

基于DEM数据预处理的小流域泥石流防治工程效果分析

渠敬凯, 杨为民, 申俊峰, 张春山, 万飞鹏, 马思琦, 徐传成, 唐海兵

Analysis of debris flow engineering treatment effect based on DEM data preprocessing in small watershed: A case study of Fangjiagou debris flow, Zhangxian County

QU Jingkai, YANG Weimin, SHEN Junfeng, ZHANG Chunshan, WAN Feipeng, MA Siqu, XU Chuancheng, and TANG Haibing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202211068>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于数值模拟的耳阳河流域泥石流灾害危险性评价

Debris flow hazard assessment of the Eryang River watershed based on numerical simulation

侯圣山, 曹鹏, 陈亮, 冯振, 王立朝, 李昂, 刘军友, 李阳光, 郑浩 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 143-151

地形因素对白龙江流域甘肃段泥石流灾害的影响及权重分析

Impacts of topographical factors on debris flows and weight analysis at the Gansu segment of the Bailongjiang River Basin

刘德玉, 贾贵义, 李松, 丛凯, 张伟 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 33-33

德钦县城直溪河泥石流成灾模式及运动过程模拟

A study of the disaster model and movement process simulation of debris flow in the Zhixi River of Deqin County

王俊豪, 管建军, 魏云杰, 高培强, 梅傲霜, 张东伟 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 187-195

川藏铁路某车站泥石流群发育特征及对线路的影响

Characteristics and potential engineering perniciousness of the debris flow group in one station of the Sichuan-Tibet Railway

何坤, 胡卸文, 刘波, 周瑞宸, 席传杰, 韩玫, 张晓宇 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 137-149

泥石流容重的时空变化特征及影响因素研究

A study of the characteristics and influencing factors of spatial-temporal changes in the debris flow density

黄海, 刘建康, 杨东旭 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 161-168

西藏天摩沟泥石流形成机制与成灾特征

Formation mechanism and disaster characteristics of debris flow in the Tianmo gully in Tibet

高波, 张佳佳, 王军朝, 陈龙, 杨东旭 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 144-153



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202211068

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.

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

渠敬凯^{1,2,3}, 杨为民^{1,3,4}, 申俊峰², 张春山^{1,3,4}, 万飞鹏^{1,2,3}, 马思琦^{1,3,4}, 徐传成^{1,2,3}, 唐海兵^{1,2,3}

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 3. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室, 北京 100081; 4. 中国地质调查局新构造与地壳稳定性研究中心, 北京 10081)

摘要: 2013 年 7 月 22 日岷县—漳县 6.6 级地震后, 漳县方家沟爆发泥石流。为减轻泥石流的潜在危害, 2015 年在沟内修建了三级拦挡坝和排导槽, 以调节泥石流峰值流量, 减轻对下游堆积扇保护对象的威胁。当前研究区防治工程是基于前期泥石流发育特征所设计, 未来防治效果有待检验。在野外调查的基础上, 采用双线性插值法精细化处理 DEM 数据, 结合高精度遥感影像, 重新构建了方家沟小流域的拦挡坝以及地形模型, 运用 FLO-2D 软件模拟分析了不同降水概率条件下方家沟泥石流的运动特征和危险性, 以评价方家沟泥石流防治工程治理效果。结果表明: 随着降雨强度的逐渐增大, 拦挡坝对于泥石流的停淤能力逐渐增强, 泥石流均未越过拦挡坝; 泥石流流速限制效率达到了 80.1%, 大大弱化了泥石流冲击破坏能力; 泥石流高危险区面积降低了约 45.34%, 有效地减小了泥石流的影响范围。综上所述, 在构建方家沟拦挡坝的模拟条件下泥石流拦挡工程治理效果显著, 研究成果可为类似小流域泥石流拦挡工程可行性检验提供借鉴。

关键词: 方家沟泥石流; DEM 数据处理; 双线性插值法; FLO-2D; 危险性分析; 治理效果

中图分类号: P694; P642.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)04-0206-14

Analysis of debris flow engineering treatment effect based on DEM data preprocessing in small watershed: A case study of Fangjiagou debris flow, Zhangxian County

QU Jingkai^{1,2,3}, YANG Weimin^{1,3,4}, SHEN Junfeng², ZHANG Chunshan^{1,3,4}, WAN Feipeng^{1,2,3},

MA Siqi^{1,3,4}, XU Chuancheng^{1,2,3}, TANG Haibing^{1,2,3}

(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 2. School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 3. Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China; 4. Research Center of Neotectonism and Crustal Stability, China Geological Survey, Beijing 100081, China)

收稿日期: 2022-11-23; 修订日期: 2023-03-21

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0902)

第一作者: 渠敬凯(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事地质灾害、成因矿物学等方面研究。E-mail: qujingkai113@163.com

通讯作者: 杨为民(1965—), 男, 博士, 研究员, 主要从事地质灾害、构造地质等方面科研。E-mail: snon_72@163.com

Abstract: After the Minxian-Zhangxian magnitude 6.6 earthquake on July 22, 2013, debris flow occurred in Fangjiagou, Zhangxian County. To reduce the potential damage of debris flow, a three-level check dam and drainage channel were built in the gully to regulate the peak flow of debris flow and reduce the threat to the downstream accumulation fan protection objects. However, The control project currently in place in the study area has been designed based on the characteristics of previous debris flow occurrences, and its effectiveness for future incidents remains to be tested. This study used the bilinear interpolation method to fine process DEM data of high-precision remote sensing image, reconstructed the check dam and topographic model of Fangjiagou small watershed, and adopted FLO-2D software to simulate and analyze the movement characteristics and risk of Fangjiagou debris flow under different precipitation probability conditions; the effect of debris flow control project thus then was evaluated. The results show that: As the intensity of rainfall gradually increases, the desilting ability of the barrier dam for debris flow increases gradually, and the debris flow does not pass the barrier dam. The limiting efficiency of flow rate of debris flow is 80.1%, which greatly weakens the impact of failure ability of debris flow. The area with a high risk of debris flow is reduced by 45.34%, which effectively reduces the influence range of debris flow. This study presents that the debris flow blocking project has a remarkable treatment effect under the simulation condition of Fangjiagou dam construction, which can provide effective guidance for the feasibility test of debris flow blocking projects in similar small watersheds.

Keywords: Fangjiagou debris flow; DEM data processing; bilinear interpolation; FLO-2D; hazard analysis; governance effect

近年来,受全球构造运动活跃、气候变暖、极端天气影响,青藏高原东北缘地质灾害特别是泥石流灾害日趋严重。甘肃省漳县构造活动强烈,泥石流灾害频发,严重威胁当地人民生命财产安全^[1-2]。

20世纪60年代以来,多种泥石流防治方法和减灾模式,形成了中国泥石流防治特色^[3]。拦挡坝作为治理泥石流的最有效措施被广泛应用,随着拦挡工程的增多,治理效果评估的重要性也变得更加急迫^[4]。目前评估泥石流防治工程效果大多采用数值模拟方法。刘军友^[5]采用FLO-2D、CFX和RAMMS等3种软件,模拟分析岷县耳阳河流域泥石流活动强度,认为FLO-2D泥石流模拟最为准确。Shen等^[6]利用Massflow对红椿沟泥石流进行模拟,认为模拟软件可以作为评估泥石流拦挡效率的手段;丛凯等^[7]、杜雪剑等^[8]、郑定国^[9]、翟龙^[10]运用FLO-2D评价泥石流防治工程效果,表明数值模拟不仅可用于评价泥石流治理效果,也可以对泥石流治理方案的制定提供有效的数据支持。总之,以往学者对于泥石流治理效果的分析多依据泥石流危险性,而少有分析拦挡措施对于泥石流有效限制,也未详细分析和阐述泥石流暴发过程中坝体防治或减弱泥石流的效果。

在对有拦挡坝的泥石流案例模拟时,一般通过软件中已有坝体属性设置拦挡坝,但该方法并不能设置拦挡坝迎水面形态,降低了模拟结果的准确度^[11-12]。

贺娟等^[13]在对长河坝水电站进行HEC溃坝模拟实验中,提出依据DEM数据构建坝体的方法,较好地解决了迎水面形态的问题。由此可见,基础地形数据对模拟结果准确度的影响十分显著^[14]。目前,DEM数据精细化处理的方法主要有最近邻域法、双线性内插法以及三次卷积法,以武广臣等^[15]、王耀革等^[16]采用双线性内插法的精细化处理DEM数据的效果较好。

漳县方家沟泥石流发生风险高且规模较大。2015年在泥石流流通区下游修建了三级拦挡坝。基于野外调查和遥感解译,采用双线性内插法精细化DEM数据以构建拦挡坝,借助FLO-2D软件模拟分析不同降雨概率条件及有无拦挡措施的工况下,评价方家沟泥石流的工程治理效果,为该地区类似泥石流防治提供科学依据。

