

泥石流拦砂坝对村镇建筑的减灾效果评价

——以四川省平武县黑水沟为例

杨飞^{1,2}, 陈剑刚¹, 王辰元^{1,2}, 王金水^{1,2}, 王涛¹, 宗家明^{1,2}

(1.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; 2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: [目的] 研究不同降雨频率下泥石流拦砂坝对下游村镇建筑的减灾效果, 为山区村镇的防灾减灾提供参考。[方法] 对“7·12”四川省平武县黑水沟泥石流灾害进行现场调查。基于砌体墙体在泥石流作用下的极限承载力, 通过静力平衡方法提出了砖砌体结构墙体发生弯曲破坏、剪切破坏的泥石流临界流速公式, 采用 FLO-2 D 模拟了黑水沟在有无拦砂坝条件下, 不同降雨频率的泥石流运动过程和堆积范围。[结果] ①泥石流的冲出规模、堆积深度和流速与降雨频率密切相关, 与野外调查数据相比, 模拟精度达 85%。②墙体在泥石流浆体整体冲压下发生弯曲破坏, 在大石块冲击下发生剪切破坏。③无拦砂坝措施下降雨频率 $p=1\%$ 时, 泥石流堆积面积为 $9.36 \times 10^4 \text{ m}^2$, 建筑区最大流速为 7.19 m/s, 建筑区最大泥深为 5.25 m; 降雨频率 $p=2\%$ 时, 泥石流堆积面积为 $5.63 \times 10^4 \text{ m}^2$, 建筑区最大流速为 5.63 m/s, 建筑区最大泥深为 4.46 m。④修建拦砂坝后, 降雨频率 $p=2\%$ 时泥石流不会冲出沟口, 堆积面积减了 82.6%, 降雨频率 $p=1\%$ 时泥石流堆积面积和建筑区最大流速分别减小了 38.4% 和 60.6%。[结论] 防治工程可有效减少灾害规模, 避免建筑遭受冲击破坏, 但是仍需在汛期加强监测预警。

关键词: 泥石流; 村镇建筑; 拦砂坝; 减灾效果; 砌体墙体破坏

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)04-0143-10

中图分类号: TV87, P642.23

文献参数: 杨飞, 陈剑刚, 王辰元, 等. 泥石流拦砂坝对村镇建筑的减灾效果评价[J]. 水土保持通报, 2025, 45(4): 143-152. Yang Fei, Chen Jiangang, Wang Chenyuan, et al. Disaster reduction effects evaluation of debris-flow check dam on village buildings [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(4): 143-152. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.04.030; CSTR:32312.14.stbctb.2025.04.030.

Disaster reduction effects evaluation of debris-flow check dam on village buildings

—A case study at Heishui gully of Pingwu County, Sichan Province

Yang Fei^{1,2}, Chen Jiangang¹, Wang Chenyuan^{1,2}, Wang Jinshui^{1,2}, Wang Tao¹, Zong Jiaming^{1,2}

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences,

Chengdu, Sichuan 610299, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: [Objective] The disaster reduction effects of the debris-flow check dam on downstream structures under varying rainfall frequencies were investigated to offer guidance for disaster prevention and mitigation in villages and towns. [Methods] First, a field investigation of the ‘7·12’ Heishui gully debris-flow event in Pingwu County, Sichuan Province, China, was conducted. Second, based on the ultimate bearing capacity of masonry walls under debris flow impact, critical velocity formulas for bending failure and shear failure of brick masonry walls were proposed using static equilibrium methods. Finally, the debris-flow movement process and deposition extent in Heishui gully, both with and without the check dam and under varying rainfall frequencies, were simulated using FLO-2 D. [Results] ① The scale of debris-flow discharge, sediment deposition depth and flow velocity were intricately linked to the frequency of rainfall, with a simulation accuracy of 85% in comparison to the field investigation data. ② The wall suffered bending damage due to the overall pressure of debris-flow

收稿日期: 2025-04-01

修回日期: 2025-05-07

采用日期: 2025-05-09

资助项目: 国家重点研发计划项目“岩土与生物措施协同的泥石流治理关键技术”(2024YFC3012700); 林芝国家可持续发展试验区专项“川藏铁路沿线高势能泥石流成灾机理与防控关键技术”(2023-SYQ-007)

第一作者: 杨飞(1998—), 男(汉族), 甘肃省陇南市人, 硕士研究生, 研究方向为村镇泥石流防灾减灾。Email: yangfei@imde.ac.cn.

通信作者: 陈剑刚(1982—), 男(汉族), 河北省邢台市人, 博士, 研究员, 博士研究生导师, 主要从事泥石流灾害防治研究。Email: chenjg@imde.ac.cn.

slurry and shear damage from the impact of large boulders. ③ In the absence of a check dam and at a rainfall frequency of 1%, the debris-flow deposition area was $9.36 \times 10^4 \text{ m}^2$, the maximum flow velocity in the construction zone reached 7.19 m/s, and the maximum debris-flow depth in the construction zone was 5.25 m. At a rainfall frequency of 2%, the debris-flow deposition area was $5.63 \times 10^4 \text{ m}^2$, the maximum flow velocity in the construction zone reached 5.63 m/s, and the maximum mud depth in the construction zone was 4.46 m. ④ After the check dam was constructed, the debris flow did not reach the outlet under the 2% rainfall frequency, resulting in an 82.6% reduction in the deposition area. Under the 1% rainfall frequency, the debris-flow deposition area and maximum flow velocity in the construction zone were diminished by 38.4% and 60.6%, respectively. [Conclusion] Prevention and control measures can significantly reduce the magnitude of disasters and prevent buildings from being damaged. However, monitoring and early warning systems require enhancement throughout the rainy season.

Keywords: debris flow; village buildings; check dam; disaster reduction effect; brick masonry wall failure

泥石流具有突发性强,来势凶猛,速度快,历时短等特性^[1-3],严重威胁着山区居民建筑、交通线路等设施^[4-5]。近年来,由于极端强降雨事件的增多,中国西南山区泥石流灾害高发、频发,往往导致严重的人员伤亡和财产损失。例如,2020年6月26日四川省冕宁县大马乌沟泥石流,造成22人死亡失踪,房屋倒塌670余间;2022年7月12日四川省木座藏族乡黑水沟暴发泥石流,造成18人死亡失踪,38间房屋受损。为了保护居民安全并减少灾害损失,通常在沟道流通区修建拦砂坝^[6],来拦截泥石流中的固体物质,从而减小泥石流灾害规模^[7]。然而,在极端短历时强降雨激发下,尽管在流域内修建了拦砂坝和排导槽等防治措施,但仍然存在大规模泥石流冲击、淤埋损毁村镇建筑的案例^[8-9]。因此,亟需评估极端降雨情景下泥石流防治工程的减灾效果,明确下游居民区的潜在影响范围,特别是其能否有效保护堆积区的建筑安全。

