



## 基于 FLO-2D 的矿山泥石流运动特征及危险性评价 ——以甘肃省岷县簸箕沟矿山泥石流为例

刘德玉<sup>1,2</sup>, 蒋兴波<sup>1,2</sup>, 李保强<sup>1,2</sup>

1. 甘肃省地下水工程及地热资源重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 2. 甘肃省地质环境监测院, 甘肃 兰州 730050

**摘要:** 岷县簸箕沟金矿因人类开采活动引发了矿山泥石流灾害。采用 FLO-2D 软件模拟分析了降雨强度重现期 50 a 及 100 a 条件下的簸箕沟泥石流运动特征, 进行危险性评价和分区, 并结合实际发生情况做了精度验证。结果表明: 簸箕沟泥石流的堆积扇范围、堆积深度以及平均流速等运动特征参数随着降雨重现周期的变长而增大, 堆积扇中部的堆积深度及流速明显大于两翼及前端。泥石流的危险区集中分布于泥石流沟道以及沟口一定范围内。随着降雨重现周期的变长, 高危险区面积比例由 48% 升高至 54.0%。通过精度验证得出模拟结果与实际情况基本相符, 可信度较高。

**关键词:** 矿山泥石流; FLO-2D 模拟; 危险性评价; 降雨频率; 甘肃省

## MOVEMENT CHARACTERISTICS AND RISK ASSESSMENT OF MINE DEBRIS FLOW BASED ON FLO-2D SIMULATION: A Case Study of the Debris Flow in Bojigou Mine of Minxian County, Gansu Province

LIU De-yu<sup>1,2</sup>, JIANG Xing-bo<sup>1,2</sup>, LI Bao-qiang<sup>1,2</sup>

1. Key Laboratory for Groundwater Engineering and Geothermal Resources of Gansu Province, Lanzhou 730050, China;

2. Gansu Institute of Geological Environment Monitoring, Lanzhou 730050, China

**Abstract:** The human mining activities in Bojigou gold mine of Minxian County cause debris flow. The FLO-2D software is used to simulate and analyze the movement characteristics of Bojigou debris flow under the frequency of rainfall return periods of 50 a and 100 a. On this basis, the risk assessment and zoning are carried out, and the accuracy is verified by actual situation. The results show that parameters of movement characteristics such as the range of alluvial fan, accumulation depth and average velocity of debris flow increase with the increase of rainfall return period. The accumulation depth and velocity in the middle part of alluvial fan are significantly larger than those in the wings and front end. The hazardous areas of debris flow are concentrated in a certain range at the gully and gully mouth. The proportion of high risk area increases from 48% to 54.0% with the longer rainfall return period. The simulation results are basically consistent with the actual situation through accuracy verification, which are reliable in application.

**Key words:** mine debris flow; FLO-2D simulation; risk assessment; rainfall frequency; Gansu Province

### 0 引言

矿山泥石流是山区开发矿产资源过程中废石渣堆

放引发的人工泥石流<sup>[1-2]</sup>, 是山区最常见、危害最严重的地质灾害类型之一。与自然形成的泥石流不同, 矿

收稿日期: 2021-08-23; 修回日期: 2021-10-25. 编辑: 张哲.

基金项目: 中国地质调查局项目“洮河流域中游灾害地质调查”(DD20190645).

作者简介: 刘德玉(1988—), 男, 硕士, 工程师, 从事矿山地质灾害方面的研究工作, 通信地址 甘肃省兰州市七里河区建兰新村 120 号, E-mail//Ldeyu2010@163.com

山泥石流的形成、演化主要受控于人类开发矿产资源活动的影响,人为活动导致原本非泥石流沟演变为泥石流沟,低频泥石流沟演变为高频泥石流沟<sup>[3-4]</sup>.目前,国内对于自然形成的泥石流研究程度较高,而在矿山泥石流方面的研究较少,已有的研究成果主要集中在矿山泥石流的发育特征<sup>[5-6]</sup>、形成机理<sup>[7-8]</sup>、影响因素<sup>[9]</sup>等方面,针对矿山泥石流运动特征及危险性评价的研究甚少,开展该方面的研究对于防灾减灾工作具有重要的现实意义.在泥石流危险性评价方法选择上,国内学者除了采用基于单沟泥石流危险性定量评价模型<sup>[10-11]</sup>外,各种数值模拟软件模型也得到了越来越多的应用,如 FLO-2D、RAMMS、MassMov2D<sup>[12]</sup>等.其中,FLO-2D 软件模型因具有操作简单、对泥石流流变时空变化特征及运动过程模拟较为准确、评价结果与实际情况吻合度较好等优点而得到国际上的广泛认可<sup>[13-14]</sup>.

