

云南兰坪县啦井村泥石流模拟预测及风险评价

赵 蔓, 孙 俊, 朱恺悦

Simulation prediction and risk evaluation of debris flow in gullyprone ditches of Lajing Village, Lanping County, Yunnan Province, China

ZHAO Man, SUN Jun, and ZHU Kaiyue

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202405025>

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

基于FLOW-3D的泥石流龙头运动过程模拟研究

Simulation of debris flow head movement process in mountainous area based on FLOW-3D

罗超鹏, 常鸣, 武彬彬, 刘沛源, 余波 中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(6): 53-62

汉源县工业园区硝厂沟泥石流成灾机理及其堆积范围分析

Disaster mechanism and its deposition area of the Xiaochang gully debris flow in Hanyuan County industrial park

蓝再成, 胡卸文, 曹希超, 黄光林, 白金钊, 冯霄 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(3): 61-69

四川甘洛县黑西洛沟“831”泥石流动力过程

Dynamic process of the “831” debris flow in Luoxi gully of Ganluo County, Sichuan Province

史继帅, 姜亮, 翟胜强 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(3): 52-60

基于增量加载法的泥石流拦挡坝抗冲击力数值模拟

Numerical simulation of impact resistance of debris flow dam: A case study of the debris flow dam in Sanyanyu Gully, Zhouqu County, Gansu Province

刘兴荣, 魏新平, 陈豫津, 王翔宇 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 78-83

基于信息量模型的云南东川泥石流易发性评价

Susceptibility assessment of debris flows based on information model in Dongchuan, Yunnan Province

孙滨, 祝传兵, 康晓波, 叶雷, 刘益 中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(5): 119-127



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202405025

赵蔓, 孙俊, 朱恺悦. 云南兰坪县啦井村泥石流模拟预测及风险评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(5): 110-119.

ZHAO Man, SUN Jun, ZHU Kaiyue. Simulation prediction and risk evaluation of debris flow in gullyprone ditches of Lajing Village, Lanping County, Yunnan Province, China[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(5): 110-119.

云南兰坪县啦井村泥石流模拟预测及风险评价

赵蔓¹, 孙俊¹, 朱恺悦²

(1. 贵州地矿基础工程有限公司, 贵州 贵阳 550000;

2. 上海交通大学海洋工程全国重点实验室, 上海 200240)

摘要: 兰坪县位于云南省西北部, 地质环境不良, 近年来该地区受降雨影响泥石流灾害频发, 但是该地区缺乏较为精确的灾害风险评价。为对该地区泥石流灾害进行防范预警, 文章应用 FLO-2D 软件对兰坪县啦井村 1#典型泥石流河灾害进行动力过程反演分析, 基于反演所得模拟参数对 2#沟在 20 年、50 年和 100 年三种降雨重现期工况进行预测分析和灾害风险评价。结果表明: 啦井村 2#沟道泥石流淤积深度和最大流速随降雨强度的增大呈增加趋势, 极端降雨条件下沟道底部淤积深度将超过 2.5 m, 流通区最大流速将大于 5 m/s, 泥石流携带更多的松散物于堆积区堆积, 易造成安全隐患; 啦井村 2#沟中高风险区主要分布在沟道中流速泥深较大、沟道周围民房较为集中位置以及泥石流堆积区域。研究结果可为该地区防灾减灾工程与泥石流早期预警等研究提供一定参考。

关键词: 泥石流; FLO-2D; 数值模拟; 动力分析; 风险评价

中图分类号: P642.23

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2024)05-0110-10

Simulation prediction and risk evaluation of debris flow in gullyprone ditches of Lajing Village, Lanping County, Yunnan Province, China

ZHAO Man¹, SUN Jun¹, ZHU Kaiyue²

(1. Guizhou Geological and Mineral Foundation Engineering Co. Ltd., Guiyang, Guizhou 550000, China;

2. State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Lanping County, located in the northwestern part of Yunnan Province, is characterized by unfavorable geological conditions. In recent years, debris flow disasters have frequently occurred in this area due to the influence of rainfall, yet there is a lack of accurate disaster risk evaluations. To enhance early warning preparedness for debris flow disasters in the region, the FLO-2D model was employed to perform an inverse analysis of a historical debris flow event in Lajing Village, Lanping County. Based on the parameters obtained from this analysis, predictions of the dynamic characteristics and risk assessments were conducted for another debris flow-prone gully under three rainfall recurrence period conditions: 20, 50 and 100 years. The results indicate that in Gully No. 2 of Lajing Village, the siltation depth and maximum flow velocity of debris flow increase with the intensification of rainfall. Under extreme rainfall conditions, the siltation depth at the trench bottom is expected to exceed 2.5 m, and the maximum flow velocity in the transportation zone may exceed 5 m/s, leading to the accumulation of more

收稿日期: 2024-05-20; 修订日期: 2024-08-11

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

第一作者: 赵蔓(1986—), 女, 贵州黔西人, 资源勘查工程专业, 大学本科, 工程师, 主要从事地质灾害防治、水文地质、工程地质、环境地质相关研究。E-mail: 306748206@qq.com

通讯作者: 朱恺悦(2001—), 女, 安徽淮北人, 土木工程专业, 博士研究生, 主要从事地质灾害防治、岩土工程研究。

E-mail: Judy0518@sjtu.edu.cn

loose materials in the deposition area and creating significant safety hazards. The high-risk zones in gully No. 2 are primarily located in areas with high flow velocity and mud depth, around densely populated residential areas near the gully, and within the debris flow accumulation zone. The findings of this study provide valuable references for disaster prevention and mitigation engineering, as well as for early warning systems in the region.