模型试验和数值模拟是研究拦砂坝减灾效果的主要方法。王喜安^[10]、Li Shuai等^[11]、Zhou G G D等^[12]通过模型试验研究了拦砂坝结构对泥石流能量和物质的调控作用。小尺度的物理模型试验能够较好地反映拦砂坝对泥石流运动特征的减灾效果,但是存在边界条件过于简化和缩尺效应等局限性,试验的结果难以直接应用到实际。随着计算机技术的发展,数值模拟软件被用来研究泥石流灾害,可有效地避免模型试验的缩尺效应和再现泥石流的运动特征和堆积范围^[13]。其中,FLO-2 D软件已广泛用于单沟泥石流危险性分析和防治效果评价。刘军友^[14]使用FLO-2 D、CFX和RAMMS3种软件模拟了甘肃岷县耳阳河泥石流灾害,并将模拟结果与实际情况进行了对比,发现FLO-2 D模拟泥石流的效果最好。吴季寰等^[15]通过FLO-2 D对朱家沟泥石流进行了模拟,根据流速、泥深、堆积范围划分了危险性分

区。赵蔓等^[16]利用FLO-2 D对云南兰坪县啦井村泥石流灾害进行动力学模拟,基于模拟结果的泥深、流速,对下游居民房屋和公路做了风险评价。Fang Qunsheng等^[17]使用FLO-2 D模拟了华溪沟在不溃坝和溃坝情况下的泥石流冲出量,当降雨频率1%时,溃坝情景下的冲出量是不溃坝情景1.77倍。徐文静等^[18]运用FLO-2 D模拟了沙耳沟无工程措施、拦砂坝正常运行和拦砂坝失效3种情景下的泥石流运动和堆积特征,并指出拦砂坝失效时,相比无工程措施条件,泥石流频率20%下高危险区面积增加了3.39%,堆积范围增加了0.83%。夏喆等^[19]通过FLO-2 D模拟了倪厂沟在有防治工程条件下不同降雨频率的泥石流动力演进过程,发现降雨频率2%和1%时所暴发的泥石流,会导致拦砂坝防治失效,并堵塞河道。

综上所述,FLO-2 D在泥石流模拟方面取得了较好的效果,但对工程减灾效果的评价多以泥石流危险性、冲出量、流速等因子为依据,而少有考虑建筑极限承载力因素。

本文以黑水沟泥石流灾害为例,基于野外调查总结村镇建筑的类型和损毁特征,进而利用FLO-2 D软件模拟不同降雨频率下泥石流的运动和堆积过程,获得泥石流作用于建筑的流速、泥深等参数,结合砌体墙体在泥石流作用下的极限承载力,提出无筋砖砌体结构发生破坏的临界条件,进一步分析拦砂坝对村镇建筑的防护效果,为拦砂坝措施减灾功效的精细化评估和村镇建筑的减灾提供参考和借鉴。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黑水沟位于四川省平武县木座藏族乡境内(图1),为夺补河左岸的一级支流,沟口的地理坐标

为104.5°E,32°6 N,沟口有国道G247穿过,距离平武县城约30 km。黑水沟流域总面积约为102.6 km²,主沟道长度约16.3 km,最高点高程为3 805 m,最低点高程为1 206 m,相对高程差为2 599 m。流域整体呈南北向展布,北高南低,黑水沟主要包含2条支沟,西侧为龙池支沟,东侧为黑水支沟。黑水沟物源区为2条支沟汇流点以上的区域;流通区为汇流点向下5.6 km内的区域,堆积区为沟口向上0.7 km内的区域。

黑水沟流域地处摩天岭山脉,属高山峡谷地形,处于虎牙断裂的东部、龙门山断裂带的北部(图1a)。流域内出露的地层主要为下古生界碧口群碎屑岩、泥盆系三河组砂岩和砂板岩、印支早期二云母花岗岩等。通过野外调查和高清遥感影像解译分析,黑水沟流域的物源类型包括冲沟物源、沟道物源和坡面物源(图1b—1g),经计算其动储量分别为 1.40×10^6 , 8.70×10^5 , 4.50×10^5 m³,为泥石流的形成提供了丰富的松散物质条件。

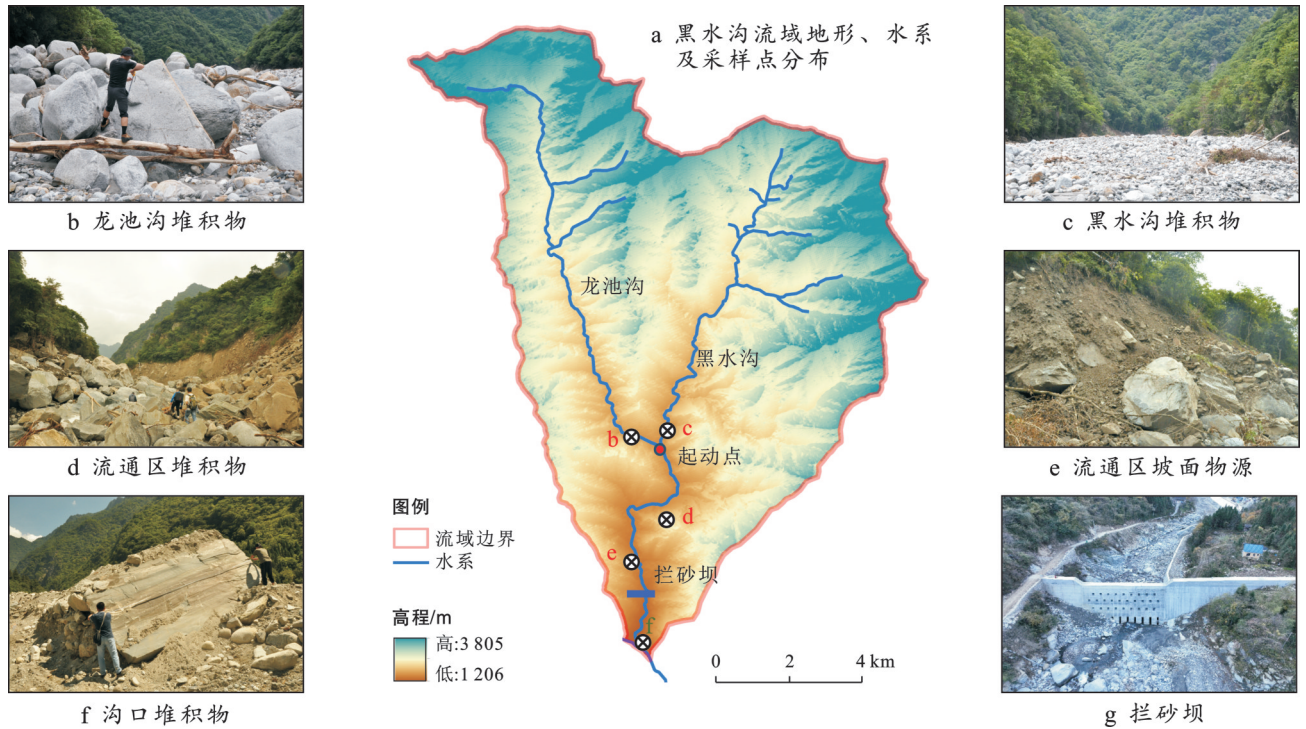


图1 黑水沟流域内物源特征与泥石流拦挡措施概况

Fig.1 Material source characteristics and debris-flow blocking measure at Heishui gully watershed