1 方家沟流域概况

1.1 地质环境背景

漳县地处青藏高原东北缘南北向地震带与祁连山地震带的交汇区,构造上属西秦岭构造带的西延。区内活动断裂发育,地震活动性强,地质环境恶劣,崩滑流灾害频发。2013年7月22日,甘肃省岷县—漳县6.6级地震^[17]诱发了12313处泥石流、滑坡、崩塌等地质灾害,为泥石流活动提供了大量的物源,增加了泥石流的易发程度和规模^[18]。

1.2 泥石流发育特征

方家沟泥石流位于漳县三岔镇方家沟村东北侧,漳河左岸一级支沟。方家沟流域面积约 4.1 km^2 , 主沟长 3.76 km , 最高分水岭海拔 $2\,985 \text{ m}$, 沟口海拔 $2\,396 \text{ m}$, 流域高差 589 m , 沟谷纵坡降 156.6% , 沟道岸坡坡度 $20^\circ \sim 45^\circ$ 。流域整体平面上呈肾状, 发育一条支沟, 主沟沟谷与支沟沟谷皆为“V”型谷, 形成区较流通区宽阔, 雨水易于汇集, 同时沟谷岸坡滑坡、坡面流较为发育, 泥石流物源丰富(图1)。经过实地调研, 方家沟每逢雨季特别是强降雨时, 均发生小型泥石流, 为高频泥石流沟。对方家沟泥石流堆积体重度进行现场测试, 泥石流属黏性泥石流, 见图1(h)。

1.3 方家沟流域岩性特征

方家沟流域及周边地区主要出露白垩系和古近系砂砾岩、泥岩, 上覆第四系黄土, 如图1(a)所示。西秦岭北缘断裂横穿方家沟小流域^[9], 以断裂为界, 东北部以古近系泥岩为主, 约占流域面积的 30% ; 南部

及西北部主要出露白垩系中、下统砂岩、灰岩夹砾岩和第四系松散堆积物, 占流域面积的 70% 左右。泥岩及砂砾岩多为泥质胶结, 结构松散, 沟道两侧岩层经过构造作用以及风化剥蚀, 岩体破碎, 在沟道两侧岸坡易形成滑坡、崩塌等小型地质灾害, 如图1(b)所示。堆积体位于坡脚或沟道中, 成为泥石流固体物源, 流通区沟道内可见白垩系砂砾岩巨型块石, 最大可达 $4 \text{ m} \times 7 \text{ m} \times 9 \text{ m}$, 如图1(e)所示。

1.4 方家沟泥石流暴发历史及防治工程

2013年8月10日漳县地区强降雨, 导致方家沟泥石流暴发, 冲毁右岸数户房屋, 淤埋沟口下方 S209 公路、村庄及耕地。为防治泥石流灾害, 2015年在方家沟泥石流流通区沟道内修建3道拦挡坝以调节泥石流峰值流量, 减轻对下游保护对象的威胁, 沟口至主河段修建排导槽, 排导槽宽 $14 \sim 25 \text{ m}$, 高约 $2 \sim 3 \text{ m}$, 长 450 m , 见图1(g)。三级拦挡坝参数为: 高 8 m 、宽 30 m , 溢流口约高 1.5 m 、宽 20 m , 见图1(c)(d)(f)。

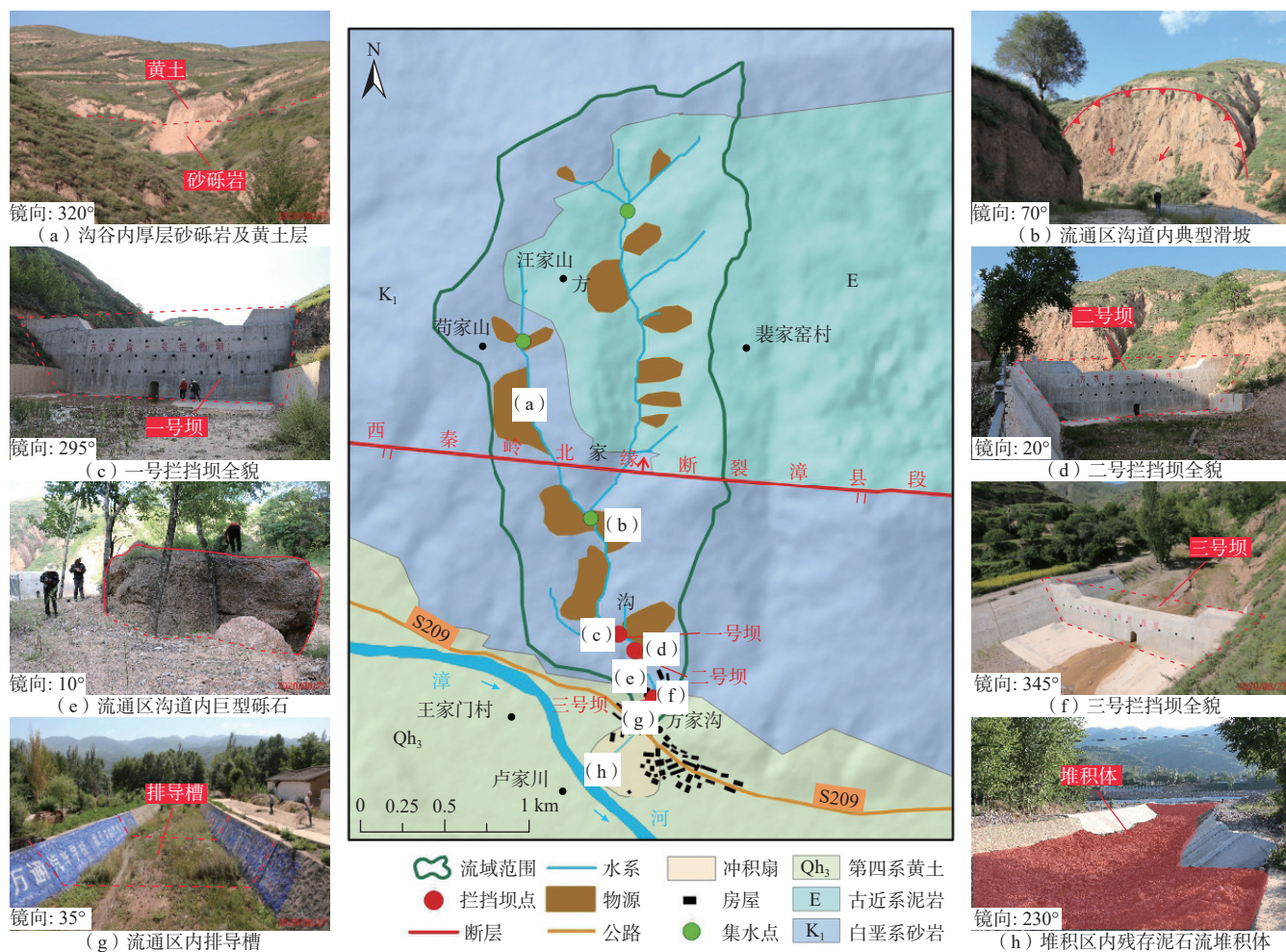


图1 方家沟泥石流发育特征及流域地质略图

Fig. 1 Development characteristics of Fangjiagou debris flow and geological sketch in the study area

工程完成后,拦挡坝前淤积物不断增加,加大了极端降雨条件下泥石流暴发的风险。

2 DEM 数据预处理

数字高程模型(DEM)数据的精细程度决定了数值模拟计算结果的准确性。双线性内插法处理 DEM 数据是目前较为经济的格网插值方法,兼顾插值精度和计算机处理数据能力问题,在两者之间做到了较为合理的平衡^[20],因此采用双线性内插法对方家沟小流域 DEM 数据进行精细化预处理。

2.1 精细化模型操作流程

DEM 数据的精细化处理主要是通过 GIS 软件来实现的,具体步骤如下:

(1)检查研究区 DEM 数据坐标,确认无误后将数据源转换为 tif 格式;

(2)通过多次试验,选取最优解,选用距离加权法进行图幅镶嵌;

(3)按格网大小进行数据重采样,将原本格网较大的 DEM 数据通过重采样生成格网较小的 DEM 数据;

(4)检查转化好的 DEM 数据质量,若满足应用要求,则将精细化后的 DEM 数据导出。

2.2 地理数据处理与导入

研究区模拟所使用的地形数据是从 5 m 分辨率 DMS 重采样而生成的 12.5 m 精度的 DEM 数据,其中,数据质量相比于同级别数据质量较高,遥感数据则采用分辨率为 0.5 m 的 18 级 Raster 高精度遥感影像。

将收集的 DEM 数据与高精度遥感影像的 tif 文件导入 ArcGIS 软件中,随后配合遥感影像对 DEM 数据进行处理。

(1)利用遥感影像确定沟道中各拦挡坝的位置,并做好标记。用 ArcGIS10.2 的 3D Analyst 扩展模块提取流域内间距为 2 m 的等值线,根据地形实测数据,对等高线进行修正,使其尽可能与实际情况相符合。

(2)通过修改后的等高线创建 TIN 不规则三角网文件(图 2),再由 TIN 文件栅格化转为 DEM,最后利用双线性内插法将其转成精度更高符合模拟的 DEM 数据^[21],同种方法将原始 DEM 数据也进行精细化处理。