Keywords: debris flow; FLO-2D; numerical simulation; dynamic analysis; risk evaluation

0 引言

泥石流作为山区沟谷环境的典型灾害特征,是由降雨引起的边坡固态物质向流态化运动转变的过渡过程,常常伴随着洪水发生。据统计,1950—2016 年中国共发生 318 起致死性泥石流灾害,占全国致死性崩塌地质灾害总数的 16.6%,每年因泥石流灾害而造成的经济损失超过 30 亿元,死亡人数在百人以上^[1-2]。云南省降水诱发的地质灾害表现为点多面广、地质灾害类型复杂多样的特征^[3],其中泥石流多发生在山区,展开泥石流预测和风险评价的工作十分必要。

泥石流动力冲击效应是造成灾害影响严重的主要原因,目前学者主要采用模型试验和数值模拟手段对泥石流运移过程中的冲击动力特性进行研究^[4]。计算机技术的发展为应用数值模拟研究泥石流动力过程提供了有效工具,数值模拟逐渐成为精细化评价泥石流危险性的常用手段,相关的模拟软件有 RAMMS、Massflow、FLO-2D 等^[5-10]。Shen 等^[11]通过利用 Massflow 模型对红椿沟泥石流进行模拟,提供了模拟软件作为有效工具来量化已有拦挡措施效率的新思路。刘军友^[12]采用 FLO-2D、CFX 等三种软件,模拟分析岷县耳阳河流域泥石流活动强度,对比研究表明 FLO-2D 泥石流模拟最为准确。数值模拟可揭示泥石流灾害动力过程,为泥石流灾害定量风险评估、防灾减灾提供有效依据。

经过近 30 年的发展,泥石流风险评价研究已取得很大进展,评价方法逐步由定性、半定量向定量研究发展。层次分析法、信息熵法等先后应用于泥石流危险度研究,为防灾减灾工作提供参考并取得较好效果^[13-14],此外还有 GIS 评价法^[15]、机器深度学习法^[16]、模糊综合评判法^[17]等。胡凯衡等^[18]、崔鹏等^[19-21]等对四川、云南等地区泥石流进行考察,提出有效的泥石流风险分析方法和防治手段,部分学者基于数值模拟结果依据不同风险指标对灾害区进行危险性划分^[21-26]。本次风险评价为单沟泥石流风险评价,一般考虑为危险性与易损性叠加^[27]。

云南省兰坪县发育较多沟谷型泥石流,较为陡峻的地形地貌以及较为频繁的降雨使得泥石流灾害频发。

为进一步加强兰坪县泥石流灾害的风险评价,选取兰坪县啦井村发育的 2 条泥石流作为研究对象,FLO-2D 软件模型因具有操作简单、对泥石流流变时空变化特征及运动过程模拟较为准确等优点,本文利用 FLO-2D 软件对云南省兰坪县啦井村泥石流灾害进行动力学反演和模拟预测,基于模拟结果应用层次分析风险评价对这一典型泥石流隐患点进行危险性分区,研究结果可为该地区泥石流灾害的风险防范和治理提供借鉴。

1 研究区概况

兰坪县全称兰坪白族普米族自治县,位于云南省西北部、怒江傈僳族自治州东部,地处滇西横断山脉中段,怒山山脉与云岭山脉过渡地带,见图 1(a)。总体地势北高南低,最高点为西北端的老窝山山顶,海拔 4 435.4 m,最低点位于县境最南端澜沧江江面,海拔 1 365 m,相对高差 3 070.4 m。整个地区地形起伏较大,呈现高山与峡谷交错地貌,自北向南纵向延伸,自西向东大致平行分布。

研究区地形起伏大,高山峡谷相间排列,由北向南延伸,由西向东大致平行展布。西部由怒山山脉与云岭山脉夹持澜沧江,形成强烈构造侵蚀高山峡谷地貌,东部为云岭山脉分支腹地夹澜沧江一级支流通甸河和沱江,形成构造侵蚀高中山及槽谷地貌。

研究区域上属澜沧江水系,啦井河为澜沧江左岸一级支流。长 23.1 km,汇水面积 233.0 km²。河流纵坡降 5.65 %。据长期观测资料,雨季最大流量 74.70 m³/s,旱季最枯流量 0.48 m³/s,河宽 13 m 左右,在河谷中可见 0.2~0.8 m 高的跌水坎,河谷断面呈“V”型,谷坡坡度 25°~50°。区域地处滇西北三江褶皱系的兰坪—思茅中拗陷北部,从地层发育情况看,境内主要以新生界和中生界地层最为发育,主要为砾岩、砂岩和泥质岩类等。兰坪地区晚近纪以来构造运动强烈,其中新近系和第四系地层分布和岩性特征表现显著,中新世时期新构造运动为上升运动,上新世时期新构造运动为下降运动,第四系以来,新构造运动主要表现为间歇性上升运动。