2022年7月12日5时左右,黑水沟暴发了泥石流,持续时间约1 h。黑水沟流域在暴发泥石流之前,沟内无工程防治措施,下游房屋遭受严重的冲击、淤埋破坏。通过现场调查,建筑I是一栋2层框架结构,1层受到淤埋破坏,泥痕深约2.9 m;建筑II和III是一所小学,建筑III是4层的框架结构,泥石流淤积物充满了1层整个房屋;建筑II是3层框架结构,受到前排建筑的遮掩作用,室内泥痕线约2.1 m;沟道左岸的建筑受损较轻,以泥石流的淤埋破坏为主,沟道右岸的建筑受损严重,建筑IV受到冲击破坏和淤埋破坏,右岸建筑主要为无筋砖砌体结构和木结构,房屋受损严重,测得泥石流沟口最大冲出距离约400 m,横向最大堆积宽度约330 m。

1.2 研究方法

1.2.1 FLO-2 D数值模拟

FLO-2 D是将数字高程模型(DEM)划分为大小

一致的地形网格,利用非牛顿体与中央有限差分法计算二相流的连续性方程和动量方程,进而求解得到泥石流体的流速和泥深^[20]。FLO-2 D的模拟流程详见张浩韦等^[21]研究,仅对模拟过程中对地形数据、曼宁系数、泥石流流量等基础参数处理进行介绍。

1.2.2 参数选取

(1) 地形数据处理。在FLO-2 D模拟过程中需要对地形进行计算网格划分,网格的大小决定模拟时间和模拟结果的准确性,考虑计算机的运行速率和前人的划分经验^[22],模拟时计算网格大小为5 m×5 m;为了适应防治工程的模拟,将现有12.5 m精度的DEM数据重采样后得到5 m精度,作为模拟的地形数据。

(2) 模拟参数的选取。模拟过程中的主要参数有:曼宁系数(n),体积浓度(C_v),泥石流密度(γ),层流阻滞系数(K),屈服应力(τ)及黏滞系数(η)^[23],其

中 τ, η 用下列式子计算:

$$\eta = \alpha_1 e^{\beta_1 \epsilon_v} \quad (1)$$

$$\tau = \alpha_2 e^{\beta_2 \epsilon_v} \quad (2)$$

式中: $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ 为经验系数。根据对泥石流灾害后沉积物采样, 经室内试验测得泥石流密度 $\gamma = 1.74 \text{ g/cm}^3$ 。体积浓度参考下列公式来确定^[24]:

$$C_v = \frac{\gamma - \gamma_w}{\gamma_H - \gamma_w} \quad (3)$$

式中: C_v 为泥石流体积浓度; γ 为泥石流密度 (g/cm^3); γ_w 为水的密度, 取 1 g/cm^3 ; γ_H 为泥石流固体物质容重, 一般取 2.65 g/cm^3 。其他参数根据野外调查和 FLO-2 D 使用手册^[25] 确定, 表 1 为模拟参数取值。

表 1 黑水沟泥石流模拟参数
Table 1 Simulation parameters of debris flow at Heishui gully

参数名称	参数值	
曼宁系数 (n)	0.1(沟床); 0.2(建筑区)	
体积浓度 (C_v)	0.45	
层流阻滞系数 (K)	2 280	
黏滞系数相关参数	(α_1)	0.811
	(β_1)	13.72
屈服应力相关参数	(α_2)	0.004 62
	(β_2)	11.24

(3) 不同频率的泥石流流量过程线。采用《四川省中小流域暴雨洪水计算手册》求算不同设计频率下的洪水洪峰流量:

$$Q_p = 0.278 \psi i F = 0.278 \psi (S/\tau^n) F \quad (4)$$

式中: Q_p 为不同降雨强度的最大洪峰流量 (m^3/s); ψ 为径流系数; i 为平均最大暴雨强度 (mm/h); F 为汇水面积 (m^2); S 为雨力系数 (mm/h); τ 为流域汇流时间 (h); n 为暴雨公式指数。

由于 FLO-2 D 模拟时无法考虑泥石流对沟道的侵蚀, 需在清水洪峰流量的基础上乘以流量放大系数 (BF), 得到泥石流峰值流量 (表 2)。BF 计算公式为

$$\text{BF} = \frac{1}{1 - C_v} \quad (5)$$

表 2 不同降雨频率下的泥石流峰值流量
Table 2 Peak flow of debris flows at different rainfall frequencies

降雨频率 (P)/%	清水洪峰流量 (Q_p)/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	放大系数 (BF)	泥石流峰值流量 (Q_c)/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
1	774.74	1.82	1 410.02
2	667.19	1.82	1 214.29
5	525.96	1.82	957.25
10	418.91	1.82	762.414

采用简单概化的五边形方法确定泥石流流量过程线 (图 2), 再将泥石流流量过程线输入到 FLO-2 D 中进行模拟。

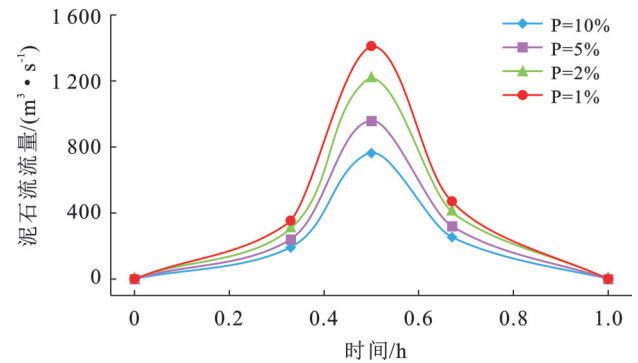


图 2 黑水沟不同频率下的泥石流流量过程线
Fig.2 Debris flow process lines at different frequencies at Heishui gully

1.2.3 无筋砌体结构受冲击破坏的力学分析

泥石流对建筑的冲击力主要是浆体的整体冲击力和巨石冲击力, 结构墙体受到平面外荷载时, 极易受到破坏 (图 3), 依据墙体在水平荷载作用下的抗弯承载力和抗剪承载力^[26], 分析无筋砖砌体墙的破坏方式。



