

引用格式: 唐海兵, 吴建军, 张春山, 等, 2024. 涪江源区韩家沟泥石流防治工程改进前后危险性分析 [J]. 地质力学学报, 30 (4): 659–672. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.2023097](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.2023097)

Citation: TANG H B, WU J J, ZHANG C S, et al., 2024. Debris flow hazard analysis before and after improvement of Hanjia gully control engineering at the source area of the Fujiang River [J]. Journal of Geomechanics, 30 (4): 659–672. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.2023097](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.2023097)

涪江源区韩家沟泥石流防治工程改进前后危险性分析

唐海兵^{1,2,3,4}, 吴建军⁵, 张春山^{1,2,3}, 杨为民^{1,2,3}, 渠敬凯^{1,2,4}, 马思琦^{1,2,3}, 徐传成^{1,4}
TANG Haibing^{1,2,3,4}, WU Jianjun⁵, ZHANG Chunshan^{1,2,3}, YANG Weimin^{1,2,3}, QU Jingkai^{1,2,4}, MA Siqi^{1,2,3}, XU Chuancheng^{1,4}

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;
 2. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室, 北京 100081;
 3. 中国地质调查局新构造与地壳稳定性研究中心, 北京 100081;
 4. 中国地质大学 (北京), 北京 100083;
 5. 四川省地质矿产勘查开发局物探队, 四川 成都 610070
1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*
 2. *Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;*
 3. *Research Center of Neotectonism and Crustal Stability, China Geological Survey, Beijing 100081, China;*
 4. *China University of Geosciences, Beijing 100083, China;*
 5. *The Geological Prospecting Team of Sichuan Geological & Mineral Bureau, Chengdu 610070, Sichuan, China*

Debris flow hazard analysis before and after improvement of Hanjia gully control engineering at the source area of the Fujiang River

Abstract: [Objective] Debris flow from the Hanjia gully develops on the left bank of the source area of the Fujiang River, Fenghe Village, Xiaohe Town, Songpan County, China. In recent years, debris flows have occurred frequently, and the largest debris flow occurred in August 2022, which seriously threatened the lives and properties of villagers in the Hanjia gully. Existing prevention and control engineering methods have decreased in effectiveness or even become ineffective. Currently, researchers have set a variety of extreme rainfall conditions and used FLO-2D to analyze the hazards of debris flow, based on which the governance effect of debris flow prevention and control engineering can be evaluated. However, there are few reports on how to improve the prevention and control engineering and evaluate the effect of the improved prevention and control engineering when the existing prevention and control engineering is ineffective. [Methods] To reduce damage to the Hanjia gully, the characteristics as well as prevention and control status of the debris flow in/from this gully were determined using remote sensing interpretation, field investigation, and FLO-2D numerical simulation; subsequently, improved prevention and control engineering was proposed. The hazard of debris flow before and after the improvements in prevention and control engineering under different rainfall frequencies were studied to analyze the effectiveness of the improved prevention and control engineering. [Results] The results show that the Hanjia gully is located in the "8.8" Jiuzhaigou earthquake disturbance area, the static reserves of post-earthquake landslides and collapses are about $49.79 \times 10^4 \text{ m}^3$, and the debris flow sources are abundant, which leads to frequent debris flow during heavy rainfall. The high-hazard area is concentrated in the No. 1 retaining dam, and Fenghe Village and Pingsong Highway are in

基金项目: 科技部基地与人才项目 (2019QZKK0902)

This research is financially supported by the Base and Talent Project of the Ministry of Science and Technology (Grant No. 2019QZKK0902).

第一作者: 唐海兵 (1999—), 男, 在读硕士, 主要从事地质灾害方面的研究。Email: 951891703@qq.com

通讯作者: 张春山 (1964—), 男, 研究员, 主要从事地质灾害、工程地质、地应力等方面研究工作。Email: zhanges401@sina.com

收稿日期: 2023-06-14; 修回日期: 2024-04-08; 录用日期: 2024-04-16; 网络出版日期: 2024-06-05; 责任编辑: 吴芳

the low-hazard area under a rainfall event occurring every 10 years, and the existing prevention and control engineering can effectively prevent the debris flow disaster. Under a rainfall event occurring once in 50 years, Fenghe Village is in the high-hazard area of debris flow. The debris flow rushes out of the drainage channel and destroys the Pingsong Highway. The maximum mud depth in the accumulation area increases from 1.41 m to 3.14 m, the maximum velocity increases from 2.4 m/s to 3.65 m/s, and the accumulation area increases from $0.28 \times 10^4 \text{ m}^2$ to $5.41 \times 10^4 \text{ m}^2$. However, the existing prevention and control engineering methods cannot meet these requirements. After adopting improved prevention and control engineering, such as multistage retaining dams and cutting and straightening of drainage channels, the flow velocity of the debris flow in front of the two additional retaining dams becomes lower than that before the improvement, and the depth of mud in front of the additional retaining dams becomes higher than that before the improvement. The maximum velocity of the debris flow within 100 m of Dam No. 3 decreases by 29%, and the maximum mud depth increases by 413%. The maximum flow velocity in the first 100 m of Dam No. 2 decreases by 21%, the maximum mud depth increases by 175%, the maximum mud depth in the accumulation area is 3.9 m, and the maximum flow velocity is 3.4 m/s. The accumulation volume of debris flows is reduced by 50.2%, and the accumulation area is reduced by 86%. [Conclusion] Improved prevention and control engineering can effectively reduce the solid mass of debris flows and guide debris flow to discharge along drainage channels. The high-hazard area of the debris flow is concentrated in the drainage channel, and the control effect of the debris flow is remarkable. [Significance] The research results provide a scientific method for evaluating the effectiveness of debris-flow control engineering improvements and offer technical support for local debris-flow early warning systems.

Keywords: engineering geology; debris flow; improving prevention and control engineering; governance effect; rainfall; geological hazards

摘要: 为了降低涪江源区左岸韩家沟泥石流的危害, 文章采用遥感解译、野外调查、FLO-2D 数值模拟等手段, 查清了韩家沟泥石流特征及其防治现状, 认为现有防治工程不能满足防灾需求, 并据此提出改进的防治工程, 对不同降雨频率下防治工程改进前后的泥石流危险性进行了研究, 并分析改进防治工程的有效性。结果表明: 韩家沟位于“8·8”九寨沟地震扰动区, 震后泥石流物源丰富, 导致每逢强降雨时泥石流频发。在 10 年一遇降雨频率下, 丰河村及平松路均处于低危险区, 现有防治工程可有效防治泥石流灾害; 在 50 年一遇降雨频率下, 丰河村处于泥石流高危险区, 泥石流冲出排导槽, 冲毁平松路, 现有防治工程不能满足要求。采用多级拦挡坝、排导槽截弯取直等改进的防治工程后, 可有效预防泥石流对沟口下方承灾体的损害, 泥石流堆积方量减少 50.2%, 堆积面积减少 86%, 高危险区均位于排导槽内, 治理效果显著。

关键词: 工程地质; 泥石流; 改进防治工程; 治理效果; 降雨; 地质灾害

中图分类号: P694; P642.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2024) 04-0659-14

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023097

0 引言

涪江源区源自四川省松潘县岷山山脉主峰雪宝顶, 终至绵阳市平武县水晶镇唐家坪, 地理坐标范围为 $N32^{\circ}22'22'' \sim 32^{\circ}55'25''$ 、 $E103^{\circ}45'48'' \sim 104^{\circ}22'45''$, 处于中国第一阶梯与第二阶梯分界带, 区内呈高山峡谷地貌, 新构造运动活跃, 地震频繁, 强震诱发的崩滑体为震后泥石流提供了丰富的物源(张宪政等, 2022), 严重威胁到当地人民生命财产安全。根据松潘县自然资源局《松潘县 2017—2022 年山洪泥石流灾害应急排查隐患点汇总表》

和野外实地调查结果, 涪江源区曾在 1976 年、1982 年、2019 年、2020 年、2022 年发生过较大规模的群发泥石流, 2022 年“8·19”泥石流是涪江源区近些年暴发的规模最大的群发性泥石流。涪江源区内刘家坝沟、韩家沟、榨房沟、李泉沟等地泥石流频发, 危害性大, 灾害损失多, 造成了房屋、农田、防治工程、平松公路等淤埋或冲毁。其中韩家沟多次发生泥石流活动, 需要重点关注并研究其危险性。泥石流危险性分析是降低泥石流危害的基础(张春山等, 2003), 目前, 泥石流危险性评价方法主要有以系统科学方法为基础的灰色关联分析法(魏斌斌等, 2013)和模糊综合评价法(尚慧等,

