

不同流路宽度比例的S形植物坝对泥石流的调控效益

张桢^{1,2}, 祁玉超³, 王道杰^{1,2}, 裴曾莉^{1,2}, 赵鹏^{1,2}, 何松膛^{1,2}

(1.中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所山地自然灾害与工程安全重点实验室, 四川成都610299; 2.中国科学院大学, 北京100049; 3.中国石油天然气管道工程有限公司, 河北廊坊065099)

摘要: [目的] 研究不同流路宽度比例的S形植物坝对泥石流的调控效益, 探究生物工程措施消能减灾的作用, 为构建生态与岩土协同减灾模式提供理论基础。[方法] 分别从流速调节、流量调节、泥沙拦截和能量削减4个方面, 对S形流路宽度比例分别为0%(S_0), 30%(S_{30}), 45%(S_{45}), 60%(S_{60}), 75%(S_{75})的植物坝开展了一系列的水槽试验。[结果] ①流路宽度比例为0%的植物坝(S_0)对阵流型泥石流具有很好的拦截效果, 流速削减31.03%~44.19%, 流量削减45.88%~56.02%, 能量削减34.37%~52.72%, 泥沙拦截3.31%~75.69%; ②流路宽度比例为75%的植物坝(S_{75})对阵流型泥石流具有很好的排淤效果, 流速削减7.69%~29.03%, 流量削减12.94%~35.54%, 能量削减11.56%~34.09%, 泥沙拦截4.13%~45.69%; ③而流路宽度比例为45%的植物坝(S_{45}), 相较于 S_0 , S_{60} , 对阵流型泥石流具有较好的拦排兼顾效果, 流速削减11.11%~40.00%, 流量削减16.47%~51.20%, 能量削减18.04%~45.16%, 泥沙拦截1.63%~54.75%。[结论] S形流路宽度比例为0%(S_0)的植物坝适合布置于以拦截为主的泥石流沟道内; S形流路宽度比例为75%(S_{75})的植物坝适合布置于以排淤为主的泥石流沟道内; S形流路宽度比例为45%(S_{45})的植物坝更适合布置于以拦排结合为主的泥石流沟道内。

关键词: 泥石流防治; 生态减灾; S形植物坝; 不同流路宽度比例; 调控效益

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)01-0040-09

中图分类号: S157.2, U418.56

文献参数: 张桢, 祁玉超, 王道杰, 等. 不同流路宽度比例的S形植物坝对泥石流的调控效益[J]. 水土保持通报, 2025, 45(1): 40-48. Zhang Zhen, Qi Yuchao, Wang Daojie, et al. Debris flow regulation efficiency of S-shaped vegetation dams with different flow path width ratios [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(1): 40-48. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.01.005; CSTR:32312.14.stbctb.2025.01.005.

Debris flow regulation efficiency of S-shaped vegetation dams with different flow path width ratios

Zhang Zhen^{1,2}, Qi Yuchao³, Wang Daojie^{1,2}, Pei Zengli^{1,2}, Zhao Peng^{1,2}, He Songtang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Engineering Resilience, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610299, China; 2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. China Petroleum Pipeline Engineering Corporation, Langfang, Hebei 065099, China)

Abstract: [Objective] The regulatory effectiveness of S-shaped vegetation dams with varying flow path width ratios on debris flows were analyzed to explore the role of bioengineering measures in energy dissipation and disaster mitigation, in order to provide a theoretical foundation for constructing an eco-geotechnical synergistic disaster mitigation model. [Methods] Flume experiments were conducted on vegetation dams with S-shaped flow paths and width ratios of 0% (S_0), 30% (S_{30}), 45% (S_{45}), 60% (S_{60}), and 75% (S_{75}). These tests focused on the flow velocity regulation, flow volume regulation, sediment control, and energy dissipation. [Results] ① The vegetation dam with a 0% flow path width ratio (S_0) exhibited impressive debris flow interception capabilities, reducing 31.03%—44.19% of the flow velocity, 45.88%—56.02% of the flow volume, 34.37%—52.72% of energy dissipation levels, meanwhile, it also achieved an increase in

收稿日期: 2024-08-20

修回日期: 2024-10-21

采用日期: 2024-10-22

资助项目: 国家自然科学基金杰出青年基金项目“山地灾害形成机理与减灾”(41925030); 国家自然科学基金青年基金项目(42201094); 四川省科技计划项目(2022NSFSC1070); 中国科学院青年创新促进会项目(2023389); 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所科研项目(IMHE-ZDRW-08)

第一作者: 张桢(1998—), 男(汉族), 河南省安阳市人, 硕士研究生, 研究方向为生态减灾。Email: zhangzhen1998@imde.ac.cn.

通信作者: 何松膛(1991—), 男(汉族), 四川省乐山市人, 博士, 副研究员, 主要从事生态减灾与区域可持续发展研究。Email: hest@imde.ac.cn.

sediment interception rate of 3.31%—75.69%. ② The vegetation dam with a 75% flow path width ratio (S_{75}) showed strong sediment discharge capabilities, reducing 7.69%—29.03% of flow velocity, and 2.94%—35.54% of flow volume, and 11.56%—34.09% of energy dissipation levels, meanwhile, it also achieved and increase in sediment interception rate of 4.13%—45.69%. ③ The vegetation dam with a 45% flow path width ratio (S_{45}) demonstrated a balanced performance in interception and discharge compared to S_{30} and S_{60} . It reduced 11.11%—40.00%, 16.47%—51.20%, 1.63%—54.75% of flow velocity, flow volume, and energy dissipation, respectively. The interception rate of the plant dam reached 18.04%—45.16%. [Conclusion] An S-shaped vegetation dam with a 0% flow path width ratio (S_0) is ideal for debris-flow channels focused on interception. In contrast, a width ratio of 75% (S_{75}) was better suited for channels that prioritize sediment discharge. The 45% width ratio (S_{45}) effectively balances the interception and discharge.