图 3 泥石流对墙体冲击破坏

Fig.3 Impact damage of debris to walls

采用文献 [27] 中推荐的公式计算泥石流浆体整体冲击力和大石块冲击力。

泥石流浆体整体冲击力计算公式为

$$\delta = \lambda \frac{\gamma_c}{g} V_c^2 \sin \alpha \quad (6)$$

式中: δ 为泥石流流体整体冲击压力 (kPa); γ_c 为泥石流容重 (kN/m^3); g 重力加速度 (m/s^2); V_c 为泥石流流速 (m/s); α 为建筑物受力面与泥石流冲击力方向的夹角 ($^\circ$), 本文取 90° ; γ 为建筑物形状系数, 圆形建筑物 $\gamma = 1.0$, 矩形建筑物 $\gamma = 1.33$, 方形建筑物 $\gamma = 1.47$ 。

大石块的冲击力计算公式为

$$F = 24.1V_c^{1.2}R^2 \quad (7)$$

式中: F 为石块冲击力(kN); R 是石块半径(m); V_c 为泥石流流速(m/s)。

根据静力计算原理,对于单层房屋,墙被视为上端不动铰支承于屋盖,下端固定于基础的竖向构件,通常沿纵向取 1 m 墙长作为计算单元(图 4)。

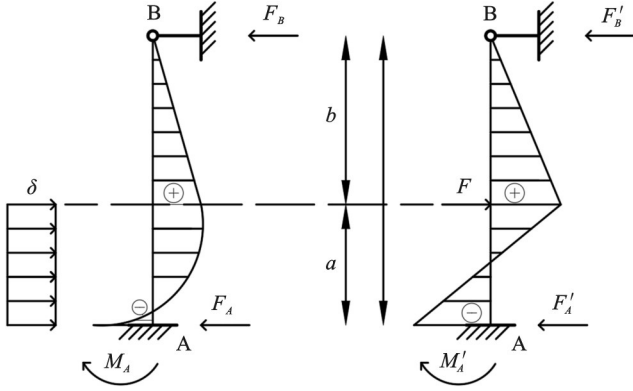


图 4 泥石流作用下墙体受力图

Fig.4 Force diagram of walls affected by debris flow

将泥石流浆体冲击力以均布荷载作用在墙体,利用力法求得 A, B 两点的支座反力为

$$F_A = \delta a - \delta a^3 \frac{l - a/4}{2l^3} \quad (8)$$

$$F_B = \delta a^3 \frac{l - a/4}{2l^3} \quad (9)$$

式中: F_A, F_B 为支座反力(N); a 为泥石流作用的高度(m); l 为墙体高度(m); δ 为泥石流流体整体冲击压力(kPa)。

对比式(8)和式(9),明显 $F_A > F_B$, A 处最容易受到破坏。

根据求出的支座反力,依据力矩平衡原理,计算出墙底部的弯矩为:

$$M_A = \frac{\delta a^2}{2} - \frac{\delta a^3(l - a/4)}{2l^2} \quad (10)$$

大石块以集中荷载作用在墙体上,通过力法求得支座反力:

$$F'_A = \frac{Fb(3l^2 - b^2)}{2l^3} \quad (11)$$

$$F'_B = \frac{Fa^2(3l - a)}{2l^3} \quad (12)$$

式中: F'_A, F'_B 为支座反力(N); a 为泥石流作用的高度(m); b 为泥石流表面到墙顶部的距离(m); l 为墙体高度(m); F 为泥石流流体整体冲击压力(kN)。

根据求出的支座反力,根据力矩平衡,计算出墙底部的弯矩为:

$$M'_A = \frac{Fab(l + b)}{2l^2} \quad (13)$$

根据材料计算墙体极限承载能力:

$$M_u = f_{tm}W \quad (14)$$

$$V = f_v tz \quad (15)$$

式中: M_u 为墙体的极限弯矩值; f_{tm} 砌体弯曲抗拉强度设计值; W 为截面抵抗矩; V 为墙体的极限剪力值; f_v 砌体抗剪强度设计值; t 为截面宽度,取 1 m, z 为内力臂,当截面为矩形时,取 z 等于 $2h/3$ (h 为截面高度)。

当 $M_A, M'_A > M_u$ 时,墙体底部发生弯曲破坏,当 $F_A, F > V$, 墙体发生剪切破坏。当墙体达到临界平衡条件时 ($M_A = M_u, F_A = V$), 可推导出临界泥石流流速:

泥石流浆体整体冲击力下弯曲破坏临界流速:

$$V_c = \frac{2l}{a(2l - a)} \sqrt{\frac{2f_{tv}Wg}{\lambda\gamma_c \sin \alpha}} \quad (16)$$

泥石流浆体整体冲击力下剪切破坏临界流速:

$$V_c = 2l \sqrt{\frac{2l f_v z g}{(8l^3 a - 4a^3 l + a^4) \gamma_c \lambda \sin \alpha}} \quad (17)$$

大石块冲击下弯曲破坏临界流速:

$$V_c = \left[\frac{2l^2 f_{tm} W}{24.1 R^2 ab(l + b)} \right]^{5/6} \quad (18)$$

大石块冲击下剪切破坏临界流速:

$$V_c = \left(\frac{f_v z}{24.1 R^2} \right)^{5/6} \quad (19)$$

2 结果与分析

2.1 泥石流运动特征

不同降雨频率下无工程措施的泥石流模拟结果(图 5—6)表明,随着降雨频率的增加,泥石流的冲出规模、堆积深度和流速均呈现减小趋势。当降雨频率 $p=1\%$ 和 $p=2\%$ 时,泥石流能够冲出至沟口,对下游居民建筑构成严重威胁,而降雨频率 $p=5\%$ 和 $p=10\%$ 时,泥石流未能冲出至沟口堆积区,不会影响沟口的居民建筑,因此,对这两种降雨频率下的泥石流运动特征不进行分析。

模拟结果(表 3)表明,当降雨频率 $p=1\%$ 时,泥石流堆积范围的面积为 $9.36 \times 10^4 \text{ m}^2$,在泥石流堆积区的沟道内,最大泥深为 12.70 m,最大流速为 7.19 m/s。堆积范围呈“U”型,上游沟谷两侧堆积宽度约为 90 m,冲出沟口后,在主河道处堆积面积约为 $5.05 \times 10^4 \text{ m}^2$,沟口最大横向宽度约为 286 m,最大冲出距离约为 335 m。左岸 I 号建筑附近有 11 间房屋处于