在近 20 年来,兰坪县共发生 8 次泥石流灾害,造成

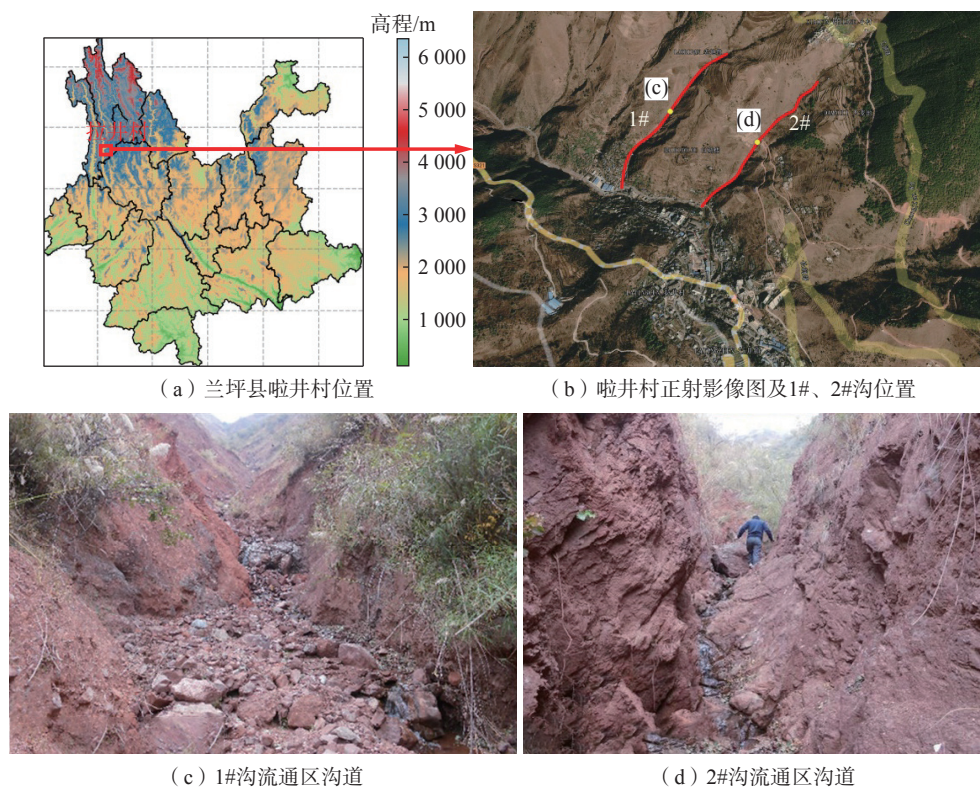


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

一定的人员伤亡和经济损失。本文关注 2011 和 2014 年发生在兰坪县啦井镇啦井村的泥石流灾害。怒江州于 2011 年 6 月 15 日开始降雨, 日降雨量达 28.7 mm/d, 至 6 月 16 日, 暴雨强度最大达 45 mm/h。2011 年 6 月 16 日上午 6 时, 怒江州兰坪县啦井镇啦井村发生泥石流灾害, 泥石流主要发生在 1#沟, 见图 1(b)。泥沙堆积于沟道内及公路上, 堆积面积约 $0.3 \times 10^4 \text{ m}^2$, 淤积厚度约 1 m, 此次灾害冲出物体积达 $0.3 \times 10^4 \text{ m}^3$, 容重达 1.60 ~ 1.70 t/m³, 为黏性泥石流。此次泥石流共造成 14 户农户受灾, 预计直接经济损失 15 万元。2014 年 8 月 4 日兰坪县再次出现暴雨, 8 月 5 日早上 5 时许, 兰坪县啦井镇 1#沟发生泥石流灾害, 日降雨量达 15 mm/d, 大量洪水夹杂沙石块冲向沟口, 见图 1(c)。本次泥石流灾害持续 1 h 左右, 泥沙及淤泥堆积于沟道内及公路上, 堆积面积约 $0.5 \times 10^4 \text{ m}^2$, 淤积厚度约 1 m, 冲出物达 $0.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。该次泥石流造成 311 省道临时中断, 260 m 村内道路和 6 栋房屋受损, 经济损失 60 多万元。

目前, 2#沟尚未发生泥石流灾害, 但于强降雨条件下发生过洪水及高含沙水流。根据现场调查结果显示, 目前该沟道内存在丰富物源条件, 见图 1(d), 一旦受到暴雨诱发, 沟道内堆积区物源可能参与泥石流活动, 威胁沟口 136 户约 600 名居民的生命财产安全, 并可能造

成 630 m 公路拥堵, 潜在损失巨大。

2 灾害动力过程分析

2.1 计算原理及模型建立

FLO-2D 是一款模拟洪涝灾害的数值模型, 是 O'Brien 于 1988 年开发的基于非牛顿流体模型及中央有限差分数值方法的泥石流模拟软件, 能较完整的分析泥石流的运动状态特征。可用来模拟洪水灾害, 适用于都市淹水、工程风险设计、桥梁涵洞水利演算等情况。该软件所模拟模型采用全动态波动动量方程和 8 种可能流向的中心在限差分路径选择方案, 在正方形网格单元系统中预测洪水波过程。

通过动量方程和连续性方程, 可以计算出每个网格单元中沿 x 、 y 方向的流体速度和堆积深度, 从而获取流体运动范围。模型如下:

(1) 运动方程:

$$i = \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(\lambda h)}{\partial x} + \frac{\partial(\theta h)}{\partial y} \quad (1)$$

式中: i ——降雨强度/(m·h⁻¹);

h ——流体流深/m;

t ——泥石流流域降雨历时/h;

λ 、 θ —— x 、 y 轴方向上的平均流速/(m·s⁻¹)。

(2)连续方程:

$$s_{ox} - s_{fx} = \lambda \frac{\partial \lambda}{\partial x} + \theta \frac{\partial \theta}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial \lambda}{\partial t} \tag{2}$$

$$s_{oy} - s_{fy} = \lambda \frac{\partial \lambda}{\partial y} + \theta \frac{\partial \theta}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial \theta}{\partial t} \tag{3}$$

式中: S_{ox} 、 S_{oy} —— x 、 y 方向的泥石流沟床坡降/‰;
 S_{fx} 、 S_{fy} ——泥石流沟 x 、 y 方向的摩擦坡降/‰;
 g ——重力加速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)。

2.2 模拟参数确定

对于云南省兰坪县泥石流 1#、2#沟道进行现场调查,获取沟道实际流域面积、沟长、平均坡降等实际调查数据,得到结果如表 1 所示。

表 1 沟道现场调查数据			
Table 1 The site investigation data of each ditch			
参数	流域面积/ km^2 (1#/2#)	沟长/ km (1#/2#)	平均坡降/‰ (1#/2#)
取值	0.96/0.99	2.11/2.08	301/432

数字地面模型是地表的数字表达,是泥石流数值模拟基础文件,其范围和精度直接影响着模拟的精度,啦井村 1#、2#泥石流模拟使用工作区高精度地形底图,将其导入在 ArcGIS 软件中矢量化为最优不规则三角网模型,再运用转换工具转换为数字高程模型,进一步转换为数值分析所需求的 ASCII 地形文件^[28-30]。

曼宁系数代表坡面或沟道的粗糙程度。其大小与地面的粗糙度、沟道的起伏度和植物生长情况等相关,其计算公式:

$$n_c = 0.033R_{ns}^{-0.51}e^{(0.34R_{ns}^{0.17})\ln h} \tag{4}$$

式中: n_c ——曼宁系数;
 R_{ns} ——泥石流的体积浓度/%;
 h ——泥石流泥深/m, 均根据泥石流堆积扇的厚度确定。

黏滞系数(n)与屈服应力(τ_y)这 2 个参数的变化主要与泥沙浓度的变化有关,屈服应力和黏度作为含沙量的函数,其经验关系式如下:

$$n = \alpha_1 e^{\beta_1 c_v} \tag{5}$$

$$\tau_y = \alpha_2 e^{\beta_2 c_v} \tag{6}$$

式中: α_1 、 α_2 、 β_1 、 β_2 ——流变系数;
 c_v ——泥沙体积浓度/%。

根据野外调查及经验取值,式中式用参数如表 2 所示。

泥石流在较高体积浓度和屈服应力的作用下会出

表 2 流变系数				
Table 2 Rheological coefficient				
参数	α_1	β_1	α_2	β_2
取值	0.811	13.72	0.004 62	11.24

现分层流动的现象,而层流间的摩擦系数用 K 表示,取值范围如表 3 所示,其中研究区地面为稀疏植被,故本次模拟中选择 K 为 2 280。

表 3 FLO-2D 手册建议的层流阻力系数值	
Table 3 Recommended laminar flow resistance coefficient values from the FLO-2D manual	
地面条件	K 值范围
级配土	90 ~ 400
被侵蚀黏土	100 ~ 500
稀疏植被	1 000 ~ 4 000
矮草原	3 000 ~ 10 000

根据《泥石流灾害防治工程勘查规范》(DZ/T 0220—2006)^[31]及现场调查推测,泥石流的重度为 1.60 ~ 1.80 t/m^3 ,本模拟选取泥石流重度参数为 1.65 t/m^3 。

