

中文核心期刊 CSCD核心期刊 中科双效期刊 中国科技核心期刊 Caj-cd规范获奖期刊

#### 基于数值模拟的耳阳河流域泥石流灾害危险性评价

侯圣山,曹 鹏,陈 亮,冯 振,王立朝,李 昂,刘军友,李阳光,郑 浩 Debris flow hazard assessment of the Eryang River watershed based on numerical simulation HOU Shengshan, CAO Peng, CHEN Liang, FENG Zhen, WANG Lichao, LI Ang, LIU Junyou, LI Yangguang, and ZHENG Hao

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202003057

#### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 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

#### 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

#### 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

#### 基于HEC-HMS模型的不同雨型泥石流流量变化特征

Flow characteristics of different rainfall type debris flow based on the HEC-HMS model 熊江, 唐川, 龚凌枫 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 154-154

#### 汶川震区北川县泥石流流域崩滑体时空演变特征

Spatio -temporal evolution characteristics of landslides in debris flow catchment in Beichuan County in the Wenchuan earthquake zone 李明威, 唐川, 陈明, 史青云 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 182–190

#### 隧道施工期岩爆危险性评价的属性识别模型及工程应用

Attribute recognition model of fatalness assessment of rockburst in tunnel construction and its application 何怡帆, 李天斌, 曹海洋 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 102-111



关注微信公众号,获得更多资讯信息

#### DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202003057

# 基于数值模拟的耳阳河流域泥石流灾害危险性评价

侯圣山<sup>1</sup>,曹 鹏<sup>2</sup>,陈 亮<sup>1</sup>,冯 振<sup>1</sup>,王立朝<sup>1</sup>,李 昂<sup>1</sup>,刘军友<sup>2</sup>,李阳光<sup>2</sup>,郑 浩<sup>2</sup>
(1. 中国地质环境监测院(自然资源部地质灾害技术指导中心),北京 100081;
2. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院,北京 100083)

**摘要:** 洮河流域中游位于甘肃省南部,属泥石流高发区。耳阳河是洮河流域中游的一条重要支流,泥石流灾害尤其严重。 为研究甘肃省南部小流域泥石流灾害的危险性,以耳阳河流域为研究对象,选取流域内居民相对集中的6条泥石流沟,用 FLO-2D模型模拟了2012年5月10日实际降雨条件下的泥石流运动特征和堆积特征,得到了泥石流流量随时间的变化曲 线、泥石流流体深度和流速在沟谷不同地段的空间分布,对"5·10"泥石流灾害过程进行了重现。模拟结果表明:泥石流爆 发15~30 min后达到洪峰,约3h后流量逐步回落;泥石流流动速度在流通区快,到沟口迅速下降,固体物质淤积阻塞河 道。通过野外现场调查和遥感解译,发现模拟得到的泥石流发生过程、堆积区分布、泥石流影响区与现场调查和访问得到 的实际情况基本相符。进而,采用相同的方法和参数,对2.0%和0.2%降水频率下泥石流的堆积范围、深度和流速进行了 模拟分析,分别制作了上述工况下的泥石流危险性分区图,圈定了潜在威胁较大的人口聚集区,为耳阳河流域泥石流灾害 的预防和治理提供了依据,也为类似泥石流提供了一种危险性分析的技术方法。

关键词:洮河流域;耳阳河;泥石流;FLO-2D;危险性评价

中图分类号: P642.3 文献标志码: A 文章编号: 1000-3665(2021)02-0143-09

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

HOU Shengshan<sup>1</sup>, CAO Peng<sup>2</sup>, CHEN Liang<sup>1</sup>, FENG Zhen<sup>1</sup>, WANG Lichao<sup>1</sup>, LI Ang<sup>1</sup>, LIU Junyou<sup>2</sup>, LI Yangguang<sup>2</sup>, ZHENG Hao<sup>2</sup>

 (1. China Institute of Geo-Environment Monitoring (Guide Centre of Prevention Technology for Geo-hazards, MNR), Beijing 100081, China; 2. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** The middle reach of the Taohe River in the southern part of Gansu Province is severely threatened by debris flow hazard. The Eryang River is an important branch of the Taohe River. On May 10, 2012, a large amount of debris flows was triggered by extreme heavy rainfall (with 1% frequency), resulting in serious losses of human life and property in Minxian County of Gansu Province. In order to recognize the hazard of debris flow in small watersheds, six key debris flow gullies in the Eryang watershed were selected as the research areas. The numerical simulation software FLO-2D was used to simulate the debris flow movement and accumulation characteristics of each debris flow gully under the actual " $5 \cdot 10$ " rainfall conditions, so as to reconstruct the " $5 \cdot 10$ " debris flow disaster scenario. Numerical simulation results show that the flow speed increased to the maximum after  $15 \sim 30$ 

