淹没深度为 1.3 ~ 2.5 m,与无桥涵时相比,淹没范围扩大了约 $13.98 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。根据调访及灾害现场村庄淹没情况,洪水流经亚者造祖村时的水位高度约为 1.6 ~ 2.8 m,受灾面积为 $16.78 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。由于模拟时只考虑了研究区洪水淹没情况,实际上在泥石流冲出沟口后,会有一部分固体物质汇入主河,致使河床有所抬升,因此,模拟结果较实际值偏小,但总体基本吻合,且可以看出在有桥涵堵塞的情况下,灾害风险放大效果明显。

4 讨论

对于植被覆盖良好的湿润山区,泥石流运动过程中往往会裹挟大量漂木,漂木遇到桥涵等断面缩窄处极易形成堵塞,引发上游水位上涨,加剧灾害风险。根据漂木长度和桥墩间距,桥墩处漂木的堵塞堆积可分为两种不同机制,即单墩堆积和跨距多墩堵塞堆积^[29-33]。当

漂木数量较少且桥墩之间的有效开口(即桥墩之间的距离)大于漂木的最大长度时,就会出现单墩堆积,在此情况下,漂木堆积通常在漂木垂直于水流方向击中桥墩后开始,这种类型的漂木堆积体稳定性不高,容易被后续来流冲溃。跨距多墩堵塞堆积可分为漂木横挡搭桥型堆积和漂木交错咬合型堆积^[34-35],若桥墩之间的有效开口小于漂木的最大长度,漂木直接被夹在两个或多个桥墩以及桥墩与堤岸之间时,就会形成“漂木横挡搭桥型”堆积,长漂木被拦截横挡于桥墩之间后形成骨架,大大减小桥涵过流断面,也会促进对后续短小漂木的拦截,逐渐形成更大的堵塞体,在桥涵结构未被破坏的情况下,这部分漂木形成的堵塞体将稳定存在,难以发生溃决。若桥墩之间的有效开口大于漂木的最大长度,但由于漂木数量较多,多根漂木同时到达桥涵处时,漂木之间相互咬合成为堵塞体,在两个或多个桥墩之间就会形成“漂木交错咬合型”堆积,在此情况下的漂木堆积体稳定性不高,在形成临时性堵塞后可能会被后续来流冲溃。由于沿河修建的干流公路桥涵的特殊性,堆积堵塞的漂木在发生溃决后,可能又会在下一个桥涵处继续堵塞堆积,形成级联堵塞。干流桥涵堵塞导致主河过流能力大大降低,不仅增大后续漂木堵塞的概率,也会阻

碍主河的过流并回淤,使得上游水位不断升高,增大邻近地区洪水淹没风险。

因此,今后干流公路桥涵修建时应适当增大桥墩之间的轴向间距,减小桥涵截面处漂浮物堵塞概率,或者尽量一桥跨越,使用大跨度的桥,避免在河道内修建多个密集分布的桥墩,要给河道预留出一定的宽度和运行空间。同时,应适当增加河道的坝高和宽度,防止因河道堵塞或干流洪峰过大而增大邻近区域洪水淹没风险。对于区域内漂浮物的减灾,可以考虑在泥石流沟道内关键断面位置设置相应的漂浮物拦截措施或在桥涵等处设计漂浮物导流桩、漂浮物清除装置^[14]等,减少大量漂浮物的堵塞淤积,并定期对沟道及河道内的漂浮物进行清理。另外,应对山区低频率老泥石流沟开展严密排查,准确划分泥石流危险区,避免在老泥石流堆积扇上建房,建议对沟道采取“固源+拦挡+排导”的综合防治措施,对不稳定斜坡进行固源处理,在沟道下游修建拦砂坝,拦截流域内主要固体物质,同时可修建连接支沟与干流的排导槽,使拦砂坝排出的细小颗粒可以顺利归流排导。

5 结论

(1)亚者造祖村“8·17”群发性泥石流具有发生频率低、成灾规模大、隐蔽性强的特征,4条沟泥石流容重均小于 1.80 g/cm^3 ,为稀性泥石流,阿祖沟和杂排沟泥石流在规模上属特大型,麻石扎三号沟和夺补河五号沟泥石流在规模上属大型,堆积扇受灾面积共计约为 $16.66 \times 10^4 \text{ m}^2$,群发性泥石流灾害风险沿干流两岸呈星扇状分布。