Keywords: debris flow prevention; ecological measures for hazard management; S-shaped vegetative dams; flow path width ratios; regulatory benefits

泥石流在运动过程中具有极强的冲击力,严重威胁着人类的生命和财产安全。因此,科学防治泥石流对山区安全与可持续发展至关重要^[1]。通过多种治理措施对泥石流浆体进行降速消能是减缓其冲击力的重要途径之一。为此,可以在泥石流的运动路径上设置一系列工程截流拦挡措施,以达到降速消能的效果^[2]。目前常见的拦挡措施主要为岩土工程措施,例如谷坊、拦沙坝、排水沟和消能槽等,这些措施在治理泥石流过程中能够有效发挥降速消能的作用,然而,它们也存在成本高、耐久性差、施工难度大、与环境不协调等问题。有些岩土工程措施甚至在长期侵蚀作用下出现垮塌,垮塌的碎块在下一轮泥石流暴发时可能被再次裹挟,进一步加剧泥石流的冲击力^[3]。因此,建立主动防治泥石流灾害的技术体系和措施十分必要^[2]。Huang 等^[4]研究指出,未来减灾的方向应注重基于韧性的灾害防治理念,在面对未知灾害时,其在准备、响应和恢复方面展现了出色的能力。基于自然的解决方案,也称为基于生态系统的灾害风险减少(DRR)措施^[5],正是这一减灾理念的应用,在山地灾害的防治过程中越来越多地使用绿色、经济的材料和结构,来补充或替代传统的工程结构。

基于自然解决方案的理念特别重视和强调植被在预防或减轻自然灾害和极端气候事件影响方面的作用^[6]。植被在治理泥石流过程中的作用主要有:①通过控制泥石流的物质来源预防灾害发生。主要通过植被根系在坡面土体中形成三维网状结构的根土复合体,提高松散土体的抗剪强度、坡面土体稳定性并抑制土颗粒滑动^[7]。植被根系在生长过程中也会逐渐填充土壤孔隙,通过蒸腾作用降低土壤含水率进而增强土体强度^[8]。同时,植被树冠层对雨水的阻挡和再分配也会减缓降雨对坡面土体的侵蚀,从而避免向沟道输送过多物源。②对已暴发的泥石流进行直接调控。主要通过植被自身躯干对运动的泥石流

进行直接拦挡^[9],进而削弱泥石流的流速、流量和能量,并缩短泥石流的运移距离^[10]。总体来讲,植被通过自身的机械特性(根茎密度、抗拉力)^[11]与生物特性(形态、结构、树龄)^[12]调节降雨再分配和控制土体侵蚀与运移^[13],减小泥石流的形成规模,对泥石流的发生和运动直接或间接地起到了良好的防治作用。但是,目前植被治理泥石流的研究多集中在预防方面,常见物源区不同植被类型与表层松动泥沙之间的拦截关系^[14]。例如,植被覆盖区的水土流失量明显减少^[15];森林覆盖率高的地区土体滑动的雨量临界值明显大于森林覆盖率低的地区^[16];树林茂密的山坡对泥石流的物源生成和水动力条件有一定的抑制作用等^[17]。可见,现有研究大多是分析植被的保水固土效应,而植被对泥石流运动的直接调控和减灾效益量化的研究较少。针对这一现状,He 等^[18]研究了灌木在不同株行距下对泥石流拦截的机制和效益,但是所采用的植被类型较为单一,与实际的植被群落布局相差甚远。陈文乐^[19]设计的植被措施虽然采用了乔灌草的搭配,优化了群落布局,但是单一的分段式布置导致植被群落结构的不完整,同时,满铺型植被措施在泥石流的调控过程中也面临着减灾持久性的问题。所以调控泥石流的植被措施设计要考虑不同植被类型和对泥石流调控的耐久性和长效性,因此植被措施的设计要拦排结合,提升植被措施的使用寿命和可靠性。基于上述分析,本研究设计具有不同流路宽度比例的 S 形植物坝,开展水槽模拟试验,分别从流速调节、流量调节、泥沙拦截和能量削减 4 个方面探究植物坝调节泥石流降速消能的作用。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区位于云南省昆明市东川区的泥石流易发区蒋家沟,地理坐标位于北纬 26°13'—26°17',东经

103°6′—103°13′。蒋家沟流域属于干热河谷区,气候干湿分明,降水多在每年的 5—10 月,常为阵雨或暴雨,地貌属于滇东北高山峡谷类型,由于泥石流发育条件较为完备、构造运动活跃再加上不合理的开发利用,导致该区域早期泥石流灾害频发,且所暴发的泥

石流多为阵流型泥石流^[20-21]。为减轻泥石流灾害对该区域的影响,在蒋家沟流域实施了一系列生物与岩土协同的防治工程,经过多年的治理,泥石流灾害得到了有效控制,强度和发生频率显著降低^[22]。蒋家沟治理前后对比及沟内植被分布如图 1 所示。



a 治理前(拍摄于2007年)



b 治理后(拍摄于2021年)

图 1 蒋家沟治理前后对比

Fig.1 Comparison of Jiangjia gully before and after treatment

1.2 试验设计

He 等^[23]通过试验发现沟道下垫面的沟槽随着弯曲系数的增加,对泥石流的截流和阻挡作用会进一步明显,同时野外考察发现河道的弯曲,能增加水流的流动距离,削减运动能量,如图 2 所示。故本试验根据弯曲河道和泥石流流通区沟道下垫面弯曲沟槽对泥石流的拦排现象,主要探究由成年植被组成的不同流路宽度比例的 S 形植物坝对已具备一定规模大小的阵流型泥石流的调控效益。此次试验并非某次泥石流事件发生的等比例试验,故从相似准则原理对试验条件进行约束^[24]。几何相似方面:根据实地考察,蒋家沟主沟平均坡度为 10°,主沟道内每 200 m 的平均弯曲系数(两点弯曲路径的长度与两点之间直线长度的比值)为 1.05,故此次试验的水槽坡度设置为 10°且植物坝中的 S 形流路的弯曲系数取 1.05。材料相似方面:试验泥石流为阵流型泥石流,每组试验使用 4 阵相同质量(80 kg)和密度(2.00×10³ kg/m³)的重塑黏性泥石流进行冲刷,每阵泥石流间隔约为 30 min。动力相似方面:按照重力相似准则设计水槽模型,泥石流的 Froude 数控制在 1~7,以保证与真实泥石流的动力相似^[25]。本试验中泥石流 Froude 数(F_r)计算公式为:

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{gh \cos(\theta)}} \quad (1)$$

式中: v 为泥石流的流速(m/s); g 为重力加速度(m/s²); h 为泥石流深度(m); θ 为坡度(°)。

植物坝中的 S 形流路宽度比例分别为 0%,

30%,45%,60%,75%(试验编组分别为 $S_0, S_{30}, S_{45}, S_{60}, S_{75}$),并设置一组无植物措施的空白对照组(如表 1 所示),试验设计如图 3 所示。试验于 2021 年 7—9 月和 2023 年 7—8 月分两阶段在中国科学院东川泥石流观测研究站试验场地进行。