收稿日期: 2020-03-19; 修订日期: 2020-07-15

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1505502/2018YFC1504704);中国地质调查局地质调查项目(DD20190645);国家自然科学基金 重点项目(41731287)

第一作者: 侯圣山(1977-), 男, 教授级高级工程师, 主要从事地质灾害调查监测相关研究。E-mail: houshengshan@mail.cgs.gov.cn

通讯作者: 李昂(1978-), 女, 教授级高级工程师, 主要从事地质灾害调查监测及科技管理工作。E-mail: liang@mail.cgs.gov.cn

minutes since the outburst. The flow lasted for about 3 hours. The speed in the moving section was very high, and decreased sharply at the gully-mouth, deposits accumulated in the river valley. According to the remote sensing and field investigation, the simulation results were compared with the actual situation. The comparison shows the simulation effect is good, and the deposition area, the discharge process, and the main damage area are well reconstructed by FLO-2D simulation. The same method and parameters are used to simulate the accumulation range, depth and velocity of debris flow under the precipitation of 2.0% and 0.2% frequencies, and the risk zoning map is produced by the simulation data. The potentially threatened houses and properties are also outlined. These provide references to the local government to control the debris risk. This work also provides a practical approach for the debris flow hazard assessment.

Keywords: Taohe watershed; Eryang river; debris flow; FLO-2D; hazard assessment

泥石流是指由强降雨诱发,在地形陡峭、岩性松 散的沟谷或者斜坡上形成的特殊洪流,表现为固体、 液体、气体三相混合流体,一般具有历时短、强度高、 破坏性大等特点<sup>[1]</sup>。山区泥石流灾害防控越来越受到 重视, 而泥石流危险性评价是泥石流灾害防控的关键 环节<sup>[2]</sup>。泥石流危险性评价方法诸多,传统泥石流危 险性评价方法主要有层次分析法、模糊综合评价、逻 辑回归模型、物源可拓模型等。层次分析法确定指标 权重具有很大的主观性;其它评价模型在泥石流危险 性区划中以流域为基本单元,无法确定流域中精确地 点的危险程度,也无法对泥石流的运动进行精确刻 画;而数值方法评价的重点在于对泥石流流动过程的 刻画,可识别流动速度、堆积厚度的空间分布及其随 时间的变化,非常适合小流域中人口聚集区泥石流的 危险性评价。宋兵等<sup>[3]</sup>运用 RAMMS 模型模拟了白沙 沟泥石流运动特征; Hungr<sup>[4]</sup> 使用 DAN3D 模型对泥石 流的流动过程进行了模拟; Magirl 等<sup>5</sup>使用 Laharz 模型对圣卡塔利纳山脉7条泥石流的运动距离和堆 积范围进行了模拟,并与实际情况相验证;Horton等<sup>69</sup> 将二维动态泥石流模型 Massflow 运用于汶川地震震 中地区流域尺度的灾害图编制; Lin 等<sup>[7]</sup> 采用二维洪 水与土石流数值模拟软件 FLO-2D 对台风诱发的松河 地区泥石流进行了分析;常鸣等<sup>[8]</sup>运用 FLO-2D 对都 江堰八一沟泥石流进行了多种降雨频率条件下的危 险性评价。上述数值分析方法在泥石流过程模拟方 面均取得了较好的效果, 尤其是 FLO-2D 模型在泥石 流危险性模拟方面潜力巨大。

泥石流灾害的致灾因子主要为强降雨,在相对脆弱的自然环境条件下,短时强降雨极易引发群发性泥石流<sup>[9]</sup>。2012年5月10日,甘肃岷县近一个小时大范围冰雹及强降雨诱发耳阳河流域突发泥石流,冲击沟

口及河道两侧村落、公路、输电设备,造成18人死亡, 直接损失4800余万元<sup>[10]</sup>。经过与岷县多个气象站点 历史降水记录相对比,确定诱发本次泥石流的降水强 度约为百年一遇。