泥石流堆积范围之内,最大泥深为 3.43 m,最大流速为 4.62 m/s,右岸 IV 号建筑附近有 6 间房屋处于泥

石流堆积范围之内,最大泥深为 5.25 m,最大流速为 6.02 m/s。

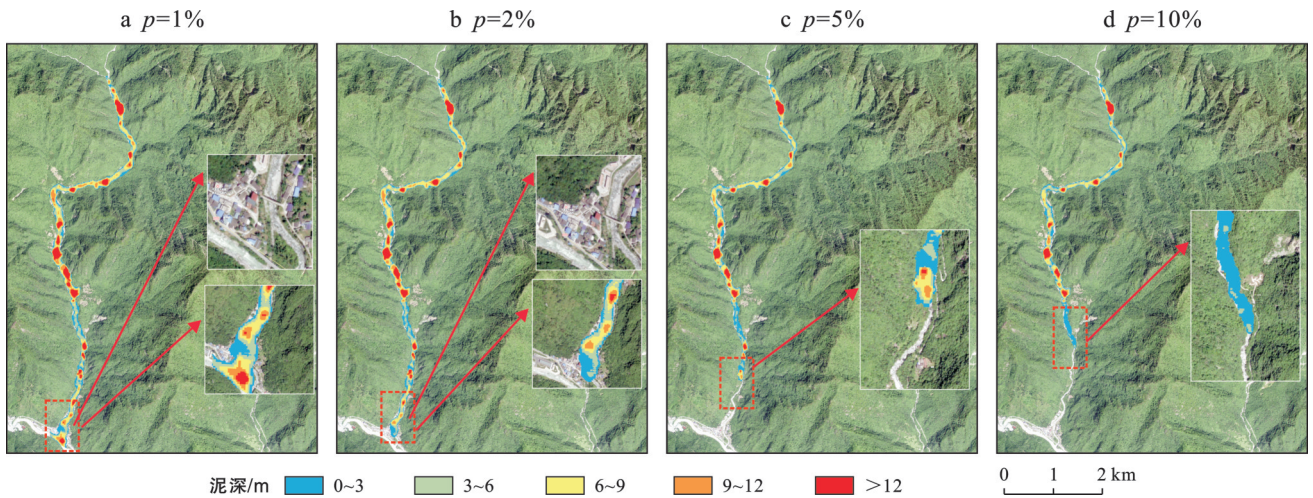


图 5 自然条件下不同频率的泥石流泥深模拟结果

Fig.5 Simulation results of debris flow depth with different frequencies under natural conditions

表 3 自然工况下不同频率的泥石流模拟结果

Table 3 Simulation results of debris flow at different frequencies under natural conditions

降雨频率/%	1	2
沟道内最大泥深/m	12.70	11.83
沟道最大流速/(m·s ⁻¹)	7.19	5.63
建筑区最大泥深/m	3.43(左)	2.61(左)
	5.25(右)	4.46(右)
建筑区最大流速/(m·s ⁻¹)	4.62(左)	3.54(左)
	6.02(右)	4.17(右)
堆积面积/10 ⁴ m ²	9.36	5.63
主河堆积扇面积/10 ⁴ m ²	5.05	0.00
淤积房屋数量/间	17	9

降雨频率为 $p=2\%$ 时,泥石流堆积范围的面积为 $5.63 \times 10^4 \text{ m}^2$,在泥石流堆积区的沟道内,最大泥深为 11.83 m,最大流速为 5.63 m/s,沟口处最大堆积宽度约

为 136 m,最大冲出距离约为 191 m,但没有在主河道堆积。左岸 I 号建筑附近有 3 间房屋处于泥石流堆积范围之内,最大泥深为 2.61 m,最大流速为 3.54 m/s;右岸 IV 号建筑附近有 6 间房屋处于泥石流堆积范围之内,最大泥深为 4.46 m,最大流速为 4.17 m/s。

对比 4 种降雨频率下泥石流的运动特征,发现降雨频率 $p=1\%$ 的模拟结果与黑水沟“7·12”泥石流灾后场景较为接近。根据模拟结果,建筑 I 区域的泥深 0.75~3.51 m,建筑 II 区域的泥深 0.43~6.29 m,建筑 III 区域的泥深 0.93~6.42 m,与野外调查数据相符。将模拟结果与灾后实测结果进行对比(图 7),沟口最大冲出距离和横向最大堆积宽度的模拟误差率为 16.25% 和 13.33%;沟口堆积扇面积验证方法参照方群生等^[28]、李宏杰等^[29]应用的模型来验证(表 4),通过计算,模拟结果精度为 85%。

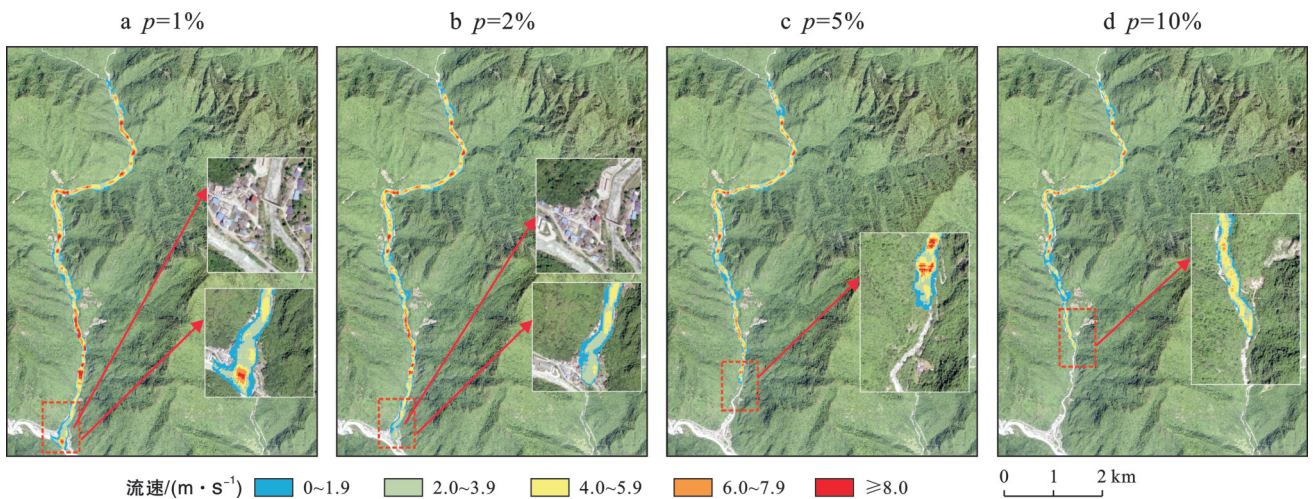


图 6 自然条件下不同频率的泥石流流速模拟结果

Fig.6 Simulation results of debris flow with different frequencies under natural conditions