(2)早期多次强震和前期长历时强降雨共同促进并激发了此次群发性泥石流的形成,而干流公路桥涵布设不当,导致泥石流裹挟的漂浮物堵塞桥涵,致使主河回淤—漫坝—溢流,受灾面积增大了 $16.78 \times 10^4 \text{ m}^2$,风险范围扩大了约 1 倍。

(3)对于植被覆盖良好的湿润山区,干流公路桥涵修建时应适当增大桥墩之间的轴向间距,或者尽量一桥跨越,使用大跨度的桥,避免在河道内修建多个密集分布的桥墩,要给河道预留出一定的宽度和运行空间,防止因漂浮物堵塞桥涵放大泥石流灾害风险。

参考文献(References):

[1] 陈宁生,周海波,卢阳,等.西南山区泥石流防治工程效益浅析[J].成都理工大学学报(自然科学版),2013,40(1): 50-58. [CHEN Ningsheng, ZHOU Haibo, LU Yang, et al. Analysis of benefits of debris flow control projects in

southwest mountain areas of China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2013, 40(1): 50-58. (in Chinese with English abstract)]

- [2] 赵聪,梁京涛,铁永波,等.西藏雅鲁藏布江峡谷特大巨型泥石流活动与泥沙输移特征研究[J].中国地质灾害与防治学报,2024,35(4): 45-55. [ZHAO Cong, LIANG Jingtao, TIE Yongbo, et al. Study on the activities of the massive debris flows and sediment transport characteristics in the Grand Bend of the Yarlung Zangbo River Gorge, Xizang [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(4): 45-55. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 史继帅,姜亮,翟胜强.四川甘洛县黑西洛沟“8·31”泥石流动力过程[J].中国地质灾害与防治学报,2024,35(3): 52-60. [SHI Jishuai, JIANG Liang, ZHAI Shengqiang. Dynamic process of “8·31” debris flow in Heixiluogou, Ganluo County, Sichuan Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(3): 52-60. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 谢湘平,王小军,李忠丽,等.漂浮物对泥石流输移过程影响试验研究[J].水利水电技术(中英文),2022,53(5): 179-189. [XIE Xiangping, WANG Xiaojun, LI Zhongli, et al. Experimental study of influence from driftwood on debris flow transport process [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(5): 179-189. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 于国强,张霞,顾小凡,等.基底侵蚀作用对黄土坡面泥流动力过程影响机制研究[J/OL].中国地质,(2024-07-05)[2024-07-28]. [YU Guoqiang, ZHANG Xia, GU Xiaofan, et al. Influence of the basal erosion on kinetic process of loess slope debris flow [J/OL]. Geology in China, (2024-07-05)[2024-07-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.p.20240704.1646.002.html>. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 李钰,甘滨蕊,王协康,等.四川省甘洛县2019年群发性山洪泥石流灾害的形成机理[J].水土保持通报,2020,40(6): 281-287. [LI Yu, GAN Binrui, WANG Xiekang, et al. Formation mechanism of group flash flood/debris flow disasters in Ganluo County, Sichuan Province in 2019 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(6): 281-287. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 张宪政,铁永波,宁志杰,等.四川汶川县板子沟“6·26”特大型泥石流成因特征与活动性研究[J].水文地质工程地质,2023,50(5): 134-145. [ZHANG Xianzheng, TIE Yongbo, NING Zhijie, et al. Characteristics and activity analysis of the catastrophic “6·26” debris flow in the Banzi Catchment, Wenchuan County of Sichuan Province [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(5): 134-145. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 陈剑刚,费高高,王喜安,等.漂浮物对山洪泥石流运动致