耳阳河流域泥石流沟众多,主沟平均纵比降为 235‰,主沟和支沟塌岸严重。区内大量种植黄芪、党 参、玉米、胡豆等作物。每年5-6月为农耕时节,农 业生产后土壤松散,抗侵蚀能力差,一旦出现强降雨, 容易发生群发性泥石流灾害。泥石流的威胁巨大,识 别危险地段、预测致灾过程至关重要。因此,本文运 用 FLO-2D 模型,选取耳阳河流域6条具有代表性的 泥石流,模拟了2012年5月10日实际降雨(1%降雨 概率)情况下的泥石流过程,并与地质灾害现场调查 成果对比,以验证模拟的可靠性。进而,运用相同的 评价模型,模拟上述泥石流在2.0%和0.2%降雨频率 条件下的堆积范围、深度、流速,并进行了泥石流危 险性分析,为泥石流灾害防治提供依据。

#### 1 研究区概况

岷县位于甘肃南部,属于西秦岭北支中段,紧邻 长江流域和黄河流域的分界线,洮河穿流而过,为典 型的中高山侵蚀地貌,是甘肃省泥石流活跃区之一<sup>[11]</sup>。

研究区位于岷县洮河右岸支流耳阳河流域(图1), 地处西秦岭山地和黄土高原的交汇区,新构造运动活 跃,地貌上呈现为年轻的构造侵蚀中山地貌类型。耳 阳河流域面积约 63 km<sup>2</sup>,主沟长度约 15.8 km,流域内 最高海拔为东山顶的 3 130 m,最低海拔 2 310 m,位于 耳阳河汇入纳纳河的沟口。耳阳河的主沟和支沟多 呈"V"型谷,沟壁陡峭,临空面发育,滑坡塌岸多见;沟 内耕地众多,土地松散,物源丰富。区内植被覆盖总 体上差,耳阳河两岸岩土裸露,仅有农作物和零星灌 木,上游局部可见人工林。



图 1 耳阳河流域地形图 Fig. 1 Topographic map of the Eryang river watershed

流域内出露的地层主要是泥盆系、侏罗系的板 岩、页岩和砂岩等,经过构造作用和风化作用,岩体破 碎,稳定性较差;区内第四纪沉积物主要为黄土、冲洪 积物、泥石流堆积物、残坡积物,耳阳河下游东岸(右 岸)剖面图见图 2。

研究区为高寒湿润气候带,多年平均降水量为 560.8 mm,6-8月降水占总降水量的60%以上。受地 形及海拔高度影响,降水量空间分布差异较大,呈现 出由河谷到山顶降水量逐渐增大的趋势。

耳阳河属于黄河水系,为黄河的三级支流:耳阳 河在茶埠镇沟门村汇入纳纳河,之后向西流约500m, 在茶埠镇阳坡汇入洮河。经过野外调查,耳阳河流域 内共发育23条泥石流沟,其中左岸9条,右岸14条, 泥石流沟线密度为1.45条/km。



本研究选取的6条泥石流沟对称分布于耳阳河两 岸(表1),均处于活跃期,呈"V形谷",主沟纵比降为 189.7‰~316.9‰,平均坡度35°~50°。松散物质类 型主要为坡面的残坡积物以及耕作土,其次为沟道两 岸的小型崩塌、滑坡及沟岸坍塌,其余为沟底再搬运 形成的松散物质。6条沟谷中都有大面积耕地,占沟 谷总面积的51%,义子沟、接哈沟、扎龙沟上游农田 已经退耕,牌嘴堡北沟(牌嘴沟)和接哈沟上游有人工 林。6条沟沟底情况相似,可见泥石流相砂砾,碎石以

|         | 表1 泥石           | <b>ī</b> 流沟特征参数                |
|---------|-----------------|--------------------------------|
| Table 1 | Property list o | of the key debris flow gullies |

| 泥石流沟名称 | 流域面积/km <sup>2</sup> | 主沟长度/km | 纵比降/‰ | 相对高差/m |
|--------|----------------------|---------|-------|--------|
| 拉龙沟    | 1.47                 | 1.31    | 205.9 | 350    |
| 扎龙沟    | 1.36                 | 1.66    | 217.4 | 400    |
| 义子沟    | 2.12                 | 2.48    | 189.7 | 550    |
| 接哈沟    | 2.47                 | 1.67    | 250.0 | 650    |
| 拉路沟    | 0.90                 | 1.19    | 316.9 | 450    |
| 牌嘴沟    | 0.54                 | 1.31    | 246.0 | 400    |

及泥球,碎石粒径多在 2~10 cm,最大可见 1.3 m, 母岩主要为砂岩、砂质板岩、灰岩、灰质板岩。6条泥 石流沟的补给段长度占各自沟道总长度的 61.8%~ 69.2%。接哈沟堆积扇挤压耳阳河河道,使耳阳河出 现一处牛轭状河曲(图 3)。

