

基于数值模拟的强降雨诱发低频泥石流 特征分析和危险性评价

——以秦岭鸡窝子山洪泥石流为例

马志亮¹, 庄建琦¹, 吴靛², 曹琰波¹,
陈生银¹, 常磊¹, 占洁伟¹, 马鹏辉¹, 孔嘉旭¹

(1.长安大学 地质工程与测绘学院(西部矿产资源与地质工程
教育部重点实验室), 陕西 西安 710054; 2.青海省地质环境监测总站, 青海 西宁 810008)

摘要: [目的] 研究发育在秦岭山区的低频泥石流的特征及成因机制, 为该地区此类低频泥石流的防灾减灾工作提供科学参考。[方法] 以2023年“8·11”鸡窝子山洪泥石流为研究对象, 通过野外调查、数值模拟等手段, 采用实际降水频率, 开展此次山洪泥石流形成过程反演, 并进行危险性评价。[结果] ①强降雨快速汇集形成洪流, 导致上游沟道松散物质被揭底侵蚀, 形成“消防水管”效应, 暴发山洪泥石流, 并借助陡峭地形对全流域沟道进行侵蚀, 大量堆积物和巨大冲击力在下游扩散开来形成堆积扇, 并堵塞河道。②在实际降雨频率下模拟得出, 泥石流全流域淤积深度在0.04~5.63 m, 最大流速7.43 m/s, 堆积扇面积 1.91×10^4 m², 一次性冲出量为78 271 m³。③基于流速、泥深和危害范围, 给出了高、中、低3个危险区域, 堆积扇西侧区域地势较高, 为低危险区, 占堆积扇面积约10%, 中间区域和堆积边缘至公路区域为中危险区, 该类面积占62%, 堆积扇东南和西南区域为高危险区, 该类面积占28%。[结论] 2023年“8·11”鸡窝子山洪泥石流是一次典型由极端短时强降雨诱发的低频山洪泥石流灾害, FLO-2D模型可有效模拟泥石流的运动和沉积过程, 并确定了泥石流的危险范围。

关键词: 低频泥石流; 数值模拟; 危险性分区; 秦岭鸡窝子山洪泥石流

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2025)01-0147-11

中图分类号: P642.23

文献参数: 马志亮, 庄建琦, 吴靛, 等. 基于数值模拟的强降雨诱发低频泥石流特征分析和危险性评价[J]. 水土保持通报, 2025, 45(1): 147-157. Ma Zhiliang, Zhuang Jianqi, Wu Liang, et al. Characteristics analysis and risk assessment of low-frequency debris flow induced by heavy rainfall based on numerical simulation [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(1): 147-157. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.01.016; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.01.016.

Characteristics analysis and risk assessment of low-frequency debris flow induced by heavy rainfall based on numerical simulation

—A case study of Jiwozi flash flood and debris flow in Qinling Mountains

Ma Zhiliang¹, Zhuang Jianqi¹, Wu Jing², Cao Yanbo¹,

Chen Shengyin¹, Chang Lei¹, Zhan Jiewei¹, Ma Penghui¹, Kong Jiayu¹

(1. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University

(Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering), Xi'an,

Shaanxi 710054, China; 2. Qinghai Institute of Geo-Environment Monitoring, Xining, Qinghai 810008, China)

Abstract: [Objective] The characteristics and causal mechanisms of low-frequency debris flows in the Qinling Mountains was analyzed in order to provide a scientific reference for their prevention and mitigation. [Methods] The “8·11” Jiwozi flash flood and debris flow of 2023 served as the research subject. Using field

收稿日期: 2024-08-26

修回日期: 2024-11-01

采用日期: 2024-11-01

资助项目: 国家自然科学基金项目“重大滑坡预测预报基础研究”(42090053), “秦岭生态地质环境系统演化与灾害风险管控”(42341101), “工程地质与地质灾害”(41922054); 科技部重点基础研究计划项目(2020YFC1512000)

第一作者: 马志亮(2000—), 男(汉族), 河北省衡水市人, 硕士研究生, 研究方向为地质工程。Email: 2023226103@chd.edu.cn.

通信作者: 庄建琦(1982—), 男(汉族), 河南省商丘市人, 博士, 教授, 主要从事工程地质与地质灾害方面的科研与教学工作。Email: jqzhuang@chd.edu.cn.

investigations and numerical simulations, actual precipitation frequencies were used to reverse engineer the formation process of the flash flood and debris flow, and a risk assessment was carried out. [Results] ① Intense rainfall accumulated quickly, forming torrents that erode loose materials in upstream channels. This process, known as the “fire hose” effect, triggered mountain floods and debris flows. Assisted by steep terrain, these flows eroded channels across the watershed, and a significant amount of sediment spreads downstream, forming alluvial fans and blocking river channels. ② Simulations under actual rainfall frequencies showed that the sediment deposition depths across the watershed ranges from 0.04 to 5.63 meters, with a maximum flow velocity of 7.43 m/s. The area of the alluvial fan was $1.91 \times 10^4 \text{ m}^2$, and the one-time discharge volume was 78 271 m^3 . ③ Based on flow velocity, sediment depth, and hazard range, three danger zones were identified (high, medium, and low). The area on the western side of the alluvial fan, with higher elevation, was classified as a low-risk zone, accounting for approximately 10% of the fan area. The central area and the area from the edge of the fan to the road were classified as medium-risk zones, comprising 62% of the total area. The southeastern and southwestern areas of the alluvial fan were high-risk zones, accounting for 28% of the area. [Conclusion] The “8·11” Jiwozi flash flood and debris flow in 2023 was a typical low-frequency flash flood and debris flow disaster triggered by extreme short-duration heavy rainfall. The FLO-2D model effectively simulates the movement and deposition processes of the debris flow and determines the hazardous areas.

Keywords: low-frequency debris flow; numerical simulation; hazard zoning; Jiwozi flash flood and debris flow in Qinling Mountains

近年来,由于全球气候变化的影响,极端暴雨事件明显增多,极端强降雨会导致土壤迅速饱和,山区河流水位急剧上升,增加山体滑坡的风险,在被人们所忽视的一些山区暴发极低频泥石流。极低频泥石流具有极强的隐蔽性、群发性、突发性等特点,一旦暴发,具有极强的破坏性,对下游沟口附近的居民和建筑物造成巨大损失。近年来,在山区由降雨引发的极低频泥石流严重灾害多次发生。如 2013 年 8 月 6 日,九寨沟县香扎沟暴发百年未遇大规模泥石流,冲毁便桥 12 座,受损房屋达 30 多间;2017 年 8 月 3 日下午 5 点,西藏波密县暴发 70 a 一遇泥石流,冲毁 30 余户房屋,导致 20 人受伤;2022 年 7 月 12 日 5 时许,受突发强降雨影响,四川省平武县暴发山洪泥石流,造成 3 人死亡,15 人失联。因此对极端降雨事件导致极低频泥石流灾害的研究已成为相关地区防灾减灾工作的重中之重。2023 年 8 月 11 日 16:00,受突发暴雨的影响,西安市长安区滦镇街道喂子坪村鸡窝子组蒿沟暴发山洪泥石流。山洪泥石流沿着沟道从上游倾泻而下,在下游冲刷出一条长约 500 m、最宽处约 60 m 的喇叭状河沟。此次泥石流来势快冲击力强,冲毁多处民房,导致 210 国道线路中断,最后冲入沱河,在河道形成大量堆积,共造成 25 人死亡、2 人失联,直接经济损失约 1 560 万元。暴发该山洪泥石流的蒿沟位于秦岭北麓山区,山高坡陡,植被茂密,在此之前约 100 a 未发生过泥石流灾害。