2019),以统计学方法为基础的信息量法(Chen et al., 2013)和距离判别法(Tan et al., 2012),以计算机软件为基础的数值模拟方法,常用的模拟软件有FLO-2D、Mass-Flow等。灰色关联分析法能够处理少量或质量较差的数据,缺点是当讨论指标之间的相关性时,将其转换为灰数值可能导致信息缺失;模糊综合评价法可以对蕴含信息具有模糊性的数据做出比较贴合实际的量化评价,缺点是计算繁杂,确定指标权重时会具有较强的主观性;信息量法计算工作简便,缺点是样本数据量较少时会导致预测的精度显著下降;距离判别法不受评价指标量纲的影响,缺点是放大了没有显著变化的指标的作用。相较于上述评价方法,数值模拟方法能较准确地模拟出复杂地形下泥石流的运动与堆积情况,分析灾害对承灾体的影响,FLO-2D软件可以完整地分析泥石流的运动特征,研究泥石流的运动机理、运动过程(Wu et al., 2013; 王纳纳和唐川, 2014; Boccali et al., 2015; 王骏等, 2016)。有学者依据FLO-2D软件模拟得到的泥深与流速,确定危险性分区标准,进行泥石流危险性分区(唐川等, 1994; Gregoretti et al., 2019; Chang et al., 2020; 马思琦等, 2022; 张浩韦等, 2022);也有学者设置了多种极端降雨工况,采用FLO-2D分析泥石流的危险性,评价泥石流防治工程的治理效果(杜雪剑等, 2016; 刘鑫磊等, 2017; 杨海龙等, 2017; 丛凯等, 2019; 唐海等, 2019; 张奋翔等, 2019; 王高峰等, 2020; 李宝幸等, 2022)。已有研究显示,FLO-2D软件不仅可以模拟分析泥石流的运动过程,还能模拟流速、泥深和淤积范围,更适合对防治工程的有效性进行分析。

韩家沟是涪江源区内位于涪江左岸的一级支沟,沟内泥石流活动性强,当地政府为减小泥石流危害,于2020年修建了泥石流防治工程,建设了一座拦挡坝和排导槽。2022年“8·19”泥石流造成坝前被淤满,泥石流在排导槽拐弯处发生堵塞,冲出沟槽,造成重大灾害,现有防治工程效果不佳,需要进行改进。文章基于韩家沟泥石流的现场调查和遥感解译,采用FLO-2D软件模拟分析不同情况下韩家沟泥石流的危险性,评价防治工程改进前后的防治效果,以期为当地泥石流防治预警提供技术支撑。

1 地质环境背景

涪江源区地势由西北向东南逐渐降低,境内山

高坡陡,沟谷纵横,地质条件复杂。地层自元古界至第四系均有不同程度的出露,其中蓟县系、青白口系、志留系、三叠系岩性以板岩、千枚岩、片岩为主,易风化剥蚀。区内断裂发育,主要有岷江断裂、塔藏断裂、雪山断裂和虎牙断裂(图1),其中虎牙断裂地震活动性强,先后发生过1976年“8·16”、“8·23”松平7.2级地震(陈浩等, 2020)和2017年“8·8”九寨沟7.0级地震(付国超等, 2017; 姚鑫等, 2017),这3次强震诱发了大量崩塌、滑坡,崩滑堆积体为涪江源区各泥石流沟提供了丰富物源,强降雨时易引发泥石流。

2 韩家沟泥石流特征

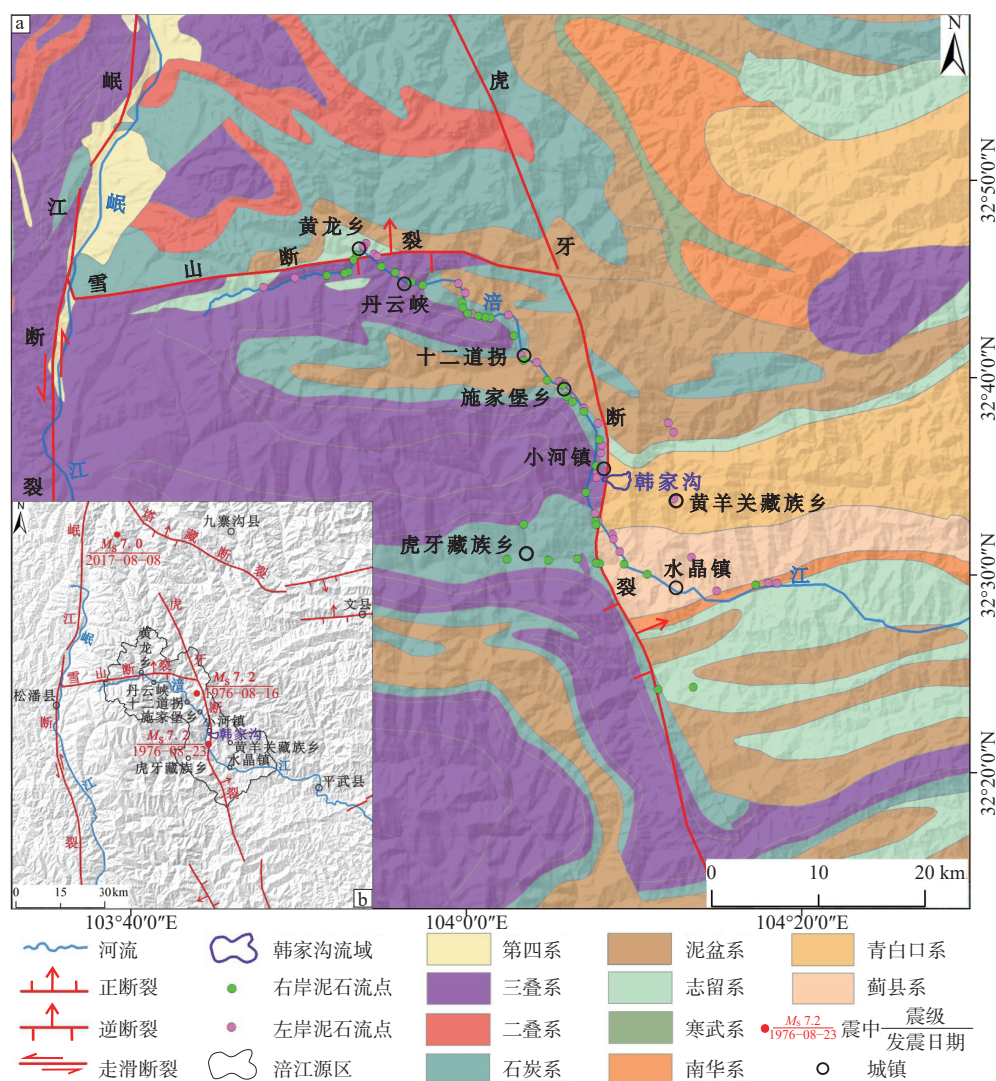
韩家沟泥石流位于四川省松潘县小河镇丰河村,泥石流流域平面形态呈帚状(图1,图2),面积约为4.1 km²,主沟长约3295 m,最高点高程3185 m,最低点高程1521 m,相对高差1664 m,主沟道纵坡降505‰。流域内形成区和流通区岸坡发育有较多崩滑体(图2),崩滑体主要分布在中下游,通过遥感解译获取崩滑体面积,根据震区崩滑体物源的体积计算公式(方群生等, 2016),计算得出流域内18个崩滑体总体积约为49.79×10⁴ m³(表1)。

韩家沟主沟纵坡降大,流域内震后物源量骤增,导致韩家沟泥石流活动性增强,近些年泥石流频发。据现场调查,韩家沟曾在1970年、1982年、1984年、2018年、2019年、2020年、2022年多次暴发泥石流灾害。其中,1970年和1982年泥石流规模大。1983年至2022年期间,多次发生山洪和小规模泥石流,属中一高频稀性泥石流。

2022年8月18日至19日,涪江流域遭遇50年一遇强降雨,韩家沟暴发泥石流,泥石流一部分堆积于拦挡坝前,一部分漫过坝顶冲出沟口后,沿导流槽下泻,堆积于丰河村西南涪江左岸,堆积扇长420 m,扇径300 m,均厚2 m,扩散角40°(图2a、2b)。

3 泥石流危险性模拟分析

泥石流防治工程的有效性可通过对比防治工程竣工前后泥石流启动位置、危险范围或者暴发泥石流临界雨量阈值的变化来分析,目前,应用较多的是基于数值模拟计算泥石流的运动过程、运动参数,分析泥石流发生时的危险性,从而评价防治工



a—区域地质图；b—活动构造分布图

图1 涪江源区地质略图

Fig. 1 Geological sketch of the source area of the Fujiang River

(a) Regional geological map; (b) Active structure distribution map

程的效果。此次研究通过FLO-2D软件模拟分析韩家沟泥石流在防治工程改进前后的泥深、流速及危险性。

3.1 改进的泥石流防治工程设计

“8·19”泥石流在排导槽拐弯处冲出沟道，最大泥深达4 m，冲毁了平松公路涵洞，淤埋农田及平松公路，考虑到2020年防治工程不能满足50年一遇泥石流停淤、泄流需要（图2c—2f），根据韩家沟泥石流特点及危害，建议按以下方法改进防治工程，具体措施如下。