- 灾影响研究进展 [J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(3): 104 – 111. [CHEN Jiangang, FEI Gaogao, WANG Xi'an, et al. Advances on disaster effects of drift wood in flash flood debris flows [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(3): 104 – 111. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 袁东, 张广泽, 王栋, 等. 西部山区交通廊道泥石流发育特征及选线对策 [J]. 地质通报, 2023, 42(5): 743 – 752. [YUAN Dong, ZHANG Guangze, WANG Dong, et al. Development characteristics of debris flow in traffic corridors in western mountainous areas and route selection countermeasures [J]. Geological Bulletin of China, 2023, 42(5): 743 – 752. (in Chinese with English abstract)]
- [10] CHEN Jiangang, LIU Wenrun, ZHAO Wanyu, et al. Magnitude amplification of flash floods caused by large woody in Keze gully in Jiuzhaigou National Park, China [J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2021, 12(1): 2277 – 2299.
- [11] 陈晓清, 崔鹏, 韦方强. 良好植被区泥石流防治初探 [J]. 山地学报, 2006, 24(3): 333 – 339. [CHEN Xiaoqing, CUI Peng, WEI Fangqiang. Study of control debris flow in high-covered vegetation region [J]. Journal of Mountain Science, 2006, 24(3): 333 – 339. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 崔鹏, 陈晓清, 柳素清, 等. 风景区泥石流防治特点与技术 [J]. 地学前缘, 2007, 14(6): 172 – 180. [CUI Peng, CHEN Xiaoqing, LIU Suqing, et al. Techniques of debris flow prevention in National Parks [J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(6): 172 – 180. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 高克昌, 孟国才, 韦方强, 等. 德宏“7·5”特大滑坡泥石流灾害分析及其对策 [J]. 防灾减灾工程学报, 2005, 25(3): 251 – 257. [GAO Kechang, MENG Guocai, WEI Fangqiang, et al. Analysis and counter-measure for the large-scale landslide-debris flow hazard in Dehong, Yunnan, China [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2005, 25(3): 251 – 257. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 谢湘平, 王小军, 闫春岭. 漂木灾害研究现状及研究展望 [J]. 山地学报, 2020, 38(4): 552 – 560. [XIE Xiangping, WANG Xiaojun, YAN Chunling. A review of the research on woody debris related disaster and its prospect [J]. Mountain Research, 2020, 38(4): 552 – 560. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 黄勋, 唐川. 基于数值模拟的泥石流灾害定量风险评价 [J]. 地球科学进展, 2016, 31(10): 1047 – 1055. [HUANG Xun, TANG Chuan. Quantitative risk assessment of catastrophic debris flows through numerical simulation [J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(10): 1047 – 1055. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 杨强, 王高峰, 李金柱, 等. 白龙江中上游泥石流形成条件与成灾模式探讨 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(6): 70 – 79. [YANG Qiang, WANG Gaofeng, LI Jinzhu, et al. Formation conditions and the disaster modes of debris flows along middle and upper reaches of the Bailongjiang River Basin [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(6): 70 – 79. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 屈永平, 唐川, 刘洋, 等. 四川省都江堰市龙池地区“8·13”泥石流堆积扇调查和分析 [J]. 水利学报, 2015, 46(2): 197 – 207. [QU Yongping, TANG Chuan, LIU Yang, et al. Survey and analysis of the “8·13” debris flows fan in Longchi Town of Dujiangyan City, Sichuan Province [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(2): 197 – 207. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 蒋涛, 崔圣华, 许向宁, 等. 基于遥感解译的典型强震区泥石流物源发育及演化——以四川都汶高速沿线为例 [J]. 地质通报, 2024, 43(7): 1243 – 1254. [JIANG Tao, CUI Shenghua, XU Xiangning, et al. Distribution and evolution of debris flow in a typic meizoseismal area based on remote sensing: A case study of the Sichuan Duwen expressway [J]. Geological Bulletin of China, 2024, 43(7): 1243 – 1254. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 陈宁生, 田树峰, 张勇, 等. 泥石流灾害的物源控制与高性能减灾 [J]. 地学前缘, 2021, 28(4): 337 – 348. [CHEN Ningsheng, TIAN Shufeng, ZHANG Yong, et al. Soil mass domination in debris-flow disasters and strategy for hazard mitigation [J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, 28(4): 337 – 348. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 游勇, 陈兴长, 柳金峰. 四川绵竹清平乡文家沟“8·13”特大泥石流灾害 [J]. 灾害学, 2011, 26(4): 68 – 72. [YOU Yong, CHEN Xingchang, LIU Jinfeng. “8·13” extra large debris flow disaster in Wenjia gully of Qingping Township, Mianzhu, Sichuan Province [J]. Journal of Catastrophology, 2011, 26(4): 68 – 72. (in Chinese with English abstract)]
- [21] OKAMOTO T, TAKEBAYASHI H, SANJOU M, et al. Log jam formation at bridges and the effect on floodplain flow: A flume experiment [J]. Journal of Flood Risk Management, 2020, 13(S1).
- [22] WANG Daozheng, WANG Xingang, CHEN Xiaoqing, et al. Analysis of factors influencing the large wood transport and block-outburst in debris flow based on physical model experiment [J]. *Geomorphology*, 2022, 398: 108054.
- [23] CHEN Huayong, RUAN Hechun, CHEN Jiangang, et al. Review of investigations on hazard chains triggered by river-blocking debris flows and dam-break floods [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 830044.
- [24] 郭岐山, 肖建兵, 关新芳. 平武县石坎河小流域震后泥石流活动特征及工程防治建议 [J]. 中国地质灾害与