2012年"5·10"特大暴洪泥石流发生之后,在牌嘴 沟中修建了10道拦挡坝。2019年9月现场调查发 现,前6道拦挡坝已被泥石流堆积物、两侧崩滑堆积 物淤满、掩埋,后4道拦挡坝仍具有拦挡作用。在扎 龙沟沟口修建了约400m长的排导渠,宽10~15m, 深3m。

#### 2 泥石流危险性评价

FLO-2D 模型由 O'Brien<sup>[12-13]</sup>提出,采用有限差 分计算垂向深度和流动速度,预测泥石流流动和堆积 范围,可用于泥石流、洪水、溃坝、城市淹没等过程的 模拟,并可用于灾害危险性评价。



图 3 本研究选取的六条泥石流平面分布图 Fig. 3 Distribution of the six gullies in this study

FLO-2D软件在模拟泥石流运动过程中,将地形 分为若干等大网格,每一个网格中,其曼宁系数和高 程值都是唯一的,通过运动方程以及连续方程,可以 计算出每个网格中流体深度、流量,进而得知流体的 运动范围,通过动量方程计算出相邻网格间流体的速 度变化。FLO-2D 模型方程如下:

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

式中:t--泥石流运动时间/s;

$$u \longrightarrow X$$
轴方向流速/(m·s<sup>-</sup>);

$$v \longrightarrow Y$$
方向流速/( $\mathbf{m} \cdot \mathbf{s}^{-1}$ )。

连续方程控制了泥石流运动时每个网格内质量 守恒。

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

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

式中:g----重力加速度/(m·s<sup>-2</sup>);

S<sub>fy</sub>、S<sub>fx</sub>——X、Y方向摩擦坡降;

X、Y方向的运动方程保持了运动平衡。

$$S_{\rm f} = S_{\rm y} + s_{\rm v} + S_{\rm td} = \frac{\tau_{\rm c}}{h\gamma_{\rm m}} + \frac{k\eta u}{8h^2\gamma_{\rm m}} + \frac{n_{\rm td}^2 u^2}{h^{4/3}} \qquad (4)$$

式中: S<sub>f</sub>----摩擦坡降;

n<sub>td</sub>——等效曼宁系数。

流变方程考虑了泥石流运动时颗粒之间的碰撞 对泥石流流动阻力的影响。

- 2.1 数据处理与导入
- 2.1.1 地形数据处理

地形数据来自1:5万数字高程模型(DEM)。将 高程数据转化为 ASCII 格式, 导入 FLO-2D, 将之剖分 为10m×10m的评价单元,通过插值计算,确定每个评 价单元的高程,完成地形数据处理。

用 ArcGIS 将研究区流域边界、出水点、拦挡坝等 主要地形要素矢量化,导入FLO-2D。

2.1.2 确定泥石流参数

郭富赟等<sup>[14]</sup>对耳阳河流域泥石流流体重度进行 了测算,为17.0~17.6 kN/m<sup>3</sup>。本文采用文献[14]的泥 石流流体重度测算结果,并结合堆积物平均重度,计 算出泥石流泥沙体积浓度为46.67%~50.67%,取中间 值 48.67%。

高浓度泥石流在屈服应力的作用下出现层流特 征,层流之间的摩擦作用即可用层流阻滞系数(k)表 示,本文参考前人研究实例,用工程地质类比法,k取 值定为2250。

黏滞系数(η)和屈服应力(τ<sub>v</sub>)的大小主要取决于 泥沙体积浓度,关系式如下:

$$\eta = \alpha_1 e^{\beta_1 C_\nu} \tag{5}$$

$$\tau_{v} = \alpha_{2} e^{\beta_{2} C_{v}} \tag{6}$$

2021年

式中: $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ ——试验系数;

 $C_v$ ——体积浓度。

根据泥石流堆积物、流体的容重和物质组成,判断研究区泥石流为黏性,且为中阻性,泥沙比(*R*<sub>ns</sub>)为0.75。王裕宜等<sup>[15]</sup>统一的泥沙比-体积浓度-流变参数关系式如下:

$$n_c = 0.033 R_{ns}^{-0.51} \exp\left(0.34 R_{ns}^{0.17}\right) \ln h \tag{7}$$

$$R_{ns} = 2.25 \times 10^{-6} \tau_{y}^{-3.36} \exp\left[9.37 \times 10^{-6} \tau_{y}^{3.87} \times c_{v}\right]$$
(8)

$$R_{ns} = 4.59 \times 10^{-9} \eta^{-2.2} \exp \left[ 8.9 \times 10^{-11} \eta^{7.99} \times c_{\nu} \right]$$
(9)