由于极低频泥石流隐蔽性和复杂性,导致其难以监

测和预警,国内外学者针对此类泥石流开展了系统研究。关于低频泥石流形成机制和运动特征方面,提出了松散物质物源特征和降雨特征对低频泥石流形成的影响程度,并发现极低频泥石流在运动方面具有极强的侵蚀特征,通过沟道侵蚀放大泥石流流量^[1]。如 Tian 等^[2]对 2014 年四川省丹巴县泥石流灾害进行深入研究,发现土壤质量、地震、干湿循环及冻融作用是主要控制因素,而高频小雨通过影响土壤特性和体积,触发了泥石流;严炎等^[3]研究了四川省汶川县簇头沟泥石流,指出汶川地震后沟道中松散物质和极端降雨是主要诱因,该泥石流具有过渡性质,冲击力极大,形成了泥石流—堰塞湖—溃决洪水的灾害链;史继帅等^[4]通过实地考察发现黑西洛沟“8·31”泥石流运动中存在两级平台,起到淤积、分选、流通的作用;Liu 等^[5]通过实地调查、航道测量、小时级降雨记录以及遥感图像等手段,提出了黑水流域的大规模极低频泥石流是由局部暴雨触发,且具有极强的侵蚀和搬运能力;曲瑞等^[6]通过对天水大沟泥石流独特的特征分析,提出了地震活动、地形条件和丰富的物源储备共同孕育该泥石流。通过这些特征分析,可以看出极低频泥石流的发生与特定的物质和降雨特征密切相关,极端强降雨是诱发该类型泥石流的主要因素,松散物质可以通过形成的洪流侵蚀沟道,放大泥石流流量。在泥石流危险性评价研究方面,提出了基于流速、流深、降雨频率等影响因素的评价技术,并基于概率分布和动能原理进行泥石流危险性分区。如,马鹏辉等^[7]以

小流域降雨—径流计算模型计算了不同频率下铜鹅沟泥石流峰值流量和单次泥石流过程总量,采用刘希林^[8]提出的沟谷泥石流危险度计算公式对铜鹅沟泥石流进行了危险性评估;Lee 等^[9]利用地理信息系统(GIS)和雷达(LiDAR)技术,对首尔 Bukhansan 国家公园内的泥石流灾害风险进行了定量分析,该研究强调了在风险评估过程中考虑经济价值的重要性,指出了风险分析的准确性依赖于概率方程的精确性、分析组件的综合考量,以及所依赖数据的可用性和质量;随着计算机和数值模型的发展,数值模拟技术被广泛应用到泥石流危险性评价,水动力模拟软件 FLO-2D 已经成熟运用于山洪泥石流的相关研究,并在山洪泥石流危险评价方面取得了良好效果,常鸣等^[10]以一沟泥石流为研究对象通过分析不同降雨频率下(5 a, 20 a, 50 a, 100 a, 200 a)的泥石流暴发强度及周期,采用 FLO-2D 数值模拟方法开展危险性评价,经验证模拟精度较高,可为危险范围内重点设施的监测预警提供科学依据。

综上所述,学者们已从多个方向对于不同类型的低频泥石流特征和危险性进行了研究,提出了该类型泥石流的主要影响因素和评价方法。但是对于在极端降雨下单沟小流域低频泥石流运动情况的剖析,依然可以提升对低频泥石流形成机制的认识,为低频泥石流风险防控提供科学参考。本文基于 2023 年“8·11”鸡窝子山洪泥石流的详细野外工程地质调查与分析,选用高精度 DEM 数据及地调数据,利用 FLO-2D 二维模型对由强降雨引发的山区小流域低频泥石流进行研究,模拟泥石流的暴发过程,再现该泥石流的沉积深度、流动速度和影响区域,探索低频泥石流的特征及成因机制。最后对 2023 年“8·11”鸡窝子山洪泥石流的危险性进行分析,为发育在秦岭山区的这类低频泥石流的防灾减灾工作提供参考。

1 研究区地质背景

研究区位于陕西省西安市长安区滦镇街道喂子坪村鸡窝子组,在西安市正南方向约 43 km 处。本次发生山洪泥石流灾害的蒿沟为单沟流域,沟口地理坐标为 108°49′43″E, 33°52′06″N, 210 国道横过泥石流沟出口,沔河在沟口侧 210 国道下部由北到南流向。由于山区地形条件,居民点和生产活动集中在下游冲积扇区域,紧邻公路和河流开有多家农家乐。

1.1 地形地貌

蒿沟位于沔峪口以上 22 km 处,为沔峪河左岸一级支流,全长 2.6 km,流域面积 1.2 km²。研究区属于秦岭的核心区,位于秦岭山脉北麓中段。区域内

海拔约 1 572~2 607 m,属中高山地貌,相对高差达 1 035 m;地形总体上属深切构造侵蚀地形,纵向坡度和两侧边坡坡度较陡;沟道狭窄,整体呈 V 形,沟域形态类似树叶形状,为雨水的快速汇流提供了地形条件。由于较陡的地形条件,易形成强烈的土壤侵蚀、崩塌、滑坡等地质灾害,为泥石流松散固体物源汇集提供了有利条件。

1.2 气象与水文

研究区属于半湿润大陆性季风气候,多年平均气温为 14.1 ℃,年降水量在 800 mm 以上,降水年际变化大,季节分配不均,主要集中在 8—9 月,雨季降水量占全年 70% 以上,局地多暴雨出现^[11]。蒿沟沟道内径流量较小,泥石流暴发的水源条件主要为暴雨作用下沟谷中产生的短时洪水。

1.3 地质构造与地层岩性

研究区处于秦岭北麓造山带,地质构造复杂,断层纵横交错,裂隙节理发育。长期的构造活动导致秦岭造山带北缘出现明显的挤压变形,形成呈东西向延伸挤压构造带,构造形迹以断层、挤压片理化带的形式表现出来,岩体风化作用强烈,整体结构疏松。研究区出露地层岩性为太古界古老的花岗岩、片麻岩及第四系沉积物(卵石、砾石、粉质黏土),蒿沟流域内的地层主要为岩层且花岗岩分布较多,第四系沉积物分布于表层和下游堆积区。地下水类型为裂隙水,花岗岩和片麻岩具有较强的风化性,容易形成大量的颗粒状细土和砂砾物质,第四系沉积物包括了易于破碎和运移的碎屑岩和粉砂岩等松散沉积物,为泥石流的形成提供了物质基础。

2 泥石流发育特征

2.1 泥石流形成条件分析

低频泥石流暴发突然、速度快、持续时间短、破坏力强,其发生必须同时具备丰富的物源、陡峻的地形和丰富的水源等三大基本条件^[12],当物源条件和地形条件同时满足时,降雨则成为泥石流的激发因素和动力条件。