本研究以甘肃省定西市岷县簸箕沟矿山泥石流为例,在 2019 年实地调查的基础上,对影响泥石流发育的 3 个主要条件(地形、降水及固体物源)进行分析,采用 FLO-2D 软件模拟分析降雨强度重现期 50 a 及 100 a 条件下的泥石流运动特征,划分危险性评价分区,通过与实际发生情况进行对比并计算模拟精度,验证模拟方法及结论的可靠性.该研究可为矿山泥石流的运动特征分析及危险性评价提供一种新的思路和方法,以期为该地区及其他地区的泥石流灾害防治及国土空间规划提供科学依据及参考.

## 1 研究区概况

### 1.1 基本情况

簸箕沟金矿地处甘肃省定西市岷县秦许乡境内,距离岷县城西南约 10 km (图 1).沟口附近为泥地族村居民点、农田、213 乡道及村路,距离南侧西河主河道约 450 m (图 2).流域内植被平均覆盖率约为 35%,植被类型主要为草地及当地村民种植的当归、黄芪等药材.

该矿山位于岷县鹿儿坝金矿东延段,开采方式为地下开采,矿区累计查明金资源量达 8.6 t,已接近大型矿床规模<sup>[16]</sup>.2012 年 5 月 10 日,受短时强降水影响,簸箕沟暴发泥石流,淤积毁坏沟口附近农田近 1 hm<sup>2</sup>,造成重大经济损失.

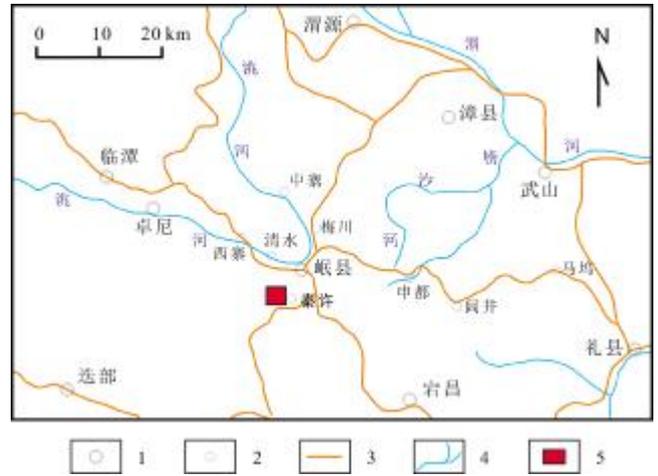


图 1 研究区地理位置图

Fig. 1 Geographical location map of the study area  
1—县(county); 2—乡(township); 3—公路(highway); 4—水系(river);  
5—研究区(study area)

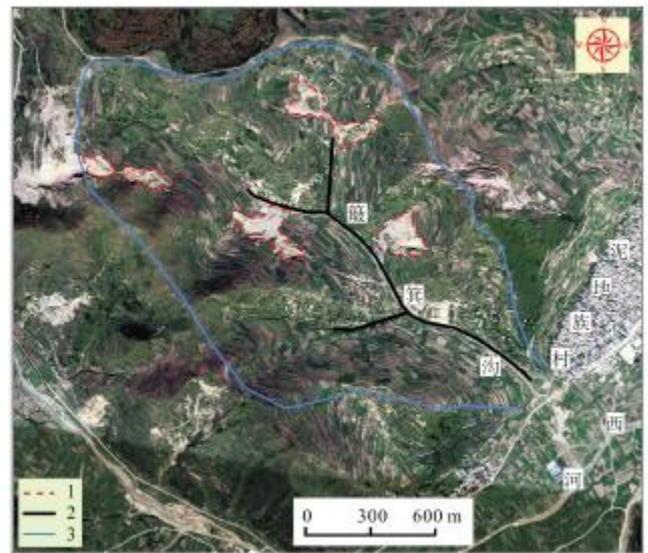


图 2 簸箕沟流域及矿渣分布图

Fig. 2 Bojigou watershed and slag distribution map  
1—矿渣边界(slag boundary); 2—沟道(gully channel); 3—流域边界  
(watershed boundary)