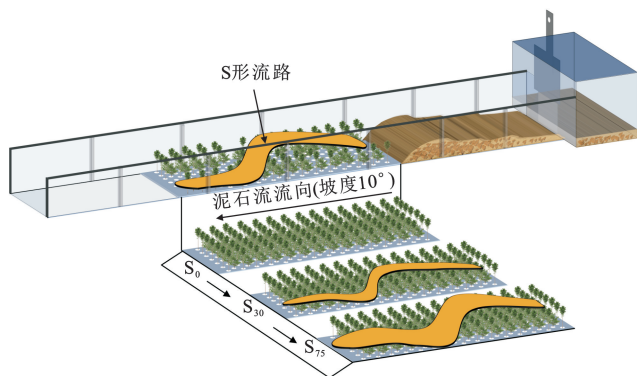
图 2 河道中的 S 形流路

Fig.2 S-shaped flow paths in river channel

表 1 不同流路宽度比例的 S 形植物坝设置参数

Table 1 Setting parameters of S-shaped type vegetative dams with different flow path width ratios

试验编号	流路宽度比例/%	植物坝内乔木数量	植物坝内灌木数量
S_0	0	105	84
S_{30}	30	90	70
S_{45}	45	75	56
S_{60}	60	60	42
S_{75}	75	45	28
空白对照	无植被措施	—	—



注: S_0, S_{30}, S_{75} 表示流路宽度比例分别为 0%, 30%, 75%。下同。

图 3 试验设计示意图

Fig.3 Schematic diagram of experimental design

1.3 试验装置

试验装置共有 3 部分组成:上部物料池(0.6 m×0.6 m×0.7 m)、中部试验水槽(4 m×0.4 m×0.4 m)、下部尾料收集桶(200 L)。在距离物料池 1.25 和 3.5 m 处安装了激光泥位计(Leuze, ODSL 30/V-30 m-S12, 10Hz)和摄像机(GoPro 9, 3 840×2 160 pixels, 30 fps),用来测量和记录泥石流流经植物坝前后的深度变化和流动过程;在试验水槽的侧面和正后方也分别架设了一台摄像机(SONY FDR-AX60, 3 840×2 160 pixels, 25 fps),用来记录整个试验过程。试验装置如图 4 所示。

试验用泥石流为现场配置,原料取自于蒋家沟内天然泥石流堆积物,按照比例配置泥石流 80 kg,密度为 $2.00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,为消除颗粒粒径尺寸效应的影响,故从蒋家沟原始物料中筛出粒径在 20 mm 以上的固体颗粒,颗粒级配曲线如图 5 所示。

经 2021 年 7 月和 2023 年 7 月两次在泥石流易发区蒋家沟野外实地考察,发现蒋家沟主沟道内长有

拦截泥石流已成年的乔木林和灌木丛。在野外考察的基础上,本试验拟选取蒋家沟流域内用于治理山地灾害且最具代表性的植被物种——新银合欢和马桑作为本次试验乔木和灌木的模拟对象,结合野外样方调查(表 2)并根据相似准则原理,按照 1:50 比例制作试验用植被模型。

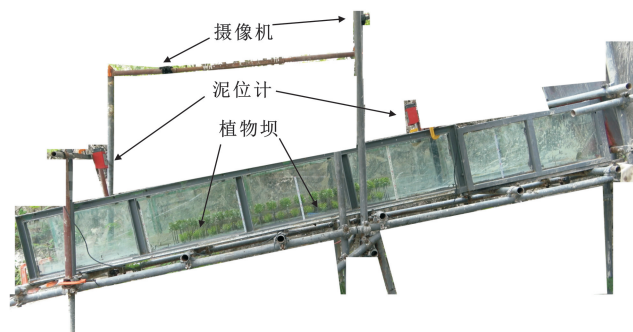


图 4 试验装置示意图

Fig.4 Diagram of test setup

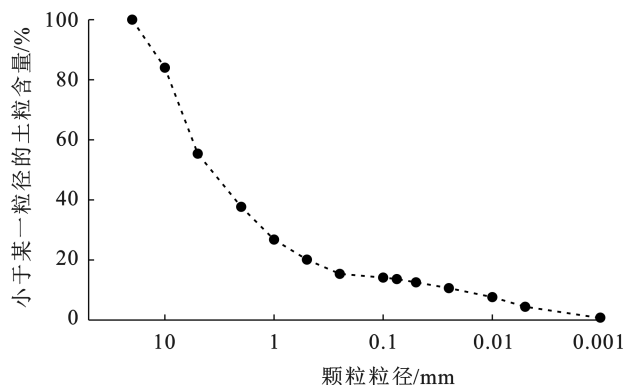


图 5 试验用泥石流物料颗粒级配曲线

Fig.5 Particle size distribution of debris flow material in experiment

表 2 新银合欢和马桑地表特征参数

Table 2 Surface characteristic parameters of *Leucaena leucocephala* and *Coriaria sinica*

树种	考察数量/株	株高/m	冠幅/m	胸径/m	基径/m	基部分支/条
新银合欢	67	9.23±1.3	4.8×5.6	0.15±0.9	—	—
马桑	25	2.23±0.7	2.1×2.2	—	0.15	6

1.4 数据获取

1.4.1 流速调节 试验中利用浮标法测量植物坝坝前和坝后泥石流的流速变化。为更客观地对植物坝的流速削减能力进行评价,本研究以流速削减率作为评价指标。根据定义,流速削减率(P_v)可以表示为:

$$P_v = \frac{v_a - v_b}{v_a} \times 100\% \quad (2)$$

式中: v_a, v_b 分别为坝前流速(m/s)和坝后流速(m/s)。

1.4.2 流量调节 植物坝对泥石流峰值流量的削减也是降速消能的有效手段之一^[19]。为客观有效地对

植物坝的流量调节能力进行评价,本文以峰值流量削减率作为评价指标。根据定义,峰值流量削减率(P_Q)可以表示为:

$$P_Q = \frac{Q_a - Q_b}{Q_a} \times 100\% \quad (3)$$

式中: Q_a 为泥石流流经植物坝前的峰值流量(m^3/s); Q_b 为泥石流流经植物坝后的峰值流量(m^3/s)。

1.4.3 泥沙拦截 泥石流中携带的大量泥沙是其具有强大破坏力的主要因素之一。泥沙拦截可通过对尾料进行称重获得,计算得到植物坝拦截泥沙的质量

和拦沙率,来研究不同 S 形流路宽度比例的植物坝对泥石流的泥沙拦截效果。泥沙拦截量(m)和泥沙拦截率(P_s)可用以下公式表示:

$$m = m_o - m_i \quad (4)$$

$$P_s = \frac{m_o - m_i}{m_o} \times 100\% \quad (5)$$

式中: m 为泥沙拦截量(kg); m_o 为试验输入水槽泥沙量(80 kg); m_i 为输出水槽泥沙量(kg)。

1.4.4 能量削减 能量削减的作用是削减阵流的冲击力和能量大小,减小对下游的危害,从而达到防灾减灾的目的。泥石流属于固液两相流,其单位时间单位距离提供的瞬时能量(E)可用下式表示^[26]:

$$E = \gamma_c v I \quad (6)$$

因此,定义消能率(η)为:

