

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2022.03-04

王子亮, 常鸣, 刘沛源, 等. 安宁河流域典型沟谷泥石流危险性评价——以冷渍沟为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(3): 31-38.

WANG Ziliang, CHANG Ming, LIU Peiyuan, *et al.* Hazard assessment of typical gully debris flow in Anning river: A case study at the Lengzi gully[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(3): 31-38.

安宁河流域典型沟谷泥石流危险性评价 ——以冷渍沟为例

王子亮, 常 鸣, 刘沛源, 徐 璐

(地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059)

摘要:冕宁县安宁河流域为地质灾害密集分布区, 安宁河断裂穿越于此, 构造复杂, 冷渍沟在上游左岸发育。在强降雨条件下, 该沟就会暴发泥石流, 堵塞安宁河流域和掩埋杀叶马村房屋和道路。冷渍沟泥石流具有流域面积小, 主沟长度短, 沟床纵比降大等特征, 为了研究安宁河流域内泥石流的危险性, 以冷渍沟为例, 分析不同降雨周期下的泥石流暴发强度, 模拟泥石流的运动过程并进行危险性评价。模拟的最大流速、最大堆积深度和降雨强度三者结合建立冷渍沟泥石流危险性评价模型。研究结果表明, 冷渍沟泥石流危险范围内高危险区域占 27%, 主要集中在松散固体物质较多的沟道, 中危险性区域和低危险区域各占 56% 和 17%, 该结论为危险范围内的居民和重点设施的风险管控提供参考。

关键词:冷渍沟; FLO-2D; 冲沟型泥石流; 危险性评价

中图分类号: P642.23

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2022)03-0031-08

Hazard assessment of typical gully debris flow in Anning river: A case study at the Lengzi gully

WANG Ziliang, CHANG Ming, LIU Peiyuan, XU Lu

(State Key Laboratory for Geo-Hazard Prevention and Geo-Environment Protection (Chengdu University of Technology),
Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: The Anning river basin is a densely distributed area of geological hazards, where the Anning river rift crosses, with complex tectonics and the Lengzi gully developing in the upper left bank. The gully is subject to mudslides under heavy rainfall conditions, blocking the Anning river basin and burying houses and roads in the village of Yema. Lengzi gully debris flow has the characteristics of small area, a short main trench and a large channel longitudinal slope. To explore these damage, taking Lengzi gully as an example, the intensity of debris flow burst under different rainfall cycles is analyzed, and the movement process of debris flow is simulated and the risk assessment is carried out. Combined with the simulated maximum flow velocity, maximum accumulation depth and rainfall intensity, the hazard assessment model is established. The results show that in the danger range of Lengzi gully debris flow, the high risk area accounts for 27%, mainly distributed in the channel with more loose

收稿日期: 2022-01-03; 修订日期: 2022-03-30

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金项目(U21A2032; 42077245); 第二次青藏高原综合科学考察研究资助(2019QZKK0902)

第一作者: 王子亮(1997-), 男, 山东淄博人, 硕士研究生, 主要从事工程地质与地质灾害防治方面的研究。

E-mail: 2019050256@stu.cdu.edu.cn

通讯作者: 常 鸣(1985-), 男, 山东临沂人, 博士, 副教授, 主要从事环境地质、地质灾害风险评价、遥感与 GIS 应用方面研究。

E-mail: changmxq@126.com

solid materials, and the medium risk area and low risk area account for 56% and 17%, respectively. this conclusion provides a scientific basis for the monitoring and early warning of key facilities in the danger range.

Keywords: Lengzi gully; FLO-2D; gully debris flow; hazard assessment

0 引言

按照高山斜坡地貌特征进行分类,沟谷型泥石流和坡面型泥石流为最主要的两种泥石流流类型^[1]。因为沟道具备急陡的特征,在强降雨条件下,泥石流以两种形式暴发:席卷垮塌体和沟床揭底^[2]。在调查冕宁县境内 129 个乡镇中,31 个乡镇处于泥石流极高危险区^[3]。

目前国内外已有许多研究学者利用不同的技术手段展开泥石流危险性评价的研究,其中比较青睐的是数值模拟软件(FLO-2D)。Bertolo 等^[4]运用 FLO-2D 模拟了小流域泥石流运动淤积过程,龚柯等^[5]对汶川县绵虬镇泥石流进行了综合危险性等级评价运用 FLO-2D, Christen 等^[6]研究讨论了泥石流的危险性评价,利用泥石流暴发概率的方法来实现, Nocentini 等^[7]运用一种 DAN-W 与 FLO-2D 结合的动态代码的分析方法评估潜在泥石流的巨大危险性, Quan 等^[8]通过泥石流数值模拟软件(FLO-2D)得到泥石流危险性综合评价结果,余宏明等^[9]选取了 8 个因子并采用模糊数学方法建立危险度评价模型,詹钱登等^[10]充分利用 FLO-2D 模型对中华台北地区的泥石流进行危险性的评价,曹鹏等^[11]利用 FLO-2D 软件对泥石流进行了危险型分析,对泥石流的防治提供了参考,唐川等^[12]通过野外考察和实地实验测量,确定了典型地区典型泥石流危险性评价的主要因子,崔鹏等^[13]创建了一套研究体系,用来评估泥石流动力过程的危险性与风险管理理论与方法。牛全福等^[14]利用灰色关联度等四种方法进行泥石流危险性评估,并得到了危险性评价图,常鸣等^[15]利用 FLO-2D 模型获取泥石流危险性数模模拟结果,以此构建危险性分布图。林文等^[16]利用 FLOW-R 和 FLO-2D 耦合模型对四川省都江堰市麻柳沟泥石流开展危险性评价分析研究,为泥石流灾害监测预警提供建设性建议。