### 1.2 地形条件

簸箕沟地势总体西北高,东南低,呈北西方向延伸,地形切割较强烈,相对高差较大.流域海拔最高约 2 780 m,最低 2 470 m,相对高差 310 m,地貌类型为构造侵蚀中低山地貌.簸箕沟流域面积约 2.87 km<sup>2</sup>,主沟道长 2.56 km,平均沟床纵比降 121‰.流域形状呈“桃叶”型,沟谷多呈深切“V”字型.沟道两岸山势较陡峻,坡度 30~60°,上游沟床坡度较陡,沟谷狭窄,宽度

5~10 m,下游近沟口处斜坡多为近直立陡崖,可见泥石流相碎石沿沟口流向定向排列. 簸箕沟陡峻的地形条件(相对高差及沟床纵比降大、沟坡坡度陡)以及较小的流域面积都有利于泥石流的形成<sup>[17]</sup>.

### 1.3 降水条件

研究区具有降水集中、暴雨多发的主要特点,为泥石流灾害的发生提供了有利的水动力条件. 根据气象资料,区内多年平均降水量为 560.8 mm/a,年最大降水量为 709.3 mm,日最大降水量为 61.5 mm,1 h 最大降水量 54.0 mm,10 min 最大降水量为 30.4 mm. 降水年内分配不均,降水量主要集中于 5—9 月,占全年降水总量的 78%以上,大雨(大于 25 mm/d)多年平均爆发次数为 2.1 次/a. 可能发生泥石流的 24 h 的界限雨值  $H_{24(D)}=30$  mm,1 h 的界限雨值  $H_{1(D)}=15$  mm,10 min 的界限雨值  $H_{1/6(D)}=6$  mm. 2012 年 5 月 10 日 17 时许,受短时强降水影响,岷县多地暴发特大山洪泥石流灾害,降雨中心 1 h 降雨量达到 42 mm,持续时长约 40 min,过程雨量 69.2 mm<sup>[18]</sup>. 簸箕沟距离降雨中心约 30 km,降雨强度重现期达到 50 a,引发泥石流灾害.

### 1.4 固体物源条件

簸箕沟泥石流的固体物质来源主要为采矿活动产生废石弃渣( $Q_4^{ml}$ ),其次为坡面残坡积物( $Q_4^{el+dl}$ )以及沟岸少量的滑坡、崩塌重力堆积物( $Q_4^{del+col}$ ). 废石弃渣的物质组成主要为三叠系(T)板岩、砂质板岩和砂岩块石,粒径多在 6~30 cm,最大粒径约 120 cm,结构松散凌乱. 残坡积物的物质组成主要为坡面风化的板岩、砂岩碎屑,粒径大小不一. 流域内松散固体物质体积约  $32 \times 10^4$  m<sup>3</sup>,其中,4 处矿山开采点形成的废石弃渣随意堆放在硐口外的山坡和沟道内,体积约  $26 \times 10^4$  m<sup>3</sup>,占固体物质总量的 81%,且随着矿山开采规模和开采深度的增大,废石弃渣仍在不断增长. 固体松散物质的大量增加为泥石流的产生提供了丰富的物质来源.

## 2 研究方法

### 2.1 FLO-2D 软件概况

FLO-2D 软件是 O'Brien 于 1988 年开发的基于

非牛顿流体模型及中央有限差分数值方法的泥石流模拟软件<sup>[19]</sup>. 该软件可以完整分析泥石流的运动特征及流变状态,在预测泥石流堆积范围以及划分危险性评价分区方面取得了较好的效果.

### 2.2 模拟参数取值

模拟所需的地形数据采用簸箕沟流域 1:1 万等高线,在 ArcGIS 软件中生成 DEM 数据,转换为 ASC II 格式,导入 FLO-2D 后构建 10 m × 10 m 的网格模型. 模拟计算所需的流变参数通过现场调查以及查阅 FLO-2D 手册确定. 其中,簸箕沟在 50 a 及 100 a 降雨重现期频率下的暴雨洪峰流量及泥石流峰值流量参数见表 1,其余模拟参数见表 2.

表 1 不同降雨频率下的暴雨参数取值表  
Table 1 Rainstorm parameters under different rainfall frequencies

降雨重现期/a	暴雨洪峰流量 $Q_p/(m^3/s)$	泥石流峰值流量 $Q_c/(m^3/s)$
50 (P=2%)	48.23	94.54
100 (P=1%)	60.30	118.18

## 3 模拟结果及精度验证

### 3.1 泥石流运动特征参数模拟结果

按照降雨强度重现期 50 a ( $P=2\%$ )和 100 a ( $P=1\%$ )的降雨频率条件对簸箕沟泥石流的运动过程进行模拟计算,获得泥石流暴发过程中的流体堆积深度、流体速度、冲出沟口物源量、堆积扇面积和体积等数据,模拟结果见表 3 和图 3.