模拟计算所需的参数通过现场调查以及查阅 FLO-2D 手册确定,通过泥石流灾害动力模拟对参数进行调整和修正,最终参数取值见表 4。

表 4 FLO-2D 数值模型主要物理力学参数					
Table 4 Main physical and mechanical parameters of the FLO-2D numerical model					
参数	曼宁系数	摩擦系数	泥石流重度 /($\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏滞系数 (1#/2#)	屈服应力 kPa (1#/2#)
取值	0.07	2 280	1.65	3 644.13/ 1 860.49	4.53/2.62

2.3 数值模拟结果及分析

2014 年啦井村 1#沟泥石流实际情况冲出沟口 120 m 左右,堆积区平面上呈“喇叭状”,上窄下宽,上部宽 15 ~ 20 m,下部宽 150 ~ 170 m,最大流速达到 6.11 m/s。应用 2014 年 8 月 4 日啦井村降雨工况对啦井村 1#沟泥石流进行动力学过程模拟如图 2 所示,结果显示啦井村 1#泥石流在沟口形成了大量松散堆积物堆积,最大的淤积深度为 4.84 m,在上游沟道窄陡处流速达到 8.14 m/s。泥石流威胁区范围内平均淤积深度为 1.91 m,平均流速为 1.67 m/s,泥石流冲出沟口约 100 m,少量泥沙淤积至河道,可能会造成堵江风险,模拟结果与证明了模拟参数的适配性和数值模拟的可行性。故利用模拟反演所获得参数对啦井村 2#泥石流沟进行不同降雨重现周期泥石流动力学模拟,并基于模拟结果对该沟道泥石流灾害进行风险性评价^[32]。

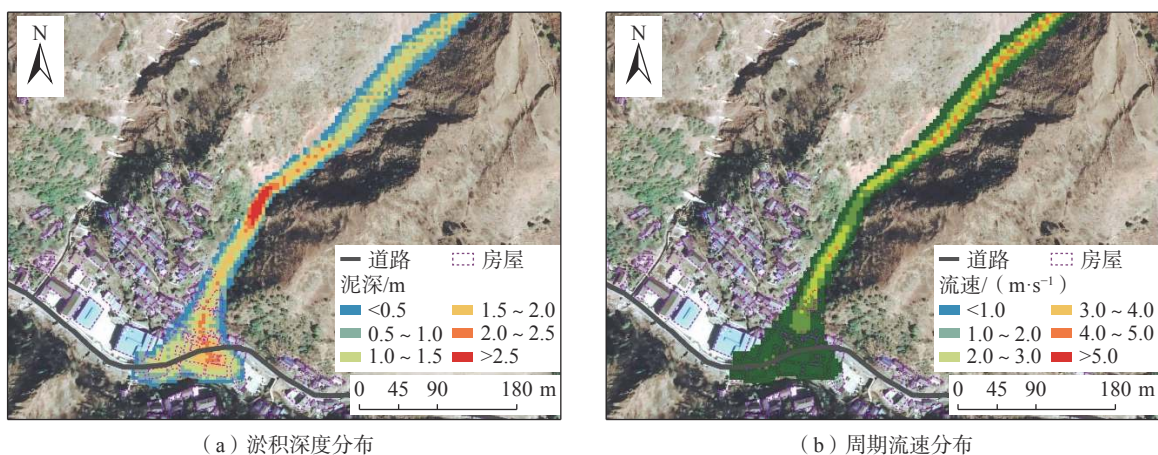


图 2 啦井村 1#沟泥石流模拟结果

Fig. 2 Simulation results of debris flow in gully No. 1, Lajing Village

啦井村 2#沟泥石流模拟结果如图 3—4 所示。结果显示, 在 20 年降雨重现期工况下, 啦井村 2#泥石流沟松散堆积物主要堆积于沟内, 少量泥沙冲出沟口, 沟内最大淤积深度为 2.61 m, 最大流速 4.21 m/s。泥石流影响区范围内平均淤积深度为 0.87 m, 平均流速为 0.74 m/s, 将对沟口的道路以及少量房屋造成淤埋。在 50 年降雨重现期工况下, 啦井村 2#泥石流沟松散堆积

物主要堆积于沟口, 最大淤积深度为 3.24 m, 在上游沟道窄陡处流速高达 6.14 m/s。泥石流影响区范围内平均淤积深度为 1.42 m, 平均流速为 1.01 m/s。根据模拟结果可知, 泥石流在 50 年一遇暴雨条件下冲出沟口约 60 m, 少量泥沙淤积至河道, 可能会造成堵江风险。在 100 年降雨重现期工况下, 松散堆积物在沟道内开始淤积, 沟口最大淤积深度为 5.24 m, 平均淤积深度为