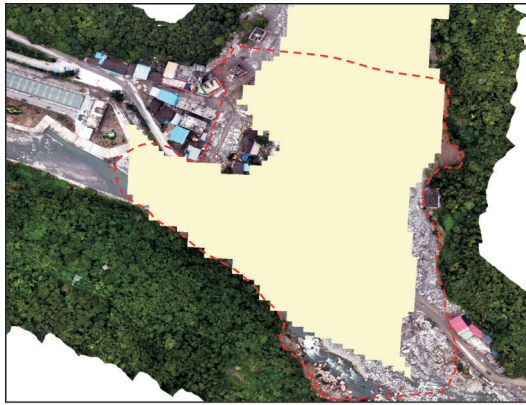


图 7 模拟堆积范围与实际堆积范围对比

Fig.7 Comparison of simulating deposited areawith actual deposited area

表 4 模拟结果与实际结果对比

Table 4 Comparison between simulation results and actual results

沟口最大冲出距离/m		沟口横向最大堆积宽度/m		沟口堆积面积/ 10^4 m^2			
实际	模拟	实际	模拟	实际	模拟	重叠	精度
400	335	330	286	6.54	5.05	4.88	85%

2.2 无筋砖砌体结构的破坏方式

由表 5 可知,墙体在泥石流浆体整体冲压下,弯曲破坏的临界流速(6.37 m/s)小于剪切破坏时的临界流速(17.51 m/s),然而在大石块冲击下,剪切破坏的临界流速(2.02 m/s)小于弯曲破坏时的临界流速(11.69 m/s),所以墙体在泥石流浆体整体冲压下主要是弯曲破坏,在大石块冲击下发生剪切破坏。降雨频率 $p=1\%$ 时,此建筑区的泥石流流速为 3.35 m/s,与表 5 中的临界流速对比: $3.35 \text{ m/s} > 2.02 \text{ m/s}$,表明该建筑因受大石块的作用而发生剪切破坏,泥

石流裹挟的大石块是导致砌体墙体破坏的主要因素。

表 5 不同破坏方式的临界流速

Table 5 Critical flow velocity for different failure modes

破坏方式	浆体— 弯曲破坏	浆体— 剪切破坏	大石块— 弯曲破坏	大石块— 剪切破坏
流速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	6.37	17.51	11.69	2.02

2.3 泥石流防治工程减灾效果

2022年泥石流灾害发生后,在距沟口上游 950 m 处,修建 1 座高约 15 m 的窗口重力式拦砂坝用于阻挡泥石流。由模拟结果可知,降雨频率 $p=1\%$, $p=2\%$ 的泥石流对下游居民区的影响较大,因此在 FLO-2 D 中添加拦砂坝,模拟这两种降雨频率下泥石流的运动过程和堆积特征。

由图 8 可知,在 2 种频率下拦砂坝后都出现回淤现象,泥石流淤满坝体后发生漫坝,继续向下游流动,相比于无拦砂坝条件下,泥石流的冲出距离、泥石流堆积面积发生明显变化。表 6 表明,降雨频率 $p=2\%$ 时,泥石流漫坝后冲出的距离为 452.29 m,堆积区最大泥深为 6.35 m,最大流速为 4.83 m/s,堆积面积为 $9\,800 \text{ m}^2$,缩减了 82.6%,未冲到下游居民区。降雨频率 $p=1\%$ 时,泥石流漫坝后,在沟口的堆积面积为 $5.77 \times 10^4 \text{ m}^2$,减少了 38.4%;沟口最大冲出距离为 218 m,缩短了 34.9%;沟口最大堆积宽度为 161 m,缩减了 43.7%;在泥石流堆积区的沟道内,最大泥深为 12.27 m,最大流速 5.48 m/s,并未冲到主河道。左岸 I 号建筑附近有 3 间房屋处于泥石流堆积范围之内,最大泥深为 1.76 m,降低了 48.6%,最大流速为 1.82 m/s,下降了 60.6%。灾后对右岸的房屋进行了全面拆除,所以右岸无房屋受到威胁。

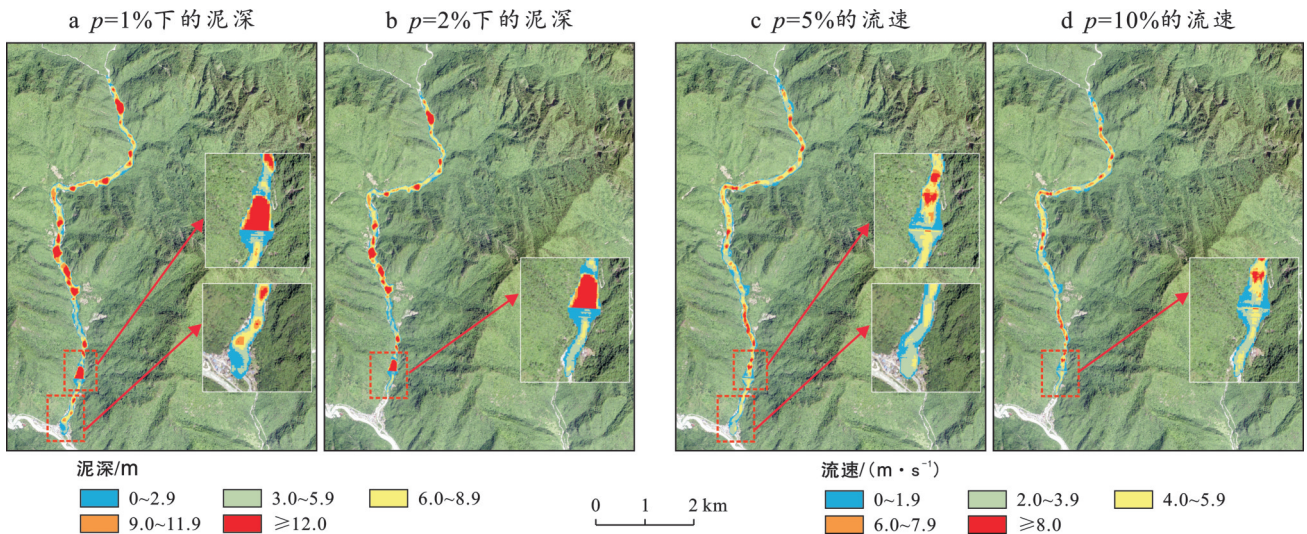


图 8 工程措施下不同频率的泥石流泥深、流速模拟结果

Fig.8 Simulation results of depth and velocity of debris flow with different frequencies under engineering measures

表 6 有无工程措施条件下泥石流模拟结果对比
Table 6 Comparison of debris flow simulation results with and without engineering measure