(1)在流通区增建2座拦挡坝（图3），以减轻1号坝（原有拦挡坝）的淤积压力。坝体几何参数可参考1号坝（图2g），其合理性可通过FLO-2D软件

模拟验证，坝址宜选在冲击力小、流速缓慢的位置，将3号坝（栅栏坝）设置在流通区上游，即支沟进入主沟后向下游方向一定距离的位置，同时兼顾主沟与支沟的泥石流拦蓄，3号坝用于拦挡巨型块石、树干等，降低泥石流对2号坝的冲击力；2号坝设置在沟谷跌坎上游，该拦挡坝需要与3号坝间隔一定距离以保证其库容，且该处泥石流速度较慢，易于拦截泥石流。

(2)改进原有排导槽，将排导槽截弯取直，以增强排导槽的泄流能力（图3），降低泥石流的危害。

3.2 模拟软件

1986年美国联邦紧急事务管理局提出了FLO-2D，这是一种体积守恒洪水演算模型，可用于泥沙

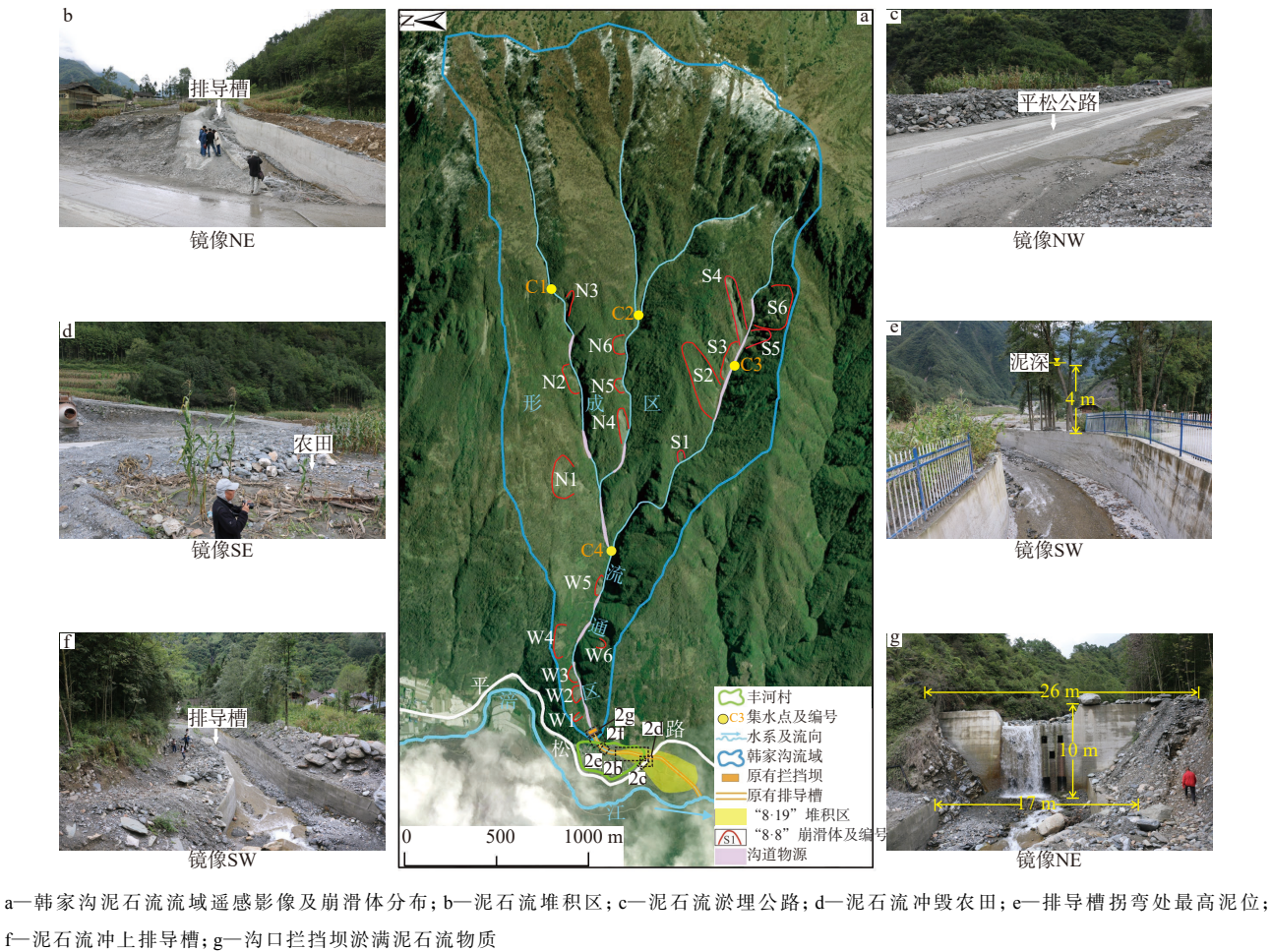


图 2 韩家沟泥石流流域崩滑体分布特征及“8·19”泥石流遗迹

Fig. 2 Distribution characteristics of collapses and landslides and remains of the "8 · 19" debris flow in Hanjia gully debris flow watershed

(a) Remote sensing image and distribution of collapses and landslides in Hanjia Gully debris flow watershed; (b) Debris flow accumulation area; (c) Debris flow burying the highway; (d) Debris flow that washed away farmland; (e) The highest mud position at the bend of the drainage channel; (f) Debris flow that washed up the drainage channel; (g) The retaining dam at the mouth of the gully was filled with debris flow material

表 1 韩家沟流域崩滑体体积

Table 1 Static reserves of slumped masses in the Hanjia gully watershed

编号	崩滑体面积/ $\times 10^4 \text{ m}^2$	体积/ $\times 10^4 \text{ m}^3$	编号	崩滑体面积/ $\times 10^4 \text{ m}^2$	体积/ $\times 10^4 \text{ m}^3$
N1	2.29	6.66	S4	1.60	4.74
N2	0.69	2.13	S5	0.76	2.33
N3	0.24	0.78	S6	3.17	9.08
N4	0.63	1.95	W1	0.12	0.40
N5	0.26	0.84	W2	0.31	0.99
N6	0.50	1.57	W3	0.24	0.78
S1	0.17	0.56	W4	0.92	2.80
S2	3.69	10.49	W5	0.26	0.84
S3	0.62	1.92	W6	0.29	0.93
崩滑体总计					49.79

注: N、S、W分别为韩家沟流域内北侧、南侧、西侧

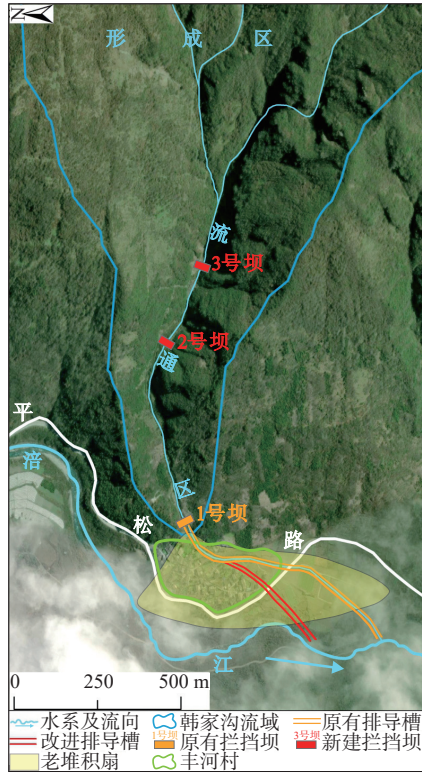


图3 韩家沟泥石流防治工程改进前后工程布置平面图

Fig. 3 Plan of Hanjia gully debris flow prevention and control engineering before and after improvement

输送、泥浆和泥石流、雨水道、大坝和堤坝决口以及地下水等问题的地质灾害模拟 (Bertolo and Wiczorek, 2005)。FLO-2D 数值模拟基于有限差分法和非牛顿体来求解流体运动学特征,其运动控制方程如下。

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

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

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

其中,式(1)为连续方程,式(2)、(3)为运动方程。式中, h —泥石流流体的泥深, m; i —有效降雨强度, mm/h; u — x 方向的平均流速, m/s; v — y 方向的平均流速, m/s; t —时间, s; 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, %。

2009年,美国学者 O'Brien (2009) 推导出 FLO-2D 模型的泥石流流体流变方程表达式:

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

式中, S_y —屈服坡降, %; S_v —黏滞坡降, %; S_{id} —紊流扩散坡降, %; τ_y —屈服应力, MPa; γ_m —泥石流流体比重, t/m³; K —层流阻滞系数; η —流体黏滞系数; n —曼宁系数。