由这 2 种降雨重现周期的模拟结果可知堆积范围、最大流速以及平均流速随着重现周期的变长而增大. 堆积的深度从出沟口往中部逐渐增加,在中部停滞,而后往前动力渐小,随即堆积厚度越来越小. 堆积扇中部区域一般为最深堆积区域,泥石流堆积区两翼及堆积前端的深度一般小于泥石流堆积区的中部. 在地形上,堆积扇偏向上游的区域堆积深度较大,偏向下游的区域堆积深度较小. 堆积区中部的流体流速明显大于两翼及前段.

表 2 模拟参数取值表

Table 2 Value table of simulation parameters

曼宁系数 n	体积浓度 $C_v$	层流阻滞系数 K	泥石流容重 $\gamma_m/(t/m^3)$	宾汉黏滞系数 $\alpha_1$	宾汉黏滞系数 $\beta_1$	宾汉屈服系数 $\alpha_2$	宾汉屈服系数 $\beta_2$
0.1	0.49	2280	1.6	0.798	13.12	0.0042	11.14

表3 泥石流运动过程模拟计算结果

Table 3 Simulation results of debris flow movement process

频率/%	最大堆积深度/m	平均堆积深度/m	堆积扇面积/10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>	堆积扇体积/10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	冲出沟口物源量/10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	最大流速/(m/s)	平均流速/(m/s)
2	5.14	1.92	2.12	4.07	0.74	5.34	2.92
1	8.34	4.32	3.13	13.52	3.62	8.48	3.97