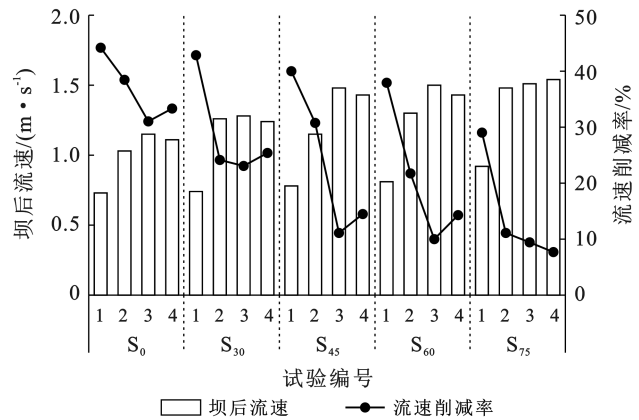
$$\eta = \frac{E_o - E_i}{E_o} \times 100\% \quad (7)$$

式中: γ_c 为泥石流的容重(kg/m^3); v 为泥石流流速(m/s); I 为沟道比降(无量纲); E_o 为过坝前泥石流能量(J); E_i 为过坝后泥石流能量(J)。

2 结果与分析

2.1 流速调节

通过对每组试验和空白对照组 4 阵泥石流的坝前流速进行测量,第 1 阵泥石流的坝前流速平均值为 1.30 m/s,第 2,3,4 阵泥石流的坝前流速平均值为 1.67 m/s。图 6 展示了 4 阵泥石流流经不同 S 形流路宽度比例的植物坝的坝后流速及其流速削减率的变化趋势。整体上,随着 S 形流路宽度比例的增大,各组 4 阵泥石流的坝后流速整体呈上升趋势,泥石流的流速削减率呈下降趋势。 S_0 — S_{75} 每组试验中的第 1 阵泥石流的坝后流速相较于各自组内的第 2,3,4 阵泥石流的坝后流速是最低的,但随着 S 形流路宽度比例的增大,各组试验的第 1 阵泥石流的坝后流速呈上升趋势,分别为 0.73,0.74,0.78,0.81 和 0.92 m/s。同样, S_0 至 S_{75} 每组试验中对第 1 阵泥石流的流速削减率相较于各自组内的第 2,3,4 阵泥石流的流速削减率是最高的,随着 S 形流路宽度比例的增大,对第 1 阵泥石流的流速削减率呈下降趋势:分别为 44.19%,42.86%,40.00%,37.93%,29.03%。除 S_{75} 组外,每组中第 4 阵泥石流的坝后流速相较于各自第 3 阵泥石流的坝后流速都有下降的趋势,从而各组对第 4 阵泥石流的流速削减率出现了略微的上升。同时,各组植物坝对第 2 阵次泥石流的调控过程中,出现了 S_{45} 的坝后流速低于 S_{30} 坝后流速的反常现象, S_{45} 和 S_{30} 坝后流速分别为 1.15 和 1.26 m/s。



注:横坐标刻度值 1,2,3,4 分别表示泥石流阵次。下同。

图 6 模拟 4 阵泥石流流经不同 S 形流路宽度比例坝植物坝的后流速及其流速削减率

Fig.6 Post-dam flow rates and flow reduction rates for four simulated debris flows through vegetative dams with different S-shaped flow path widths

2.2 流量调节

通过对每组试验和空白对照组 4 阵泥石流的坝前流量进行测量,第 1 阵泥石流的坝前峰值流量平均值为 $0.0166 \text{ m}^3/\text{s}$,第 2,3,4 阵泥石流的坝前峰值流量平均值为 $0.0255 \text{ m}^3/\text{s}$ 。图 7 展示了 4 阵泥石流流经不同 S 形流路宽度比例的植物坝的坝后峰值流量及其流量削减率的变化趋势。整体上,随着 S 形流路宽度比例的增大,各组 4 阵泥石流的坝后峰值流量整体呈上升趋势,流量削减率整体呈下降趋势。 S_0 — S_{75} 每组试验中的第 1 阵泥石流的坝后峰值流量相较于各自组内的第 2,3,4 阵泥石流的坝后峰值流量是最低的,同时,随着 S 形流路宽度比例的增大,各组试验的第 1 阵泥石流的坝后峰值流量呈上升—下降—平稳—上升的趋势:分别为 $0.0073, 0.0089, 0.0081, 0.0081$ 和 $0.0107 \text{ m}^3/\text{s}$ 。同样, S_0 — S_{75} 每组试验中对第 1 阵泥石流的流量削减率相较于各自组内的第 2,3,4 阵泥石流的流量削减率是最高的,随着 S 形流路宽度比例的增大,对第 1 阵泥石流的流量削减率呈下降—上升—平稳—下降的趋势:分别为 56.02%,46.39%,51.20%,51.20%,35.54%。 S_{45} 和 S_{60} 对第 4 阵泥石流的流量削减率出现了上升的趋势,其余组对第 4 阵泥石流的流量削减率仍呈下降趋势。

2.3 泥沙拦截

图 8 描绘了不同 S 形流路宽度比例的植物坝对 4 阵泥石流的泥沙拦截量及其泥沙拦截率的变化趋势。整体上,各组的泥沙拦截量和泥沙拦截率呈下降趋势。各组植物坝对首阵泥石流的泥沙拦截量最多:分别是 60.55,43.60,43.80,37.00 和 36.55 kg,可以看出 S_{30} 与 S_{45} 对首阵泥石流的泥沙拦截量较为相似, S_{45} 在

第 4 阵泥石流冲刷中,泥沙拦截量和泥沙拦截率出现了升高的现象,其他组则没有类似的现象。且各组植物坝对第 2 阵泥石流的泥沙拦截量和泥沙拦截率,相较于第 1 阵泥石流来讲,出现了断崖式的下跌,随后除 S_{45} 外,其余组的第 3 阵和第 4 阵的泥沙拦截量和泥沙拦截率逐渐趋于缓和下降。