3.3 参数设定

采用《泥石流灾害防治工程勘查规范》(DZ/T 0220—2006)附录 I (中华人民共和国国土资源部, 2006) 推荐的经验公式, 计算 10 年一遇和 50 年一遇降雨时泥石流发生的流量 (高士麟, 2021; 邵玉祥等, 2021), 计算公式如下。

$$Q_c = (1 + \phi) \times Q_p \times D_c \quad (5)$$

$$\phi = (\gamma_c - \gamma_w) / (\gamma_H - \gamma_c) \quad (6)$$

$$Q_p = 0.278 \psi i F \quad (7)$$

式中, Q_c —泥石流流量, m³/s; ϕ —泥沙修正系数; Q_p —频率为 P 的暴雨洪峰流量, m³/s; D_c —堵塞系数, 根据沟道特征, 按照规范要求具体取值; γ_c —泥石流重度, kN/m³; γ_w —清水的重度, kN/m³; γ_H —固体颗粒重度, kN/m³; ψ —洪峰径流系数; i —最大平均暴雨强度, mm/h; F —流域面积, km²。

FLO-2D 模拟所需参数确定如下。

(1) 重度: 据现场实测结果, 集水点 C1 所在支沟、集水点 C2 所在支沟、集水点 C3 所在支沟、集水点 C4 所在主沟的泥石流容重 γ_c 分别为 19.4 kN/m³、20.1 kN/m³、20.5 kN/m³、19.6 kN/m³, 泥石流固体颗粒重度 γ_H 分别为 26.9 kN/m³、27.2 kN/m³、27.3 kN/m³、26.8 kN/m³, 泥石流平均容重为 19.9 kN/m³, 泥石流平均固体颗粒重度为 27.1 kN/m³, 体积浓度 c_v 表达式:

$$c_v = (\gamma_c - \gamma_w) / (\gamma_H - \gamma_w) \quad (8)$$

带入公式(8)得体积浓度为 57.9%, 对应泥砂比 $R_{ns}=0.29$;

(2) 层流阻滞系数: 参考已有研究成果 (吴季寰等, 2022), 用工程地质类比法, 取层流阻滞系数 $K=2284$;

(3) 实验系数: 泥砂比 (R_{ns})—体积浓度 (c_v)—流变参数 (η 、 τ_y) 关系式 (O'Brien and Julien, 1993; 王裕宜等, 2003; Boniello et al., 2010):

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

根据公式(9)得出实验系数 $[\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2]$ 为 $[0.000249, 0.03, 15.38, 14.41]$;

(4)曼宁粗糙系数:参考 FLO-2D 使用手册建议值(O'Brien, 2009),结合实际调查,设定韩家沟流域内沟道及坡面曼宁系数 n 分别为 0.28、0.32;

(5)集水点及泥石流流量过程曲线:集水点选取在松散物源聚集处或水力条件充足的位置(图2a),根据10年一遇和50年一遇泥石流流量计算结果可得点位处泥石流流量过程曲线(图4)。

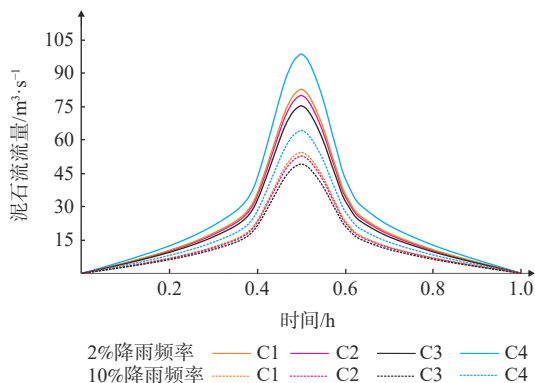


图4 韩家沟内集水点流量过程曲线

Fig. 4 Flow curve of water collection point in the Hanjia gully

3.4 情况模拟

根据国家气象局(<https://data.cma.cn/>)提供的松潘县1991—2022年逐日降水数据,利用空间插值法处理降雨数据,再进行非线性回归分析,得出涪江流域降雨频率拟合曲线(图5)与拟合公式。

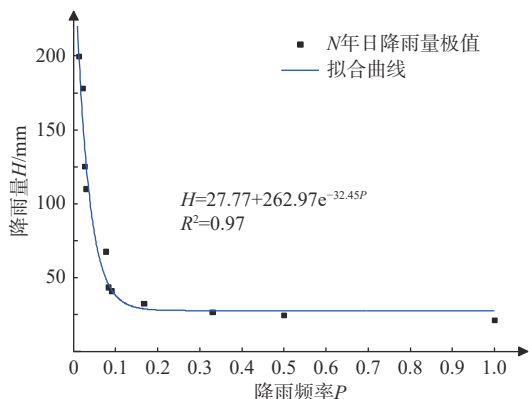


图5 涪江流域降雨量频率拟合曲线

Fig. 5 Fitting curve of rainfall frequency in the Fujiang River basin

$$H = 27.77 + 262.97e^{-32.45P} \quad (10)$$

式中, H — N 年日降雨量极值, mm; P —降雨频率;拟合公式置信概率为97%。

10年一遇降雨、50年一遇降雨对应 P 值分别

为 0.1、0.02, 带入式(2)可得 $H_{10\text{年一遇}} = 38\text{ mm}$, $H_{50\text{年一遇}} = 165.2\text{ mm}$ 。

结合降雨、防治工程条件,设定以下模拟情况。

(1)10年一遇降雨频率下,现有防治工程(I P_{10})与改进后的防治工程(II P_{10});

(2)50年一遇降雨频率下,现有防治工程(I P_{50})与改进后的防治工程(II P_{50})。

模拟比较不同降雨频率下防治工程改进前后韩家沟泥石流的泥深、流速及危险性,分析防治工程改进前后的防治效果。

4 泥石流危险性模拟结果

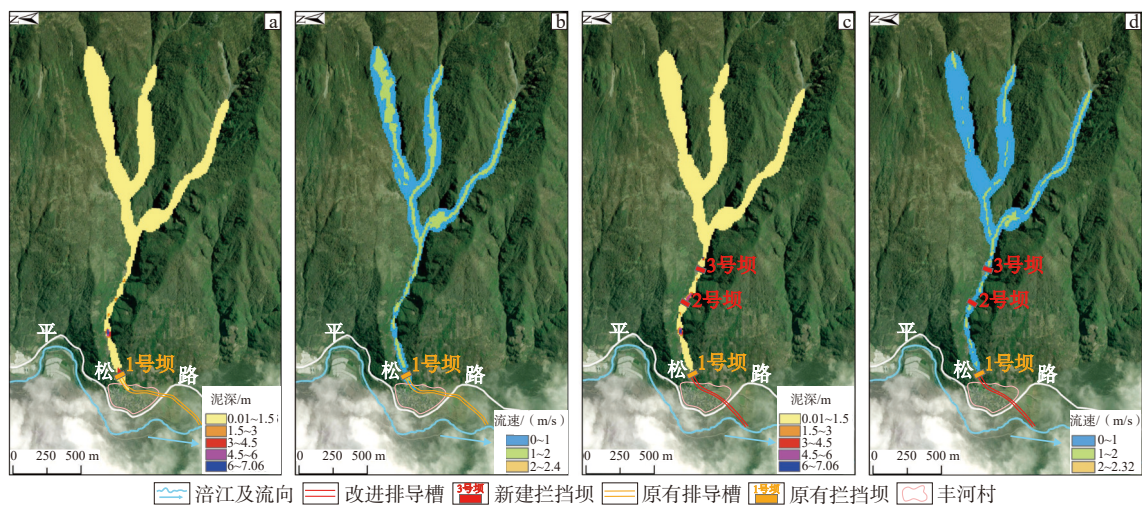
4.1 不同防治工程下的泥石流泥深与流速

(1)10年一遇降雨频率

模拟结果表明,在 I P_{10} 条件下,韩家沟泥石流高泥深区位于沟谷低洼处,较高流速区位于沟谷陡坎处(图6a、6b);沟口1号坝坝前最大泥深可达4.07 m(表2),沟床被抬升后,泥石流过拦挡坝后流速较高(图6b),拦挡坝下游堆积区,一部分泥石流固体物质堆积于排导槽内及两侧,最大泥深为1.41 m,最大流速2.4 m/s(表3),堆积面积约 $0.28 \times 10^4\text{ m}^2$ (表2)。在 II P_{10} 条件下,3号坝前最大泥深达6.2 m,2号坝前最大泥深达5.23 m,1号坝前最大泥深为1.05 m(表2,图6c),泥石流较高流速区位于2号坝和3号坝前后,通过坝后回淤的固体物质降低沟道纵坡,新增的两座拦挡坝有效减缓形成区的泥石流流速(图6d)。