冷渍沟泥石流沟道物源丰富,每年都有不同程度的暴发^[17]。沟口处有房屋、道路和安宁河干流,一旦强降雨触发泥石流灾害,将可能造成人口伤亡和财产损失。评价其危险性十分必要。因此,本文研究泥石流危险性特征,模拟了冷渍沟泥石流的运动过程,并根据冷渍沟流域特征,建立适合于冷渍沟的危险性模型,最后获取冷渍沟泥石流危险性评价结果,最终得到冷渍沟危险性评价图,为重点区域内的防范提供评估建议。

1 冷渍沟流域概况

冷渍沟泥石流位于凉山彝族自治州境内安宁河流域上游,流域面积约 0.62 km²,主沟较长约 1.49 km,沟床平均纵比降约 364‰,高差约 542 m。侵入岩和后期沉积岩为流域内主要地层类型。早期的侵入岩主要是印支期斜长花岗岩(γ_{05}^1);后期的沉积岩地层主要以三叠系上统白果湾群(T_3-J_1bg)的泥灰岩、炭质泥岩及砂岩为主。大量角砾岩、糜棱岩及断层泥在沟内存在。全新统残、坡积堆积层(Q_4^{dl+el})和冰水堆积层(Q_3^{gl+fgl})为主要的第四系地层(图 1、图 2)。

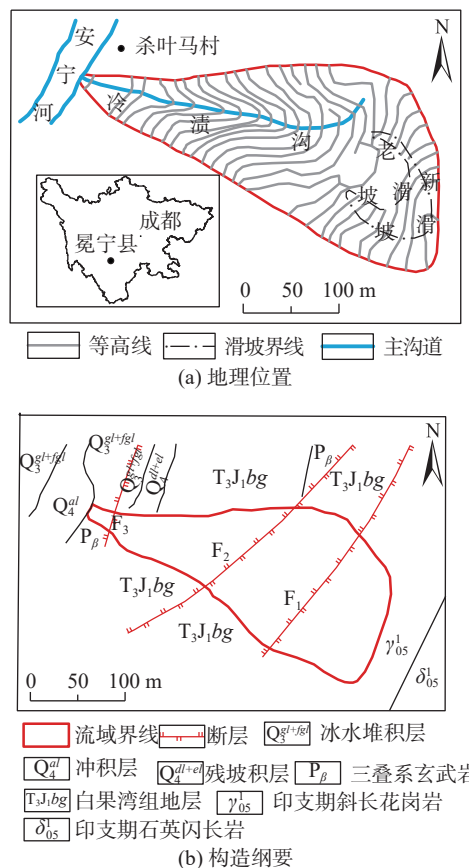


图 1 冷渍沟流域地理位置及构造纲要图

Fig. 1 Geographic location and tectonic outline of Lengzi gully

强烈抬升的新构造运动是该流域的最主要的构造特征。根据四川省地震局的震动烈度峰值分区与 1:400 万《中国地震动参数区划图》(UB18306—2001)分区可知,冷渍沟流域的地震动峰值加速度为 0.3 g,地震基本烈度为 VIII 度。

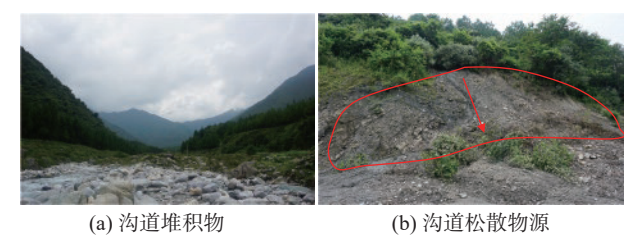


图 2 冷渍沟物源情况

Fig. 2 Lengzi gully ditch channel and accumulation situation

研究区属亚热带季风气候。年均降水量在 1 000 mm 以上, 年际变化不明显。每年的 6—9 月降雨量最为集中, 最高可达 834.4mm, 在全年降雨中占比较大, 主要以局部暴雨为主。