2.1.1 物源条件 结合现场调查和无人机勘察,查明崩滑型物源、侵蚀型物源是本次 2023 年“8·11”鸡窝子山洪泥石流的主要物源补给来源。调查发现蒿沟上游岸坡陡峻,上部基岩裸露(图 1a),沟道内堆积大量山崩碎屑物以及大体积块石,碎石粒径范围为 100~300 mm,块石大小不一;沟道两侧坡体较陡,植被覆盖差,由于沟道的切割,当坡脚遭到雨水的掏蚀作用时,会出现坍塌,在蒿沟两侧堆积成物源,这些物源在沟道受到冲刷,部分被冲向下游;根据现场调查,

侵蚀作用发生在自山洪泥石流启动后的整条沟道(图 1b),坡面物源多以浅表层侵蚀为主(图 1c),分布在长约 2 km 的整个流通区,沟道受到强烈下切掏蚀作用,带着巨大冲击力的山石滚落砸入沟谷,受到撞击的岩质沟道发生破坏(图 1d),沟道内受掏蚀作用下切约 0.3~2.0 m。



图 1 2023 年“8·11”鸡窝子山洪泥石流物源组成

Fig.1 Material of 2013 “8·11” Jiwozi flood-debris flow event

2.1.2 地形条件 受新构造运动的影响,嵩沟流域不断抬升,且切割较深,形成典型的中高山河谷(峡谷)区,沟谷狭窄整体呈 V 形,沟域形态类似树叶形状,能够迅速汇水。该流域面积为 1.2 km²,主沟呈北西—南东向,全长为 2.61 km,宽度约 12~45 m,流域内海拔最高点 2 584 m,最低点 1 572 m,高差达 1 012 m,平均纵坡降 388‰。按照泥石流在地形中的运动特征和沉积特征进行划分,分为汇流区、流通区、堆积区,具体划分如图 2 所示。

(1) 汇流区。流域内沟道上游为汇流区,海拔范围 2 295~2 584 m,坡度陡峻,沟床纵比降为 722.5‰,有几条不太明显的支沟交汇在海拔 2 295 m 平台,汇水面积约为 0.08 km²。该区地表水主要表现为强降雨作用下的快速汇集,为泥石流沟提供了重要的水力条件。

(2) 流通区。该段沟道长约 2 km,沟床宽约 15~30 m,区域流域面积约 0.92 km²,平均纵坡降比为 339‰,海拔主要在 1 617~2 295 m,沟道狭窄陡峭,存在两处较大的转弯,上游沟道纵坡降比为 413‰,中段存在一段坡度较缓的平台,下游沟道纵坡降比为 265‰。两侧的沟岸较为陡峭,坡度约 30°~45°,局部可达 60°。陡峭的 V 形沟岸(图 3a),加上长距离、大坡降的平直沟道,为沟道侵蚀提供了有利的地形条件,既有利于沟两侧的强风化松散物下滑和堆

积,更有利于山洪泥石流在沟道内高速运动,以最快的速度搬运、铲刮、运移沟道两侧及沟底堆积物^[13]。

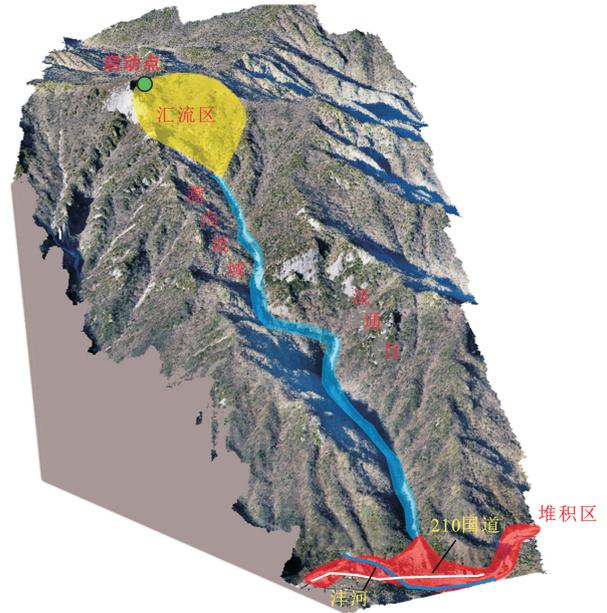


图 2 2023 年“8·11”鸡窝子山洪泥石流分区

Fig.2 Zoning of 2013 “8·11” Jiwozi flood-debris flow event

(3) 堆积区。堆积区分布于沟口与沔河交汇处,高程在 1 572~1 617 m,平均纵坡降为 225‰,面积约为 2.00×10⁴ m²(图 3c)。该区存在明显堆积扇,山洪泥石流在沟口即流通区与堆积区的交界处开始产生堆积,并向外扩散,冲毁房屋,破坏道路,剩余堆积物冲入沔河。堆积厚度为 2~6 m,后缘堆积物垂向层与层之间特征不明显,为混杂的土石块,磨圆度差,为典型的冲洪积堆积地貌区。区内人类活动较为集中,有道路、房屋等(图 3b,图 3d)。

2.1.3 降雨条件 降雨是导致 2023 年“8·11”鸡窝子山洪泥石流发生的主要原因,形成泥石流既需要足够的水量,还需要有较大的雨强,当降雨量达到一定界限后才能激发泥石流^[14]。西安市气象台 2023 年 8 月 6 日 20:18 升级发布暴雨橙色预警信号,2023 年 8 月 6—11 日,陕西秦岭北麓出现持续性降雨,8 月份降雨量为多年平均降雨量的 50%~82%。根据鸡窝子组附近雨量站 8 月 11 日当日降雨量数据,降雨过程主要集中在 11 日 14:00—17:00 时,最大 1 h 降雨量为 26 mm,最大 2 h 降雨量为 44.4 mm,最大 3 h 降雨量为 52 mm,当日下午时段累计降雨量为 56.9 mm,降雨量峰值出现在 16:00,经走访多位村民确定山洪泥石流在此时暴发(图 4)。历时短、强度高的集中降雨,致使大部土体、风化层含水量达到饱和状态,尤其是短历时强降雨所引发的山洪,对沟道上游的松散物质产生强大的铲刮侵蚀效应,增加了洪流的侵蚀能力,导致该流域暴发山洪泥石流灾害。



图 3 2023 年“8·11”鸡窝子山洪泥石流沟下游

Fig.3 Downstream of 2023 “8·11” Jiwozi flood-debris flow event

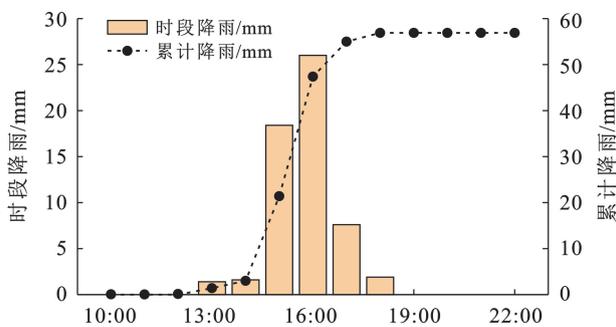


图 4 山洪泥石流灾害点附近雨量站 8 月 11 日降雨过程

Fig.4 Rainfall process at rainfall gauge stations near flood-debris flow site on August 11