(2)50年一遇降雨频率

模拟结果表明,在 I P_{50} 条件下,1号坝前后有较多泥石流物质堆积,坝前最大泥深达8.85 m(表2,图7a),在排导槽拐弯处,泥石流流体由于排泄不畅,发生堵塞,致泥石流冲出排导槽,冲毁农田,淤埋公路,最大泥深可达3.14 m,堆积区最大流速3.65 m/s(表3),堆积于涪江左岸岸坡,堆积面积达 $5.41 \times 10^4\text{ m}^2$,方量约 $2.15 \times 10^4\text{ m}^3$ (表2)。在 II P_{50} 条件下,3号坝上游泥石流较高流速区面积相比 I P_{50} 条件下显著减少(图7b、7c),堆积区最大流速3.4 m/s,固体物质多堆积于排导槽的中上段,最大泥深为3.9 m(表3,图7d),泥石流能够顺畅通过排导槽和公路过水涵洞,固体物质总堆积面积 $0.76 \times 10^4\text{ m}^2$,堆积方量约 $1.07 \times 10^4\text{ m}^3$ (表2),相比于 I P_{50} ,方量减少 $1.08 \times 10^4\text{ m}^3$,总堆积面积减少 $4.65 \times 10^4\text{ m}^2$ 。



a—现有防治工程下泥深；b—现有防治工程下流速；c—防治工程改进后泥深；d—防治工程改进后流速

图 6 10 年一遇降雨频率下不同防治工程的泥石流泥深与流速

Fig. 6 Mud depth and velocity of debris flow in different control engineering conditions under 10-year rainfall frequency

(a) Mud depth of debris flow under existing control engineering conditions; (b) Velocity of debris flow under existing control engineering conditions; (c) Mud depth of debris flow after improvement of control engineering; (d) Velocity of debris flow after improvement of control engineering

表 2 不同防治工程下的泥石流模拟结果

Table 2 Simulation results of debris flow under different control engineering conditions

降雨频率	模拟情况	拦挡坝数量/座	坝前100 m内最大泥深/m	坝前100 m内最大流速/(m/s)	堆积面积/ $\times 10^4 \text{ m}^2$	泥石流堆积方量/ $\times 10^4 \text{ m}^3$	威胁民宅面积/ $\times 10^4 \text{ m}^2$
10年一遇	I P_{10}	1	4.07(1号)	1.98(1号)	0.28	0.10	0
	II P_{10}	3	1.05(1号)5.23(2号)6.2(3号)	1.40(1号)2.07(2号)2.04(3号)	0	0	0
50年一遇	I P_{50}	1	8.85(1号)	2.3(1号)	5.41	2.15	0.47
	II P_{50}	3	6.17(1号)6.07(2号)6.88(3号)	2.26(1号)2.56(2号)2.61(3号)	0.76	1.07	0

注: 1号为原有拦挡坝; 2号、3号为新建拦挡坝

表 3 不同防治工程下堆积区的危险区面积、最大泥深与流速模拟结果

Table 3 Simulation results of hazardous area, maximum mud depth and velocity of accumulation area under different control engineering conditions

降雨频率	模拟情况	危险区面积/ $\times 10^4 \text{ m}^2$			最大流速/(m/s)	最大泥深/m
		高危险	中危险	低危险		
10年一遇	I P_{10}	0	0.11	0.17	2.40	1.41
	II P_{10}	0	0	0	0	0
50年一遇	I P_{50}	0.44	1.43	3.54	3.65	3.14
	II P_{50}	0.35	0.12	0.29	3.40	3.90

4.2 不同防治工程下的泥石流危险性

(1) 10 年一遇降雨频率

基于不同防治工程下韩家沟泥石流泥深和流速的模拟结果,通过泥深、泥深与流速乘积结果并

依据泥石流危险性分区标准(表 4; 曹鹏等, 2021)进行泥石流危险性分区(图 8, 表 5)。

在 I P_{10} 条件下,韩家沟泥石流高危险区分布于流通区沟道,沟口下方堆积区居民及建筑物受泥

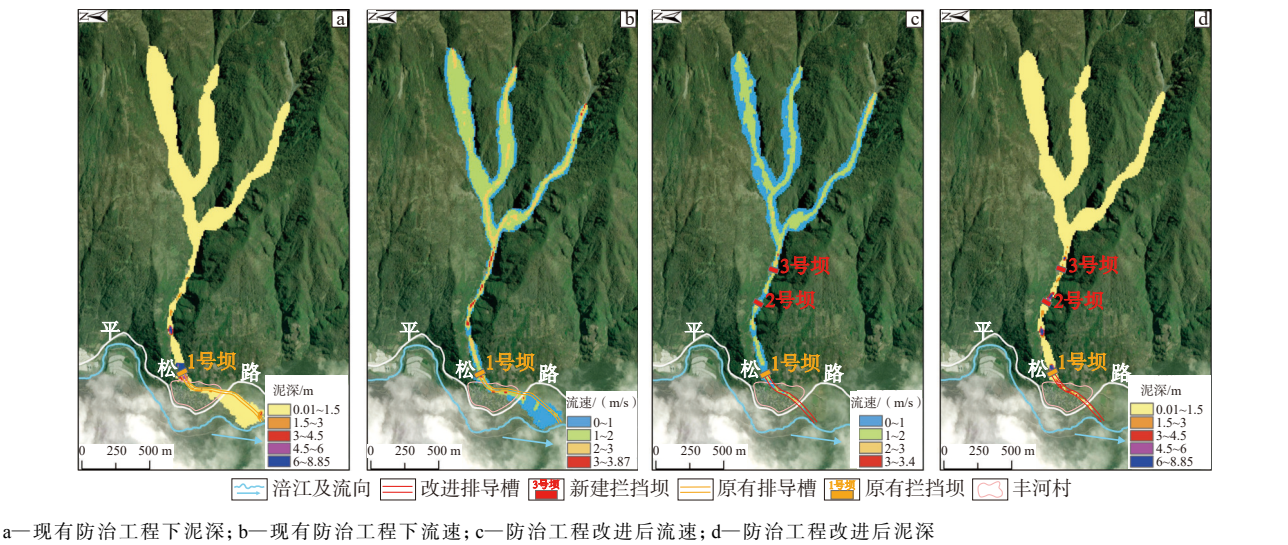


图 7 50 年一遇降雨频率下不同防治工程的泥石流泥深与流速

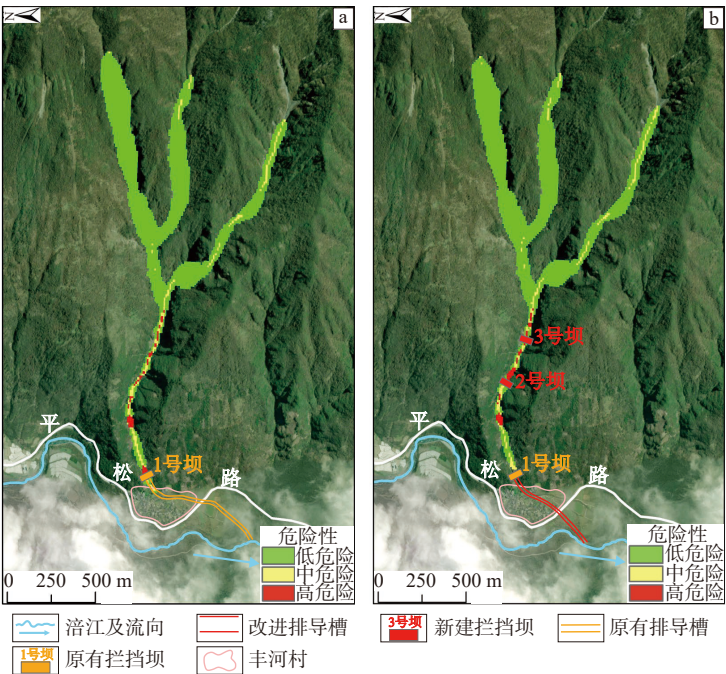
Fig. 7 Mud depth and velocity of debris flow in different control engineering conditions under 50-year rainfall frequency

(a) Mud depth of debris flow under existing control engineering conditions; (b) Velocity of debris flow under existing control engineering conditions; (c) Velocity of debris flow after improvement in control engineering; (d) Mud depth of debris flow after improvement in control engineering

表 4 泥石流危险性分区标准

危险性	堆积深度/m	逻辑关系	堆积深度与流速乘积
高	$H \geq 1.5$	OR	$VH \geq 1.5$
中	$0.5 < H < 1.5$	AND	$0.5 < VH < 1.5$
低	$0.01 \leq H \leq 0.5$	AND	$0.1 \leq VH \leq 0.5$