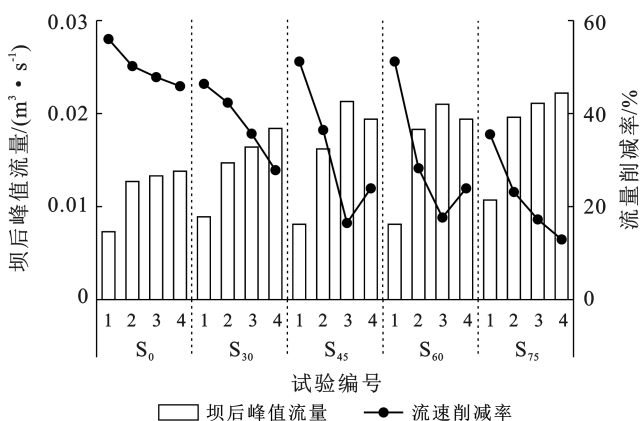


图 7 模拟 4 阵泥石流流经不同 S 形流路宽度比例植物坝的坝后峰值流量及其流量削减率的变化

Fig.7 Changes of post-dam peak discharge and discharge reduction rates for four simulated debris flows through vegetative dams with different S-shaped flow path widths

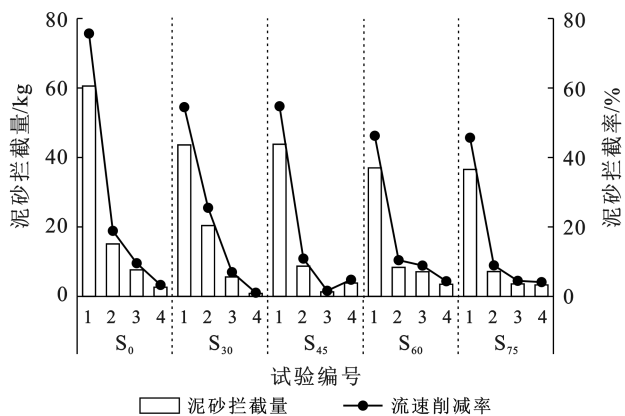


图 8 不同 S 形流路宽度比例的植物坝对 4 阵泥石流的泥沙拦截量及其泥沙拦截率的变化

Fig.8 Changes of sediment interception and sediment interception rate of four simulated debris flow by vegetative dams with different S-shaped flow path widths

2.4 能量调节

图 9 描述了不同 S 形流路宽度比例的植物坝对 4 阵泥石流的能量削减率。从整体上来看,随着泥石流阵次的增加,除 S_{75} 外,其余组的植物坝对 4 阵泥石流的能量削减能力呈现出先减弱后提升的趋势。各组植物坝对首阵泥石流的能量削减率是最高的,分别为 52.72%, 49.90%, 45.16%, 43.13% 和 34.09%, 其中 S_{30} 与 S_{45} 对首阵泥石流的能量削减率较为接近。在

第 2 阵次泥石流冲刷各组的植物坝时,出现了 S_{45} 的能量削减率高于 S_{30} 的现象。

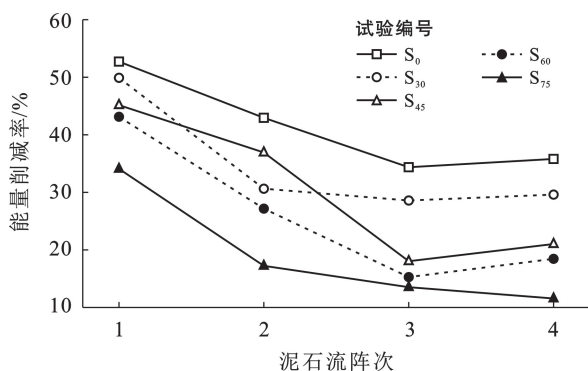


图 9 不同 S 形流路宽度比例的植物坝对泥石流的能量削减率变化

Fig.9 Changes in energy reduction rate of debris flow by vegetative dams with different S-shaped flow path widths

3 讨论

图 10 描述了 4 阵泥石流冲击过后各组植物坝的试验现象。试验过程中发现,4 阵泥石流冲击不同 S 形流路宽度比例的植物坝时,植物坝对每阵泥石流的拦挡作用和调控效益是不同的,同时,为避免其他因素影响,进行了相应的空白对照试验。从试验各个指标分析中可以看出,当 4 阵泥石流分别冲刷 S_0 至 S_{75} 共 5 组类型的植物坝时,各组植物坝对首阵泥石流的调控效益相较于第 2, 3, 4 阵次泥石流的调控效益是最优的:对首阵泥石流的流速削减率、流量削减率、泥沙拦截率和能量削减率分别达到了 29.03%~44.19%, 35.54%~56.02%, 45.69%~75.69% 和 34.09%~52.72%。这是因为不同流路宽度比例的 S 形植物坝对首阵泥石流发挥治理作用的是灌木和乔木的树干部分,但发挥主要作用的是植物坝内的灌木,因为其众多枝干组合在一起,所以对首阵泥石流具有强大的拦截作用。第 2 阵泥石流冲刷植物坝时,坝前流速比首阵泥石流的坝前流速提升了约 22.16%, 从图 10 可以看出,这可能是因为首阵泥石流在水槽内产生了“铺床”作用,增强了后续阵次泥石流的坝前流速。所以,当第二阵泥石流到达植物坝时,植物坝内未被淹没的灌木、未被冲垮的乔木以及前排的乔木树冠仍能发挥出一定的拦截能力,但相较于首阵泥石流来讲,各个 S 形流路宽度比例的植物坝对第 2 阵泥石流的调控效益都出现了不同程度的降低,也能够解释对第 2 阵泥石流的泥沙拦截量和泥沙拦截率出现了断崖式下跌的现象。而且在第 2 阵泥石流冲刷植物坝时,出现了 S_{45} 坝后流速 (1.15 m/s) 比 S_{30} 坝后流速 (1.26 m/s) 低的反常现象,这可能是因为植物坝设

置 45% 宽度比例的 S 形流路会比设置 30% 宽度比例的 S 形流路, 对阵流型泥石流的调控效益更佳, 从而出现了 S_{45} 植物坝的降速效果优于 S_{30} 植物坝的现象。这也进一步的解释了在植物坝对第 2 阵次泥石流的能量调节中, 出现了 S_{45} 的能量削减率 (36.93%) 要大于 S_{30} 的能量削减率 (30.64%) 的现象。但是, 随着 S 形流路宽度比例和泥石流阵次的增加, 导致植被数量进一步的减少和植物坝的调控能力逐步下降, 这种现象可能会消失, 所以植物坝在第 3 阵次和第 4 阵次的泥石流冲刷中并没有出现坝后流速和能量调节的反常现象。当第 3 阵泥石流冲刷植物坝时, 灌木因其株高矮小, 从图 10 可以看出, 已被泥石流全部淹没, 难以产生进一步的拦截能力, 而前两阵泥石流在植物坝内形成了具有一定高度的“河床”, 这会使后续的泥石流的流动深度抬升, 但还不足以达到乔木树冠的高度, 所以第 3 阵泥石流仅有乔木的树干部分在