(3)调用 ArcGIS10.2 栅格转 ASCII 工具将精细化后的 DEM 数据及原始精细化 DEM 数据依次转换为 FLO-2D 软件能够识别的 ASCII 文件。

(4)运行 FLO-2D 数值模拟软件,新建项目,将生成的 ASCII 文件作为基础地形数据加载进项目中。随后将泥石流流域地形进行划分,为满足计算精度的

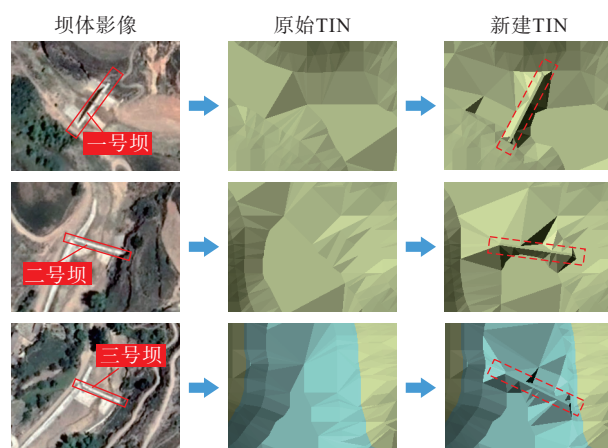


图 2 结合遥感影像精细处理 DEM 前后 TIN 数据对比图

Fig. 2 Comparison of tin data before and after DEM fine processing combined with remote sensing images

要求,选取 5 m×5 m 的正方形格网。导入流域边界的矢量文件,以确定模拟边界,并对选定区域进行高程赋值使得每个网格都具有单独的高程值。

3 工况和模拟参数

3.1 FLO-2D 基本原理

FLO-2D 是 1986 年美国联邦紧急事务管理局提出的,是一种体积守恒洪水演算模型,可用于泥浆和泥石流运动、泥沙输送、洪水泛滥以及坝体决口等地质灾害问题的模拟^[22]。FLO-2D 数值模拟是基于有限差分法和非牛顿体来求解流体运动学特征,利用运动方程(1)计算出相邻网格间流体的速度变化,并通过连续方程(2)(3)控制泥石流的质量守恒。

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

$$S_{fx} = S_{ax} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\partial u}{g \partial t} - u \frac{\partial u}{g \partial x} - v \frac{\partial u}{g \partial y} \quad (2)$$

$$S_{fy} = S_{ay} - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{\partial v}{g \partial t} - u \frac{\partial v}{g \partial x} - v \frac{\partial v}{g \partial y} \quad (3)$$

式中: h ——泥石流流体的泥深/m;

S_a ——水力坡降;

u —— x 方向的平均流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);

v —— y 方向的平均流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);

t ——时间/s;

i ——有效降雨强度/($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$);

S_{fx} 、 S_{fy} —— x 、 y 方向上的摩擦坡降;

S_{ax} 、 S_{ay} —— x 、 y 方向上的床底坡降。

其后,美国学者 O'Brien(1993)又推导出该模型的泥石流流体流变方程表达式^[23]:

$$S_f = S_y + S_v + S_{td} = \frac{\tau_y}{\gamma_m h} + \frac{K\eta u}{8\gamma_m h^2} + \frac{n^2 u^2}{h^3} \quad (4)$$

式中: S_y ——屈服坡降;

S_v ——黏滞坡降;

S_{td} ——紊流扩散坡降;

γ_m ——泥石流流体比重/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$);

K ——层流阻滞系数;

n ——曼宁系数。

3.2 不同概率条件下降雨量确定

根据中国气象局记录的漳县 1986—2021 年最大日降雨量数据,采用郑鑫等^[24]提出的空间插值法对降雨数据进行处理,再进行非线性回归分析,得出漳县地区降雨频率拟合曲线(图 3)与拟合公式,获得 50 年一遇、100 年一遇以及 200 年一遇降雨条件下对应降水量。

$$H = 54.76 + 62.13e^{-27.38P} \quad (5)$$

式中: H ——降雨量/mm;

P ——降雨频率。

拟合公式置信概率为 96%。

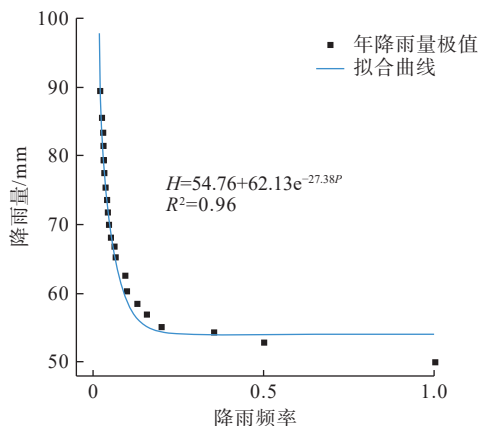


图 3 漳县地区年降雨量频率拟合曲线

Fig. 3 Fitting curve of annual rainfall frequency in Zhangxian area

50 年一遇、100 年一遇、200 年一遇降水对应 P 值为 0.02, 0.01, 0.005, 代入式(6)中可得 $H_{50\text{年}}=90.7\text{ mm}$, $H_{100\text{年}}=102\text{ mm}$, $H_{200\text{年}}=108.9\text{ mm}$ 。

3.3 模拟工况设置

结合降雨、防治工程条件,模拟 6 种工况下高易发沟道泥石流的危险性,分别为:①无防治工程条件下 50 年一遇降雨泥石流;②无防治工程条件下 100 年一遇降雨泥石流;③无防治工程条件下 200 年一遇降雨泥石流;④有防治工程条件下 50 年一遇降雨泥石流;⑤有防治工程条件下 100 年一遇降雨泥石流;⑥有防治工程条件下 200 年一遇降雨泥石流。

以工况①、②、③作为对照组分析极端天气下泥石流危险性,以工况④、⑤、⑥作为对照组评判工程措施效果,通过对比 6 种工况下拦挡坝对泥石流的拦蓄作用,分析拦挡坝的治理效益。

3.4 模拟参数率定

泥石流运动过程模拟时,一般将集水点放在物源集中和水动力条件强的位置^[25]。基于方家沟泥石流特征的野外调查和遥感解译,两支沟及形成区中下游崩塌及滑坡较为发育,泥石流物源丰富。2013 年 8 月 10 日降雨使得支沟与主沟形成区上游汇水量急剧增加,并裹挟沟道堆积物及滑坡体前缘破碎层形成泥石流汇至主沟,泥石流方量不断增加,漫越主沟沟道淤埋村庄及道路最后汇入漳河。因此,模拟计算时将泥石流集水点分别设置在主沟、支沟形成区以及主沟形成区与流通区交汇处(图 1)。

FLO-2D 模拟所需参数设置如下:

(1)重度及体积浓度:据泥石流堆积体取样测试,方家沟泥石流容重 $\gamma=19.3\text{ kN/m}^3$,比重 $G_s=2.72\text{ g/cm}^3$,平均孔隙比 $e=0.705$,体积浓度 $C_v=55\%$,对应泥砂比 $R_{ns}=0.76$;

(2)层流阻滞系数:参考侯圣山等^[26]、吴季寰等^[27]资料,采用工程地质类比法,层流阻滞系数 $K=2\ 280$;

(3)屈服应力及黏滞系数:根据已确定的参数,联立黏滞系数 η 和屈服应力 τ_y 计算式以及王裕宜等^[28]统一的泥砂比-体积浓度-流变参数关系式:

$$\begin{cases} \eta = \alpha_1 e^{\beta_1 C_v} \\ \tau_y = \alpha_2 e^{\beta_2 C_v} \\ R_{ns} = 2.25 \times 10^{-6} \tau_y^{-3.36} e^{(9.37 C_v \times 10^{-6} \tau_y^{3.87})} \\ R_{ns} = 4.56 \times 10^{-9} \eta^{-2.2} e^{(8.9 C_v \times 10^{-11} \eta^{7.99})} \end{cases} \quad (6)$$

可得 $[\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2]$ 为 $[0.000462, 11.24, 0.045, 13.42]$, 以及 $[\eta, \tau_y]$ 为 $[0.224, 72.57]$ 。

(4)曼林粗糙系数:根据王裕宜等^[28]提出的曼林粗糙系数(n)计算式为:

$$n = 0.033 R_{ns}^{-0.51} e^{0.34 R_{ns}^{0.17}} \ln h \quad (7)$$

式中: h ——泥深/m;

e ——平均空隙比。

由于曼宁系数 n 为变量,计算时取 2013 年方家沟泥石流流域内平均泥深 1.0 m,最大泥深 5.0 m。根据 FLD-2D 使用手册中建议的参数取值和野外调查数据计算综合,曼宁系数取值 0.05 ~ 0.25 之间。