石流影响轻微(图 8a), 现有防治工程能够避免 10 年一遇泥石流发生时对村民生命及财产的危害。在 II P₁₀ 条件下, 泥石流高危险区主要分布在流通区中上游, 固体物质淤积在拦挡坝前(图 8b), 增建的 2 号坝和 3 号坝降低了泥石流的流速, 有效拦



a—现有防治工程; b—防治工程改进后

图 8 10 年一遇降雨频率下不同防治工程的泥石流危险性分区

Fig. 8 Hazard distribution of debris flow in different control engineering conditions under 10-year rainfall frequency

(a) Under existing control engineering conditions; (b) After improvements in control engineering

表 5 不同防治工程下泥石流危险性分区统计

Table 5 Statistics of hazard zones of debris flow under different control engineering conditions

降雨频率	模拟情况	危险区总面积 / $\times 10^4 \text{ m}^2$	高危险区		中危险区		低危险区	
			面积 / $\times 10^4 \text{ m}^2$	占总面积比例/%	面积 / $\times 10^4 \text{ m}^2$	占总面积比例 /%	面积 / $\times 10^4 \text{ m}^2$	占总面积比例 /%
10年一遇	I P_{10}	29.22	0.64	2.19	1.91	6.54	26.67	91.27
	II P_{10}	28.79	0.62	2.15	1.83	6.36	26.34	91.49
50年一遇	I P_{50}	36.08	1.83	5.07	5.01	13.89	29.24	81.04
	II P_{50}	31.56	1.99	6.31	3.99	12.64	25.58	81.05

截泥石流中的固体物质。

(2) 50 年一遇降雨频率

基于不同防治工程下韩家沟泥石流泥深和流速的模拟结果,依据泥石流危险性分区标准(表 4)进行泥石流危险性分区(图 9,表 5)。

在 I P_{50} 条件下,高危险区主要分布在 1 号坝前后、排导槽内及堆积扇扇缘涪江左岸,由于排导槽

拐弯,公路涵洞过水截面小,泥石流暴发时发生堵塞,流体冲出排导槽,造成农田、公路局部处于中危险区(图 9a),中危险区面积约 $1.43 \times 10^4 \text{ m}^2$,低危险区面积约 $3.54 \times 10^4 \text{ m}^2$ (表 3),威胁民宅面积约 $0.47 \times 10^4 \text{ m}^2$ (表 2)。在 II P_{50} 条件下,泥石流冲出沟口后沿排导槽泄流,高、中危险区基本限于排导槽内,随水动力条件降低,固体物质最终堆积于排导槽内(图 9b)。

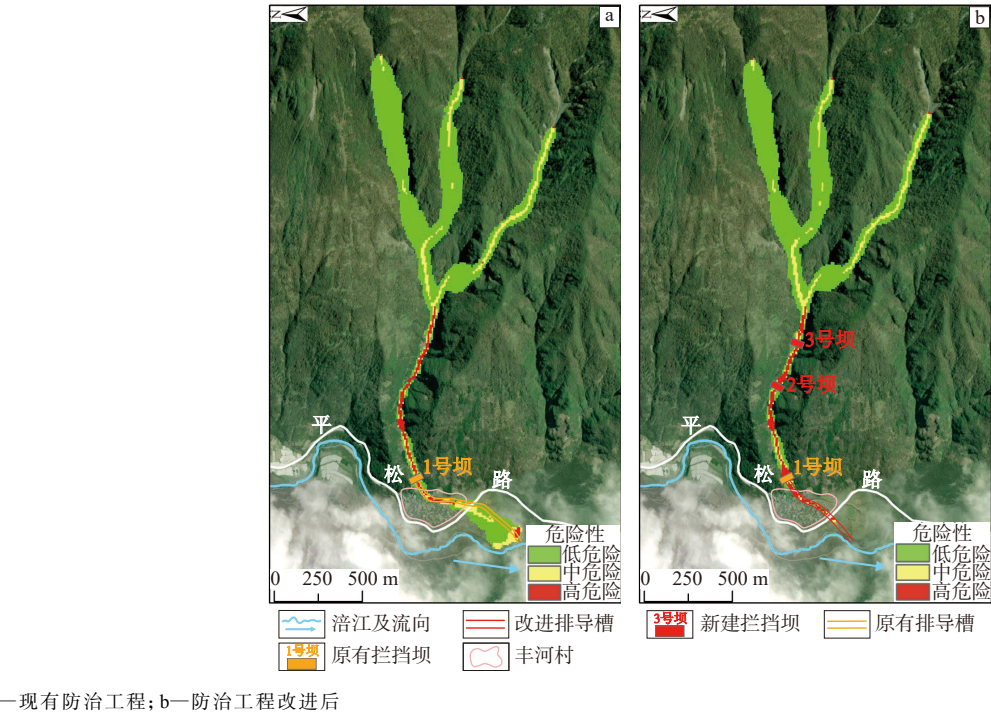


图 9 50 年一遇降雨频率下不同防治工程的泥石流危险性分区

Fig. 9 Hazard distribution of debris flow in different control engineering conditions under 50-year rainfall frequency

(a) Under existing control engineering conditions; (b) After improvements in control engineering

5 防治工程改进前后效果对比分析

在 II P_{50} 条件下,相比于 I P_{50} ,增加的两座拦挡坝坝前泥石流流速整体小于改进前,坝前泥深整体

大于改进前(图 10); 3 号坝前 100 m 范围内泥石流的最大流速由 3.66 m/s 降低至 2.61 m/s,最大泥深由 1.34 m 增加至 6.88 m, 2 号坝前 100 m 范围内的最大流速由 3.25 m/s 降低至 2.56 m/s,最大泥深由 2.21 m 增加至 6.07 m(图 10),说明通过新建拦挡坝的有

效拦蓄,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。

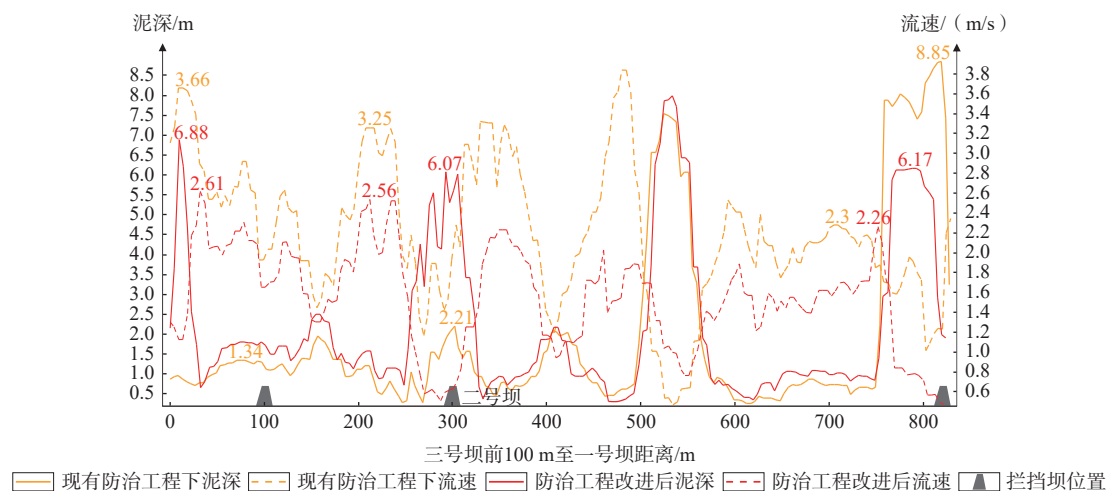


图 10 50 年一遇降雨频率下不同防治工程的泥石流泥深及流速变化曲线

Fig. 10 Change curve of mud depth and velocity of debris flow in different control engineering conditions under 50-year rainfall frequency

Ⅱ P_{50} 条件下沟口坝下方泥深、流速迅速降低,相比于 $I P_{50}$ 条件下,固体物质堆积量减少 50.2%,堆积面积减少 86%(表 2);高危险区集中于拦挡坝前和改进的排导槽内,坝下游危险性范围大大减小(图 9b)。采用多级拦挡坝、排导槽截弯取直等改进的防治工程后,治理效果显著。

在 $I P_{10}$ 和 $II P_{10}$ 条件下,泥石流高危险区和中危险区主要分布于流通区沟道内。 $I P_{10}$ 条件下,高危险区主要分布在 1 号坝上游,中危险区在坝后排导槽内也有局部分布,沟口下方堆积区居民及建筑物受泥石流影响轻微,平松公路不受影响,现有防治工程能够避免 10 年一遇泥石流。 $II P_{10}$ 条件下,泥石流高危险区主要分布在流通区中上游,固体物质淤积在拦挡坝前,沟口下方承灾体不受影响。可见,增建的 2 号坝和 3 号坝降低了泥石流的流速,有效拦截泥石流中的固体物质,治理效果明显。