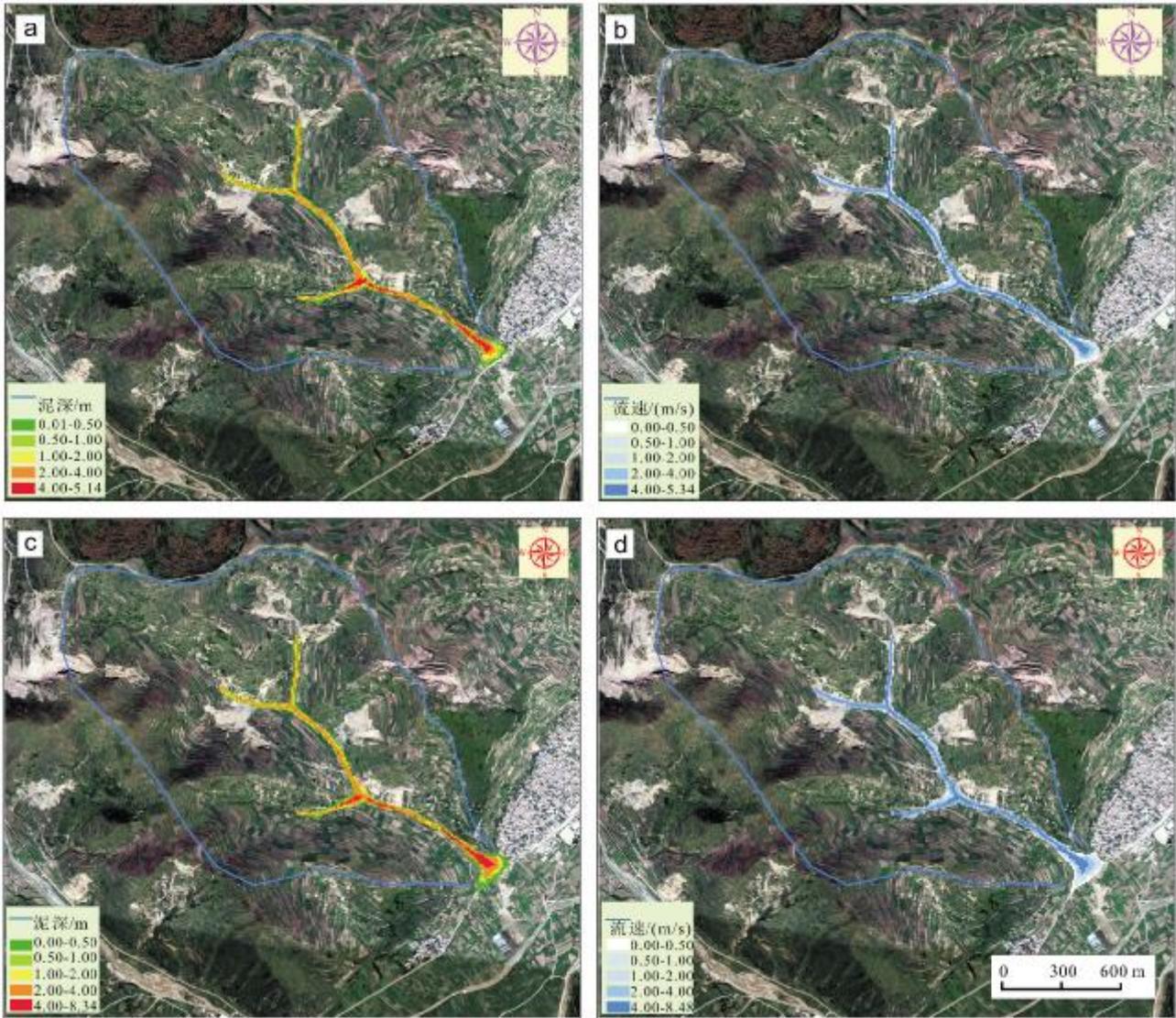


图3 不同降雨频率下的泥石流泥深及流速模拟结果

Fig. 3 Simulation results of mud depth and velocity of debris flow under different rainfall frequencies

a— 2%频率的泥深(mud depth at 2% frequency); b— 2%频率的流速(velocity at 2% frequency); c— 1%频率的泥深(mud depth at 1% frequency); d— 1%频率的流速(velocity at 1% frequency)

### 3.2 泥石流危险性评价模拟结果

泥石流影响强度的判定通过泥深或者泥深与流动速度相结合的方式表达,对泥石流强度按照表4进行划分<sup>[20]</sup>.对于泥石流的重现周期,因该泥石流属于暴雨型泥石流,泥石流发生的频率可认为与暴雨发生的

频率一致,综合考虑泥石流影响强度与发生频率两个指标可通过表5综合确定泥石流的危险性<sup>[20]</sup>.本次调查根据不同频率下泥石流的强度和泥石流发生频率对泥石流区域进行危险性的划分,得到泥石流危险性分区图(图4).

表 4 泥石流影响强度判别表

Table 4 Discrimination of debris flow influence intensity

泥石流强度等级	泥深/m	关系	泥深×流速/(m <sup>2</sup> /s)
高	$h \geq 2.5$	或	$vh \geq 2.5$
中	$0.5 \leq h < 2.5$	且	$0.5 \leq vh < 2.5$
低	$0.001 \leq h < 0.5$	且	$vh < 0.5$

表 5 泥石流危险性综合判别表

Table 5 Comprehensive discrimination of debris flow risk

重现周期	高影响强度	中影响强度	低影响强度
2%	危险性大	危险性中等	危险性小
1%	危险性中等	危险性小	危险性小

降雨频率  $P=2\%$ (重现期 50 a)的泥石流危险性评价结果为:危险区面积  $10.58 \times 10^4 \text{ m}^2$ . 其中高危险区面积  $5.15 \times 10^4 \text{ m}^2$ , 占比 48.7%;中危险区面积  $3.20 \times 10^4 \text{ m}^2$ , 占比 30.2%;低危险区面积  $2.23 \times 10^4 \text{ m}^2$ , 占比 21.1%. 危险区范围涵盖了沟口两侧宽约 170 m, 长约 60 m 范围内的区域, 主要威胁沟口附近的房屋 2 栋、村道 100 m、农田 2.3  $\text{hm}^2$ .

降雨频率  $P=1\%$ (重现期 100 a) 的泥石流危险性评价结果为:危险区面积  $12.02 \times 10^4 \text{ m}^2$ . 其中高危险区面积  $6.49 \times 10^4 \text{ m}^2$ , 占比 54.0%;中危险区面积  $3.22 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,

占比 26.8%;低危险区面积  $2.31 \times 10^4 \text{ m}^2$ , 占比 19.2%. 危险区扩大到了沟口两侧宽约 260 m、长约 180 m 范围内的区域, 主要威胁沟口附近的房屋 9 栋、村道 135 m, 乡道 210 m, 农田 3.2  $\text{hm}^2$ .