3.5 泥石流流量过程曲线

漳县北邻天水地区,两地地质、地貌、气候均有相

似性,因此,选用水科院水文研究所提出的模型计算流量过程曲线,其中所提出的参数在本区降雨-径流分析中具有良好的适用性^[29]。根据漳县地区降雨频率拟合曲线与拟合公式,得出 50 年一遇、100 年一遇以及 200 年一遇降水频率下方家主沟及支沟清水流量,由于泥石流运动过程中会携带大量泥砂,具有放大作用,所以泥石流流量是清水流量乘以放大因子 $BF=1/(1-C_v)$,得出泥石流流量过程曲线(图 4)。

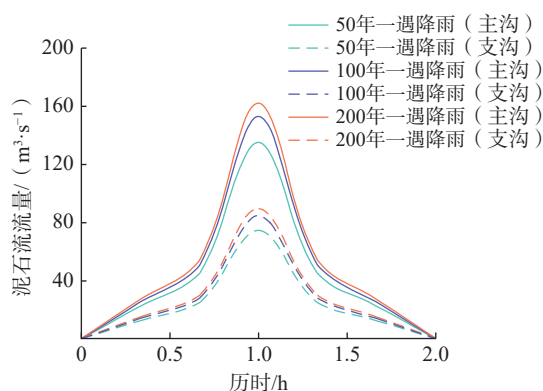


图 4 50 年一遇、100 年一遇及 200 年一遇降水频率下主沟及支沟泥石流流量概化过程曲线

Fig. 4 Generalized process curve of debris flow in main ditch and branch ditch under 50, 100 and 200 year rainfall frequency

4 不同降雨频率下泥石流工程治理效果分析

基于上述工况和模拟参数,利用 FLO-2D 软件模拟计算不同暴发频率下方家沟泥石流的泥深与流速。通过对方家沟泥石流泥深与流速计算结果的深入分析,评价方家沟泥石流防治工程效益。

4.1 拦挡坝对泥石流泥深的拦蓄效果

4.1.1 泥深模拟结果

图 5 为 3 种降雨频率下有无防治工程的方家沟泥石流泥深计算结果。

由图 5 和表 1 可知,不同降雨条件下泥石流泥深分布特征如下:

(1)50 年一遇降雨:无拦挡条件下泥石流总堆积面积 $41.44 \times 10^4 \text{ m}^2$,堆积体体积 $31.58 \times 10^4 \text{ m}^3$,最大泥深 6.47 m,平均堆积厚度为 0.76 m,沟口处堆积区面积为 $11.23 \times 10^4 \text{ m}^2$,淤埋民宅总面积 $9.08 \times 10^4 \text{ m}^2$ (55 户民宅),省道 S209 路面泥石流深度 0.3 ~ 0.8 m;拦挡条件下泥石流总堆积面积 $24.64 \times 10^4 \text{ m}^2$,堆积体体积 $25.31 \times 10^4 \text{ m}^3$,最大泥深 7.64 m,平均堆积厚度 1.03 m,泥石流被一号拦挡坝拦截至坝前,对沟口处民宅及省道 S209 并未造成威胁。相较于无拦挡条件下,有拦挡条件下

的泥石流规模降低了 $6.27 \times 10^4 \text{ m}^3$,减少了 19.8%,但泥石流最大泥深和平均泥深分别增加 1.17 m 和 0.27 m,增加了一号拦挡坝的防治负担。

(2)100 年一遇降雨:无拦挡条件下泥石流总堆积面积 $48.76 \times 10^4 \text{ m}^2$,堆积体体积 $46.29 \times 10^4 \text{ m}^3$,最大泥深 7.03 m,平均堆积厚度 0.95 m,沟口处堆积区面积 $17.68 \times 10^4 \text{ m}^2$,淤埋民宅总面积 $10.08 \times 10^4 \text{ m}^2$ (68 户民宅),省道 S209 路面泥石流深度 0.4 ~ 1.6 m;拦挡条件下泥石流总堆积面积为 $27.2 \times 10^4 \text{ m}^2$,堆积体体积 $38.34 \times 10^4 \text{ m}^3$,最大泥深 11.47 m,平均堆积厚度 1.70 m,泥石流越过一号拦挡坝堆积至二号拦挡坝前,对沟口处民宅及省道 S209 并未造成威胁。相较于无拦挡条件,有拦挡条件下的泥石流规模降低了 $7.95 \times 10^4 \text{ m}^3$,减少 17.2%,但泥石流最大泥深和平均泥深分别增加 4.44 m 和 0.75 m,一号拦挡坝泥石流防治功能已完全丧失,同时增加了二号拦挡坝的防治负担。

(3)200 年一遇降雨:无拦挡条件下泥石流总堆积面积 $66.48 \times 10^4 \text{ m}^2$,堆积体体积 $57.92 \times 10^4 \text{ m}^3$,最大泥深 7.45 m,平均堆积厚度 1.15 m,沟口堆积区面积 $28.81 \times 10^4 \text{ m}^2$,淤埋民宅总面积 $10.92 \times 10^4 \text{ m}^2$ (80 户民宅),省道 S209 路面泥石流深度达 0.65 ~ 2.06 m,同时堵塞漳河河道形成堰塞湖;拦挡条件下泥石流总堆积面积 $30.96 \times 10^4 \text{ m}^2$,堆积体体积 $59.60 \times 10^4 \text{ m}^3$,最大泥深 14.67 m,平均堆积厚度 2.12 m,泥石流越过一、二号拦挡坝堆积至三号拦挡坝前,对沟口处民宅及省道 S209 并未造成威胁。相较于无拦挡条件下,有拦挡条件下的泥石流规模降低了 $6.88 \times 10^4 \text{ m}^3$,减少了 10.3%,但泥石流最大泥深和平均泥深分别增加了 7.22 m 和 0.97 m,一、二号拦挡坝泥石流防治功能已完全丧失,同时增加了三号拦挡坝的防治负担。

总体而言,无论在自然条件或者有拦挡坝条件下,随着降雨量的增加,泥石流堆积范围、流量、最大泥深、平均泥深以及威胁面积皆在不断增大,但在修建拦挡坝后,泥石流皆被拦挡在泥石流沟道中,堆积于坝前,并未到达沟口处,大大减少了沟口下方堆积区的固体物质,对村庄及公路基本上无威胁。

4.1.2 坝体对泥深拦挡效益分析

为探究拦挡坝对于泥石流停淤的影响,依据模拟计算结果,得到不同降雨条件下各拦挡坝前 100 m 处泥深剖面(图 6)。

一号坝:坝前沟道较窄,受降雨影响最大,最大泥深为 200 年一遇降雨条件下的 10.25 m,最小泥深为 50 年一遇降雨条件下的 5.33 m,泥深在 3 种降雨条件