冷渍沟内曾在 20 世纪 20—30 年代就发生过大规模山体垮塌现象; 20 世纪 50 年代又陆续发生小规模山体垮塌, 物源大多滞留在流域沟道及两侧的山体坡面上; 在 21 世纪初期大规模山体滑坡又再次发生, 随后演变成碎屑流, 造成了人员伤亡及财产损失, 2000 年 8 月因为强降雨导致泥石流的暴发, 以后每年陆续有不同危险程度的泥石流发生^[17]。冷渍沟流域的物源主要集中在沟道上游位置, 为泥石流的启动提供了很好的物质条件, 沟道上游有 1 处大型滑坡的存在, 在形成区两侧的边坡上有几处小滑坡的存在(图 3)。

2 冷渍沟泥石流数值模拟

2.1 FLO-2D 模型

模拟软件采用的是水力方面广泛运用的 FLO-2D, 流体的流速和堆积深度是软件可控制的, 它软件结果的呈现主要是通过数学方程来实现的^[18]。该软件是通过连续方程和运动方程控制泥石流的质量守恒和动量守恒, 见式(1)、(2)、(3):

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

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

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

式中: I ——一次降雨强度;
 t ——时间/h;
 u ——溃决型泥石流在二维模型中 x 方向的平均流动速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);
 h ——泥石流的深度/m;
 v ——泥石流的平均流动速度(垂直方向)/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);
 g ——重力加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$);

x, y ——流体运动过程中水平和垂直方向;
 S_{fx}, S_{fy} ——模拟过程中的摩擦阻力;
 S_{ox}, S_{oy} ——沟道的纵坡降。

2.2 参数选取

文中研究主要采用的是分辨率为 2 m 的 DEM 数据, 该数据是由 91 卫图下载的等高线, 在 ArcGIS 软件中生成的。然后在 ArcGIS 软件中将 DEM 格式的文件转换成可以直接导入模拟软件的 ASC II 格式的图像文件, 当做进行泥石流模拟的主要地形条件。根据遥感影像, 解译沟道内物源情况, 确定一个集水点具体位置, 集水点是指泥石流模拟开始时启动的地方(图 3)。

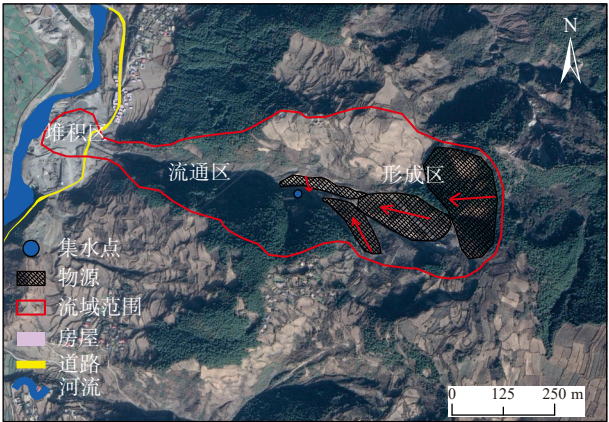


图 3 冷渍沟流域平面示意图

Fig. 3 Sketch map of Lengzi gully

2.2.1 曼宁系数 n_c

在泥石流模拟过程中, 曼宁系数代表了地面的粗糙程度, 对沟道中水流运动有一定的影响, 根据 FLO-2D 手册(表 1)给出的建议值范围, 再结合冷渍沟流域的灌木草地的地表状况, 取冷渍沟泥石流的曼宁系数为 0.18。

表 1 FLO-2D 手册建议的曼宁系数值

Table 1 Manning coefficient values suggested by the FLO-2D manual

地表状况	曼宁系数值	地表状况	曼宁系数值
茂密草地	0.17 ~ 0.8	耕地	0.000 8 ~ 0.012
植物茂密灌木草地	0.17 ~ 0.48	轮休耕地	0.06 ~ 0.22
杂林灌木、牧草地	0.3 ~ 0.4	传统耕地	0.06 ~ 0.16
一般草地植生	0.2 ~ 0.4	以整地农地	0.3 ~ 0.5
植物稀疏粗糙地	0.2 ~ 0.3	梯田	0.07 ~ 0.17
矮草原	0.1 ~ 0.2	无耕农作物	0.17 ~ 0.47
稀疏草原	0.05 ~ 0.13	有块石分布开阔地	0.1 ~ 0.2
有块石分布稀疏植被	0.09 ~ 0.34	沥青混凝土	0.02 ~ 0.005

2.2.2 泥沙体积浓度

根据对泥石流流体体积浓度计算见式 4 和陈长兴等^[17]

对冲沟冷渍沟沟道堆积物进行了一系列物理试验后得到体积浓度的各个参数。

$$C_v = \frac{\gamma_c - \gamma_w}{\gamma_s - \gamma_w} \quad (4)$$

式中: C_v ——泥沙体积浓度;

γ_s ——泥石流固体颗粒比重/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$);

γ_w ——水的重度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$);

γ_c ——泥石流容重/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$).