式中:nc---曼宁系数;

h——泥深/m(本文以平均堆积厚度表示)。

将各泥石流沟泥深带入式(7)即可得到拉龙沟、 扎龙沟、拉路沟、接哈沟、义子沟、牌嘴沟的曼宁系 数,分别为0.0193,0.0224,0.0045,0,0,0.0224。将式 (5)(6)(8)(9)联立,求解得到 α<sub>1</sub>、α<sub>2</sub>、β<sub>1</sub>、β<sub>2</sub>分别为 0.00016,0.00230,17.41,18.28。

2.2 "5·10"泥石流数值模拟

根据野外调查和访问得知,耳阳河流域泥石流于

2012 年 5 月 10 日 17 时 50 分许开始爆发, 18 时左右 达到洪峰, 21 时逐步回落, 泥石流过程历时约 3 h。降 雨量数据选用岷县麻子川自动站降雨观测数据, 如 图 4 所示<sup>[16]</sup>。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, 本次研 究区位于甘肃省南部, 和川西地区距离较近, 地质、地 貌、气候均有相似性, 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。运用推理公式法 概化各泥石流沟清水流流量过程曲线, 并乘以放大系 数  $BF(BF=1/(1-C_v)=2.10)$ , 得到泥石流流量过程曲 线, 见图 5。



图 4 岷县麻子川自动站降水曲线图(2012 年 5 月 10 日) Fig. 4 Precipitation curve of the Mazichuan monitoring station (May 10, 2012)



Fig. 5 Flow process curve of (a) clear water and (b) debris flow

从图 5 可以看出, 各泥石流沟于爆发 15~30 min 后达到洪峰, 约 3 h 后流量逐步回落; 这与现场调查和 访问了解到的"5·10"当时的情况基本相符。

模拟结果显示:泥石流流体在流通区运动速度较快,最大速度可达7m/s;在沟口附近速度迅速下降,大部分泥石流汇入耳阳河,部分区域堆积深度较大,堵塞河道(图6)。

通过 FLO-2D 模拟,得到了 6 条泥石流沟的堆积 扇面积和泥石流堆积平均厚度,如表 2 所示。实地调 查测量得到的面积和厚度同时列于表 2,并将模拟结 果和实际面积进行对比。可以看出:除拉龙沟和拉路 沟外,其他各沟堆积扇面积误差率在-6.2%~28.5%之 间、堆积扇均厚误差率在-7.5%~23.3%之间。模拟 堆积厚度大部分低于实际厚度,主要原因是自"5·10"



图 6 "5·10"泥石流深度(a)和流速(b) Fig. 6 "5·10" debris flow (a) depth and (b) velocity

表 2 模拟结果与调查结果对比表 Table 2 Comparison of the simulation and survey results

|     | 1 · · · · · · · · · · · · · · · · · · · |        |         |         |      |       |
|-----|---|--------|---------|---------|------|-------|
| 沟名  | 堆积扇范围/m <sup>2</sup>                    |        |         | 堆积扇均厚/m |      |       |
|     | 调查值                                     | 模拟值    | 误差率/%   | 调查值     | 模拟值  | 误差率/% |
| 拉龙沟 | 3 968                                   | 11 500 | 189.8   | 1.50    | 1.12 | -25.3 |
| 扎龙沟 | 9 826                                   | 11 600 | 18.1    | 1.60    | 1.31 | -18.1 |
| 拉路沟 | 731                                     | 21 400 | 2 827.5 | 1.10    | 0.31 | -71.8 |
| 牌嘴沟 | 9 218                                   | 10 500 | 13.9    | 0.58    | 0.57 | -1.7  |
| 义子沟 | 15 956                                  | 20 500 | 28.5    | 0.60    | 0.74 | 23.3  |
| 接哈沟 | 21 971                                  | 20 600 | -6.2    | 1.60    | 1.48 | -7.5  |

泥石流爆发后,每年有少量松散物质冲出沟口,堆积 扇厚度逐年加大,实测的厚度比"5·10"泥石流实际堆 积厚度大。拉龙沟与拉路沟堆积面积误差率分别达 到 189.8% 和 2 827.5%,模拟堆积扇面积远远大于实际 面积,主要原因为村民在沟口附近建房、开垦土地,对 泥石流堆积扇进行了人为改造。