产生拦挡作用, 这也解释了各组植物坝对第三阵泥石流的调控效益呈现出了进一步降低的趋势。当第 4 阵泥石流冲击植物坝时, 因为植物坝内乔木树冠以下的部分几乎被泥石流全部淹没, 所以接近 70% 的乔木树冠发挥了拦挡作用, 因此部分植物坝对第 4 阵泥石流的调控效益反而得到一定程度上的提升, 具体到各个调控指标上: $S_0, S_{30}, S_{45}, S_{60}$ 的植物坝对第 4 阵泥石流的流速削减率出现了上升现象, S_{45}, S_{60} 的植物坝对第 4 阵泥石流的流量削减率出现了上升现象, S_{45} 的植物坝对第 4 阵泥石流的泥沙拦截率出现了上升现象, $S_0, S_{30}, S_{45}, S_{60}$ 的植物坝对第 4 阵泥石流的能量削减率出现了上升现象, 可以看出, 第 4 阵泥石流冲刷植物坝时, S_{45} 植物坝在 4 个调控指标上都出现了上升现象, 而 S_{75} 始终处于下降趋势, 这可能是因为 S_{75} 的植物坝流路宽度比例过大导致植物数量太少。

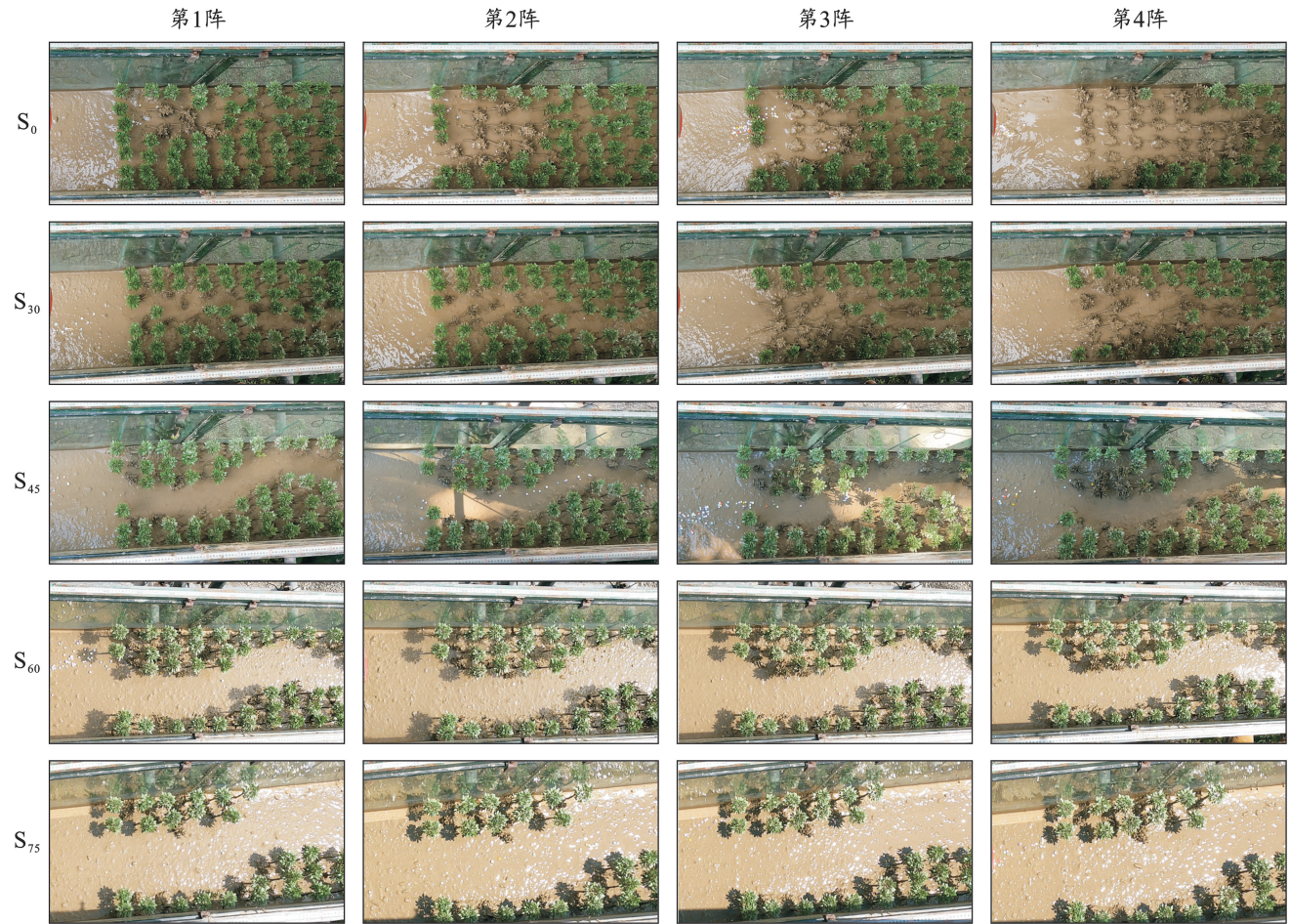


图 10 模拟 4 阵泥石流冲击过后的各组植物坝的试验现象 (泥石流流向为从左至右)

Fig.10 Experimental phenomena in groups of vegetative dams after impact of four surges of debris flow (direction of debris flow is from left to right)

该试验旨在探究由成年植被组成的不同流路宽度比例的 S 形植物坝对已具有一定规模大小的阵流

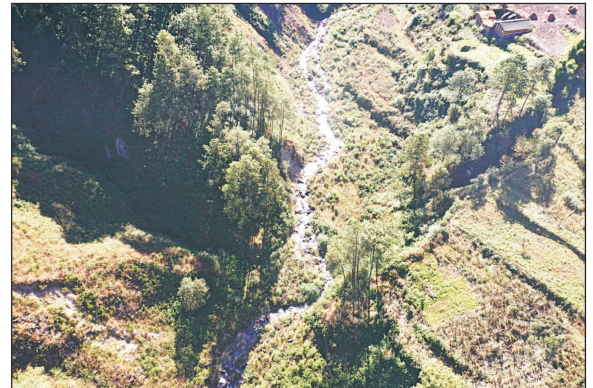
型泥石流的调控作用与效益。本研究所提出的不同流路宽度比例的 S 形植物坝在治理泥石流的过程中