2.2 泥石流运动过程分析

2023 年 8 月 6—11 日长时间的降雨过程对上游岩体冲刷作用显著,11 日的强降雨使沟道上游山体垮塌,蒿沟上游高山环抱呈漏斗状地形,强降雨在此处迅速汇集并带动物源,泥石流启动。启动后泥石流在狭窄的沟道中流动,形成了类似于消防水管中高速水流的效应^[15]。流通区沟谷呈 V 形,该段沟道冲刷特征明显,在海拔约 1 617~2 295 m 的沟段进行坡面侵蚀,并在流通区沟道内侵蚀下切。在海拔约 1 786~2 295 m 的部分沟段岸坡较陡,泥石流冲刷两岸坡脚导致岸坡垮塌,增大了泥石流的规模。在流通区中段存在两处较大的转弯,两段弯道之间是一段坡度较缓

的平台,起到淤积、分选、流通的作用。泥石流流过平台后进一步下切侧蚀,下游段沟道逐渐变宽,坡度放缓,泥石流流速减小。由于泥石流在冲出沟口前受到沟岸两侧限制,泥石流冲出沟口后呈辐射状在沟口散开,最终冲入泮河河道内,形成堆积扇。洪水裹挟碎石泥沙顺流而下,冲毁 2 户民房及其他建筑(约 800 m²),造成该路段 210 国道 3 处损毁,21 处轻微受损,3 处电力基础设施毁坏及一条 35 千伏线路故障,导致 900 户居民停电,55 个通信基站停机。综上分析,在整个泥石流启动和形成过程中,呈现出强降雨—山体崩塌—雨水汇流—形成山洪—下切侧蚀—泥石流形成—沟口堆积—堵塞河道等过程(图 5)。

3 基于 FLO-2D 山洪泥石流数值模拟

本文利用 FLO-2D 数值模拟软件,结合降雨量、地理数据和数字地形数据等多种参数,模拟泥石流流动速度、堆积深度和堆积范围等泥石流运动过程和状态。该软件基于非牛顿流体模型和中心有限差分法,运行时无需人工干预,计算结果具有较高的可靠性和准确性,FLO-2D 模型方程为:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = I \quad (1)$$

式中: t 为泥石流运动时间(s); x, y 为 x, y 轴方向距

离(m); h 为流体深度(m); I 为有效降雨强度(mm/h); u, v 为流体速度在 x, y 轴上的分量(m/s)。

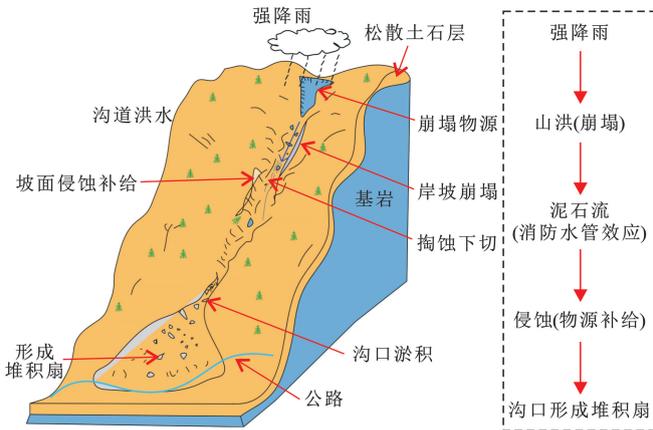


图 5 2023 年“8·11”鸡窝子山洪泥石流形成过程
Fig.5 Formation process of 2013 “8·11” Jiwozi flood-debris flow event

3.1 地形数据获取

本次模拟采用的地形数据为数字高程模型 DEM,通过无人机数据采集,并基于 PIX4D 处理,获取研究区高精度 DEM 和遥感影像。在 FLO-2D 中对研究区进行网格划分,网格大小为 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$,共 367 416 格位。

3.2 数值模拟参数选择

FLO-2D 数值模拟的主要参数包括地形、降雨、体积浓度、流体参数、曼宁系数以及模拟时间等。根据现场调查和前人研究成果对 2023 年“8·11”鸡窝子山洪泥石流模拟所需的参数进行赋值,FLO-2D 模拟参数详见表 1。

表 1 FLO-2D 数值模拟的主要参数

Table 1 Main parameters of FLO-2D numerical simulation

模拟参数项	数值
网格大小/m	5×5
曼宁系数 N	0.2(沟床),0.25(堆积区)
模拟时间/h	1
洪峰流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	54.9
体积浓度(C_v)	0.6
层流阻滞系数 K	2 280
黏滞系数相关参数	$\alpha_1 = 0.029\ 5, \beta_1 = 15.1$
屈服应力相关参数	$\alpha_2 = 0.003\ 6, \beta_2 = 12.6$

(1) 体积浓度。通常而言,直接在泥石流暴发地点采集样本并据此计算的体积浓度是最为准确的,但在野外勘查时救援队及当地政府对堆积区域进行了恢复,所以对 2023 年“8·11”鸡窝子山洪泥石流体积浓度取值主要参考 FLO-2D 软件使用手册,据现场调

查整个沟道区域内泥石流粒径较大的砾石含量较多,孔隙比较大,确定泥石流体积浓度取值为 0.6。

(2) 层阻系数。根据现场调查,蒿沟小流域沟底为大石,沟道内植被稀疏,结合 FLO-2D 使用手册和对秦岭北麓山脉已有的研究文献,最终确定 2023 年“8·11”鸡窝子山洪泥石流的层流阻滞系数 $K = 2\ 280$ 。

(3) 宾汉屈服应力以及宾汉黏滞系数。宾汉屈服应力表示在泥石流运动过程中,流体开始流动所需的最小应力。当施加在泥石流上的剪切应力超过宾汉屈服应力时,泥石流才会开始流动。宾汉流体的黏滞系数表示在泥石流开始流动后,流体流动的速率与应力施加的关系。流变参数公式:

$$\mu = \alpha_1 e^{\beta_1 C_v} \quad (2)$$

$$\tau_y = \alpha_2 e^{\beta_2 C_v} \quad (3)$$

式中: μ 为黏滞系数; τ_y 为屈服应力; α_1, β_1 和 α_2, β_2 一般通过经验取值,合理地设定宾汉屈服应力和宾汉黏滞系数以准确模拟泥石流在不同地形条件下的流动行为和冲击力。本次模拟的流变参数赋值为: $\alpha_1 = 0.029\ 5, \alpha_2 = 0.003\ 6, \beta_1 = 15.1, \beta_2 = 12.6$ 。

(4) 曼宁系数。曼宁系数是用于描述流体在河道、沟渠或开阔水域中流动时受到阻力的系数,用于计算水流速度、水深和水流的阻力损失等。曼宁系数的大小取决于流体和管道的摩擦阻力、流体的黏性、管道的形状和表面粗糙度等因素。因此需要对每个格网设置单独的曼宁系数以表征流体经过不同阻力介质时的流变特征。本研究根据王裕宜^[16]推导的不同阻力介质状态下的求取曼宁系数的公式(4)获取,其计算公式为:

$$n_c = 0.33 R_{ns}^{-0.51} \exp(0.34 R_{ns}^{0.17}) \ln h \quad (4)$$

式中: n_c 为曼宁系数; h 为泥深(m); R_{ns} 为泥沙比。

根据 FLO-2D 使用手册中建议的参数取值和综合野外调查,全流域沟道曼宁系数选择 0.2,沟口至堆积扇曼宁系数选择 0.25。

(5) 泥石流过程模拟时间的确定。通过对研究区当地居民的调查访问,得知 2023 年“8·11”鸡窝子山洪泥石流暴发于 2023 年 8 月 11 日 16:00,从洪水集聚到山洪泥石流启动后侵蚀沟道冲向下游,前后历时大约 1 h,由此将模拟时间设定 1 h。