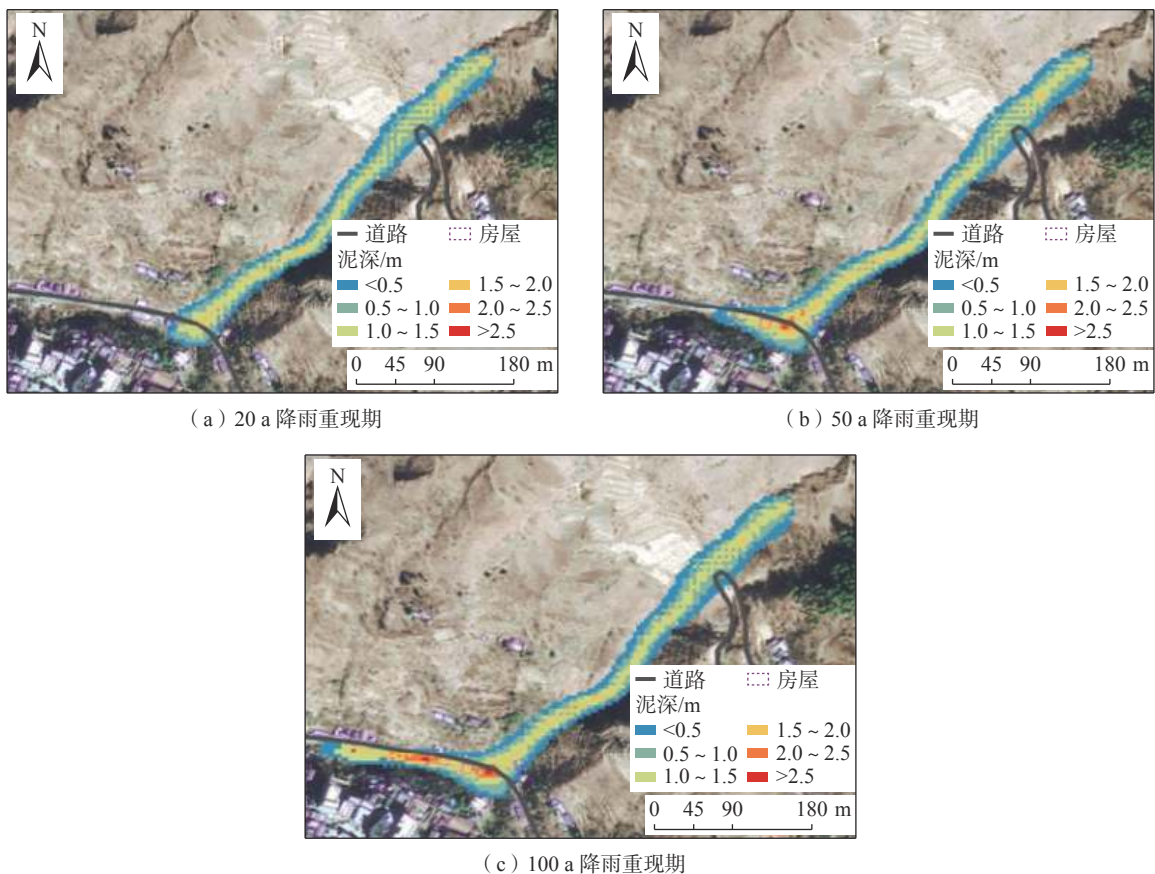


图 3 不同降雨工况下啦井村 2#沟泥石流淤积深度分布

Fig. 3 Debris flow deposition depth distribution in gully No. 2, Lajin Village, under different rainfall conditions

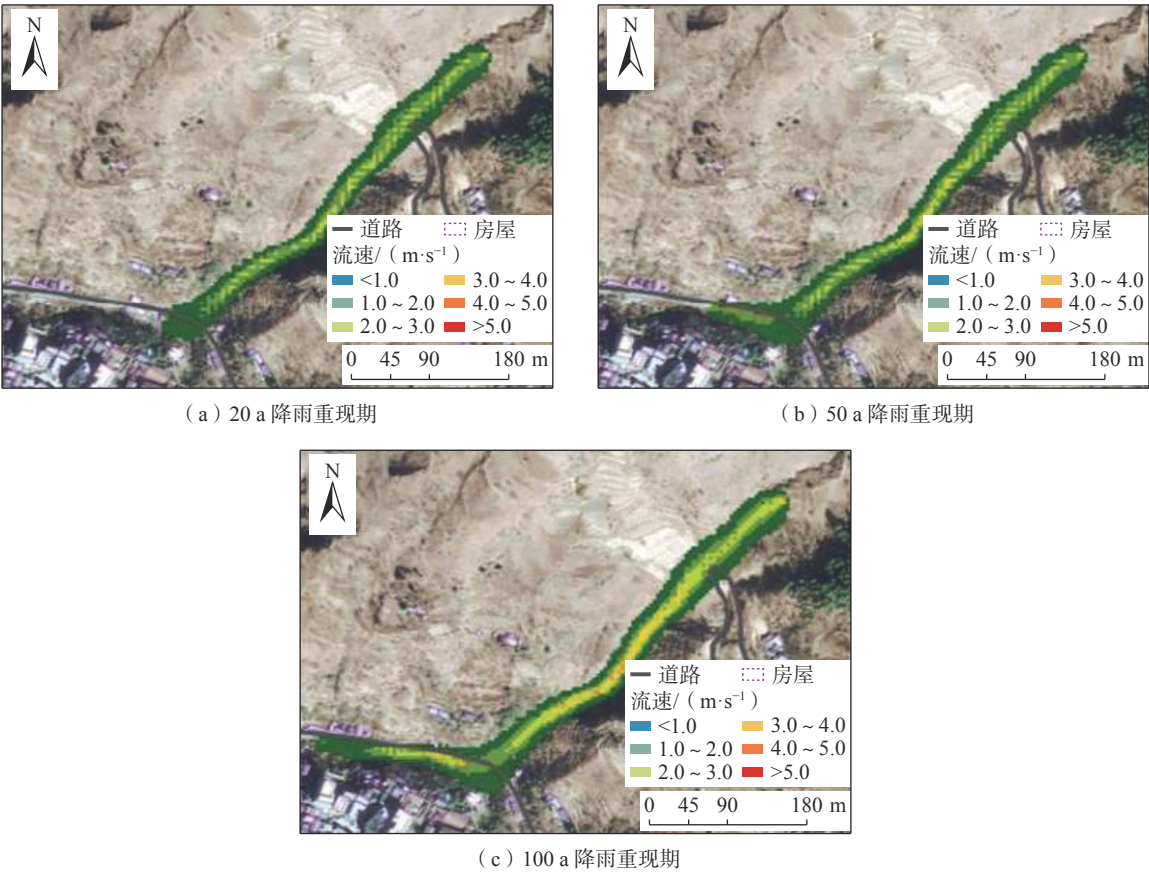


图 4 不同降雨工况下啦井村 2#沟泥石流流速分布

Fig. 4 Flow velocity distribution of debris flow in gully No. 2, Lajing Village, under different rainfall conditions

1.41 m, 泥石流堆积范围较大, 冲出沟口约 200 m, 对沟口大量房屋造成淤埋, 且在沟口形成大面积淤积, 泥沙冲出体积约 $0.8\times10^4\text{ m}^3$ 。泥沙淤积至河道, 河道中泥沙的最大淤积深度为 4.33 m, 易造成河道堵塞。

沟道纵坡陡峭地段的泥石流模拟结果显示: 泥石流流量越大, 会导致携带更多松散物于堆积区漫流堆积, 最终导致堆积范围和强度增大; 因泥石流淤积深度和最大流速自堆积区中心向两侧逐渐减低, 泥石流强度由内向外呈现降低趋势^[33]。

3 灾害风险评价

3.1 危险性评价及易损性评价

泥石流危险性指的是人类及其周围环境受到泥石流损害的可能性大小。泥石流危险性评价是制定泥石流灾害防治决策的前提。本文根据 20 年一遇、50 年一遇和 100 年一遇降雨重现期工况模拟结果, 将模拟的泥深、流速作为评价的基本依据, 然后根据学者常鸣等^[26]提出的强度划分标准(表 5), 得出不同降雨频率条件下的泥石流强度分布, 然后结合泥石流强度与重现周期,