通过 FLO-2D 数值模拟结果可得出:在降雨重现期为 50 a 及 100 a 降雨频率下,簸箕沟泥石流的危险区均集中分布于泥石流主沟道、支沟沟道以及沟口一定范围内,这些区域容易遭受泥石流破坏,相应地也是泥石流的防治区.截至 2019 年调查时期,簸箕沟的主沟及支沟沟道内几乎无房屋等建筑,在沟口处为泥地族村居民点、农田及公路,针对该泥石流沟还未实施有效的工程治理措施.因此,泥石流威胁的沟口范围区为人口及财产易损区,也是重点防治区,建议从加强矿山弃渣的科学管理、泥石流监测预警及防治工程建设等方面开展泥石流灾害防治工作.

3.3 模拟结果精度验证

簸箕沟曾于 2012 年 5 月 10 日暴发一次降雨重现期为 50 a 的泥石流,淤积毁坏沟口附近农田近 1  $\text{hm}^2$ .为验证本次模拟结果的精度,将同一降水频率(2%)下模拟的堆积面积与“5·10”泥石流实际堆积面积进行对比,具体数据见表 6. 模拟精度计算公式<sup>[21]</sup>如下:

$$A = \frac{S_0^2}{S_a \times S_n} \times 100\%$$

式中,  $A$  为模拟精度;  $S_a$  为泥石流实际堆积范围面积;

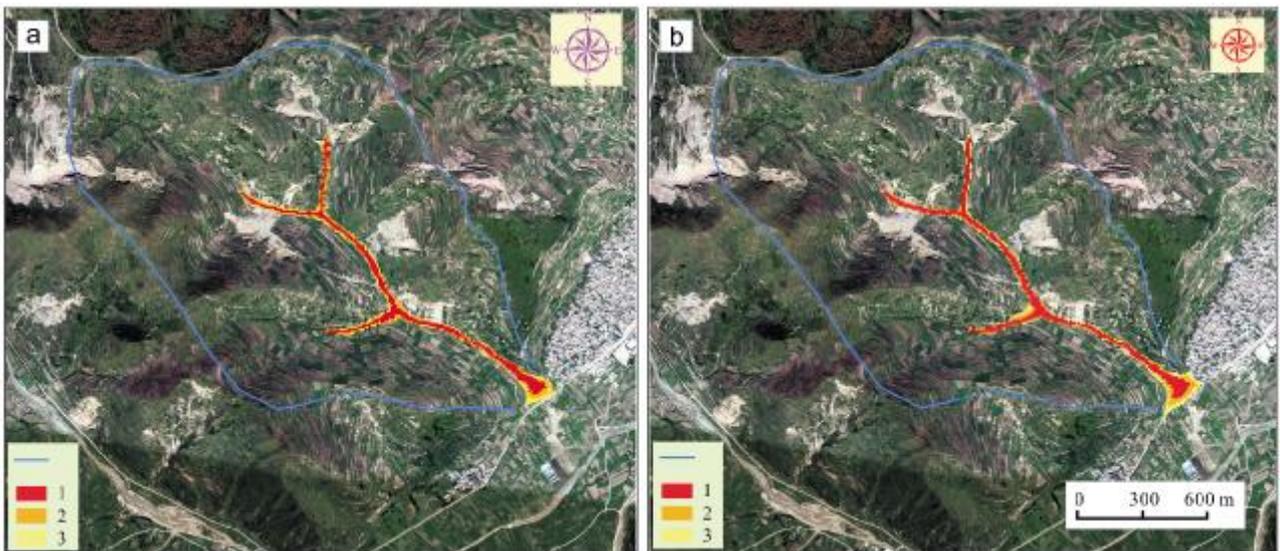


图 4 不同降雨频率下的泥石流危险性分区图

Fig. 4 Hazard zoning maps of debris flow under different rainfall frequencies

a— 2%频率的危险性分区(hazard zoning at 2% frequency); b— 1%频率的危险性分区(hazard zoning at 1% frequency); 1—高危险区(high risk area); 2—中危险区(media risk area); 3—低危险区(low risk area)

$S_n$  为泥石流模拟堆积范围面积;  $S_0$  为模拟堆积范围与实际堆积范围的重叠区面积。

表 6 实际堆积面积与模拟堆积面积对比

Table 6 Comparison between actual and simulated accumulation areas

降雨频率/%	实际值/ $10^4 \text{ m}^2$	模拟值/ $10^4 \text{ m}^2$	重叠区/ $10^4 \text{ m}^2$	精度/%
2	1.98	2.12	1.79	76.33