2.3 "5·10"泥石流危险性评价

当前泥石流危险性分级指标主要有流速和泥深<sup>[17]</sup>、 冲击力和堆积厚度<sup>[18]</sup>、频率和强度<sup>[19-20]</sup>等,耳阳河流 域泥石流的危害性主要在于泥石流携带的固体物质 淤埋农田和房屋,以及中高速黏性洪流对沿岸的冲击 和侵蚀。因此,本次选取流速、泥深等指标进行危险 性分级,采用如表3所示的逻辑关系,确定泥石流危 险性的空间分布。

表 3 泥石流危险性分区指标 Table 3 Risk classification of debris flow

| 危险性 | 堆积深度/m             | 逻辑关系 | 堆积深度和流速的乘积                    |
|-----|--------------------|------|-------------------------------|
| 高   | <i>h</i> ≥1.5      | OR   | <i>vh≥</i> 1.5                |
| 中   | 0.5< <i>h</i> <1.5 | AND  | 0.5 <vh<1.5< td=""></vh<1.5<> |
| 低   | 0.01≤h≤0.5         | AND  | $0.1 \leq vh \leq 0.5$        |

危险性评价结果见表 4、图 7。"5·10"泥石流总危 险区面积为 57 900 m<sup>2</sup>,占总流通区面积的 60.2%,其中 高危险区面积占总危险区面积比例较高的是接哈沟 和扎龙沟,分别为 34.23% 和 38.60%。

表 4 泥石流危险性分区统计表 Table 4 Statistics of debris flow hazard zoning

| I able 4     | Statistics of de | edris now nazaru | zoning |
|--------------|------------------|------------------|--------|
| <b>沙</b> 口 夕 | F                | 占总危险面积比例/9       | %      |
| 闪名 -         | 高危险              | 中危险              | 低危险    |
| 拉龙沟          | 13.89            | 70.83            | 15.28  |
| 扎龙沟          | 38.60            | 35.09            | 26.32  |
| 拉路沟          | 16.36            | 54.55            | 29.09  |
| 牌嘴沟          | 2.20             | 71.43            | 26.37  |
| 义子沟          | 15.03            | 58.55            | 26.42  |
| 接哈沟          | 34.23            | 47.75            | 18.02  |

由于"5·10"泥石流过后重新规划了房屋建筑,目前耳阳河沿岸的大部分建筑在1%降雨频率条件下较为安全,但扎龙沟、接哈沟沟口和义子沟沿岸的部分房屋建筑易受到泥石流威胁,共涉及约21处房屋(见图7中的局部放大)。

2.4 不同降雨频率条件数值模拟和危险性评价

通过对"5·10"过程进行模拟,并与实际情况进行 对比,验证了模型和参数的可靠性,说明FLO-2D技术 能够较好地重现泥石流过程、模拟出泥石流流速、堆 积深度的时空分布。使用同样的参数及方法,对 P=2.0%及P=0.2%降雨频率条件下泥石流情况进行了 模拟,并开展了上述两个工况的泥石流危险性评价。 P=2.0%及P=0.2%降雨参数取值见表5,模拟得到的 流量过程曲线见图8。

利用表 3 中的逻辑运算方法,得到了 P=2.0% 及 P=0.2% 降雨概率的泥石流危险性分区图(图 9、表 6)。 6 h



图 7 "5·10"泥石流危险性分区图 Fig. 7 Hazard zoning map of "5·10"debris flow

| 表 5 不同频率的降雨参数 |   |             |      |      |  |
|---------------|---|-------------|------|------|--|
|               | Table 5         Rainfall amounts of different frequencies |             |      |      |  |
|               | 1.2 Cal   | 频率及小时降水量/mm |      |      |  |
| 泰附历时          |   | 2.0%        | 1.0% | 0.2% |  |
|               | 1 h   | 33.2        | 42.0 | 49.3 |  |

48.2

模拟结果显示:在2.0%降雨频率条件下,泥石流

52.9

64.4

总危险面积为 37 900 m<sup>2</sup>, 牌嘴沟、拉路沟、义子沟无 高危险区, 加之牌嘴沟已修建道拦挡坝, 危险性不 高。低危险区占总危险区的 72.2%。扎龙沟高危险区 占比最高, 为 13.95%, 主要分布于沟口, 距离左岸居民 建筑最近约 30 m, 威胁较小。但义子沟沿岸仍有 4 户 居民处于中危险区内, 接哈沟沟口仍有 5 户居民处于 中危险区内。