进行危险性评价等级分区^[34]。

表 5 泥石流强度影响划分表 ^[26]			
Table 5 Classification table of debris flow intensity impacts			
泥石流强度	泥深/m	关系	泥深与最大流速乘积/($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)
高	$H\geq2.5$	OR	$VH\geq2.5$
中	$0.5\leq H<2.5$	AND	$0.5\leq VH<2.5$
低	$0<H<0.5$	AND	$VH<0.5$

易损性是指受灾体遭受地质灾害破坏的机会多少以及发生损毁的难易程度, 反映了社会经济系统对地质灾害的响应能力, 包括受灾体对灾害活动的敏感程度和承受能力。由于威胁区承灾体的复杂性, 根据《地质灾害风险调查评价技术要求》, 评价地质灾害承灾体易损性, 根据现场对工作区范围内承灾体详细调查结果, 将易损性评价指标分为 4 大类进行选取: 社会易损性、物质易损性、经济易损性、环境易损性。社会易损性的人口密度评价指标数据、人口年龄结构与人口受教育程度指标可通过实地调查获得; 物质易损性评价指标数据的获取主要根据卫星影像精细遥感解译及现场实地调查; 经济易损性值可由区域内承灾体年均收入得到; 环

境易损性指标主要根据室内遥感解译得到,并在野外调查时复核修正(表 6)。

表 6 易损性计算公式
Table 6 Vulnerability calculation formula

易损性指标	社会易损性	建筑易损性	交通易损性	经济易损性
表达式	$F = \sum_{i=1}^n F_{i,j}$ F 为社会易损性; $F_{i,j}$ 为主级指标权重标准化的值乘以次级指标权重标准化的值	$M = \sum_{i=1}^n A_{i,j}$ M 为物质易损性值(建筑/交通); $A_{i,j}$ 为承灾体主级指标权重标准化的值乘以次级指标权重标准化的值		$J = G/N$ J 为经济易损性,无量纲, G 为区域内每个承灾体家庭年收入(万元); N 为区域人均年收入(万元)

权重按照层次分析法计算原理计算得到: 社会易损性(0.462 6)、建筑易损性(0.237 8)、交通易损性(0.197 3)、经济易损性(0.102 3), 得到综合易损性指数。

3.2 风险评价结果及分析

近年来, 泥石流形成机理与形成条件研究取得了突破性进展, 已建立了典型地区的泥石流信息系统, 从而把泥石流预测建立在泥石流形成机理与发生条件的基础上。泥石流灾害风险可用风险度来衡量, 联合国将灾害的风险度定义为危险度与易损度的乘积:

$$R = H \cdot V \tag{7}$$

式中: R ——泥石流风险度;
 H ——泥石流危险度;
 V ——泥石流影响下受灾体的易损度。

根据泥石流强度影响及危险性分区标准, 在 ArcGIS 中使用栅格计算工具, 通过重分类工具将低危险、中危险、高危险的属性分别赋值, 得到啦井村泥石流危险性评价图, 见图 5(a)。将不同类型承灾体易损性按照权重值叠加各易损性图层, 按照自然断点原则将其划分为

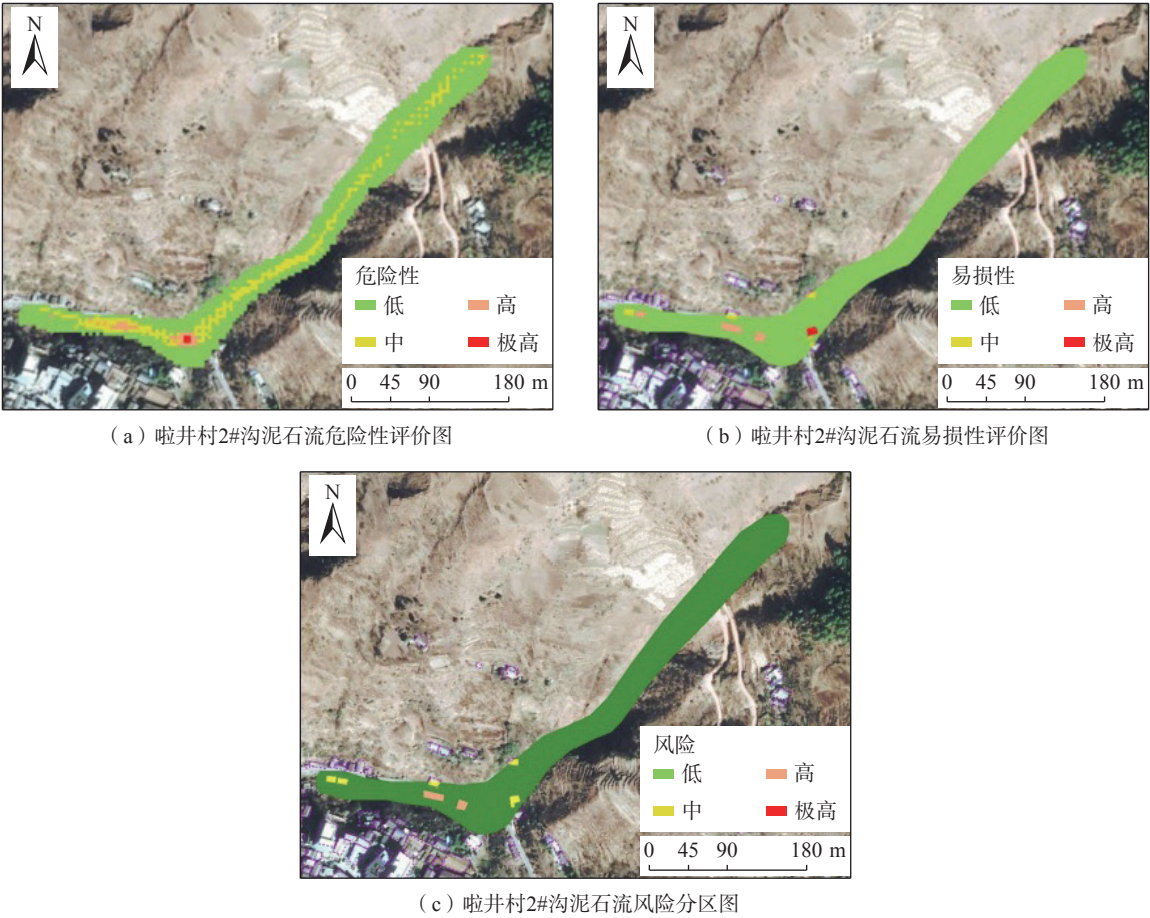


图 5 风险评价结果

Fig. 5 Risk evaluation results

极高、高、中、低易损性,最后得到啦井村 2#泥石流沟易损性分布图,见图 5(b)。

20 年重现周期下急坡街 2#仅有少量泥沙冲出,对下游居民房屋的危害较小,主要以低中风险为主;50 年重现周期下急坡街 2#泥石流流沟道内为低中风险区,民房集中区、重要道路位置为中风险,高风险区域为堆积区;100 年重现周期下急坡街 2#泥石流流沟道内为低中风险区,高风险主要分布于堆积区。