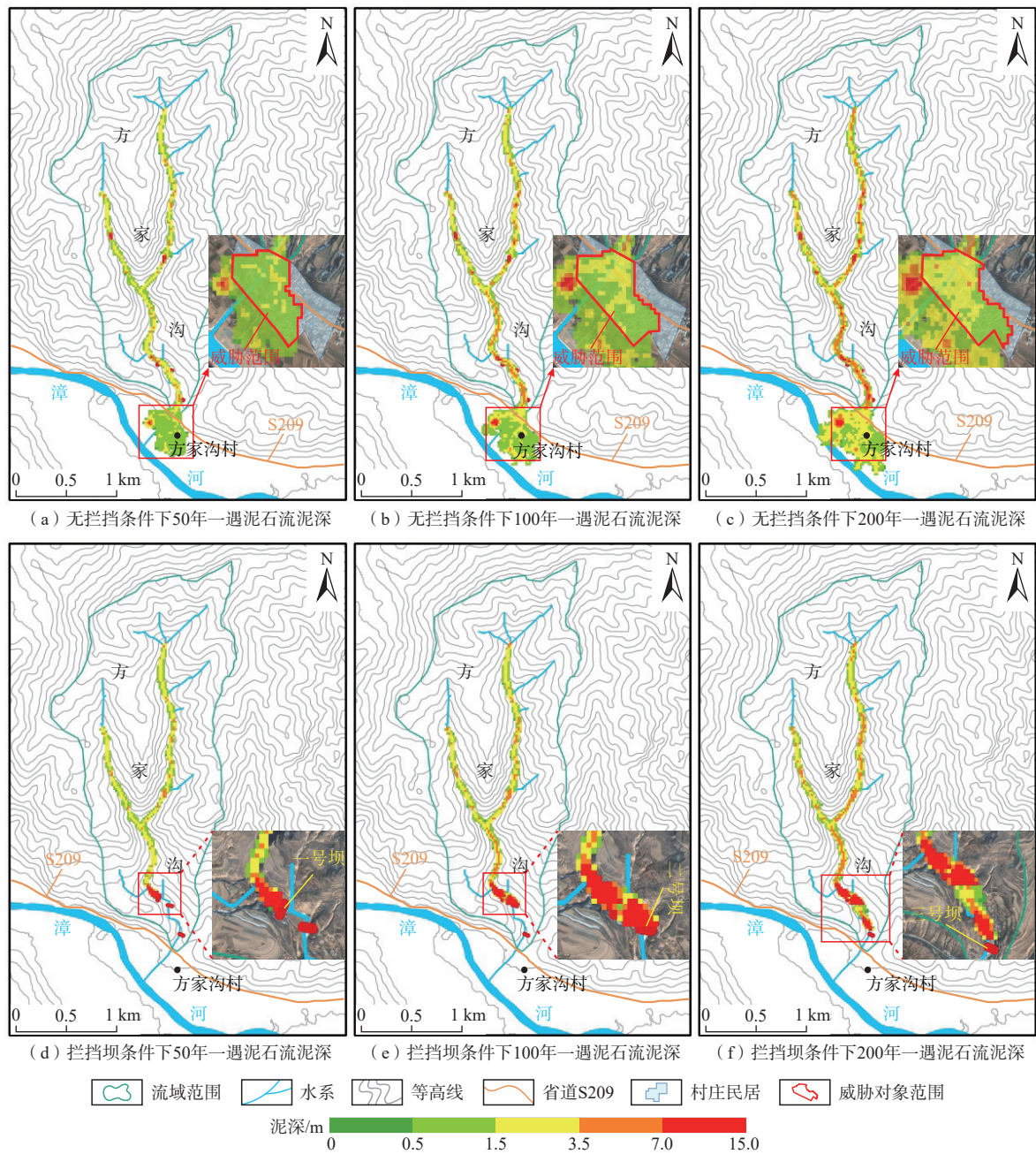


图 5 有无拦挡工程条件下不同降雨频率泥石流泥深对比

Fig. 5 Comparison of mud depth of debris flow with and without retaining works under different rainfall frequencies

表 1 有无防治工程的 50 年一遇、100 年一遇以及 200 年一遇降雨条件下泥石流特征表

Table 1 The characteristics of debris flow under the conditions of 50-year event, 100-year event and 200-year event rainfall with and without prevention projects, respectively

降雨频率	拦挡坝 (有/无)	泥深/m				泥石流总方量			堆积面积 (/10 ⁴ m ²)	威胁民宅面积 (/10 ⁴ m ²)	淤埋省道 (是/否)
		最大泥深	差值	平均厚度	差值	体积/(10 ⁴ m ³)	差值/(10 ⁴ m ³)	变化量/%			
50 年一遇降雨	无	6.47		0.76		31.58			41.44	9.08	是
	有	7.64	1.17	1.03	0.27	25.31	-6.27	-19.8	24.64	0	否
100 年一遇降雨	无	7.03		0.95		46.29			47.76	10.08	是
	有	11.47	4.44	1.70	0.75	38.34	-7.95	-17.2	27.20	0	否
200 年一遇降雨	无	7.45		1.15		66.48			57.92	10.92	是
	有	14.67	7.22	2.12	0.97	59.60	-6.88	-10.3	30.96	0	否

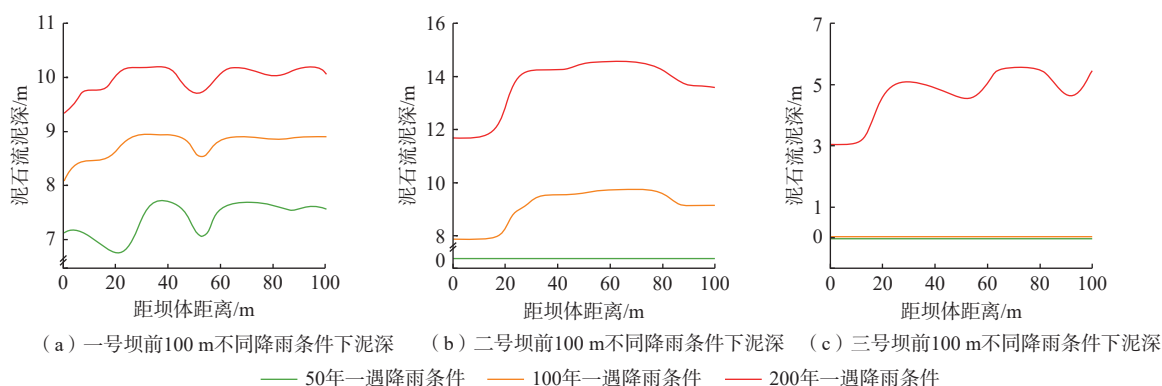


图6 不同降雨频率下拦挡坝坝前100 m范围内泥深变化

Fig. 6 Change of mud depth within 100 m in front of check dam under different rainfall frequencies

下深度曲线受地形起伏控制而形状一致;一号坝库容量为 $8.24 \times 10^4 \text{ m}^3$, 50年一遇降雨量条件下泥石流流量为 $5.95 \times 10^4 \text{ m}^3$, 占库容量的72.21%, 因此在50年一遇降雨条件下一号坝具有调节和防治作用, 但在100年一遇与200年一遇降雨条件下泥石流泥深皆越过坝体下泄至二、三号坝。

二号坝: 100年一遇与200年一遇泥石流到达二号坝前, 由于二号坝前地形宽阔且沟道较深, 因此泥深为3个坝体前最大, 可达14.67 m; 二号坝库容量为 $18.64 \times 10^4 \text{ m}^3$, 但在100年一遇条件下泥石流流量达到了 $18.15 \times 10^4 \text{ m}^3$, 占库容量的97.37%, 故二号坝前泥深在50年一遇降雨条件下处于防治效果的临界状态, 泥石流防治压力最大。

三号坝: 三号坝前泥深为3个坝前泥深最小的, 最大泥深仅为5.7 m, 远低于坝高, 并且坝前泥石流堆积量较少, 可见三号坝的停淤作用小, 防治作用不明显。但三号坝近沟口, 可降低泥石流破坏力, 减弱泥石流对村庄和公路的危害。

在拦挡条件下受地形因素影响, 各级坝前100 m范围内泥深起伏不定, 并随着降雨量的增加, 泥深随之不断升高, 大量泥石流被拦截在各级拦挡坝前方, 导致各级拦挡坝前入库泥石流流量不断增加, 根据邱恩喜等^[30]、唐勤等^[31]对泥石流规模的分析, 本文模拟表明泥深的升高大大增加了各级拦挡坝的防治压力。结合熊木齐等^[32]对武都区马槽沟的治理工程分析, 方家沟流域内泥深不断增加而抬高沟床、加宽沟道, 通过坝后固体物质的回淤降低沟道纵坡, 从而有效减小了泥石流的流动速度, 继而减小了泥石流对沟道的起底、侧蚀等冲刷作用, 最终降低了固体松散物质的转化为泥石流物源的效率, 同时泥石流堆积范围的减小也极大地降低了沟口处民宅及公路的受灾风险^[33]。

4.2 拦挡坝对泥石流流速的减弱作用

4.2.1 流速模拟结果

图7为3种降雨频率下有无防治工程的方家沟泥石流流速计算结果。

由图7和表2可知, 不同降雨条件下泥石流流速分布特征如下:

(1) 无防治工程时, 泥石流流速呈连续性分布的特征, 形成区沟道内流速较大, 流速一般在1.5~4.0 m/s之间, 但面积占比较小; 在流通区内, 流域地势相对宽缓, 因此流速小于形成区内流速, 流速一般在0.5~2.75 m/s之间, 但随着降雨量的增加, 泥石流流速亦在不断增加; 堆积区因地势宽缓, 对泥石流阻碍作用减弱, 泥石流泻流呈现出多向性而导致流速降低, 沟口村庄区流速在0~2.75 m/s之间, 区域面积占比较大。

(2) 与无拦挡条件下相似, 有拦挡工程时, 泥石流流速亦呈连续性分布, 形成区流速在1.5~4.0 m/s之间; 流通区内, 由于拦挡坝的作用, 坝前泥石流流速明显减小, 流速从4.0 m/s迅速下降至0.5 m/s, 而坝体附近泥石流流速稳定在0~1.5 m/s之间, 甚至在200年一遇降雨条件下3座拦挡坝附近的泥石流流速仍被限制在1.5 m/s以内, 极大地降低了泥石流破坏力, 从而保证了下游村庄及公路安全。

随着降雨量的增加, 两种工况条件下泥石流流速面积占比逐渐向流速大的区域偏移, 但主要集中在0.5~2.75 m/s范围内。对比有无拦挡条件下泥石流流速, 拦挡条件下各流速区段面积皆小于无拦挡条件下, 并随着降雨量的增加, 拦挡坝对流速的限制作用逐渐增强, 尤其是在200年一遇降雨条件下, 泥石流流速限制效率达到了80.1%, 极大地降低了泥石流的危害。