取 $\gamma_c = 2.0 \text{ g/cm}^3$, $\gamma_s = 2.7 \text{ g/cm}^3$, $\gamma_w = 1.0 \text{ g/cm}^3$, 最后得到 $C_v = 0.6$ 。

2.2.3 流变系数

在泥石流模拟过程当中还与泥石流的屈服强度及黏滞参数有关。

$$\eta = \alpha_1 e^{\beta_1 C_v} \quad (5)$$

$$\tau_y = \alpha_2 e^{\beta_2 C_v} \quad (6)$$

式中: η ——黏滞系数;

α_1 、 β_1 、 α_2 、 β_2 ——经验系数;

τ_y ——屈服应力。

各种流变系数的取值是根据詹钱登等研究学者进行一系列实验后得到的^[10]。冷渍沟取 $\alpha_1 = 0.811$, $\alpha_2 = 0.00462$, $\beta_1 = 13.72$, $\beta_2 = 11.24$ 。

2.2.4 层流阻力系数 K

泥石流在较高体积浓度和屈服应力的作用下会出现分层流动的现象^[19], 层流间的摩擦系数用 K 表示, 根据 FLO-2D 手册, 选择 K 为 2280, 该手册上的取值是根据 Woolhiser(1975)实地测定而得。

2.2.5 流量计算

在开始进行模拟前首先利用雨洪法对不同降雨周期下的清水流量进行综合计算, 根据现场调查与模拟结果进行对比分析, 实际暴发的泥石流堆积厚度与模拟结果中 20 年的降雨强度类似, 再与《四川省中小流域暴雨洪水计算手册》^[20-21]结合, 深入讨论 20 年、50 年及 100 年的降雨强度, 通过数学思想, 最终可以得到冷渍沟的清水流量见式(7), 通过《泥石流灾害防治工程勘查规范》以及《四川省中小流域暴雨洪水计算手册》提供的式(8)计算不同程度降雨强度下的泥石流最大洪峰流量。

$$W_p = \psi 0.1 H_{Tp} F = 0.1 H F \quad (7)$$

$$Q_p = 0.278 \psi i F = 0.278 \Psi (S/\tau^n) F \quad (8)$$

式中: W_p ——集水流域内洪水总量/(10^4 m^3);

ψ ——径流系数;

H_{Tp} ——总时间为 T 的降雨总量/mm;

F ——集水点所在的流域面积/ m^2 ;

H ——径流深度/cm;

Q_p ——不同降雨强度下的最大洪峰流量/($\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

i ——平均最大暴雨强度/($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$);

S ——雨力系数/($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$);

τ ——流域汇流时间/h;

n ——暴雨公式指数。

根据公式(7)和(8), 结合《四川省中小流域暴雨洪水计算手册》中的计算式(9)和式(10), 从而得到冲沟冷渍沟流域范围内的清水流量过程线(图4)。

$$T_p = 2.78(W_p/Q_p) \quad (9)$$

$$Q = y Q_p; T = x T_p \quad (10)$$

式中: T_p ——清水流量过程线洪峰历时/h;

Q ——清水流量过程线中各个时刻相对应的流量值/($\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

T ——清水流量过程线中不同时刻值/h;

x 、 y ——四川省中小流域洪水计算手册中清水流量过程线系数值。

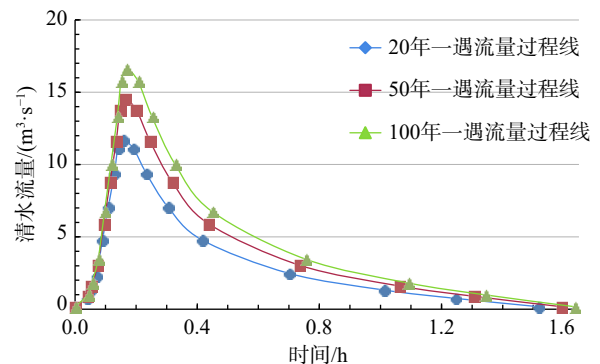


图4 冷渍沟清水流量过程线

Fig. 4 The water flow process of Lengzi gully

在模拟过程中引入放大系数 BF 来把沟道内的侵蚀程度体现出来, BF 由泥石流的体积浓度决定。表2为模拟参数的设置。沟道长度(L)在 Google 卫星地图上通过地形图测量得到。

$$BF = \frac{1}{1 - C_v} \quad (11)$$

3 模拟结果及验证

根据不同的参数取值对不同降雨强度下的冷渍沟泥石流运动过程进行综合模拟, 最终得到泥石流运动过程中最大堆积范围(图5)和流体的最大速度(图6)。20 年一遇降雨强度下, 泥石流未达到堵江状态; 50 年一遇的降雨强度下, 淹没了杀叶马村的村道, 流经该村的

表 2 冷渍沟泥石流 20 年一遇参数选取

Table 2 The parameter of Lengzi gully under 20 years rainfall frequency

流域面积 F/m^2	沟道长度 L/km	屈服应力 τ_y/MPa	黏滞系数 η	层流阻力系数 K	曼宁系数 n_c
0.62×10^6	1.49	4 903	5 704	2 280	0.18
放大系数 BF	径流深度 H/cm	汇流时间 τ/h	体积浓度 C_v	洪峰流量 $Q_p/(\text{cm}^3\cdot\text{s}^{-1})$	洪水流量 $W_p/10^4\text{ m}^3$
2.5	26	1.6	0.6	11.57×10^6	1.612