3.3 泥石流启动点选取

通过现场调查和收集数据的比较,2023 年“8·11”鸡窝子山洪泥石流启动点位于蒿沟流域上游汇流区,该区域地势较高且汇水面积大,水动力条件充足。

3.4 流量过程线的确定

模拟泥石流运动的速度和深度与流量过程线有着紧密的联系,通常流量过程线是根据预先设定的降雨强度来进行计算的。本次模拟是反演 2023 年“8·11”鸡窝子山洪泥石流,据应急管理部消息,8 月 11 日 8:00—18:00,陕西省西安市长安局地出现大暴雨,鸡窝子组在事发当天下午有短时暴雨,山洪泥石流暴发时间在当天 16:00 左右,此时出现最大 1 h 雨量为 26 mm(图 4),通过设计的降雨工况计算其清水流量过程线,根据水文手册中的洪峰流量计算公式(5)确定洪峰流量。

$$Q_B = 0.278\varphi \frac{s_p}{\tau_n} F \quad (5)$$

式中: Q_B 为洪峰流量值; φ 为流域内的径流系数; F 为蒿沟面积; s_p 为小时降雨量最大值; τ_n 为泥石流的汇流所需时间; n 为暴雨公式指数。

根据上述公式,求得 2023 年“8·11”鸡窝子山洪泥石流灾害时的洪水洪峰流量为 $54.9 \text{ m}^3/\text{s}$,本次研究区位于秦岭北麓,与川西地区距离较近,地质、地貌、气候均有相似性,流量过程曲线计算选用《四川省中小流域暴雨洪水计算手册》中川西地区水文模型^[17],此计算手册中的参数在本区降雨径流分析中具有良好的适用性,在具体应用时需要结合实际情况进行修正和调整。进行泥石流模拟时,清水流量乘以放大系数 BF[BF=1/(1- C_v)=2.50],得到鸡窝子山洪泥石流流量过程曲线(图 6)。

4 模拟结果及分析

4.1 泥石流流深

利用 FLO-2D 模型和 ArcGIS 的矢量标绘工具,

a 流深分布



b 流速分布



图 7 鸡窝子山洪泥石流流深和流速分布

Fig.7 Distribution of flow depth and velocity of Jiwozi flood-debris flow

4.2 泥石流流速

从山洪泥石流流速分布(图 7b)可以看出,山洪泥石流自高海拔处启动后,保持着较高的流速,在上游陡坡段速度逐渐增大,在拐弯处速度达到最大,该

测量得到本次模拟的山洪泥石流冲出长度为 $2\,639 \text{ m}$,山洪泥石流覆盖总面积为 $9.4 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。山洪泥石流的一次性冲出量按照堆积扇栅格面积与山洪泥石流的最终深度来计算,该山洪泥石流的一次性冲出量为 $78\,271 \text{ m}^3$ 。

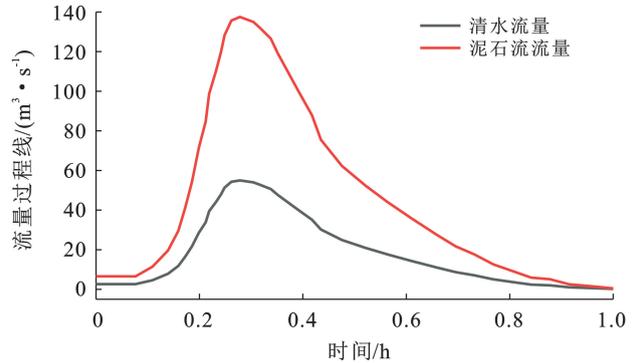


图 6 鸡窝子山洪泥石流流量概化过程线

Fig.6 General process line of Jiwozi flood-debris flow discharge

从山洪泥石流流深分布(图 7a)可以看出,在此次降雨工况下大部分沟道中堆积物被冲到下游堆积区。整个流通区以侵蚀为主,泥位较浅,堆积深度约为 $0.05 \sim 2 \text{ m}$;山洪泥石流冲出沟口形成堆积扇,堆积深度约为 $2 \sim 5.63 \text{ m}$,泥位最高处出现在地势较低的居民区以及最东侧的沔河河道。在蒿沟沟道内,泥位较大处多出现在沟道窄处和沟道拐角处,前者由于断面收缩导致泥位增加,后者由于弯道爬高效应^[18],山洪泥石流冲出沟口后泥位减小,而后局部增大,这是由于山洪泥石流在冲出沟口前受到沟岸两侧限制,横断面变大,而当冲出沟口后呈辐射状在沟口前散开,导致流体瞬间扩散,形成堆积扇,泥位达到最大。模拟出山洪泥石流淤埋深度最大为 5.63 m ,最小为 0.04 m 。

山洪泥石流的流速分布(图 7b)可以看出,山洪泥石流自高海拔处启动后,保持着较高的流速,在上游陡坡段速度逐渐增大,在拐弯处速度达到最大,该

流沟道内侧,向沟道两侧外延伸,沟道内侧的地形通常较为陡峭,水流在重力作用下加速,同时,沟道内侧的水流受到的摩擦力相对较小,这也有助于流速的增加。并结合山洪泥石流流深图(图 7a)看出在流速更快的区域,山洪泥石流的淤埋深度会相应地减少,这主要是由于地形的影响,地形越陡峭,山洪泥石流所具有的重力势能越大,所转化的动能越大,导致流动速度加快。与此同时,随着流速的增加,山洪泥石流中的固体物质会更多地参与到山洪泥石流的活动,从而使山洪泥石流的淤埋深度有所减少^[19]。表现在山洪泥石流在沟道转弯处聚集和蓄能,流速由最大值 7.4 m/s 降到 3~6 m/s,堆积深度由 1.16~2.27 m 增加到 2.27~3.40 m。山洪泥石流冲出沟口形成堆积扇时速度消散而泥深最大。图 7b 显示速度分布呈现出不连续性,这一现象主要是由山洪泥石流沟的地形特征所决定的。该山洪泥石流沟道宽度不一,坡降也各有差异,这些因素共同影响了速度的分布。在沟道横断面较窄的区域,山洪泥石流的断面面积减小,导致流速的增加。而在坡降较大的区域,重力势能转化为动能的效率更高,因此流速也相应增大,在弯道之前高势能流体在大比降的平直沟道下滑,流速达到最大;相反,当沟道断面变宽且坡降减小时,流速则会降低。此外,由于沟岸两侧的限制和摩擦阻力,山洪泥石流中心流速通常快于两侧。当山洪泥石流冲出沟口,沟口限制的消失使得泥石流开始向两侧扩散,堆积区较开阔,扩散面积大,形成一个速度较小的扇形区域。