- 防治学报, 2018, 29(3): 31 – 37. [GUO Qishan, XIAO Jianbing, GUAN Xinfang. The characteristics of debris flow activities and its optimal timing for the control in Shikan River Basin, Pingwu Country [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(3): 31 – 37. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 钟燕川, 郭海燕, 徐金霞, 等. 四川省泥石流活动与降水因子特征 [J]. 水土保持研究, 2018, 25(6): 390 – 396. [ZHONG Yanchuan, GUO Haiyan, XU Jinxia, et al. Characteristics of debris flow and precipitation in Sichuan Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(6): 390 – 396. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 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(增刊 1): 164 – 174. [CHEN Ningsheng, CUI Peng, LIU Zhonggang, et al. Calculation of debris flow bulk density based on clay particle content [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2003, 33(Sup 1): 164 – 174. (in Chinese)]
- [27] 中国地质灾害防治工程行业协会. 泥石流灾害防治工程勘查规范(试行): T/CAGHP 006—2018 [S]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2018. [China Geological Disaster Prevention Engineering Industry Association. Code for Exploration of debris flow Disaster Prevention Projects (Trial): T/CAGHP 006-2018 [S]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2018. (in Chinese)]
- [28] 陈德明, 王兆印, 何耘. 泥石流入汇对河流影响的实验研究 [J]. 泥沙研究, 2002(3): 22 – 28. [CHEN Deming, WANG Zhaoyin, HE Yun. Experimental study on the fluvial process of debris flow discharging into a river [J]. Journal of Sediment Research, 2002(3): 22 – 28. (in Chinese with English abstract)]
- [29] SCHMOCKER L, HAGER W H. Probability of drift blockage at bridge decks [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 137(4): 470 – 479.
- [30] RUIZ-VILLANUEVA V, WYŻGA B, MIKUŚ P, et al. Large wood clogging during floods in a gravel-bed river: The Długopole bridge in the Czarny Dunajec River, Poland [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2017, 42(3): 516 – 530.
- [31] RUIZ-VILLANUEVA V, BADOUX A, RICKENMANN D, et al. Impacts of a large flood along a mountain river basin: The importance of channel widening and estimating the large wood budget in the upper Emme River (Switzerland) [J]. *Earth Surface Dynamics*, 2018, 6(4): 1115 – 1137.
- [32] DE CICCO P N, PARIS E, SOLARI L, et al. Bridge pier shape influence on wood accumulation: Outcomes from flume experiments and numerical modelling [J]. *Journal of Flood Risk Management*, 2020, 13(2).
- [33] COMITI F, LUCÍA A, RICKENMANN D. Large wood recruitment and transport during large floods: A review [J]. *Geomorphology*, 2016, 269: 23 – 39.
- [34] 谢湘平, 韦方强, 谢涛, 等. 山洪中漂木在拦砂坝前堵塞堆积实验 [J]. 山地学报, 2014, 32(2): 249 – 254. [XIE Xiangping, WEI Fangqiang, XIE Tao, et al. Experiment on the clogging and deposition of woody debris flowing with torrents in front of debris dams [J]. *Mountain Research*, 2014, 32(2): 249 – 254. (in Chinese with English abstract)]
- [35] 谢湘平, 王小军, 屈新, 等. 缝隙坝对携带漂木的泥石流减灾效果实验研究 [J]. 工程地质学报, 2020, 28(6): 1300 – 1310. [XIE Xiangping, WANG Xiaojun, QU Xin, et al. Experimental study on mitigation effect of slit dam to debris flow with driftwood [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(6): 1300 – 1310. (in Chinese with English abstract)]