充分发挥出了拦排结合的优势,有效提高了植物坝的使用寿命和治理可靠性。通过对试验现象的分析,泥石流冲击不同流路宽度比例的 S 形植物坝时,各组植物坝对 4 阵泥石流的调控方式和调控效益是不同的。为确保试验数据具有一定的可靠性,试验在设计和开展阶段分别遵循了几何相似、材料相似,并且在泥石流的模型试验中,Froude 数(Fr)是常用的动力相似准则,通过保持 Froude 数不变,可以确保不同尺寸的泥石流模型在流动行为上的相似性。该试验泥石流

坝前平均流速(1.30 m/s 与 1.67 m/s)所推导出的无量纲 Froude 数分别为 1.32 与 1.70,符合自然界中泥石流 Froude 数的范围。图 11 是野外考察自然状态下沟道中具有一定宽度比例的 S 形流路与生长在流路周围的植被,具体到现实应用中,植物坝内的植被物种和流路弯曲系数可根据研究区当地气候、地形等因素条件,因地制宜择优选取。同时,也可根据当地对泥石流的调控目的,合理选择植物坝内的流路宽度比例大小,确保植被措施能够发挥出最大的治理效能。



a 沟道整体



b 沟道局部

图 11 沟道中具有一定宽度比例的 S 形流路与生长在流路周围的植被

Fig.11 S-shaped flow paths with a certain percentage of width in channels and vegetation growing around flow paths

当前,气候变化导致自然灾害在全球范围内频繁发生。因此,研究生态措施在山地灾害治理中的作用机制,并科学合理地应用这些措施,已成为山区可持续发展亟待解决的重要课题^[27-29]。然而,本试验只假设了成年期植被对已具有一定规模大小泥石流的调控治理这种理想状态,以及此次试验中使用的植物为人造模型,无法完全再现植被与土壤之间的真实相互关系,因此在后续的研究中,应考虑不同生长期的植被对泥石流暴发由量变到质变的联动过程全周期的调控治理效益。此外,本研究的效益指标较为宏观,后续研究可结合数值模拟,研究生态措施在自然环境中与大气、土壤、水分等之间的微观相互作用机制。同时,植物坝也可设计多种形状的流路形态,分析量化不同流路形态下的植物坝对泥石流治理效益的差异。生态与岩土协同治理山地灾害值得进一步深入探索,优化和提升生态工程措施,将有助于更好地与岩土工程措施协同,以实现绿色减灾的科学防治理念。

4 结论

(1) S 形流路宽度比例为 0%(S_0)的植物坝在对阵流泥石流流速调节、流量调节、泥沙拦截和能量调节上具有更好的拦截能力。流速削减 31.03%~

44.19%,流量削减 45.88%~56.02%,泥沙拦截 3.31%~75.69%,能量削减 34.37%~52.72%。

(2) S 形流路宽度比例为 75%(S_{75})的植物坝在对阵性泥石流流速调节、流量调节、泥沙拦截和能量削减上,排淤能力更佳。流速削减 7.69%~29.03%,流量削减 12.94%~35.54%,泥沙拦截 4.13%~45.69%,能量削减 11.56%~34.09%。

(3) 在 S_{30} , S_{45} , S_{60} 试验中,对阵流型泥石流既可以达到一定拦截,同时也具备一定排淤效果的是 S 形流路宽度比例为 45%(S_{45})的植物坝。流速削减 11.11%~40.00%,流量削减 16.47%~51.20%,泥沙拦截 1.63%~54.75%,能量削减 18.04%~45.16%。

(4) 经过各组植物坝对阵流型泥石流的调控效益分析,S 形流路宽度比例为 0%(S_0)的植物坝适合布置于以拦截为主的泥石流沟道内;S 形流路宽度比例为 75%(S_{75})的植物坝适合布置于以排淤为主的泥石流沟道内;S 形流路宽度比例为 45%(S_{45})的植物坝更适合布置于以拦排结合为主的泥石流沟道内。

参考文献 (References)

- [1] Cui Peng, Zeng Chao, Lei Yu. Experimental analysis on the impact force of viscous debris flow [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2015,40(12):1644-1655.