4.3 泥石流危险性分区

通过 FLO-2D 模拟还原了 2023 年“8·11”鸡窝子山洪泥石流运动堆积过程,得到山洪泥石流流速、堆积深度和影响范围,对于山洪泥石流危险性分级指标,不同学者提出了不同的指标和方法。如,常鸣^[20]依据泥深的大小和泥深与流动速度的乘积大小来界定泥石流的危险强度,丛凯等^[21]认为泥石流对建筑物的破坏力主要取决于其冲击力和堆积厚度,O'brien^[22]综合考虑泥石流影响强度与发生频率来确定泥石流的危险性,这种方法被广泛使用。而本研究属于低频泥石流,历史降雨频率缺少研究价值,所以通过模拟实际降雨频率对 2023 年“8·11”鸡窝子山洪泥石流的危险性进行评价,此次泥石流造成的破坏主要是由携带的固体物质冲毁房屋道路,以及洪流对沿岸的冲击和侵蚀,因此参考曹鹏^[23]提出的泥石流强度的危险性划分标准,根据泥石流的堆积深度及堆积深度与流速的乘积进行山洪泥石流危险程度的界定(表 2),将泥石流堆积区划分为高、中、低 3 个等级的危险区域。

表 2 山洪泥石流危险性等级划分

Table 2 Hazard classification of flood-debris flow

危险性等级	泥深/m	关系式	泥深与流速的乘积/ ($m^2 \cdot s$)
高	$h \geq 2.5$	OR	$vh \geq 2.5$
中	$0.5 \leq h < 2.5$	AND	$0.5 \leq vh < 2.5$
低	$0.0 \leq h < 0.5$	AND	$vh < 0.5$

根据 2023 年“8·11”鸡窝子山洪泥石流危险性分布图(图 8),受顺流冲击而下的山洪泥石流作用,整个流域沟道几乎全部为高危险区,沿沟道中心向两侧危险性降低,沟道两侧极小面积为中危险区,沟道内常年无人出入所以不在研究范围。而沟口堆积扇覆盖了人类活动区,受山洪泥石流特征和地形影响,山洪泥石流在沟口散开形成堆积扇。以不同危险区面积除以堆积扇总面积,得出山洪泥石流堆积扇各类危险面积所占比例。堆积扇西侧区域地势较高为低危险区,占堆积扇面积约 10%。中间区域和堆积边缘至公路区域为中危险区,该类面积占 62%,该类型所占堆积扇面积较大,主要冲毁 210 国道一处。堆积扇东南和西南区域为高危险区,该类面积占 28%,占人口聚集区比例高达 62.3%,冲毁区内民房和两处公路,该危险类型主要分布在沟道两侧及堆积区平坦的地方,因居民房屋和道路及分布在该类型中,极易受到泥石流的破坏,需要重点防护。



图 8 2023 年“8·11”鸡窝子山洪泥石流危险性分区

Fig.8 Hazard zoning of 2023 “8·11” Jiwozi flood-debris flow event

4.4 模拟结果验证

将模拟得出的堆积扇面积和分布进行统计分析,得到的堆积扇范围与实测和遥感解译进行对比,计算结果详见表 3。堆积扇范围的误差比率约 4%,模拟与实际淹没区域基本重叠(图 9),模拟结果较为准

确;山洪泥石流的最大流速出现在河道中游,到达下游后流速逐渐减小,这一结果与物理运动的能量储存、启动、能量消耗过程相一致^[24],当山洪泥石流流速较高时,沉积量较低,当流速和冲击力从下游流向上游出口处减小时,开始逐渐沉积,在出口处达到最大深度,与实际山洪泥石流的沉积过程有很好的对应。结果显示,从上游到出口的横截面上,最大沉积深度达

到 5.54 m,堆积扇区域最终沉积深度在 2~5.6 m,对位于山洪泥石流沟下游和出口的村庄、道路和其他基础设施造成毁灭性破坏。据村民反映,暴发的山洪泥石流冲走的 2 处民房位于沟口右侧,冲击下来的泥石流导致 210 国道 3 处破坏。模拟结果与 2023 年“8·11”鸡窝子山洪泥石流灾害实际情况相符合,说明本次模拟结果的可靠性。

表 3 模拟结果与实际结果对照

Table 3 Comparison of simulation results with actual measured results

堆积区最大冲出距离/m		横向最大宽度/m		堆积面积/ 10^4 m^2			
模拟值	实测值	模拟值	实测值	模拟值	实测值	重叠区	误差比率/%
177	177	841	859	1.93	2.01	1.91	4

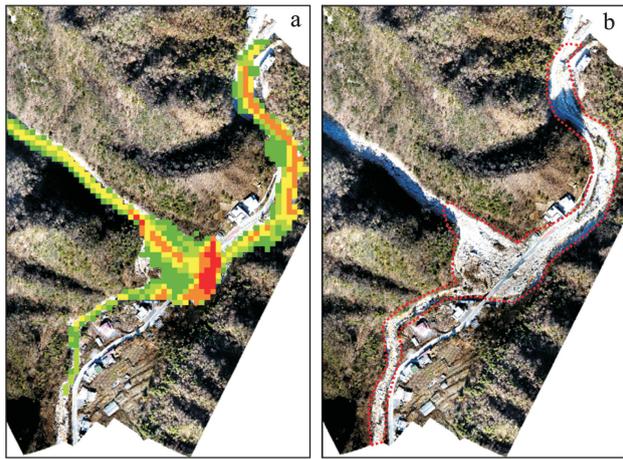


图 9 模拟堆积范围(a)与实际堆积范围对比(b)

Fig.9 Comparison of simulating deposited area(a) with actual deposited area(b)

5 讨论

低频山洪泥石流由于其隐蔽性和暴发的突然性,是山洪泥石流防控的重点对象。以往的研究针对频发型泥石流研究较多,尤其是在数值模拟和预测预报方面取得了较为丰富的研究成果。本研究通过对 2023 年“8·11”鸡窝子山洪泥石流事件的分析,揭示了极端降雨诱发低频泥石流的特征及其危险性。但是,针对低频山洪泥石流的研究依然存在不足。在数值模拟方面,FLO-2D 数值模拟方法在模拟泥石流运动和沉积过程方面具有显著优势,但数据获取受限于技术条件和成本,导致在数值模拟过程中,多数参数均是根据野外调查或者经验参数进行估算,无法真实再现山洪泥石流的过程;其次,FLO-2D 模型的准确性受限于输入参数的准确性,包括泥石流的体积浓度、层流阻滞系数和宾汉屈服应力等^[25],这些参数的确定往往需要复杂的现场调查和试验;此外,模型可

能难以准确捕捉泥石流在非常不规则地形中的行为,如急转弯、陡坡和狭窄沟谷等,模型的计算能力也可能限制其在大规模区域或复杂地质条件下的应用^[26]。近几十年来 FLO-2D 已广泛运用于泥石流模拟,拥有非常成熟的参数体系,地形数据作为泥石流数值模拟的基础数据,而在进行野外调查时,当地救援施工队对已完成了对冲毁路段的抢修和对堵塞河道的清理,为了使模拟过程和结果更加真实可靠,整合与分析历史遥感影像和数字高程模型(DEM)数据,在进行模拟之前,对这些让地形产生局部变形的特征地形点根据历史地形进行了修正,使地形数据与真实地形大致吻合,但仍难以避免误差。本文对 2023 年“8·11”鸡窝子山洪泥石流暴发过程进行模拟,山洪泥石流流量由暴发当日降雨量计算,忽视了山洪泥石流暴发前由持续降雨造成的径流量变化,模拟流量偏小是造成模拟误差的主要来源。