将地质灾害的危险性和易损评价结果叠加,根据现场调查可知,泥石流上游沟道两侧斜坡坡体崩滑物源发育较多,新增物源较为丰富,利用 GIS 的功能将泥石流危险性分区与承灾体易损性分区叠加计算,得到泥石流风险分区图,见图 5(c)。

由评价结果可知,由于泥石流物质在沟道上游沿原始沟道运动,主要对沟道两侧的岸坡造成影响,在沟道局部拐弯处会对岸坡产生强烈冲刷。此外,沟口处由于民房聚集,对居民生命安全将造成巨大威胁。啦井村泥石流堆积范围较宽,对周围房屋建筑、公路直接造成威胁,泥石流对下游居民房屋的危害较小,主要以低中风险为主,易损性较低;在沟道中流速、泥深较大位置存在少量高风险,易损性较高。

4 结论

(1)模拟结果表明在啦井村 2#沟道泥石流淤积深度和最大流速随降雨强度的增大呈不断增加的趋势,堆积物深度和范围逐步增大,灾害区域和程度逐步增大。

(2)通过开展啦井村泥石流灾害风险预测发现,随着流量增大,泥石流携带更多的松散物于堆积区漫流堆积,最终导致堆积范围和强度增大;因泥石流泥深和流速由堆积区中心向两侧逐渐减低,泥石流强度由内向外呈降低的趋势。

(3)将模拟的泥深、流速作为评价的基本依据,根据不同频率的降雨强度,将泥石流强度与重现周期相结合,进行风险评价。研究表明,啦井村 2#沟较高风险区主要分布于沟道中流速大、淤积深度大的区域,而下游居民区受灾风险相对较低。评价区内人口密集,潜在人口风险较大,研究成果可有效服务泥石流影响区的国土空间规划和防灾减灾工作。

参考文献(References):

- [1] LIN Qigen, WANG Ying. Spatial and temporal analysis of a fatal landslide inventory in China from 1950 to 2016 [J].

Landslides, 2018, 15(12): 2357–2372.

- [2] ZHANG Shuai, LI Can, PENG Jingyu, et al. Fatal landslides in China from 1940 to 2020: Occurrences and vulnerabilities [J]. *Landslides*, 2023, 20(6): 1243–1264.
- [3] HE Songtang, WANG Daojie, ZHAO Peng, et al. A review and prospects of debris flow waste-shoal land use in typical debris flow areas, China [J]. *Land Use Policy*, 2020, 99: 105064.
- [4] 何晓英,唐红梅,陈洪凯.浆体黏度和级配颗粒组合条件下泥石流冲击特性模型试验[J].岩土工程学报,2014,36(5): 977–982. [HE Xiaoying, TANG Hongmei, CHEN Hongkai. Experimental study on impacting characteristic of debris flow considering different slurry viscosities, solid phase ratios and grain diameters [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(5): 977–982. (in Chinese with English abstract)]
- [5] KEVIN H, HYUNCHUL J, LAWRENCE L, et al. Geohazard study of mudslide event at a subsea escarpment and structural response of crossing flowlines: Part I – FEA Analysis[C].Proceedings of the ASME 2022 41st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Volume 9: Offshore Geotechnics. Hamburg, Germany. 2022.
- [6] WANG Weiping, YANG Jiansi, WANG Yanbin. Dynamic processes of 2018 Sedongpu landslide in Namcha Barwa–Gyala Peri massif revealed by broadband seismic records [J]. *Landslides*, 2020, 17(2): 409–418.
- [7] O'BRIEN J S, JULIEN P Y, FULLERTON W T. Two-dimensional water flood and mudflow simulation [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1993, 119(2): 244–261.
- [8] CHRISTEN M, KOWALSKI J, BARTELT P. RAMMS: numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2010, 63(1): 1–14.
- [9] 段学良,马凤山,郭捷,等.基于 Massflow 模型的西藏仁布杰仲沟泥石流运动特征分析[J].中国地质灾害与防治学报,2019,30(6): 25–33. [DUAN Xueliang, MA Fengshan, GUO Jie, et al. Movement characteristics of Jiezhonggou debris flow of Renbu, Tibet based on Massflow model [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(6): 25–33. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 史继帅,姜亮,翟胜强.四川甘洛县黑西洛沟“8·31”泥石流动力过程分析[J].中国地质灾害与防治学报,2024,35(3): 1–9. [SHI Jishuai, JIANG Liang, ZHAI Shengqiang. Analysis on dynamic process of the “8·31” debris flow in Luoxi gully of Ganluo County, Sichuan Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2024, 35(3): 1–9. (in Chinese with English abstract)]
- [11] SHEN Wei, WANG Dongpo, HE Siming, et al. Numerical