安宁河流域 1/4 被堵塞; 100 年一遇的情况下, 安宁河流域 1/3 被堵塞。因为冲沟冷渍沟沟道中存在大量的固

体松散物质, 因此在不同降雨强度下, 沟道的堆积深度和流体速度均要大于堆积区和沟道两侧。

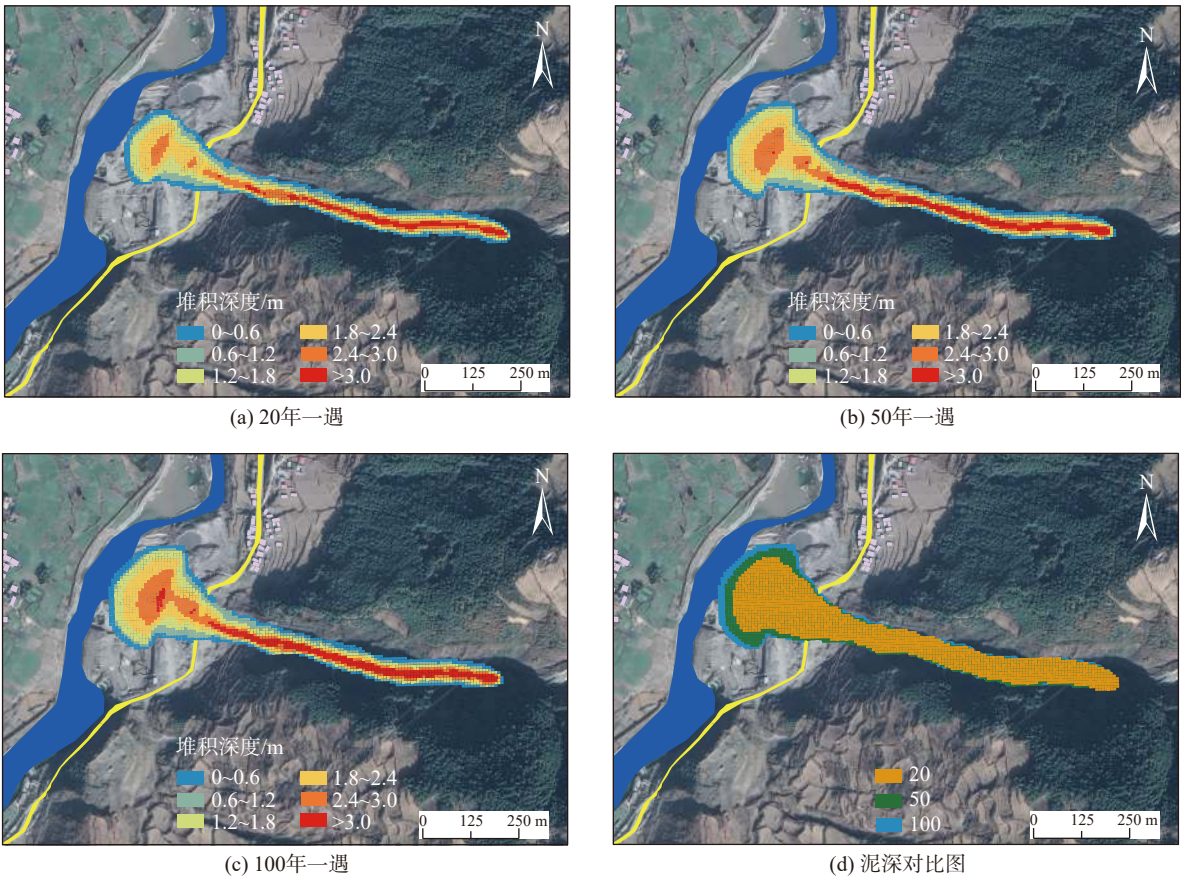


图 5 冷渍沟泥石流模拟泥深图

Fig. 5 Simulated depth of the Lengzi gully

在模拟了 20 年、50 年及 100 年降雨强度情况的基础上, 并与现场调查的实际情况结合分析可得, 现场的泥石流堆积情况与模拟中 20 年一遇的降雨强度相当, 并未达到 50 年和 100 年一遇的降雨强度, 因此将 20 年一遇的降雨周期中的最大堆积范围, 并去野外实地考察的范围综合起来分析模拟结果的准确性, 具体参见式 (12), 具体参数见表 3, 图 7 是冲沟冷渍沟泥石流数值模拟运动参数与实际观测结果验证图。

$$A = \frac{S_0}{\sqrt{S_m \cdot S_r}}$$

(12)