实现低频泥石流的预测是当下研究的重要课题,由于低频泥石流形成机制的复杂性,国内外对低频泥石流的预测手段较为匮乏。低频泥石流主要是由于极端强降雨诱发,但是针对潜在泥石流沟道的判识依然没有较为成熟的方法,导致往往忽视了潜在泥石流沟暴发泥石流的可能性,且人类活动多集中在这类沟道的沟口,这也是导致低频泥石流危害较大的原因。倪化勇等^[27]以茶园沟为例,对历史灾害数据进行累加生成,建立灰色模型,从而有效预测未来灾害的发生时间和规模,但模型没有充分考虑降水入渗、水文汇流和蒸散发等动态因素,其普遍适用性需要进一步验证和调整;深度学习技术在泥石流预测领域的运用较为广泛,并基于人工神经网络、机器学习等方法开展了泥石流沟道判识和评价研究^[28]。但是泥石流的形成受到较多因素的影响,尤其是低频泥石流的判识

影响因素选择是影响判识效果的关键^[29]。因此,针对低频山洪泥石流的预警是当前泥石流防控的重点,在实现低频山洪泥石流精准预警之前,基于数值模拟技术开展低频山洪泥石流危险评价,指导土地利用规划是有效防控低频山洪泥石流的主要手段。

目前的研究方法在泥石流预测方面取得了有效进展,但每种方法都不可避免地存在局限性。值得注意的是,无论采用哪种预测技术,对降雨数据的精确性和地形特征的详细程度都有很高的要求。因此,准确判断出基于地形和气候条件的潜在泥石流易发流域,加强这些区域的防护措施和预警系统,对于预防极端天气引发的灾害损失极为关键^[30]。未来的研究应当着眼于制定全面的长期监测计划,以便利用现有数据并结合未来数据的积累,不断改进模型和预测方法,提高预测的准确性和实用性。

6 结论

(1) 低频山洪泥石流的触发机制主要由于极端天气事件的突发性、地区特有的地质条件以及显著的地形特征。据野外调查,鸡窝子组蒿沟内存在大量崩滑型物源和侵蚀型物源作为物源供应;沟域内纵向坡度和两侧边坡坡度较陡,并存在跌水和急弯等特征,为泥石流暴发提供了地形条件;持续性强降雨使土体饱和,极强的小时降雨量,为山洪泥石流暴发提供了水动力条件。

(2) 低频山洪泥石流的运动特征表现在较大的流速、巨大的能量释放、显著的侵蚀与堆积作用。2023年“8·11”鸡窝子山洪泥石流事件的形成过程为地表径流在强降雨作用下迅速汇集,形成沟道洪水;沟道内的松散物质被山洪侵蚀,沿沟道下滑,狭窄沟道和陡峭地形导致山洪泥石流流速和动能在短时间内显著增加,形成类似“消防水管”的高速流动效应;当山洪泥石流进入下游沟道,由于沟道宽度增加和坡度减缓,流速迅速降低。携带的泥沙、石块和树干因动能减少而迅速沉积,最终在沟口泮河河道内形成扇形堆积体。

(3) FLO-2D 有效地模拟了泥石流的运动和沉积过程,并确定泥石流的危险范围。模拟结果显示2023年“8·11”鸡窝子山洪泥石流的堆积形态为典型的扇形堆积,堆积扇面积为 $1.93 \times 10^4 \text{ m}^2$,最大流速为 7.43 m/s ,最大沉积深度为 5.63 m ,一次性冲出量为 $78\,271 \text{ m}^3$ 。并依据泥石流流深和流速将堆积扇危险性分为重度、中度和轻度危险区,中高危险区面积占堆积扇面积的比例之和达 90%,与实测危险范围基本吻合。

参考文献 (References)

- [1] Iverson R M. Scaling and design of landslide and debris-flow experiments [J]. *Geomorphology*, 2015,244:9-20.
- [2] Tian Shanfeng, Hu Guisheng, Chen Ningsheng, et al. Debris flow prediction with machine learning: Smart management of urban systems and infrastructures [J]. *Neural Computing and Applications*, 2021, 33 (22): 15769-15779.
- [3] 严炎,葛永刚,张建强,等.四川省汶川县簇头沟“7·10”泥石流灾害成因与特征分析[J].*灾害学*,2014,29(3):229-234.
Yan Yan, Ge Yonggang, Zhang Jianqiang, et al. Research on the debris flow hazards in cutou gully, Wenchuan county on July 10, 2013 [J]. *Journal of Catastrophology*, 2014,29(3):229-234.
- [4] 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 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):52-60.
- [5] Liu Mei, Deng Mingfeng, Chen Ningsheng, et al. Analysis of the low-frequency debris flow disaster induced by a local rainstorm on 12 July 2022, in Pingwu County, China [J]. *Remote Sensing*, 2024,16(9):1547.
- [6] 曲瑞,李仲先,何政伟,等.甘肃天水大沟短时强降雨诱发低频泥石流特征及成因[J].*山地学报*,2018,36(3):488-495.
Qu Rui, Li Zhongxian, He Zhengwei, et al. Characteristics and causes of low frequency debris flow induced by heavy rainfall in Dagou village, Tianshui City, Gansu Province, China [J]. *Mountain Research*, 2018,36(3):488-495.
- [7] 马鹏辉,彭建兵,朱兴华,等.陕西蓝田铜鹅沟泥石流发育特征及危险性分析[J].*中国地质灾害与防治学报*,2017,28(1):75-81.
Ma Penghui, Peng Jianbing, Zhu Xinghua, et al. Characteristics and risk analysis of debris flow in Tonge gully in Lantian County, Shaanxi Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2017,28(1):75-81.
- [8] 刘希林.沟谷泥石流危险度计算公式的由来及其应用实例[J].*防灾减灾工程学报*,2010,30(3):241-245.
Liu Xilin. Quantitative assessment on site-specific debris flow hazard and application [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2010, 30 (3):