在 $I P_{50}$ 和 $II P_{50}$ 条件下,泥石流高危险区主要分布于流通区沟道内,中危险区主要分布在形成区和堆积区,两种模拟情况下略有不同。 $I P_{50}$ 条件下,泥石流高危险区还分布在 1 号坝前后、排导槽内及堆积扇前缘;中危险区主要分布在形成区沟道、排导槽两侧及堆积扇前缘,其他为低危险区;堆积区中危险区面积约 $1.43 \times 10^4 \text{ m}^2$,农田、公路局部处于中危险区,堆积区低危险区面积约 $3.54 \times 10^4 \text{ m}^2$,威胁民宅面积约 $0.47 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。 $II P_{50}$ 条件下,泥石流冲出沟

口后高危险区基本限于排导槽内,沿排导槽泄流;中危险区主要分布在形成区沟道和排导槽局部,其他为低危险区;泥石流在堆积区随水动力条件降低,固体物质最终堆积于排导槽内。可见,在流通区增设 2 座拦挡坝,改善排导槽泄流条件,泥石流高危险区面积虽稍有增大,但均位于流通区沟道或排导槽内,对承灾体没有损害,堆积区中~低危险区面积比 $I P_{50}$ 条件下明显减少,治理效果显著。

6 讨论

为验证 FLO-2D 模拟结果的可靠性,比较韩家沟泥石流现场实测和数值模拟结果,取 $I P_{50}$ 条件下的堆积范围及二者重合的范围,计算公式如下:

$$A_c = \frac{S_0}{S_a} \times \frac{S_0}{S_n} \times 100\% \quad (11)$$

式中, A_c —数值模拟精确度,其值越接近 1,说明数值模拟结果越可靠; S_0 —实际堆积扇与模拟堆积扇重叠面积, $\times 10^4 \text{ m}^2$; S_a —实际堆积扇面积, $\times 10^4 \text{ m}^2$; S_n —模拟堆积扇面积, $\times 10^4 \text{ m}^2$ 。

通过计算 $A_c=75\%$,符合模拟精度要求(表 6)。FLO-2D 软件不仅可以模拟分析泥石流的运动过程,还能模拟流速、泥深和淤积范围,更适合对建有防治工程的泥石流危险性进行分析。虽然受限于 DEM 数据精度,未加入防治工程的结构要素,模拟结果存在一定误差,在参数确定方面仍有需要改进

或提高的空间,但其仍是模拟分析的常用有效软件,有进一步推广的前景。

表 6 韩家沟泥石流数值模拟精度

Table 6 Numerical simulation accuracy of Hanjia gully debris flow

沟名	堆积扇面积/ $\times 10^4 \text{ m}^2$			A_c
	S_a	S_n	S_0	
韩家沟	5.15	5.41	4.57	75

7 结论

文章提出了增设拦挡坝以及排导槽截弯取直等改进的防治工程措施。

(1) FLO-2D 模拟不同降雨频率下防治工程改进前后韩家沟泥石流危险性分析结果表明: 现有防治工程条件下, 由 10 年一遇降雨至 50 年一遇降雨, 泥石流暴发时堆积区最大泥深由 1.41 m 增加至 3.14 m, 最大流速由 2.4 m/s 增加至 3.65 m/s, 堆积面积由 $0.28 \times 10^4 \text{ m}^2$ 增加至 $5.41 \times 10^4 \text{ m}^2$; 10 年一遇泥石流高危险区集中于 1 号坝上游, 现有防治工程基本能满足防灾需求。在现有防治工程条件下, 50 年一遇泥石流高危险区位于堆积区南侧, 农田、公路局部处于中危险区, 堆积区高危险区面积约 $0.44 \times 10^4 \text{ m}^2$, 中危险区面积约 $1.43 \times 10^4 \text{ m}^2$, 低危险区面积约 $3.54 \times 10^4 \text{ m}^2$, 可冲毁部分民宅、农田, 淤埋公路。

(2) 防治工程改进后, 增加的两座拦挡坝坝前泥石流流速整体小于改进前, 坝前泥深整体大于改进前; 3 号坝前 100 m 范围内泥石流的最大流速下降了 29%, 最大泥深增加了 413%; 2 号坝前 100 m 范围内的最大流速下降了 21%, 最大泥深增加了 175%, 泥石流堆积面积减少了 86%, 堆积区最大泥深 3.9 m, 最大流速 3.4 m/s。

(3) 改进的防治工程可有效地减小泥石流下泄的固体物质量, 引导泥石流沿排导槽泄流, 泥石流高、中危险区集中于排导槽内, 高危险区面积减少至 $0.35 \times 10^4 \text{ m}^2$, 中危险区面积减少至 $0.12 \times 10^4 \text{ m}^2$, 低危险区面积减少至 $0.29 \times 10^4 \text{ m}^2$, 泥石流防治效果显著。

References

BONIELLO M A, CALLIGARIS C, LAPASIN R, et al., 2010. Rheo-logical investigation and simulation of a debris-flow event in the Fella watershed[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(5): 989-997.
BERTOLO P, WIECZOREK G F, 2005. Calibration of numerical models for

small debris flows in Yosemite Valley, California, USA[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5(6): 993-1001.
BOCCALI C, CALLIGARIS C, ZINI L, et al., 2015. Comparison of scenarios after ten years: The influence of input parameters in Val Canale valley (Friuli Venezia Giulia, Italy)[M]//LOLLINO G, GIORDAN D, CROSTA G B, et al. *Engineering geology for society and territory - volume 2: Landslide processes*. Cham: Springer: 525-529.
CHANG M, LIU Y, ZHOU C, et al., 2020. Hazard assessment of a catastrophic mine waste debris flow of Hou Gully, Shimian, China[J]. *Engineering Geology*, 275: 105733.
CHEN P Y, YU H M, LIU Y, et al., 2013. Evaluation of debris flow risk based on independent information data fluctuation weighting method[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 34(2): 449-454. (in Chinese with English abstract)
CONG K, LI R D, BI Y H, 2019. Benefit evaluation of debris flow control engineering based on the FLO-2D model[J]. *Northwestern Geology*, 52(3): 209-216. (in Chinese with English abstract)
CHEN H, DONG T X, LI Y, et al., 2020. Geomorphological characteristics and its response to fault activity in the upper reaches of the Fujiang Drainage Basin, China[J]. *Mountain Research*, 38(4): 542-551. (in Chinese with English abstract)
CAO P, HOU S S, CHEN L, et al., 2021. 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*, 32(2): 100-109. (in Chinese with English abstract)
DU X J, SUN S Q, ZHAO Z, et al., 2016. Research on engineering control effect on Hongchun Gully debris based on FLO-2D model[J]. *Earth and Environment*, 44(3): 376-381. (in Chinese with English abstract)
FU G C, LV T Y, SUN D X, et al., 2017. Seismogenic structure of the MS7.0 earthquake on August 8, 2017 in Jiuzhaigou, Sichuan[J]. *Journal of Geomechanics*, 23(6): 799-809. (in Chinese with English abstract)
FANG Q S, TANG C, WANG Y, et al., 2016. A calculation method for predicting dynamic reserve and the total amount of material source of the debris flows in the Wenchuan meizoseismal area[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 36(6): 1008-1014. (in Chinese with English abstract)
GREGORETTI C, STANCANELLI L M, BERNARD M, et al., 2019. Relevance of erosion processes when modelling in-channel gravel debris flows for efficient hazard assessment[J]. *Journal of Hydrology*, 568: 575-591.
LIU X L, TANG C, FANG Q S, et al., 2017. Hazard assessment of dam-breaking debris flow based on numerical simulation[J]. *Journal of Sediment Research*, 42(6): 28-34. (in Chinese with English abstract)
LI B X, CAI Q, SONG J, et al., 2022. Risk assessment of debris flow hazard based on FLO-2D: A case study of debris flow in Maiduo Gully[J]. *Journal of Natural Disasters*, 31(4): 256-265. (in Chinese with English abstract)
MA S Q, YANG W M, ZHANG C S, et al., 2022. Provenance characteristics and risk analysis of debris flows in Siertou, Lanzhou city[J]. *Journal of Geomechanics*, 28(6): 1059-1070. (in Chinese with English abstract)
Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China, 2006. Specification of geological investigation for debris flow stabilization: DZ/T 0220-2006[S]. Beijing: Standards Press of China. (in Chinese)