4.2.2 坝体对流速拦挡效益分析

为分析拦挡坝对于泥石流流速的影响, 选取不同

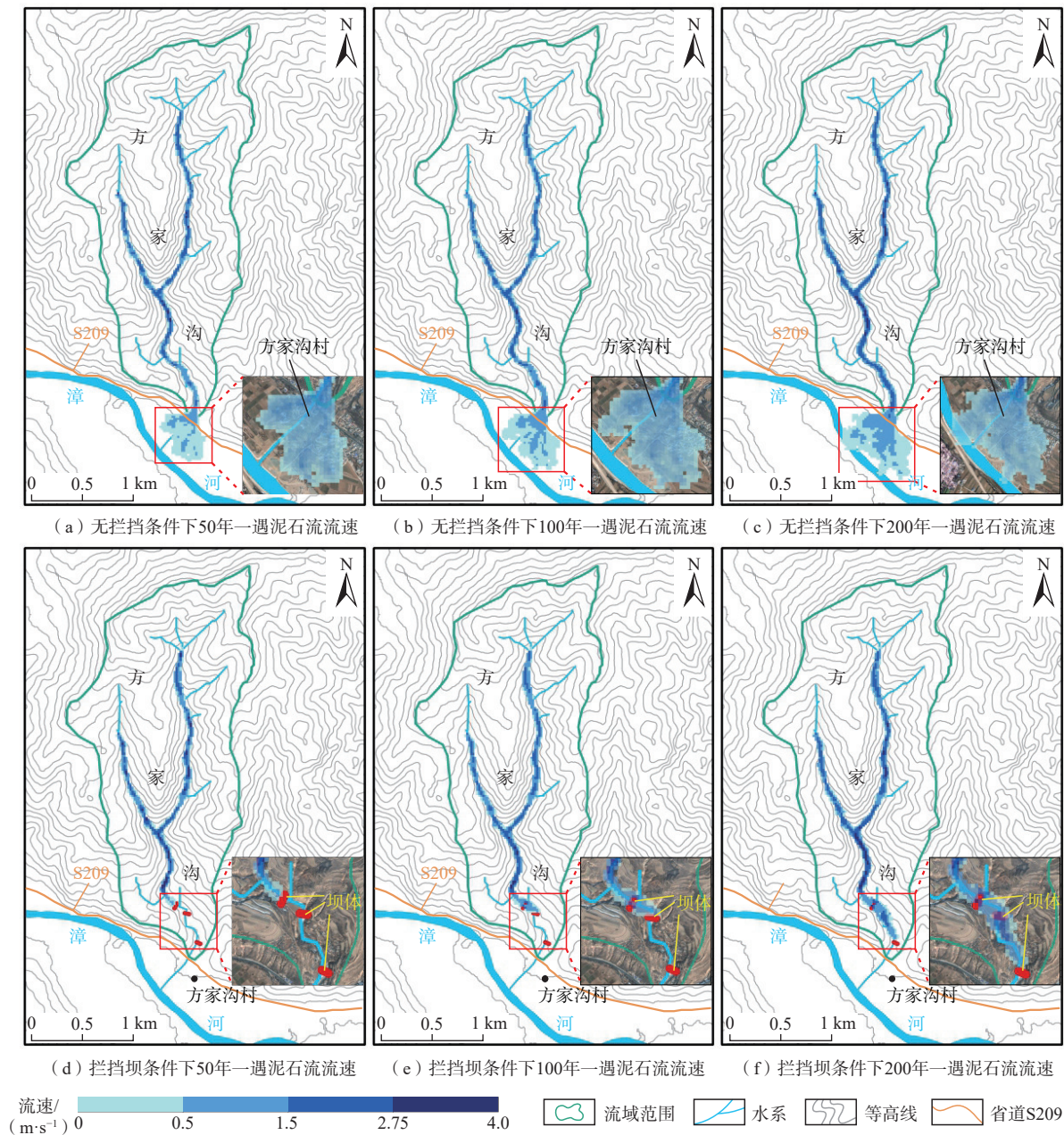


图 7 有无拦挡工程条件下不同降雨频率泥石流流速对比

Fig. 7 Comparison of debris flow velocity of different rainfall frequencies under non-blocking Engineering conditions

表 2 有无防治工程的不同降雨频率下不同泥石流流速占比

Table 2 Different debris flow velocity ratio with and without ptrevention project under different rainfall frequencies

降雨频率	拦挡坝 (有/无)	≤0.5 m/s			0.5 ~ 1.5 m/s			1.5 ~ 2.75 m/s			2.75 ~ 4.0 m/s		
		面积 (/10 ⁴ m ²)	占比/%	变化率/%	面积 (/10 ⁴ m ²)	占比/%	变化率/%	面积 (/10 ⁴ m ²)	占比/%	变化率/%	面积 (/10 ⁴ m ²)	占比/%	变化率/%
50年一遇降雨	无	12.48	30.12	-52.48	15.92	38.42	-30.09	9.92	23.94	-33.87	3.12	7.53	-67.31
	有	5.93	24.07		11.13	45.17		6.56	26.62		1.02	4.14	
100年一遇降雨	无	9.31	19.09	-41.14	19.84	40.69	-37.70	13.32	27.32	-41.44	6.29	12.90	-75.20
	有	5.48	20.15		12.36	45.44		7.80	28.68		1.56	5.74	
200年一遇降雨	无	11.56	19.96	-54.67	18.28	31.56	-25.38	19.84	34.25	-47.38	8.24	14.23	-80.10
	有	5.24	16.93		13.64	44.06		10.44	33.72		1.64	5.30	

降雨条件下有无拦挡坝一号拦挡坝前 100 m 至三号坝 流速剖面(图 8)。

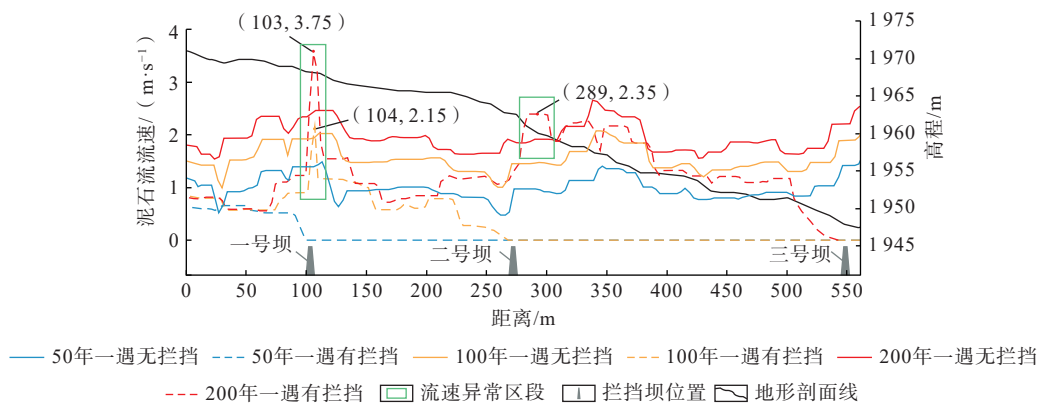


图 8 有无拦挡坝条件下泥石流流速变化曲线及地形剖面线

Fig. 8 Change curve and topographic profile of debris flow velocity with and without check dam

(1)在无拦挡条件下,泥石流流速随着地形起伏而呈现出规律性变化,并且流速在 0.5 ~ 3 m/s 范围内变化;在拦挡条件下,泥石流流速基本稳定在 0.5 ~ 2.5 m/s 区域内波动,局部最大可达 3.75 m/s,表面流速受拦挡坝影响变化较大;总体表现无拦挡条件下泥石流流速皆高于有拦挡条件下泥石流流速。

(2)一、二号坝在遭遇 100 年一遇或 200 年一遇强降雨时,拦挡坝附近泥石流流速均出现流速异常波动。其中以一号坝附近最为显著,并且流速瞬时变化较大,泥位相差大,说明随着泥石流冲过拦挡坝,由于坝体存在的高差作用,致使坝后流速异常增大。但二号坝坝前淤积库区宽大缓冲作用较强,由于拦挡坝的阻挡作用流速不断降低。

对比 3 种不同降雨条件下泥石流流区段性流速发现,其随着降雨量的增加而增大,但在拦挡条件下,流速在拦挡坝附近时呈现出急剧下降的趋势,拦挡坝对流速限制明显。泥石流冲击力与流速成正比,方家沟拦挡坝对流速的限制与削弱作用显著,有效地减轻了泥石流对下游的冲击危害^[7]。结合徐林荣等^[34]对于泥石流流速横向分布特征的分析,由于拦挡坝坝体横向上厚度较大,流速在横向上分布不连续,两侧流速远小于中泓线流速,拦挡坝稳定系数较高,在大幅度限制泥石流流速的同时,也保证了坝体自身稳定性。

4.3 拦挡坝防治效果综合评价及防治建议

4.3.1 拦挡坝治理效果分析

基于上述方家沟泥石流泥深及流速的模拟结果,采用曹鹏等^[35]对岷县地区泥石流危险性分区的方法(表 3),对自然条件下方家沟泥石流危险性进行分区(图 9),由此评价方家沟泥石流防治工程治理效果。

表 3 泥石流危险性分区标准

Table 3 Debris flow hazard zoning index

危险性	堆积深度/m	逻辑关系	堆积深度与流速乘积
高	≥ 1.5	OR	≥ 1.5
中	(0.5, 1.5)	AND	(0.5, 1.5)
低	[0.01, 0.5]	AND	[0.1, 0.5]