Fig. 8 Flow process curve of debris flow in different rainfall frequencies

在 0.2%降雨频率条件下, 泥石流危险区总面积 为 60 500 m<sup>2</sup>, 与百年一遇条件下相比, 危险区总面积 仅增加了 4.5%(2 600 m<sup>2</sup>); 但中-高危险区面积占比增 大, 其中接哈沟堆积区高危险面积约 4 000 m<sup>2</sup>, 占总面 积的 34.78%; 其次为义子沟和扎龙沟, 高危险区面积 分别为 3 100 m<sup>2</sup> 和 2 500 m<sup>2</sup>, 占比分别为 12.82% 和 35.82%。考虑到"5·10"后, 在牌嘴沟已增设拦挡坝, 牌 嘴沟堆积区无高危险区。除拉路沟外, 其他各沟沟口 和沟道附近居民均受到威胁, 共约 38 户, 其中中-高危 险区居民总户数约22户。

### 3 结论

(1)利用自动站降雨观测数据,运用 FLO-2D 模拟 重现了"5·10"泥石流运动和堆积特征,得到了泥石流 堆积范围、堆积深度、发展过程。与野外调查所得的 现场情况进行了对比,排除人为大规模改造作用,堆 积扇均厚模拟结果误差在-7.5%~23.3%之间,堆积扇 面积模拟结果误差在-6.2%~28.5%之间,数值模拟结



图 9 2.0% (a)和 0.2% (b)降雨频率条件下泥石流危险性分区图 Fig. 9 Hazard zoning map of debris flow in (a) 2.0% and (b) 0.2% rainfall frequencies

|         | 表 6 2.0% 和 0.2% 降雨频率条件下泥石流堆积区危险性分区统计表  |
|---------|--|
| Table 6 | Statistics of hazard zoning of debris flow accumulation area in 2.0% and 0.2% rainfall frequencies |

|            | いな  |                   | 高危险区      | 中危险区              |           | 低危险区              |           |
|------------|-----|-------------------|-----------|-------------------|-----------|-------------------|-----------|
|            | 闪名  | 面积/m <sup>2</sup> | 占总面积的比例/% | 面积/m <sup>2</sup> | 占总面积的比例/% | 面积/m <sup>2</sup> | 占总面积的比例/% |
| 2.0%降雨概率   | 拉龙沟 | 100               | 1.64      | 3 400             | 55.74     | 2 600             | 42.62     |
|            | 扎龙沟 | 600               | 13.95     | 2 300             | 53.49     | 1 400             | 32.56     |
|            | 拉路沟 | 0                 | 0         | 2 400             | 58.54     | 1 700             | 41.46     |
|            | 牌嘴沟 | 0                 | 0         | 1 500             | 27.78     | 3 900             | 72.22     |
|            | 义子沟 | 0                 | 0         | 4 800             | 50.53     | 4 700             | 49.47     |
|            | 接哈沟 | 600               | 7.06      | 5 300             | 62.35     | 2 600             | 30.59     |
|            | 拉龙沟 | 2 000             | 23.26     | 5 800             | 67.44     | 800               | 9.30      |
|            | 扎龙沟 | 2 400             | 35.82     | 3 200             | 47.76     | 1 100             | 16.42     |
| 0.200 際雨椰玄 | 拉路沟 | 1 100             | 18.64     | 3 600             | 61.02     | 1 200             | 20.34     |
| 0.2%P4的孤平  | 牌嘴沟 | 0                 | 0         | 4 800             | 57.83     | 3 500             | 42.17     |
|            | 义子沟 | 2 500             | 12.82     | 13 100            | 67.18     | 3 900             | 20.00     |
|            | 接哈沟 | 4 000             | 34.78     | 5 700             | 49.57     | 1 800             | 15.65     |

果和实际情况基本相符,模拟效果较好。

(2)通过模拟,以泥石流堆积深度和冲击速度为标准,划分了不同降雨频率场景下的泥石流危险区; 在此基础上圈定了易于受泥石流威胁的房屋、财产等 潜在受灾对象,为泥石流风险防控及治理提供了参考。

(3)FLO-2D 模型能够较好地进行泥石流过程重 现和危险性区划,通过不同降雨频率下的数值模拟, 可以得到泥石流流体深度和速度的空间分布和变化 过程,能够对泥石流过程及冲击场景进行直观表达。

#### 参考文献(References):

[1] 黄崇福.自然灾害基本定义的探讨[J].自然灾害学报,2009,18(5):41 - 50. [HUANG Chongfu. A discussion on basic definition of natural disaster[J].