式中: A ——模拟结果精度/%;
 S_0 ——实际堆积与模拟堆积重叠区域面积/ km^2 ;
 S_m ——模拟堆积面积/ km^2 ;
 S_r ——实际堆积面积/ km^2 。

4 危险性评价

研究结合降雨强度和泥石流强度开展冷渍沟泥石流危险性评价分析。通过模拟运动过程得到泥石流最大流速及最大堆积深度, 参照常鸣等[22]针对泥石流最大流速和最大堆积深度得出的泥石流强度划分标准, 得到

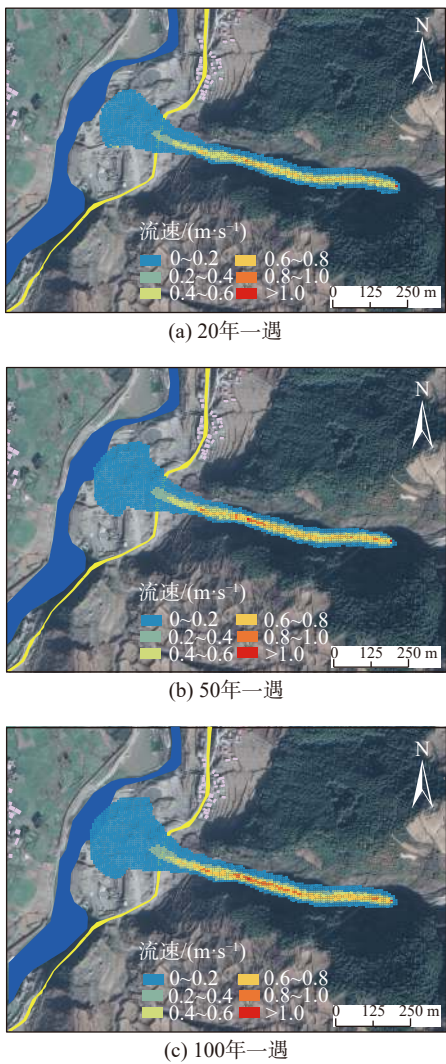


图 6 冷渍沟泥石流模拟流速图
Fig. 6 Simulated velocity of Lengzi gully

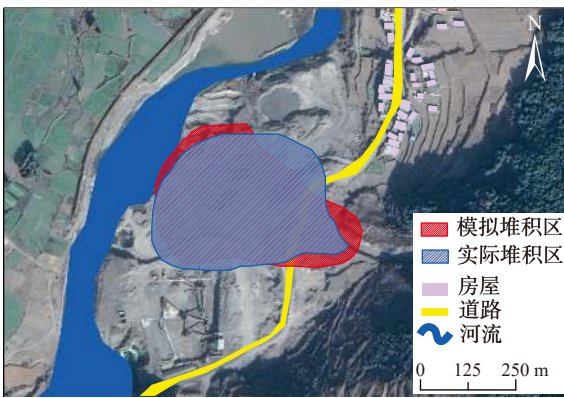


图 7 冷渍沟 20 年一遇模拟结果验证
Fig. 7 Verification of the simulation results of Lengzhi gully once in 20 years

冷渍沟泥石流强度划分表, 具体见表 4。

泥石流危险性评价划分标准图中的泥石流强度是由所模拟的 3 种降雨频率下的泥深和流速相乘而得到的。在 FLO-2D 软件中输入 3 种降雨频率的强度而得到泥石流危险性评价图, 得到的危险性评价图是 3 种降雨频率综合得到的结果。

冷渍沟泥石流的暴发概率的划分是根据不同雨强下的模拟危险范围, 再与实地考察的情况相结合得到的, 综合两者起来分析, 得到安宁河流域内冷渍沟泥石流危险性评价标准(图 8)。

根据研究得到的泥石流危险性评价等级标准, 高危险性, 中危险性及低危险性 3 类作为安宁河流域冷渍沟泥石流的具体危险性等级划分标准, 文中详细统计了这 3 类等级的所占的流域面积及地形地貌特征(图 9)。

表 3 冲沟冷渍沟泥石流对比验证表

Table 3 Comparison and verification table of debris flow in Lengzi gully

泥石流沟道名称	设计频率/%	最大冲出长度/m		最大冲出宽度/m		冲出范围/(10 ⁴ m ²)			精度/%
		模拟	实际	模拟	实际	模拟	实际	重叠	
冷渍沟	5.00	207.00	190.00	147.00	187.00	1.52	1.77	1.32	86

表 4 研究区泥石流强度划分表

Table 4 Debris flow intensity division table in the study area

危险等级	最大堆积深度/m	关系式	最大堆积深度/m与最大流速/(m·s ⁻¹)乘积
高	$H \geq 2.5$	OR	$VH \geq 2.5$
中	$0.5 \leq H < 2.5$	AND	$0.5 \leq VH < 2.5$
低	$H < 0.5$	AND	$VH < 0.5$