- [2] Chen Xiaoqing, Cui Peng, You Yong, et al. Engineering measures for debris flow hazard mitigation in the Wenchuan earthquake area [J]. *Engineering Geology*, 2015, 194:73-85.
- [3] Wang Xian, Chen Jiangang, Chen Huayong, et al. Erosion process of multiple debris flow surges caused by check dam removal: An experimental study [J]. *Water Resources Research*, 2022, 58(3):e2021wr030688.
- [4] Huang Yu, Zhang Bei. Challenges and perspectives in designing engineering structures against debris-flow disaster [J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2022, 26(10):4476-4497.
- [5] Dorren L, Moos C. Towards quantitative evidence of Eco-DRR in mountains: A concise review [J]. *Ecological Engineering*, 2022, 175:106485.
- [6] Bo M W, Fabius M, Arulrajah A, et al. Environmentally friendly slope stabilization using a soil nail and root system in Canada [M] // *Ground Improvement Case Histories*. Amsterdam: Elsevier, 2015:629-654.
- [7] Veylon G, Ghestem M, Stokes A, et al. Quantification of mechanical and hydric components of soil reinforcement by plant roots [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2015, 52(11):1839-1849.
- [8] Biddle P G. Patterns of soil drying and moisture deficit in the vicinity of trees on clay soils [J]. *Géotechnique*, 1983, 33(2):107-126.
- [9] Jin Ke, Chen Jiangang, Chen Xiaoqing, et al. Impact failure models and application condition of trees in debris-flow hazard mitigation [J]. *Journal of Mountain Science*, 2021, 18(7):1874-1885.
- [10] Booth A M, Sifford C, Vascik B, et al. Large wood inhibits debris flow runout in forested Southeast Alaska [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2020, 45(7):1555-1568.
- [11] Mu Hongli, Yu Xianju, Fu Suhua, et al. Effect of stem basal cover on the sediment transport capacity of overland flows [J]. *Geoderma*, 2019, 337:384-393.
- [12] Lin Yongming, Cui Peng, Ge Yonggang, et al. The succession characteristics of soil erosion during different vegetation succession stages in dry-hot river valley of Jinsha River, upper reaches of Yangtze River [J]. *Ecological Engineering*, 2014, 62:13-26.
- [13] Nehal L, Yan Z M, Xia J, et al. Flow through non-submerged vegetation: A flume experiment with artificial vegetation [C] // 6th International Water Technology Conference, Istanbul, Turkey, 2012.
- [14] De Baets S, Poesen J, Reubens B, et al. Methodological framework to select plant species for controlling rill and gully erosion: Application to a Mediterranean ecosystem [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, 34(10):1374-1392.
- [15] Reichenbach P, Busca C, Mondini A C, et al. The influence of land use change on landslide susceptibility zonation: The Briga catchment test site (Messina, Italy) [J]. *Environmental Management*, 2014, 54(6):1372-1384.
- [16] Ocakoglu F, Gokceoglu C, Ercanoglu M. Dynamics of a complex mass movement triggered by heavy rainfall: A case study from NW Turkey [J]. *Geomorphology*, 2002, 42(3/4):329-341.
- [17] Gonzalez-Ollauri A, Mickovski S B. Hydrological effect of vegetation against rainfall-induced landslides [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 549:374-387.
- [18] He Songtang, Chen Wenle, Wang Daojie, et al. Experimental investigation of the effects of shrub filter strips on debris flow trapping and interception [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2023, 38(2):265-278.
- [19] 陈文乐. 典型生物工程与岩土工程泥砂拦截优化配置试验研究[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.
- Chen Wenle. Experiment Study on optimal allocation of typical bioengineering and geotechnical engineering in sediment control [D]. Beijing: University of the Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [20] 陈文乐, 杜鹃, 方迎潮, 等. 泥石流频发区典型乔灌植物根系的固土效应[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(5):32-39.
- Chen Wenle, Du Juan, Fang Yingchao, et al. Soil reinforcement effect of root systems of typical plants in areas with frequent debris flow [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(5):32-39.
- [21] 黄英, 丁明涛, 庙成, 等. 云南蒋家沟泥石流运动特征及其发展趋势[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(8):1434-1442.
- Huang Ying, Ding Mingtao, Miao Cheng, et al. Characteristics and evolution of debris flow motion in Jiangjia gully in Yunnan Province [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(8):1434-1442.
- [22] 魏丽, 胡凯衡, 黎晓宇, 等. 蒋家沟泥石流沟道年际冲淤变化特征分析[J]. *长江科学院院报*, 2017, 34(9):57-62.
- Wei Li, Hu Kaiheng, Li Xiaoyu, et al. Inter-annual variation of the morphology of debris flow channel in Jiangjia gully [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2017, 34(9):57-62.
- [23] He Songtang, Wang Daojie, Chang Shiqiu, et al. Effects of the morphology of sediment-transporting channels on the erosion and deposition of debris flows [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(14):544.

- research of geological hazard division based on GIS in Beiliu City [J]. *Guizhou Geology*, 2023, 40(1):20-25.
- [23] 李成芳, 王忠诚, 李振炜, 等. 西南喀斯特区土壤侵蚀研究进展[J]. *中国岩溶*, 2022, 41(6):962-974.
Li Chengfang, Wang Zhongcheng, Li Zhenwei, et al. Research progress of soil erosion in karst areas of Southwest China [J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(6):962-974.
- [24] 闫开云, 李江, 许强, 等. 综合遥感精准解译红层岩质滑坡四维特征: 以垮梁子滑坡为例[J/OL]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 1-13 [2024-12-31]. <https://doi.org/10.13203/j.whugis20230118>.
Yan Kaiyun, Li Jiang, Xu Qiang, et al. Accurate interpretation of four-dimensional characteristics of red-bed rock landslide by comprehensive remote sensing: Taking Kualiangzi landslide as an example [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 1-13 [2024-12-31]. <https://doi.org/10.13203/j.whugis20230118>.
- [25] 吴先谭, 邓辉, 张文江, 等. 基于斜坡单元自动划分的滑坡易发性评价[J]. *山地学报*, 2022, 40(4):542-556.
Wu Xiantan, Deng Hui, Zhang Wenjiang, et al. Evaluation of landslide susceptibility based on automatic slope unit division [J]. *Mountain Research*, 2022, 40(4):542-556.
- [26] 杨宇. 岩溶地区小流域土壤侵蚀量计算及泥石流敏感性评价: 以贵州省威宁县二塘河小流域为例[D]. 四川成都: 成都理工大学, 2018.
Yang Yu Estimation of soil erosion and assessment of debris flow susceptibility in karst area: A case study of the Ertang watershed in Weining County, Guizhou [D]. Chengdu Sichuan: Chengdu University of Technology, 2018.
- [27] 刘传正. 崩塌滑坡灾害风险识别方法初步研究[J]. *工程地质学报*, 2019, 27(1):88-97.
Liu Chuangzheng. Analysis methods on the risk identification of landslide disasters [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27(1):88-97.
- [28] 旷开金, 郑开焰, 陈锐, 等. 基于 NPP-VIIRS 夜间灯光数据的福建省县域经济发展时空演化研究[J]. *地域研究与开发*, 2023, 42(4):29-35.
Kuang Kaijin, Zheng Kaiyan, Chen Rui, et al. Spatio-temporal evolution of county economic development in Fujian Province based on NPP-VIIRS nighttime lighting data [J]. *Areal Research and Development*, 2023, 42(4):29-35.
- [29] 田尤, 陈龙, 黄海, 等. 藏东察雅县城地质灾害风险评价及源头管控对策建议[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2024, 35(2):146-154.
Tian You, Chen Long, Huang Hai, et al. Geological hazard risk assessment and suggestions for risk control in Chaya County, Eastern Xizang [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2024, 35(2):146-154.
- [30] Liu Qiang, Tang Aiping, Huang Delong, et al. Impact of orthogonal transformation for factors on model performance in landslide susceptibility [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2023, 82(5):119.
- 题[J]. *地理科学进展*, 2014, 33(2):145-152.
Cui Peng. Progress and prospects in research on mountain hazards in China [J]. *Progress in Geography*, 2014, 33(2):145-152.
- [28] Martinez A, Dejong J, Akin I, et al. Bio-inspired geotechnical engineering: Principles, current work, opportunities and challenges [J]. *Géotechnique*, 2022, 72(8):687-705.
- [29] Lan Huijuan, Wang Daojie, He Songtang, et al. Experimental study on the effects of tree planting on slope stability [J]. *Landslides*, 2020, 17(4):1021-1035.

(上接第 48 页)

- [24] Iverson R M. Scaling and design of landslide and debris-flow experiments [J]. *Geomorphology*, 2015, 244:9-20.
- [25] 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.
- [26] 费祥俊, 舒安平. 泥石流运动机理与灾害防治[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
Fei Xiangjun, Shu Anping. *Movement Mechanism and Disaster Control for Debris Flow* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [27] 崔鹏. 中国山地灾害研究进展与未来应关注的科学问