根据计算得出,本次模拟精度达到 76.33%,符合精度要求,表明模拟结果与实际情况基本相符,可信度较高。分析造成模拟堆积区面积比实际堆积区面积偏大的原因在于:簸箕沟泥石流为一典型的矿山泥石流,其固体物源主要来自矿山弃渣。本次模拟采用的数据均来自 2019 年的野外实地调查,与 2012 年“5·10”泥石流相比,随着簸箕沟流域内人类采矿活动的不断进行,堆积的矿山固体弃渣数量逐年增多,具有动态性及累积性,为泥石流暴发提供了更为丰富的固体物源。因此,本次模拟采用的泥石流容重及体积浓度等参数取值要比 2012 年偏大,造成了两者堆积面积的差异,这也是符合现实情况的。

#### 4 结论

(1)簸箕沟泥石流的堆积扇范围、堆积深度以及平均流速等运动特征参数随着降雨重现周期的变长而增大。堆积扇中部的堆积深度及流速明显大于两翼及前端,堆积扇偏向上游的区域堆积深度较大,偏向下游的区域堆积深度较小。

(2)簸箕沟泥石流的危险区集中分布于泥石流主沟道、支沟沟道以及沟口一定范围内,危险区面积随着降雨重现周期的变长而增大,高危险区面积比例由 48%( $P=2\%$ ) 升高至 54.0%( $P=1\%$ )。泥石流主要威胁对象为沟口附近的房屋、公路及农田,建议从加强矿山弃渣的科学管理、泥石流监测预警及防治工程建设等方面开展泥石流灾害防治工作。

(3)通过验证,本次 FLO-2D 的数值模拟结果与实际情况基本相符,模拟精度达到 76.33%,可信度较高。本研究为研究矿山泥石流的运动特征及危险性评价提供了一种新的思路和方法,同时也期望为该地区及其他地区的泥石流灾害防治及国土空间规划提供科学依据及参考。

#### 参考文献(References):

- [1]徐友宁,何芳,张江华,等. 矿山泥石流特点及其防灾减灾对策[J]. 山地学报, 2010, 28(4): 463-469.  
Xu Y N, He F, Zhang J H, et al. Characteristics and strategy for prevention and reduction of mine debris flow[J]. Journal of Mountain Science, 2010, 28(4): 463-469.
- [2]陈华清,杨敏,张江华,等. 基于抗灾能力的矿渣型泥石流风险评价方法——以小秦岭金矿区为例[J]. 地质通报, 2015, 34(11): 2009-2017.  
Chen H Q, Yang M, Zhang J H, et al. A tentative discussion on the risk evaluation of slag debris flow based on disaster-resisting capability: A case study of the Xiaoqinling gold mining area [J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(11): 2009-2017.
- [3]徐友宁,陈华清,杨敏,等. 采矿废渣颗粒粒径对矿渣型泥石流起动的控制作用——以小秦岭金矿区为例[J]. 地质通报, 2015, 34(11): 1993-2000.  
Xu Y N, Chen H Q, Yang M, et al. Controlling role of particle sizes of mining waste residues in the initiation of mine debris flow: A case study of the Xiaoqinling gold mining area [J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(11): 1993-2000.
- [4]徐友宁,何芳,陈华清. 西北地区矿山泥石流及分布特征[J]. 山地学报, 2007, 25(6): 729-736.  
Xu Y N, He F, Chen H Q. Mine debris flow and its distribution in northwestern China [J]. Journal of Mountain Science, 2007, 25(6): 729-736.
- [5]陈海龙. 贵州省典型矿山泥石流的基本特征和起动机理研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.  
Chen H L. The features and the initiated mechanism of the typical mine debris flows in Guizhou Province [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013.
- [6]樊姝芳,冯耀栋. 铁山嶂矿山泥石流的基本特征与起动过程研究 [J]. 河南城建学院学报, 2017, 26(5): 33-38, 44.  
Fan S F, Feng Y D. Basic characteristics and start-up process of mine debris flow in Tieshanzhang [J]. Journal of Henan University of Urban Construction, 2017, 26(5): 33-38, 44.
- [7]弓永峰,刘春虎,黄玮. 牛首山东麓矿山泥石流形成机理分析[J]. 宁夏工程技术, 2017, 16(3): 193-197.  
Gong Y F, Liu C H, Huang W. The analysis of mine debris flow formation mechanism in eastern Niushou Mountain [J]. Ningxia Engineering Technology, 2017, 16(3): 193-197.
- [8]赵丽娅,韩丽君,樊姝芳,等. 台风暴雨型矿山泥石流的形成条件及起动模式[J]. 地质论评, 2018, 64(4): 947-955.  
Zhao L Y, Han L J, Fan S F, et al. Formation condition and starting mode of mine debris flow in typhoon rainstorm [J]. Geological Review, 2018, 64(4): 947-955.
- [9]杨敏. 影响小秦岭金矿区矿渣型泥石流形成的主要因素研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.