由图 9 可知,随着降雨量的增加,无防治工程条件下泥石流危险区面积不断增大,且中高风险区面积占比明显增加。相较于 50 年一遇降雨条件,200 年一

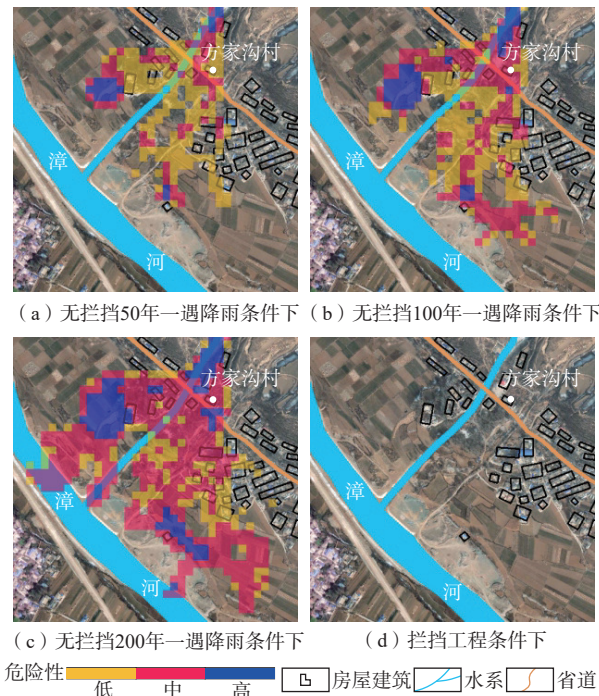


图 9 有无防治工程的不同降雨频率下堆积区危险性分区

Fig. 9 Hazard zoning of accumulation area under different rainfall frequencies with and without prevention works

遇降雨条件下危险区面积增加了一倍,威胁沟口居民数从 55 户骤增至 80 户,并且 100 年一遇与 200 年一遇降雨条件下省道 S209 大部分位于中高危险区内。修建拦挡工程后,在不同降雨频率下泥石流对沟口民宅及公路并无影响,拦挡工程治理效果显著。

由表 4 可知,随着降雨频率的减小,泥石流高危险区面积增大,占比上升。在 50 年一遇降雨条件下,治理工程使得危险区面积下降 33.06%,高危险区面积减

少 $4.8 \times 10^4 \text{ m}^2$,仅占危险区面积的 25.52%,16.7% 的高危险区转化为中低危险区;在 100 年一遇降雨条件下,危险区面积下降率为 36.32%,中高危险区面积降低了 39.85%,治理效果显著;200 年一遇降雨条件下,危险区面积下降了 41.3%,危险区面积减少 $18.08 \times 10^4 \text{ m}^2$,远大于 50 年一遇与 100 年一遇下危险区面积,同时高危险区面积减少了 45.34%,为三类降雨频率下最小,泥石流治理效果也最为明显。

表 4 50 年一遇、100 年一遇以及 200 年一遇降雨条件下有无防治工程泥石流危险区统计

Table 4 Statistical values of debris flow risk area with and without prevention and control engineering under the conditions of 2%, 1% and 0.5% rainfall frequencies, respectively

降雨频率	拦挡坝 (有/无)	危险区总面积 (10^4 m^2)	危险区 减少比例/%	高危险区		中危险区		低危险区	
				面积/(10^4 m^2)	占总面积比例/%	面积/(10^4 m^2)	占总面积比例/%	面积/(10^4 m^2)	占总面积比例/%
50 年一遇降雨	有	19.28	33.06	4.92	25.52	8.24	42.74	6.12	31.74
	无	28.8		9.72	33.75	9.56	33.19	9.52	33.06
100 年一遇降雨	有	22.44	36.32	8.08	36.01	7.8	34.76	6.56	29.23
	无	35.24		14.8	42.00	11.6	32.92	8.84	25.09
200 年一遇降雨	有	25.88	41.13	10.8	41.73	7.52	29.06	7.56	29.21
	无	43.96		19.76	44.95	17.0	38.67	7.2	16.38

以上分析可知:在有防治工程条件下,泥石流危害范围明显减少,并且随着降雨量的增加,危险区面积减少比例不断增大,泥石流拦挡措施对泥石流治理效果不断增加,说明在已修建防治工程条件下方家沟泥石流的危险性得到有效的控制。

4.3.2 泥石流防治建议

通过以上对泥石流的模拟并结合野外调查,方家沟流域内植被覆盖率较低,活动构造发育,崩滑体等松散层堆积物较多,导致泥石流物源储量较大,在发生泥石流时坝体容易因库容有限而被淤满。因此,提出以下防灾减灾建议:在雨季发生泥石流后,对坝前堆积体进行及时清理,并疏通沟道与拦挡坝的排导槽,以保证沟道顺畅;在流域内形成区及流通区内修建遥感调查、识别与警报等设备,为泥石流防范提供支持^[36];植树造林通过固土保壤减轻水土流失,继而减少物源,同时沟内植被有利于降低泥石流流速^[37]。

5 结论

(1)基于 DEM 数据预处理和高精度遥感影像重新构建拦挡坝,克服了 FLO-2D 软件中无法体现拦挡坝坝体迎水面的形态问题,同时对 DEM 数据的双线性插值法的精细化处理满足数值软件对小流域地形的要求,提高了模拟的精度和准度。

(2)修建有拦挡坝时,各级拦挡坝均降低了泥石

流发生时的流速,不同降雨概率下泥石流固体物质多停积在坝前,冲出沟口的固体物质量大大减小,泥石流防治效果明显。但同时也会造成坝前大量淤积,在遭遇 100 年一遇或更强降雨时,一号与二号拦挡坝都将会被淤埋而丧失其本身对泥石流固体物质的停淤作用。

(3)随着降雨强度的增加,无论是在自然条件还是有拦挡条件下,泥石流危险性增高。在拦挡条件下,泥石流危险区面积相对减少。相比于无拦挡坝工况,在 200 年一遇降雨频率下危险区面积下降了 41.3%,高危险区面积减少了 45.34%,治理效果显著。

(4)在目前已有的拦挡措施下,200 年一遇降雨条件下泥石流仍会漫过二级拦挡坝,致使拦挡坝丧失防治作用,因此每次发生泥石流后应及时清淤,以保证拦挡坝畅通,减轻对下游民宅及公路的威胁,同时有必要加强泥石流的监测预警以及植树造林减轻水土流失等防灾减灾措施。

虽然 FLO-2D 数值模拟较好地解决了不同降雨强度与工况条件下方家沟泥石流危险性及其防治工程效果分析,但是模拟仍有不足之处——不能判断拦挡坝坝体是否受到破坏。因此,有必要进一步开展不同降雨条件下泥石流对拦挡坝的冲切破坏和抗倾覆破坏,以保证防治工程安全运营。

致谢: 本文写作过程中,得到了重庆交通大学向

灵芝教授和中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所多位研究员的指导和帮助,在此表示感谢!

参考文献 (References):

- [1] 陈昊东. 定西市漳县地质灾害发育特征及风险评价[J]. 资源信息与工程, 2022, 37(2): 50 – 52. [CHEN Haodong. Development feature and risk assessment of geological hazards in Zhangxian County of Dingxi City[J]. Resource Information and Engineering, 2022, 37(2): 50 – 52. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 杨志华, 吴瑞安, 郭长宝, 等. 川西巴塘断裂带地质灾害效应与典型滑坡发育特征[J]. 中国地质, 2022, 49(2): 355 – 368. [YANG Zhihua, WU Ruian, GUO Changbao, et al. Geo-hazard effects and typical landslide characteristics of the Batang fault zone in the western Sichuan[J]. GEOLOGY IN CHINA, 2022, 49(2): 355 – 368. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 崔鹏. 我国泥石流防治进展[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(5): 7 – 13. [CUI Peng. Advances in debris flow prevention in China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009, 7(5): 7 – 13. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 谢涛, 徐小林, 陈洪凯. 泥石流拦挡坝研究现状及发展趋势[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2017, 28(2): 137 – 145. [XIE Tao, XU Xiaolin, CHEN Hongkai. Review and trends on debris dam research[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2017, 28(2): 137 – 145. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 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 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 (Beijing), 2021. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 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.
- [7] 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 engineering based on the FLO-2D model[J]. Northwestern Geology, 2019, 52(3): 209 – 216. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 杜雪剑, 孙书勤, 赵峥, 等. 基于 FLO-2D 模型的红椿沟泥石流工程治理效果研究[J]. 地球与环境, 2016, 44(3): 376 – 381. [DU Xuejian, SUN Shuqin, ZHAO Zheng, et al. Research on engineering control effect on Hongchun gully debris based on FLO-2D model[J]. Earth and Environment, 2016, 44(3): 376 – 381. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 郑定国. 基于 FLO-2D 的矿渣型泥石流危险性分区研究[D]. 西安: 长安大学, 2018. [ZHENG Dingguo. Study on risk zoning of slag debris flow based on FLO-2D[D]. Xi'an: Changan University, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 翟龙. 北京市南窖小流域泥石流危险性评价与工程治理效果研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021. [ZHAI Long. Risk assessment of debris flow in Nanjiao small watershed in Beijing and study on engineering control effect[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2021. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 唐得胜. 基于 FLO-2D 模型的不同频率泥石流数值模拟研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2014. [TANG Desheng. Numerical simulation of debris flow with different frequencies based on FLO-2D model[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 王高峰, 高幼龙, 姚亚辉, 等. 甘肃省白龙江流域降雨型潜在泥石流危险性预报模型[J]. 中国地质, 2022, 49(3): 732 – 748. [WANG Gaofeng, GAO Youlong, YAO Yahui, et al. Prediction model of potential debris flow hazard of rainfall type in Bailong River Basin, Gansu Province[J]. Geology in China, 2022, 49(3): 732 – 748. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 贺娟, 王晓松. 基于 HEC-RAS 及 HEC-GeoRAS 的溃坝洪水分析[J]. 水利水电工程学报, 2015(6): 112 – 116. [HE Juan, WANG Xiaosong. Analysis of dam-break flood based on HEC-RAS and HEC-GeoRAS[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(6): 112 – 116. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 曹鹏举, 程三友, 林海星, 等. DEM 在构造地貌定量分析中的应用与展望[J]. 地质力学学报, 2021, 27(6): 949 – 962. [CAO Pengju, CHENG Sanyou, LIN Haixing, et al. DEM in quantitative analysis of structural geomorphology: application and prospect[J]. Journal of Geomechanics, 2021, 27(6): 949 – 962. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 武广臣, 刘艳, 赵琴霞. 格网 DEM 的几种插值方法实