- assessment of the impeding effect of check dams in the Hongchun debris flow gully, Sichuan Province, China [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, 79(6): 2833–2845.
- [12] 刘军友. 基于不同方法的泥石流活动强度对比研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021. [LIU Junyou. Comparative study on debris flow activity intensity based on different methods [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2021. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 王一鸣, 殷坤龙. 台风暴雨型泥石流单沟危险度研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(3): 124–130. [WANG Yiming, YIN Kunlong. A study of the typhoon-triggered debris flow hazard degree of a single gully [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(3): 124–130. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 孙滨, 祝传兵, 康晓波, 等. 基于信息量模型的云南东川泥石流易发性评价 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(5): 119–127. [SUN Bin, ZHU Chuanbing, KANG Xiaobo, et al. Susceptibility assessment of debris flows based on information model in Dongchuan, Yunnan Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(5): 119–127. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 杨志昊, 郭永刚. 基于 GIS 的藏东南泥石流灾害风险预警系统研发 [J]. *农业与技术*, 2024, 44(6): 91–96. [YANG Zhihao, GUO Yonggang. Research and development of risk early warning system for debris flow disaster in southeast Tibet based on GIS [J]. *Agriculture and Technology*, 2024, 44(6): 91–96. (in Chinese)]
- [16] 高瑞源. 基于机器学习方法的区域泥石流易发性评价研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2023. [GAO Ruiyuan. Evaluation of regional debris flow susceptibility based on machine learning method [D]. Changchun: Jilin University, 2023. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 蒋庆丰. 山坡泥石流的风险性分析与评价研究 [D]. 重庆: 西南师范大学, 2002. [JIANG Qingfeng. Risk analysis and evaluation of debris flow on hillside [D]. Chongqing: Southwest University, 2002. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 胡凯衡, 张晓鹏, 罗鸿, 等. 丹巴县梅龙沟“6·17”泥石流灾害链调查 [J]. *山地学报*, 2020, 38(6): 945–951. [HU Kaiheng, ZHANG Xiaopeng, LUO Hong, et al. Investigation of the “6·17” debris flow chain at the Meilong catchment of Danba County, China [J]. *Mountain Research*, 2020, 38(6): 945–951. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 崔鹏, 庄建琦, 陈兴长, 等. 汶川地震区震后泥石流活动特征与防治对策 [J]. *自然杂志*, 2010, 32(1): 19–25. [CUI Peng, ZHUANG Jianqi, CHEN Xingchang, et al. Activity characteristics and prevention countermeasures of debris flow after “5·12” Wenchuan devastating earthquake [J]. *Nature Magazine*, 2010, 32(1): 19–25. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 崔鹏, 陈晓清, 程尊兰, 等. 西藏泥石流滑坡监测与防治 [J]. *自然杂志*, 2010, 32(1): 19–25. [CUI Peng, CHEN Xiaoqing, CHENG Zunlan, et al. Monitoring and prevention of debris-flows and landslides in Tibet [J]. *Chinese Journal of Nature*, 2010, 32(1): 19–25. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 崔鹏, 杨坤, 陈杰. 前期降雨对泥石流形成的贡献——以蒋家沟泥石流形成为例 [J]. *中国水土保持科学*, 2003, 1(1): 11–15. [CUI Peng, YANG Kun, CHEN Jie. Relationship between occurrence of debris flow and antecedent precipitation: Taking the Jiangjia gully as an example [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2003, 1(1): 11–15. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 张浩韦, 刘福臻, 王军朝, 等. 基于 FLO-2D 数值模拟的工布江达县城泥石流灾害危险性评价 [J]. *地质力学学报*, 2022, 28(2): 306–318. [ZHANG Haowei, LIU Fuzhen, WANG Junchao, et al. Hazard assessment of debris flows in Kongpo Gyamda, Tibet based on FLO-2D numerical simulation [J]. *Journal of Geomechanics*, 2022, 28(2): 306–318. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 刘德玉, 蒋兴波, 李保强. 基于 FLO-2D 的矿山泥石流运动特征及危险性评价——以甘肃省岷县簸箕沟矿山泥石流为例 [J]. *地质与资源*, 2022, 31(5): 693–699. [LIU Deyu, JIANG Xingbo, LI Baoqiang. Movement characteristics and risk assessment of mine debris flow based on FLO-2D simulation: A case study of the debris flow in Bojigou mine of Minxian County, Gansu Province [J]. *Geology and Resources*, 2022, 31(5): 693–699. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 王高峰, 陈宗良, 毛佳睿, 等. 不同工程情景和降雨频率工况下白龙江流域泥石流危险性评价 [J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 39(5): 30–40. [WANG Gaofeng, CHEN Zongliang, MAO Jiarui, et al. Debris flow risk assessment in Bailong River Basin under different engineering scenarios and rainfall frequency conditions [J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 39(5): 30–40. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 曹鹏, 侯圣山, 陈亮, 等. 基于数值模拟的群发性泥石流危险性评价——以甘肃岷县麻路河流域为例 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(2): 100–109. [CAO Peng, HOU Shengshan, CHEN Liang, et al. Risk assessment of mass debris flow based on numerical simulation: An example from the Malu River Basin in Min County [J]. *The Chinese*

- Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(2): 100 – 109. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 常鸣, 窦向阳, 唐川, 等. 降雨驱动泥石流危险性评价 [J]. 地球科学, 2019, 44(8): 2794 – 2802. [CHANG Ming, DOU Xiangyang, TANG Chuan, et al. Hazard assessment of typical debris flow induced by rainfall intensity [J]. Earth Science, 2019, 44(8): 2794 – 2802. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 王晓娅, 陈晓文, 焦娜, 等. 不同尺度的忻州市东北部泥石流风险评价及风险管控研究 [J]. 地质找矿论丛, 2023, 38(4): 541 – 546. [WANG Xiaoya, CHEN Xiaowen, JIAO Shan, et al. Research on different scale risk assessment and management and control of mudflows in the northeast area of Xinzhou City [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2023, 38(4): 541 – 546. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 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)]
- [29] 渠敬凯, 杨为民, 申俊峰, 等. 基于DEM数据预处理的小流域泥石流防治工程效果分析——以漳县方家沟泥石流为例 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(4): 206 – 219. [QU Jingkai, YANG Weimin, SHEN Junfeng, et al. Analysis of debris flow engineering treatment effect based on DEM data preprocessing in small watershed: A case study of Fangjiagou debris flow, Zhangxian County [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(4): 206 – 219. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 刘鑫, 张文, 李根, 等. 高位远程崩滑碎屑流-泥石流灾害链的演变过程与影响范围预测——以“4·5”四川洪雅县铁匠湾地质灾害链为例 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(6): 1799 – 1811. [LIU Xin, ZHANG Wen, LI Gen, et al. Research on evolution process and impact range prediction of high level remote collapse and landslide-debris flow disaster chain: Taking the “4·5” tiejiangwan geological disaster chain in Hongya County, Sichuan Province as an example [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(6): 1799 – 1811. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 泥石流灾害防治工程勘察规范: DZ/T 0220-2006 [S]. 2006. [Specification of geological investigation for debris flow stabilization: DZ/T 0220-2006 [S]. 2006. (in Chinese)]
- [32] 康晓波, 杨迎冬, 王宇, 等. 云南省地质灾害综合防治体系建设系列专项研究进展 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(6): 146 – 157. [KANG Xiaobo, YANG Yingdong, WANG Yu, et al. Progress of the special-subjects study on the construction of comprehensive geological disaster prevention and control system in Yunnan Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(6): 146 – 157. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 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)]
- [34] 万飞鹏, 杨为民, 邱占林, 等. 甘肃岷县纳古呢沟滑坡-泥石流灾害链成灾机制及其演化 [J]. 中国地质, 2023, 50(3): 911 – 925. [WAN Feipeng, YANG Weimin, QIU Zhanlin, et al. Disaster mechanism and evolution of Nagune Gully landslide-debris flow disaster chain in Minxian County, Gansu Province [J]. Geology in China, 2023, 50(3): 911 – 925. (in Chinese with English abstract)]