- Yang M. Study on the key control factors of mine waste debris flows initiation in Xiaoginlin gold mine area[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [10]李彩侠, 马煜. 四川都江堰龙溪河流域泥石流成因、特征和危险性评价[J]. 地质与资源, 2019, 28(3): 298-304.
- Li C X, Ma Y. Causes, characteristics and hazard assessment of the debris flows in Longxi River Basin, Sichuan Province[J]. *Geology and Resources*, 2019, 28(3): 298-304.
- [11]刘德玉, 丛凯, 魏洁, 等. 基于理想点法的武都区北山泥石流危险度评价[J]. 地质灾害与环境保护, 2018, 29(2): 7-11.
- Liu D Y, Cong K, Wei J, et al. Hazardousness evaluation of debris flow in Beishan Mountain of Wudu District based on ideal point method [J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2018, 29(2): 7-11.
- [12]王高峰, 陈宗良, 毛佳睿, 等. 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), 2020, 39(5): 30-40.
- Wang G F, Chen Z L, Mao J R, et al. 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)*, 2020, 39(5): 30-40.
- [13]张奋翔, 张路青, 周剑, 等. 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, 2019, 30(5): 95-102.
- Zhang F X, Zhang L Q, Zhou J, et al. Risk assessment of debris flow in Ruoru village, Tibet based on FLO-2D [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2019, 30(5): 95-102.
- [14]黄勋, 唐川. 基于数值模拟的泥石流灾害定量风险评价[J]. 地球科学进展, 2016, 31(10): 1047-1055.
- Huang X, Tang C. Quantitative risk assessment of catastrophic debris flows through numerical simulation [J]. *Advances in Earth Science*, 2016, 31(10): 1047-1055.
- [15]刘鑫磊, 唐川, 黄勋, 等. 基于数值模拟的震区溃决型泥石流流入流点选取探讨[J]. 地球与环境, 2019, 47(2): 211-217.
- Liu X L, Tang C, Huang X, et al. Discussion on selection of the inflow point of the dam-break debris flow based on the numerical simulation model [J]. *Earth and Environment*, 2019, 47(2): 211-217.
- [16]王文臣, 张卫民, 王博思, 等. 对甘肃岷县簸箕沟金矿深部富集特征的认识[J]. 甘肃地质, 2015, 24(4): 41-45.
- Wang W C, Zhang W M, Wang B S, et al. Gold enrichment in the deep of Bojigou gold deposit in Minxian County, Gansu [J]. *Gansu Geology*, 2015, 24(4): 41-45.
- [17]刘德玉, 贾贵义, 李松, 等. 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[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(3): 33-40.
- Liu D Y, Jia G Y, Li S, et al. Impacts of topographical factors on debris flows and weight analysis at the Gansu segment of the Bailongjiang River Basin [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2019, 46(3): 33-40.
- [18]周洪建, 王曦, 袁艺, 等. 半干旱区极端强降雨灾害链损失快速评估方法——以甘肃岷县“5·10”特大山洪泥石流灾害为例[J]. 干旱区研究, 2014, 31(3): 440-445.
- Zhou H J, Wang X, Yuan Y, et al. Rapid-assessing methods of loss in extremely heavy rainfall disaster chain in semiarid region: A case study on a flash flood debris flow in Minxian County, Gansu Province [J]. *Arid Zone Research*, 2014, 31(3): 440-445.
- [19]常鸣, 杨涛, 周宇, 等. 张家坪泥石流物源活动性演化及冲出范围模拟研究[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(2): 166-172, 181.
- Chang M, Yang T, Zhou Y, et al. Source activity rates and run-out amount simulation in Zhangjiaping debris-flow area [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2019, 17(2): 166-172, 181.
- [20]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 K, Li R D, Bi Y H. Benefit evaluation of debris flow control engineering based on the FLO-2D model [J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52(3): 209-216.
- [21]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 M, Dou X Y, Tang C, et al. Hazard assessment of typical debris flow induced by rainfall intensity [J]. *Earth Science*, 2019, 44(8): 2794-2802.