- O'BRIEN J S, 2009. FLO-2D Reference manual version 2009[R]. Arizona: FLO-2D software, Inc.
- O'BRIEN J S, JULIEN P Y, FULLERTON W T, 1993. Two-dimensional water flood and mudflow simulation[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 119(2): 244-261.
- SHANG H, WANG M X, LUO D H, et al., 2019. Single gully debris flow hazard assessment based on function assignment model and fuzzy comprehensive evaluation method[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 30(1): 61-69. (in Chinese with English abstract)
- SHAO Y X, JI Y, YAN B Q, et al., 2021. Daqinggou debris flow hazard investigation and evaluation in Renhe, Panzhihua of Sichuan[J]. *Journal of Agricultural Catastrophology*, 11(5): 145-150. (in Chinese with English abstract)
- TAN C, CHEN J P, LI H Z, et al., 2012. Application of weighted distance discriminant analysis in debris flow risk assessment[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(6): 1847-1852. (in Chinese with English abstract)
- TANG C, ZHOU J Q, ZHU J, et al., 1994. A study on the risk zoning of debris flow on alluvial fans by applying technology of numerical simulation[J]. *Journal of Catastrophology*, 9(4): 7-13. (in Chinese with English abstract)
- TANG H, TANG C, CHEN M, et al., 2019. Numerical simulation and analysis of debris flow prevention engineering effects in strong earthquake area[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 39(4): 196-201. (in Chinese with English abstract)
- WEI B B, ZHAO Q H, HAN G, et al., 2013. Grey correlation method based hazard assessment of debris flow in quake-hit area-taking debris flows in Beichuan as an example[J]. *Journal of Engineering Geology*, 21(4): 525-533. (in Chinese with English abstract)
- WU Y H, LIU K F, CHEN Y C, 2013. Comparison between FLO-2D and Debris-2D on the application of assessment of granular debris flow hazards with case study[J]. *Journal of Mountain Science*, 10(2): 293-304.
- WANG N N, TANG C, 2014. Numerical simulation of Huangyang Gully debris flow Longchi town Dujiangyan city based on FLO-2D[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 25(1): 107-112. (in Chinese with English abstract)
- WANG J, DING M T, HUANG Y, 2016. Debris flow motion feature and control measures of Lianhexi Valley based on FLO-2D[J]. *Journal of Southwest University of Science and Technology*, 31(2): 59-66. (in Chinese with English abstract)
- WANG G F, CHEN Z L, MAO J R, et al., 2020. Debris flow risk assessment in Bailong River Basin under different engineering scenarios and rainfall frequency conditions[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 39(5): 30-40. (in Chinese with English abstract)
- WU J H, ZHANG C S, YANG W M, et al., 2022. 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*, 31(1): 81-91. (in Chinese with English abstract)
- WANG Y Y, ZHAN Q D, HAN W L, et al., 2003. Stress-strain properties of viscous debris flow and determination of velocity parameter[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 14(1): 9-13. (in Chinese with English abstract)
- YANG H L, FAN X Y, JIANG Y J, 2017. Analysis of engineering treatment effect of debris flow based on FLO-2D: Case of Yindongzi gully in Dujiangyan city[J]. *Yangtze River*, 48(17): 66-71, 95. (in Chinese with English abstract)
- YAO X, ZHOU Z K, LI L J, et al., 2017. InSAR co-seismic deformation of 2017 MS7.0 Jiuzhaigou earthquake and discussions on seismogenic tectonics[J]. *Journal of Geomechanics*, 23(4): 507-514. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG C S, ZHANG Y C, MA Y S, 2003. Regional dangerous on the geological hazards of collapse, landslide and debris flow in the upper reaches of the Yellow River[J]. *Journal of Geomechanics*, 9(2): 143-153. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG H W, LIU F Z, WANG J C, et al., 2022. Hazard assessment of debris flows in Kongpo Gyamda, Tibet based on FLO-2D numerical simulation[J]. *Journal of Geomechanics*, 28(2): 306-318. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG F X, ZHANG L Q, ZHOU J, et al., 2019. Risk assessment of debris flow in Ruoru Village, Tibet based on FLO-2D[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 30(5): 95-102. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG X Z, TIE Y B, LI G H, et al., 2022. Characteristics and risk assessment of debris flows in the Wandong catchment after the MS6.8 Luding earthquake[J]. *Journal of Geomechanics*, 28(6): 1035-1045. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 丛凯, 李瑞冬, 毕远宏, 2019. 基于 FLO-2D 模型的泥石流治理工程效益评价[J]. *西北地质*, 52(3): 209-216.
- 陈浩, 董廷旭, 李勇, 等, 2020. 涪江上游流域地貌特征及其对断裂活动性的响应[J]. *山地学报*, 38(4): 542-551.
- 陈鹏宇, 余宏明, 刘勇, 等, 2013. 基于独立信息数据波动赋权的泥石流危险度评价[J]. *岩土力学*, 34(02): 449-454.
- 曹鹏, 侯圣山, 陈亮, 等, 2021. 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*, 32(2): 100-109.
- 杜雪剑, 孙书勤, 赵峥, 等, 2016. 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*, 44(3): 376-381.
- 付国超, 吕同艳, 孙东霞, 等, 2017. 2017 年 8 月 8 日四川九寨沟 7.0 级地震发震构造浅析[J]. *地质力学学报*, 23(6): 799-809.
- 方群生, 唐川, 王毅, 等, 2016. 汶川极震区泥石流流动储量与总物源量计算方法研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 36(6): 1008-1014.
- 高士麟, 2021. 四川省小流域设计洪水分析及应用[J]. *四川建筑*, 41(5): 230-233.
- 刘鑫磊, 唐川, 方群生, 等, 2017. 基于数值模拟的溃决型泥石流危险性评价研究[J]. *泥沙研究*, 42(6): 28-34.
- 李宝幸, 蔡强, 宋军, 等, 2022. 基于 FLO-2D 的泥石流灾害风险评价: 以麦多沟泥石流为例[J]. *自然灾害学报*, 31(4): 256-265.
- 马思琦, 杨为民, 张春山, 等, 2022. 兰州市寺儿沟泥石流物源特征及其危险性分析[J]. *地质力学学报*, 28(6): 1059-1070.
- 尚慧, 王明轩, 罗东海, 等, 2019. 基于函数赋值模型与模糊综合评价

- 判法的单沟泥石流危险性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 30(1): 61-69.
- 邵玉祥, 计扬, 严步青, 等, 2021. 四川攀枝花仁和区大箐沟泥石流调查及危险性评价[J]. 农业灾害研究, 11(5): 145-150.
- 唐川, 周钜乾, 朱静, 等, 1994. 泥石流堆积扇危险度分区评价的数值模拟研究[J]. 灾害学, 9(4): 7-13.
- 唐海, 唐川, 陈明, 等, 2019. 强震区泥石流防治工程效果数值模拟分析[J]. 水土保持通报, 39(4): 196-201.
- 谭春, 陈剑平, 李会中, 等, 2012. 加权距离判别法在泥石流危险度评价中的应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 42(06): 1847-1852.
- 魏斌斌, 赵其华, 韩刚, 等, 2013. 基于灰色关联法的地震灾区泥石流危险性评价: 以北川县泥石流为例[J]. 工程地质学报, 21(4): 525-533.
- 王纳纳, 唐川, 2014. 基于FLO-2D的都江堰市龙池镇黄夹沟泥石流数值模拟[J]. 地质灾害与环境保护, 25(1): 107-112.
- 王骏, 丁明涛, 黄英, 2016. 基于FLO-2D的联合溪沟泥石流运动特征及防治对策[J]. 西南科技大学学报, 31(2): 59-66.
- 王高峰, 陈宗良, 毛佳睿, 等, 2020. 不同工程情景和降雨频率工况下白龙江流域泥石流危险性评价[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 39(5): 30-40.
- 吴季寰, 张春山, 杨为民, 等, 2022. 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, 31(1): 81-91.
- 王裕宜, 詹钱登, 韩文亮, 等, 2003. 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, 14(1): 9-13.
- 杨海龙, 樊晓一, 姜元俊, 2017. 基于FLO-2D的泥石流工程治理效果分析: 以都江堰银洞子沟泥石流为例[J]. 人民长江, 48(17): 66-71, 95.
- 姚鑫, 周振凯, 李凌婧, 等, 2017. 2017年四川九寨沟MS7.0地震InSAR同震形变场及发震构造探讨[J]. 地质力学学报, 23(4): 507-514.
- 张春山, 张业成, 马寅生, 2003. 黄河上游地区崩塌、滑坡、泥石流地质灾害区域危险性评价[J]. 地质力学学报, 9(2): 143-153.
- 张浩韦, 刘福臻, 王军朝, 等, 2022. 基于FLO-2D数值模拟的工布江达县城泥石流灾害危险性评价[J]. 地质力学学报, 28(2): 306-318.
- 张奋翔, 张路青, 周剑, 等, 2019. 基于FLO-2D的西藏若如村泥石流危险性分析[J]. 水资源与水工程学报, 30(5): 95-102.
- 张宪政, 铁永波, 李光辉, 等, 2022. 四川泸定Ms6.8级地震区湾东河流域泥石流活动性预测[J]. 地质力学学报, 28(6): 1035-1045.
- 中华人民共和国国土资源部, 2006. 泥石流灾害防治工程勘查规范: DZ/T 0220-2006[S]. 北京: 中国标准出版社.