(1)高危险区域, 该区域面积占 27%, 由于冲沟型泥石流沟道较窄, 大量的松散堆积物堆积在沟道中, 因

此高危险区域在沟道中较集中。沟道两侧还有房屋, 农田, 一旦发生强降雨, 将会造成财产损失和人员的伤亡。

(2)中等危险区域, 该区域面积占 56%, 该区域所占研究区面积最大, 主要分布在沟道两侧及堆积区。该区域房屋较少, 主要是淤积现象对建筑物的损坏, 要及时清淤, 防止再次淤积对房屋及农作物造成损害。

(3)低危险区域, 该区域面积占 17%, 主要分布在沟道两侧边坡底部, 在暴发泥石流过程中, 可能造成安宁

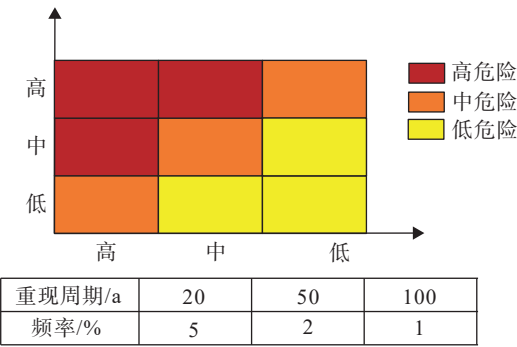


图 8 冷渍沟泥石流危险性评价划分标准图

Fig. 8 Debris flow hazard assessment standards in Lengzi gully

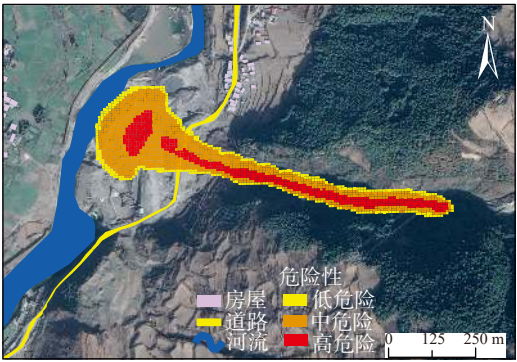


图 9 冷渍沟泥石流危险性评价图

Fig. 9 Debris flow hazard assessment result in Lengzi gully

河流域杀叶马村段的堵塞,造成流域水位升高,必要时对安宁河流域杀叶马村段的水位进行监测预警。

5 结论

冷渍沟沟道内有大量松散堆积物的堆积。一旦发生强降雨,将会造成泥石流灾害的发生。对安宁河流域内冷渍沟泥石流的危险性进行评价,模拟冷渍沟泥石流暴发时的运动过程,建立 20 年、50 年和 100 年一遇的降雨强度下的危险性评价模型。泥石流的最大堆积深度和最大流速决定了泥石流强度,再结合降雨强度,最终得到安宁河流域内冷渍沟泥石流危险性评价标准。

(1)流域面积小,流域边界不明显,主沟长度短,沟道纵比降较大等是安宁河流域内冷渍沟泥石流的最主要特征。

(2)根据室内遥感解译和野外现场调查情况来看,沟道内物源丰富,为泥石流的启动提供了很好的物质条件。模拟泥石流暴发时的运动过程,模拟结果与野外实测数据验证,在 20 年一遇的情况下,数值模拟的精度高达 86%。

(3)从冷渍沟危险性评价图中可以看出,冲沟冷渍

沟堆积危险范围内高危险区域面积占 27%,中等危险区域面积占 56%,低危险区域面积占 17%。由于冲沟型泥石流沟道较窄,大量的松散堆积物堆积在沟道中,因此中,高危险区域在沟道中较集中。中、高危险区域内的房屋,道路和农作物极易受到泥石流灾害的损害,需要加强监测预警和重点防护。

参考文献 (References) :

[1] 中华人民共和国国土资源部. 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, 2006. [Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Specification of geological investigation for debris flow stabilization; DZ/T 0220—2006 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2006. (in Chinese)]

[2] 倪化勇. 人工降雨条件下冲沟型泥石流起动试验研究 [J]. 工程地质学报, 2015, 23(1): 111—118. [NI Huayong. Field experiments for groove-type debris flow initiation with artificial rainfall [J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(1): 111—118. (in Chinese with English abstract)]

[3] 李秀珍, 刘希林, 苏鹏程. 四川凉山州安宁河流域泥石流危险性评价 [J]. 防灾减灾工程学报, 2005, 25(4): 426—430. [LI Xiuzhen, LIU Xilin, SU Pengcheng. Assessment on regional debris flow hazardousness of Anning River valley in Liangshan prefecture, Sichuan [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2005, 25(4): 426—430. (in Chinese with English abstract)]

[4] 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.

[5] 龚柯, 杨涛, 夏晨皓, 等. 基于 FLO-2D 的泥石流危险性评价: 以四川省汶川县绵虬镇簇头沟为例 [J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(6): 134—138. [GONG Ke, YANG Tao, XIA Chenhao, et al. Assessment on the hazard of debris flow based on FLO-2D: A case study of debris flow in Cutou gully, Wenchuan, Sichuan [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017, 28(6): 134—138. (in Chinese with English abstract)]

[6] CHRISTEN M, KOWALSKI J, BARTELT P. RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain [J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, 63(1/2): 1—14.