降雨频率/%	1		2	
	无	有	无	有
工程措施				
沟道内最大泥深/m	12.70	12.27	11.83	6.35
沟道最大流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	7.19	5.48	5.63	4.83
建筑区最大泥深/m(左)	3.43	1.76	2.61	0.00
建筑区最大流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)(左)	4.62	1.82	3.54	0.00
堆积面积/ 10^4 m^2	9.36	5.77	5.63	0.98
淤积房屋数量/间	17	3	9	0

在黑水沟内修建拦砂坝后,可有效预防降雨频率为 $p=2\%$ 时引发的泥石流灾害,不会对下游居民区的建筑造成威胁,但在降雨频率为 $p=1\%$ 时,泥石流仍能冲入沟岸的建筑群。墙体破坏时的临界流速随着泥石流冲击作用高度的减小呈增大趋势,随大石块粒径的减小呈增大趋势。拦砂坝具有拦蓄泥沙、减小泥石流规模等功能,可以减小泥石流冲击砌体墙体的作用高度和大石块粒径,使修建拦砂坝后砌体墙体发生破坏时的临界流速大于无工程措施的临界流速。通过模拟结果发现,修建拦砂坝后建筑区的最大流速削减至 1.82 m/s ,小于墙体破坏时的 4 种临界流速,因此,房屋结构不会发生冲击破坏。然而,建筑区仍存在最大泥深为 1.76 m 的情况,会对建筑区造成一定的淤埋风险:①当建筑迎流面上不存在门窗孔洞时,随着泥石流的持续作用,其流速逐渐降低,携带的固体物质不断沉积,导致建筑周围的淤埋深度持续增加,最终使建筑外部被淤埋;②当建筑迎流面上存在门窗孔洞时,泥深的高度超过了建筑窗台高度,泥石流可从门、窗流入建筑室内,从而导致建筑内部出现淤积,造成室内财产损失。

3 讨论

前期研究主要集中在泥石流的危险性分析,主要根据泥石流泥深和流速来划分危险性面积,但对危险区的建筑不能提供针对性的防护建议。本研究考虑建筑的极限承载力,提出了建筑在不同破坏方式下的泥石流临界流速,可针对不同的破坏方式给出针对性的防护建议。

泥石流浆体整体冲压下发生弯曲破坏,可通过以下措施来防护:①在墙体中植入竖直钢筋;②增大墙体的厚度;③提高砌筑砂浆等级。这些措施可增强墙体平面外抗弯承载能力。

泥石流大石块冲击下发生剪切破坏,可通过以

下措施来防护:①用水泥砂浆将钢筋网包于外墙体,增大墙体的受力面积;②在墙体前面堆一排废弃的轮胎;③设置钢筋混凝土防撞柱。这些措施可削减大石块的冲击力。

在黑水沟拦砂坝运行中,通过以下措施最大程度地减少损失:①在流域内布置雨量、泥位等监测设施,做好监测预警工作,汛期加强人工巡查;②定期清理拦砂坝后的泥沙物质,使拦砂坝保持一定的库容,能够有效拦截泥石流;③在建筑周边修建防护堤,改变泥石流的流向,防止泥石流直接冲击房屋建筑。

本研究是基于 FLO-2D 模拟的数据来评估拦砂坝对建筑的减灾效果,在模拟过程中未考虑拦砂坝破坏情况。因此,在后续工作中有必要开展拦砂坝破坏后泥石流对村镇建筑影响的研究。

4 结论

针对黑水沟“7·12”泥石流灾害事件,采用 FLO-2D 软件模拟了自然沟道(无拦挡工程措施)、修建防治工程两种场景下,不同降雨频率的泥石流运动过程,分析了防治工程减灾效果。

(1) 与野外调查结果相比,模拟得到的降雨频率 $p=1\%$ 时泥石流沟口最大堆积宽度、最大堆积冲出距离误差分别为 13.33% 和 16.25% ,沟口堆积区模拟精度达 85% 。

(2) 根据模拟结果,发现泥石流堆积深度、泥石流流速以及堆积范围与降雨频率相关。 $p=5\%$ 和 $p=10\%$ 时的泥石流不会对建筑造成危害, $p=1\%$ 和 $p=2\%$ 时的泥石流对下游居民建筑产生严重威胁。

(3) 基于无筋砌体结构受冲击破坏的力学分析,得到 4 种不同破坏方式下的临界流速,大石块冲击作用下砌体墙体发生剪切破坏的临界流速小于其他 3 种破坏方式。因此,泥石流裹挟的大石块是导致砌体墙体破坏的主要因素。

(4) 通过对修建拦砂坝后的防治效果模拟,发现 $p=2\%$ 时,堆积面积减少了 82.6% ,建筑未受到泥石流影响; $p=1\%$ 时,泥石流堆积面积减少了 38.4% ,沟口最大冲出距离缩短了 34.9% ,沟口最大堆积宽度缩减了 43.7% ,建筑区的最大流速小于砌体墙体发生破坏时的临界流速,未对建筑造成冲击破坏。

本文仅以黑水沟为例,评估了拦砂坝对堆积区建筑物的减灾效果,采用的数值模拟和房屋结构力学分析方法具有普适性,可利用此方法为其他泥石流易发区防治工程的减灾评估,以及沟口堆积区砖砌体结构的防护提供借鉴。

参考文献(References)