- 践[J]. 辽宁科技学院学报, 2012, 14(1): 40-41. [WU Guangchen, LIU Yan, ZHAO Qinxia. Several interpolation algorithms of grid DEM[J]. *Journal of Liaoning Institute of Science and Technology*, 2012, 14(1): 40-41. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 王耀革, 王鑫, 朱长青. 基于双线性内插规则格网 DEM 地形误差模型 [J]. 测绘科学技术学报, 2007, 24(6): 419-421. [WANG Yaoge, WANG Xin, ZHU Changqing. A terrain error model of grid DEM based on bilinear polynomial[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2007, 24(6): 419-421. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 殷志强, 徐永强, 陈红旗, 等. 2013 年甘肃岷县-漳县 $M_s6.6$ 级地震地质灾害展布特征及主控因素研究 [J]. 第四纪研究, 2015, 35(1): 88-99. [YIN Zhiqiang, XU Yongqiang, CHEN Hongqi, et al. Study on the distribution characteristics of geohazards and the causative tectonic of the Minxian-Zhangxian $M_s6.6$ earthquake on 22 July, 2013, Gansu, China[J]. *Quaternary Sciences*, 2015, 35(1): 88-99. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 田颖颖, 许冲, 徐锡伟, 等. 2013 年岷县漳县 $M_s6.6$ 地震滑坡特征参数分析 [J]. 地震工程学报, 2013, 35(4): 761-767. [TIAN Yingying, XU Chong, XU Xiwei, et al. Analysis of parameters of landslides triggered by the Minxian-Zhangxian $M_s6.6$ earthquake[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2013, 35(4): 761-767. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 郑文俊, 袁道阳, 何文贵, 等. 甘肃东南地区构造活动与 2013 年岷县-漳县 $M_s6.6$ 级地震孕震机制 [J]. 地球物理学报, 2013, 56(12): 4058-4071. [ZHENG Wenjun, YUAN Daoyang, HE Wengui, et al. Geometric pattern and active tectonics in Southeastern Gansu Province: discussion on seismogenic mechanism of the Minxian-Zhangxian $M_s6.6$ earthquake on July 22, 2013[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(12): 4058-4071. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 胡璐锦, 王亮, 陶坤旺. 基于不同地貌类型的 DEM 内插算法分析与选择 [J]. 测绘与空间地理信息, 2012, 35(12): 202-206. [HU Lujin, WANG Liang, TAO Kunwang. The analysis and choice of DEM interpolation algorithm based on different landform[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2012, 35(12): 202-206. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 张腾腾. 1:10000 DEM 精细化处理方法及其应用效果分析 [J]. 北京测绘, 2021, 35(2): 212-216. [ZHANG Tengting. 1:10 000 DEM fine processing method and its application effect analysis[J]. *Beijing Surveying and Mapping*, 2021, 35(2): 212-216. (in Chinese with English abstract)]
- [22] BERTOLO P, WIECZOREK G F. Calibration of numerical models for small debris flows in Yosemite Valley, California, USA[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2005, 5(6): 993-1001.
- [23] O'BRIEN J S. FLO-2D Reference manual version 2009[R]. Arizona: FLO-2D software, Inc, 2009.
- [24] 郑鑫, 杨涛, 师鹏飞, 等. 缺资料地区日降雨空间插值方法研究 [J]. 中国农村水利水电, 2017(3): 13-16. [ZHENG Xin, YANG Tao, SHI Pengfei, et al. Research on daily precipitation interpolation methods in data-lacking areas[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2017(3): 13-16. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 杨涛, 唐川, 常鸣, 等. 基于数值模拟的小流域泥石流危险性评价研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(1): 197-204. [YANG Tao, TANG Chuan, CHANG Ming, et al. Hazard assessment of debris flow in small watershed based on numerical simulation[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(1): 197-204. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 侯圣山, 曹鹏, 陈亮, 等. 基于数值模拟的耳阳河流域泥石流灾害危险性评价 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(2): 143-151. [HOU Shengshan, CAO Peng, CHEN Liang, et al. Debris flow hazard assessment of the Eryang River watershed based on numerical simulation[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(2): 143-151. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 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. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 王裕宜, 詹钱登, 韩文亮, 等. 粘性泥石流体的应力应变特性和流速参数的确定 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(1): 9-13. [WANG Yuyi, ZHAN Qianpeng, HAN Wenliang, et al. Stress-strain properties of viscous debris flow and determination of velocity parameter[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2003, 14(1): 9-13. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 魏周杨. 小流域暴雨洪水计算方法分析及应用 [J].

- 甘肃水利水电技术, 2018, 54(5): 11 – 13. [WEI Zhouyang. Analysis and application of storm flood calculation method in small watershed[J]. Gansu Water Resources and Hydropower Technology, 2018, 54(5): 11 – 13. (in Chinese)]
- [30] 邱恩喜, 王彬, 孙希望, 等. 四川甘洛自勒沟泥石流运动特征及预测防治效果研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(5): 934 – 945. [QIU Enxi, WANG Bin, SUN Xiwang, et al. Study on the movement characteristics and predicted prevention effect of debris flow in zile valley, Ganluo, Sichuan[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(5): 934 – 945. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 唐勤, 陈兴长, 柳金峰, 等. 云南省德钦县直任龙曲泥石流治理工程防治效果研究 [J]. 防灾减灾学报, 2022, 38(4): 36 – 44. [TANG Qin, CHEN Xingzhang, LIU Jinfeng, et al. Effect evaluation of control projects of debris flow in zhirenlongqu, Deqin County, Yunnan Province[J]. Journal of Disaster Prevention and Reduction, 2022, 38(4): 36 – 44. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 熊木齐, 郭富赟, 崔志杰, 等. 甘肃省武都区马槽沟泥石流特征及其治理工程效应 [J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2015, 51(6): 831 – 836. [XIONG Muqi, GUO Fuyun, CUI Zhijie, et al. Analysis of mitigation strategies in Macaogou debris flow valley, Wudu, Gansu Province[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2015, 51(6): 831 – 836. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 刘波, 胡卸文, 何坤, 等. 西藏洛隆县巴曲冰湖溃决型泥石流演进过程模拟研究 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(5): 150 – 160. [LIU Bo, HU Xiewen, HE Kun, et al. Characteristics and evolution process simulation of the Baqu gully debris flow triggered by ice-lake outburst in Luolong County of Tibet, China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(5): 150 – 160. (in Chinese with English abstract)]
- [34] 徐林荣, 韩征, 苏志满, 等. 泥石流流速横向分布特征与防治工程结构优化 [J]. 岩土力学, 2012, 33(12): 3715 – 3720. [XU Linrong, HAN Zheng, SU Zhiman, et al. Research on lateral distribution features of debris flow velocity and structural optimization of prevention and control works[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(12): 3715 – 3720. (in Chinese with English abstract)]
- [35] 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)]
- [36] 铁永波, 张宪政, 卢佳燕, 等. 四川省泸定县 Ms6.8 级地震地质灾害发育规律与减灾对策 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(6): 1 – 12. [TIE Yongbo, ZHANG Xianzheng, LU Jiayan, et al. Characteristics of geological hazards and it's mitigations of the Ms6.8 earthquake in Luding County, Sichuan Province[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(6): 1 – 12. (in Chinese with English abstract)]
- [37] 王奎, 岳方伟, 朱力军. 甘肃陇南市武都区小水沟泥石流治理防治工程 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, 21(3): 46 – 51. [WANG Kui, YUE Fangwei, ZHU Lijun. Engineering treatment for debris flow at Xiaoshui Gully, in Puchi Town, Wudu District, Longnan City[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2010, 21(3): 46 – 51. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 王支农