Journal of Natural Disasters, 2009, 18(5): 41 – 50. (in Chinese with English abstract) ]

- [2] 韩征,徐林荣,苏志满,等.基于流域形态完整系数的 泥石流容重计算方法[J].水文地质工程地质,2012, 39(2):100 - 105. [HAN Zheng, XU Linrong, SU Zhiman, et al. Research on the method for calculating the bulk density of debris flow based on the integrity coefficient of watershed morphology[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(2): 100 - 105. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 宋兵,沈军辉,李金洋,等. RAMMS在泥石流运动模拟 中的应用:以白沙沟泥石流为例[J]. 泥沙研究, 2018, 43(1): 32 - 37. [SONG Bing, SHEN Junhui, LI Jinyang, et al. Application of RAMMS model on simulation of debris flow in the Basha Gully[J]. Journal of

Sediment Research, 2018, 43(1): 32 - 37. (in Chinese with English abstract) ]

[4] HUNGR O. A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1995, 32(4): 610 - 623.

2021年

- [5] MAGIRL C S, GRIFFITHS P G, WEBB R H. Analyzing debris flows with the statistically calibrated empirical model LAHARZ in southeastern Arizona, USA[J]. Geomorphology, 2010, 119(1/2): 111 – 124.
- [6] HORTON A J, HALES T C, OUYANG Chaojun, et al. Identifying post-earthquake debris flow hazard using Massflow[J]. Engineering Geology, 2019, 258: 105134.
- [7] LIN J Y, YANG M D, LIN B R, et al. Risk assessment of debris flows in Songhe Stream, Taiwan[J]. Engineering Geology, 2011, 123(1/2): 100 – 112.
- [8] 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. Risk assessment of rainfall driven debris flow[J]. Geosciences, 2019, 44(8): 2794 2802. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 史培军. 三论灾害研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(3): 1-9. [SHI Peijun. Theory on disaster science and disaster dynamics[J]. Journal of Natural Disasters, 2002, 11(3): 1-9. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 王春磊,徐大录.甘肃省定西市岷县地质灾害详细调 查报告[R].兰州:甘肃省地矿局水文地质工程地质勘 察 院, 2013. [WANG Chunlei, XU Dalu. Report of detailed geo-hazard survey of Min County, Dingxi City, Gansu Province[R]. Lanzhou: Hydrogeological and Engineering Geological Survey Institute of Gansu Bureau of Geology and Miner Resources, 2013. (in Chinese)]
- [11] 李鸿琏,曾思伟.甘肃泥石流[M].北京:人民交通出版 杜,1982. [LI H L, ZENG S W. Mudslide in Gansu Province [M]. Beijing: People's Communications Publishing, 1982. (in Chinese)]
- [12] O'Brien J S. FLO-2D Reference manual version 2009[R]. Arizona: FLO-2D software, Inc, 2009.
- [13] O'BRIEN J S, JULIEN P Y, FULLERTON W T. Twodimensional water flood and mudflow simulation[J].
   Journal of Hydraulic Engineering, 1993, 119(2): 244 – 261.
- [14] 郭富赟, 孟兴民, 尹念文, 等. 甘肃省岷县耳阳沟
   "5·10"泥石流基本特征及危险度评价[J]. 兰州大学
   学报(自然科学版), 2014, 50(5): 628 632. [GUO

Fuyun, MENG Xingmin, YIN Nianwen, et al. Basic characteristics and risk assessment of " $5 \cdot 10$ " debris flow in Eryanggou, Minxian County, Gansu Province[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Science Edition), 2014, 50(5): 628 - 632. (in Chinese with English abstract) ]

- [15] 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 Qiandeng, HAN Wenliang, et al. Stress-strain properties of viscous debris flow and determination of volocity parameter[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2003, 14(1): 9 - 13. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 程瑛,黄武斌,沙宏娥.甘肃岷县两次强降水致山洪泥石流灾害特征对比分析[J].干旱区地理,2018,41(3):443-448. [CHENG Ying, HUANG Wubin, SHA Honger. Cause of two heavy rainfall causing massive mudslide in Minxian County, Gansu Province[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(3):443-448. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 常鸣. 基于遥感及数值模拟的强震区泥石流定量风险评价研究 [D]. 成都:成都理工大学,2014.
  [CHANG Ming. Quantitative risk assessment of debris flow in strong earthquake zone based on remote sensing and numerical simulation [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 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)]
- [19] 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)]
- [20] ERENA S H, WORKU H, DE PAOLA F. Flood hazard mapping using FLO-2D and local management strategies of Dire Dawa City, Ethiopia[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2018, 19: 224 – 239.

· 151 ·