- [1] 崔鹏,邓宏艳,王成华,等.山地灾害[M].北京:高等教育出版社,2018.
Cui Peng, Deng Hongyan, Wang Chenghua. Mountain hazards [M]. Beijing: Higher Education Press, 2018.
- [2] 熊江,唐川,陈明.泥石流早期识别与监测预警研究进展探讨[J].自然灾害学报,2021,30(1):165-173.
Xiong Jiang, Tang Chuan, Chen Ming. Discussion on the research progress of early identification, monitoring and early warning of debris flow [J]. Journal of Natural Disasters, 2021,30(1):165-173.
- [3] 张钰,陈晓清,游勇,等.汶川地震后肖家沟泥石流活动特征与灾害防治[J].水土保持通报,2014,34(5):284-289.
Zhang Yu, Chen Xiaoqing, You Yong, et al. Activity characteristics and disaster control of Xiaojia gully debris flow after Wenchuan earthquake [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014,34(5):284-289.
- [4] Cui Peng, Guo Xiaojun, Yan Yan, et al. Real-time observation of an active debris flow watershed in the Wenchuan earthquake area [J]. Geomorphology, 2018, 321:153-166.
- [5] Ding Mingtao, Tang Chuan, Miao Cheng. Response analysis of valley settlements to the evolution of debris flow fans under different topographic conditions: A case study of the upper reaches of Min River, China [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(3):1639-1650.
- [6] Chen Jiangang, Wang Xi'an, Chen Huayong, et al. Feedback mechanism between gully landforms and sediment trapping efficiency in a check dam [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2025, 13(1): 134-144.
- [7] 王金水,陈剑刚,王喜安,等.小流域拦砂坝上下游冲淤特征调查分析[J].长江科学院院报,2024,41(5):171-178.
Wang Jinshui, Chen Jiangang, Wang Xi'an, et al. Investigation and analysis of upstream and downstream erosion and sedimentation characteristics of check dams in small watershed [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2024,41(5):171-178.
- [8] 田述军,程小松,邓志银.基于泥石流危险性的拦挡坝减灾效益评价方法[J].自然灾害学报,2024,33(2):46-53.
Tian Shujun, Cheng Xiaosong, Deng Zhiyin. Evaluation method of disaster reduction benefit of retaining dam based on debris flow hazard [J]. Journal of Natural Disasters, 2024,33(2):46-53.
- [9] Huang Tao, Ding Mingtao, Gao Zemin, et al. Check dam storage capacity calculation based on high-resolution topogrammetry: Case study of the Cutou gully, Wenchuan County, China [J]. Science of The Total Environment, 2021,790:148083.
- [10] 王喜安.拦砂坝对泥石流沟道冲淤形态的影响[D].四川成都:中国科学院大学(中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所),2020.
Wang Xi'an. The effect of check dam on erosion and deposition of debris flow gully [D]. Chengdu, Sichuan: Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [11] Li Shuai, You Yong, Chen Xiaoqing, et al. Regulation effectiveness of a window-check dam on debris flows [J]. Engineering Geology, 2019,253:205-213.
- [12] Zhou G G D, Hu H S, Song D, et al. Experimental study on the regulation function of slit dam against debris flows [J]. Landslides, 2019,16(1):75-90.
- [13] Chen Ming, Tang Chuan, Zhang Xianzheng, et al. Quantitative assessment of physical fragility of buildings to the debris flow on 20 August 2019 in the Cutou gully, Wenchuan, southwestern China [J]. Engineering Geology, 2021,293:106319.
- [14] 刘军友.基于不同方法的泥石流活动强度对比研究:以甘肃岷县耳阳河流域为例[D].北京:中国地质大学(北京),2021.
Liu Junyou. Comparative study of debris flow activity intensity based on different methods: A case study of eryang river basin in Minxian County, Gansu Province [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2021.
- [15] 吴季寰,张春山,杨为民,等.基于熵权变异系数融合算法和FLO-2D的朱家沟流域泥石流危险性评价[J].自然灾害学报,2022,31(1):81-91.
Wu Jihuan, Zhang Chunshan, Yang Weimin, et al. Risk assessment of debris flow in Zhujiagully watershed based on entropy weight coefficient of variation fusion algorithm and FLO-2D [J]. Journal of Natural Disasters, 2022,31(1):81-91.
- [16] 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.
- [17] Fang Qunsheng, Tang Chuan, Chen Zhihe, et al. A calculation method for predicting the runout volume of dam-break and non-dam-break debris flows in the Wenchuan earthquake area [J]. Geomorphology, 2019,327: 201-214.
- [18] 徐文静,陈剑刚,王喜安,等.拦砂坝失效条件下泥石流

- 潜在危险性分析[J]. 人民长江, 2024, 55(7): 115-122.
- Xu Wenjing, Chen Jiangang, Wang Xi'an, et al. Analysis of potential hazard of debris flows under failure conditions of check dams [J]. Yangtze River, 2024, 55(7): 115-122.
- [19] 夏喆, 常鸣, 张远明, 等. 石棉县草科乡倪厂沟“8·14”泥石流动力学演化过程分析[J]. 地震工程学报, 2025, 47(2): 404-414.
- Xia Zhe, Chang Ming, Zhang Yuanming, et al. Dynamic evolution of “8·14” debris flow in Nichang gully, Caoke Township, Shimian County [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2025, 47(2): 404-414.
- [20] Castelli F, Freni G, Lentini V, et al. Modelling of a debris flow event in the Enna area for hazard assessment [J]. Procedia Engineering, 2017, 175: 287-292.
- [21] 张浩韦, 刘福臻, 王军朝, 等. 基于FLO-2 D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-2 D numerical simulation [J]. Journal of Geomechanics, 2022, 28(2): 306-318.
- [22] Si Guangwu, Chen Xiaoqing, Chen Jiangang, et al. Failure criteria of unreinforced masonry walls of rural buildings under the impact of flash floods in mountainous regions [J]. Journal of Mountain Science, 2022, 19(12): 3388-3406.
- [23] 罗玉婷, 唐川, 熊江, 等. 四川省汶川县下庄沟“8·20”泥石流成因分析及堵江范围预测[J]. 水土保持通报, 2020, 40(6): 193-199.
- Luo Yuting, Tang Chuan, Xiong Jiang, et al. Cause analysis of “8·20” debris flow and forecast of river-blocking range in Xiazhuang gully of Wenchuan County, Sichuan Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(6): 193-199.
- [24] 余斌. 不同容重的泥石流淤积厚度计算方法研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(2): 207-211.
- Yu Bin. Study on the method for deposition depth calculation of debris flow with different densities [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(2): 207-211.
- [25] O'Brien. FLO-2 D reference manual [R]. Arizona: Flo-2 D Software, 2009.
- [26] 雷雨, 崔鹏, 蒋先刚. 泥石流作用下砌体房屋破坏机理与结构优化[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2016, 48(4): 61-69.
- Lei Yu, Cui Peng, Jiang Xiangang. Failure mechanism and structure optimization of masonry building due to debris flow impact [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2016, 48(4): 61-69.
- [27] 周明慧, 熊海贝, 赵书平, 等. 泥石流冲击力简化计算方法: 以舟曲县三眼峪泥石流为例[J]. 山地学报, 2017, 35(2): 187-194.
- Zhou Minghui, Xiong Haibei, Zhao Shuping, et al. Simplified calculation of impact force of debris flow based on the case study of sanyan valley debris flow [J]. Mountain Research, 2017, 35(2): 187-194.
- [28] 方群生, 陈志和, 唐川, 等. 基于FLO-2 D数值模拟震区急陡型泥石流冲出量: 以瓦窑沟为例[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2020, 59(3): 23-31.
- Fang Qunsheng, Chen Zhihe, Tang Chuan, et al. Numerically simulating the runout volume of debris flow at urgent steep gully in the earthquake areas based on FLO-2 D: Illustrated with a case of Wayao gully [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2020, 59(3): 23-31.
- [29] 李宏杰, 常鸣, 唐亮亮, 等. 白龙江流域潜在泥石流堵江—溃决洪水链式灾害演进过程[J]. 地质科技通报, 2024, 43(6): 196-211.
- Li Hongjie, Chang Ming, Tang Liangliang, et al. Potential chain disaster evolution process of debris flow blockage and dam failure floods in the Bailong River basin [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(6): 196-211.