- 241-245.
- [9] Lee Miran, Cho J M, Yoon H S. Quantitative risk analysis of debris flow disasters in urban area using geographic information system [J]. Sensors and Materials, 2020,32(12):4573.
- [10] 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.
- [11] 袁磊, 马涛, 韩双宝, 等. 秦岭北麓地下水水文地球化学演化规律及模式 [J]. 长江科学院院报, 2024, 41(4):62-69.
Yuan Lei, Ma Tao, Han Shuangbao, et al. Regularities and modes of hydrogeochemical evolution of groundwater in the north piedmont of Qinling Mountains [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2024, 41(4):62-69.
- [12] 王峻鑫, 赵家绪. 西宁市郭家沟大崖沟泥石流成因与防治 [J]. 青海环境, 2003, 13(3):123-125.
Wang Junxin, Zhao Jiayu. Causes of the mud-rock flow and its treatment in Guojiagou and Dayagou, Xining, Qinghai [J]. Journal of Qinghai Environment, 2003, 13(3):123-125.
- [13] 刘关雄, 张杰, 杨志全, 等. 雷布大箐“9·17”泥石流灾害发育特征及运动过程模拟分析 [J]. 水力发电, 2023, 49(9):29-34.
Liu Guanxiong, Zhang Jie, Yang Zhiquan, et al. Simulation analysis on the development characteristics and movement process of “9·17” debris flow disaster in Leibudaqing, Yuanmou [J]. Water Power, 2023, 49(9):29-34.
- [14] 黄河. 基于 HEC-RAS 的山洪危险性评价 [J]. 山西建筑, 2024, 50(7):185-187.
Huang He. Flash flood risk assessment based on HEC-RAS [J]. Shanxi Architecture, 2024, 50(7):185-187.
- [15] 屈永平, 肖进. 急陡沟道泥石流的消防管效应形成机制研究 [J]. 水力发电, 2020, 46(8):38-42.
Qu Yongping, Xiao Jin. Study on formation mechanism of fire hose effect of urgent steep-channel debris flows [J]. Water Power, 2020, 46(8):38-42.
- [16] 王裕宜.《泥石流流体的流变特性与运移特征》出版 [J]. 山地学报, 2015, 33(4):472.
Wang Yuyi. The “Rheological Characteristics and Migration Characteristics of Debris Flow” were published [J]. Mountain Research, 2015, 33(4):472.
- [17] 四川省水利电力厅. 四川省中小流域暴雨洪水计算手册: 水文手册 [M]. 四川 成都: 四川省水利电力厅, 1984.
Department of Water Resources and Electric Power of Sichuan Province. Manual of Rainstorm Flood Calculation: Manual of Hydrology in Medium and Small Watersheds of Sichuan Province [M]. Chengdu, Sichuan: Department of Water Resources and Electric Power of Sichuan Province, 1984.
- [18] 向兵, 谢万银, 苏玉杰, 等. 川西公路低频泥石流发育特征与防治综述 [J]. 山西建筑, 2023, 49(17):1-8.
Xiang Bing, Xie Wanyin, Su Yujie, et al. Summary of development characteristics and prevention models of low-frequency debris flow on the traffic arteries in West Sichuan [J]. Shanxi Architecture, 2023, 49(17):1-8.
- [19] 庄建琦, 崔鹏, 郭晓军. 基于水文模型泥石流汇流预测: 以蒋家沟一级支沟大凹子沟泥石流为例 [J]. 灾害学, 2013, 28(2):55-59.
Zhuang Jianqi, Cui Peng, Guo Xiaojun. The runoff process of debris flow calculated based on hydrological model: A case study on dawazi debris flow gully [J]. Journal of Catastrophology, 2013, 28(2):55-59.
- [20] 常鸣. 基于遥感及数值模拟的强震区泥石流定量风险评估研究 [D]. 四川 成都: 成都理工大学, 2014.
Chang Ming. Research on quantitative risk assessment of debris flow in strong earthquake area based on remote sensing and numerical simulation [D]. Chengdu, Sichuan: Chengdu University of Technology, 2014.
- [21] 丛凯, 李瑞冬, 毕远宏. 基于 FLO-2D 模型的泥石流治理工程效益评价 [J]. 西北地质, 2019, 52(3):209-216.
Cong Kai, Li Ruidong, Bi Yuanhong. Benefit evaluation of debris flow control project based on FLO-2D model [J]. Northwest Geology, 2019, 52(3):209-216.
- [22] O'Brien J S. FLO-2D Reference manual version 2009 [R]. FLO-2D Software Inc, Breckenridge, CO, USA, 2009.
- [23] 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.
- [24] 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 and Engineering Geology, 2023, 50(5):134-145.

- 壤有机碳库特征及其影响因素综述[J].中国水土保持科学(中英文),2022,20(3):142-150.
- Qiu Sihui, Lin Shaoying, Wang Weiqi. Characteristics of soil organic carbon pool at different altitude gradients in Eastern China and its influencing factors: A review [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2022,20(3):142-150.
- [20] 赵玉国,张甘霖,龚子同,等.海南岛不同地质背景下的土壤类型、质量特征和作物适宜性[J].第四纪研究,2005,25(3):389-395.
- Zhao Yuguo, Zhang Ganlin, Gong Zitong, et al. Soil type, soil quality and crop suitability of soils developed from different geology environments in Hainan Island [J]. Quaternary Sciences, 2005,25(3):389-395.
- [21] 刘鹏举,夏智武,唐小明.基于 DEM 和坡面特征的坡位生成方法[J].北京林业大学学报,2016,38(2):68-73.
- Liu Pengju, Xia Zhiwu, Tang Xiaoming. Slope position extraction method based on DEM and slope features [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016,38(2):68-73.
- [22] O'Loughlin E M. Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis [J]. Water Resources Research, 1986,22(5):794-804.
- [23] Zhang Xiao, Liu Liangyun, Chen Xidong, et al. GLC-FC30: Global land-cover product with fine classification system at 30 m using time-series Landsat imagery [J]. Earth System Science Data, 2021,13(6):2753-2776.
- [24] 王晶,赵文武,刘月,等.植物功能性状对土壤保持的影响研究述评[J].生态学报,2019,39(9):3355-3364.
- Wang Jing, Zhao Wenwu, Liu Yue, et al. Effects of plant functional traits on soil conservation: A review [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(9):3355-3364.
- [25] 常海钦,付亚龙,林鑫,等.流域盆地化学风化强度空间分布及控制因素研究:以长江和珠江为例[J].地球科学进展,2019,34(1):93-102.
- Chang Haiqin, Fu Yalong, Lin Xin, et al. Spatial distribution and controlling factors of chemical weathering intensity in drainage basins: A case study in the Yangtze River basin and Pearl River basin [J]. Advances in Earth Science, 2019,34(1):93-102.
- [26] Breiman L. Statistical modeling: The two cultures (with comments and a rejoinder by the author) [J]. Statistical Science, 2001,16(3):216-218.
- [27] Molla A, Zhang Weiwei, Zuo Shudi, et al. A machine learning and geostatistical hybrid method to improve spatial prediction accuracy of soil potentially toxic elements [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2023,37(2):681-696.
- [28] Yang Qiyong, Zhang Fawang, Jiang Zhongcheng, et al. Relationship between soil depth and terrain attributes in karst region in Southwest China [J]. Journal of Soils and Sediments, 2014,14(9):1568-1576.
- [29] Moore I D, Grayson R B, Ladson A R. Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications [J]. Hydrological Processes, 1991,5(1):3-30.
- [30] 刘宝元,阎百兴,沈波,等.东北黑土区农地水土流失现状与综合治理对策[J].中国水土保持科学,2008,6(1):1-8.
- Liu Baoyuan, Yan Baixing, Shen Bo, et al. Current status and comprehensive control strategies of soil erosion for cultivated land in the Northeastern black soil area of China [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2008,6(1):1-8.

(上接第 157 页)

- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 倪化勇,吕学军,刘宇杰,等.低频泥石流特征及其预测初步探讨[J].工程地质学报,2007,15(5):612-620.
- Ni Huayong, Lv Xuejun, Liu Yujie, et al. Discussions on characteristics and prediction of debris flows with low occurrence frequency [J]. Journal of Engineering Geology, 2007,15(5):612-620.
- [28] Yokoya N, Yamanoi K, He Wei, et al. Breaking the limits of remote sensing by simulation and deep learning for flood and debris flow mapping [J]. Materials Science and Engineering, 2021,1051(1):48-55
- [29] Baggio T, Martini M, Bettella F, et al. Debris flow and debris flood hazard assessment in mountain catchments [J]. Catena, 2024,245:108338.
- [30] Stolle A, Langer M, Blöthe J H, et al. On predicting debris flows in arid mountain belts [J]. Global and Planetary Change, 2015,126:1-13.