[7] NOCENTINI M, TOFANI V, GIGLI G, et al. Modeling debris flows in volcanic terrains for hazard mapping: the case study of Ischia Island (Italy) [J]. Landslides, 2015, 12(5): 831—846.

[8] QUAN L B, BLAHUT J, VAN W C J, et al. The application of numerical debris flow modelling for the generation of physical

- vulnerability curves [J]. *Natural Hazards and Earth System Science*, 2011, 138(11): 2047–2060.
- [9] 余宏明, 袁宏成, 唐辉明. 巴东县新城区冲沟泥石流危险度评价 [J]. *水文地质工程地质*, 2003, 30(增刊1): 47–49. [YU Hongming, YUAN Hongcheng, TANG Huiming. Fuzzy comprehensive evaluation method to evaluate debris flow risk factor in Badong new city [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2003, 30(Sup 1): 47–49. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 詹钱登, 萧凯文, 徐郁超, 等. 应用 FLO-2D 及 Debris 2D 模拟羌黄坑集水区土石流流动特性差异之研究 [J]. *中华防灾学刊*, 2015, 7(2): 239–247. [ZHAN Qiadeng, XIAO Kaiwen, XU Yuchao, et al. Study on the difference of flow characteristics of soil-rock flow in Qianghuangkeng catchment area by using FLO-2D and Debris 2D [J]. *Chinese Journal of Disaster Prevention*, 2015, 7(2): 239–247. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 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)]
- [12] 唐川, 李为乐, 丁军, 等. 汶川震区映秀镇“8·14”特大泥石流灾害调查 [J]. *地球科学*, 2011, 36(1): 172–180. [TANG Chuan, LI Weile, DING Jun, et al. Field investigation and research on giant debris flow on August 14, 2010 in Yingxiu Town, epicenter of Wenchuan earthquake [J]. *Earth Science*, 2011, 36(1): 172–180. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 崔鹏, 邹强. 山洪泥石流风险评估与风险管理理论与方法 [J]. *地理科学进展*, 2016, 35(2): 137–147. [CUI Peng, ZOU Qiang. Theory and method of risk assessment and risk management of debris flows and flash floods [J]. *Progress in Geography*, 2016, 35(2): 137–147. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 牛全福, 陆铭, 李月锋, 等. 基于灰色关联与粗糙依赖度的甘肃兰州市区泥石流危险性评价 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2019, 30(5): 48–56. [NIU Quanfu, LU Ming, LI Yuefeng, et al. Hazard assessment of debris flow in Lanzhou City of Gansu Province based on methods of grey relation and rough dependence [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(5): 48–56. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 常鸣, 唐川. 基于水动力的典型矿山泥石流运动模式研究 [J]. *水利学报*, 2014, 45(11): 1318–1326. [CHANG Ming, TANG Chuan. Study on typical movement model in mine debris flow based on hydrodynamic force conditions [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45(11): 1318–1326. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 林文, 周伟, 李靖, 等. 基于 Flow-R 和 FLO-2D 耦合模型的沟谷型泥石流危险性评价 [J/OL]. *人民长江*: 1–9. [LIN Wen, ZHOU Wei, LI Jing, et al. Debris flow hazard assessment based on combination of Flow-R and FLO-2D models [J/OL]. *Yangtze River*: 1–9. https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?bcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=RIVE20211008000&uniplatform=NZKPT&v=HFdcQQN9Fr2BnwrB79d72ZrNvTI4uEHw_decSY9iPiLe_gw9fCRwPOFDhHUORnjy (in Chinese with English abstract)]
- [17] 陈兴长, 游勇, 陈晓清, 等. 安宁河上游冷渍沟泥石流特征及其发展趋势 [J]. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(1): 122–128. [CHEN Xingzhang, YOU Yong, CHEN Xiaoqing, et al. Characteristics and development trends of debris flows of lengzi gully in the upper Anning River, southwest Sichuan, China [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, 21(1): 122–128. (in Chinese with English abstract)]
- [18] ADEGBE M, ALKEMA D, JETTEN V G, et al. Post seismic debris flow modelling using FLO-2D: Case study of Yingxiu, Sichuan Province, China [J]. *Journal of Geography and Geology*, 2013, 5(3): 101–115.
- [19] O'BRIEN J S, JULIEN P Y. Physical properties and mechanics of hyperconcentrated sediment flows [J]. *Flash Floods and Debris Flow Hazards in Utah*, 1985: 260–279.
- [20] 四川省水电局. 四川省水文手册 [M]. 四川省水利电力局水文总站图书出版社, 1984. [Sichuan Provincial Hydropower Bureau. Sichuan province hydrology manual [M]. Sichuan Provincial Water Resources and Electric Power Bureau Hydrology Station Book Press, 1984. (in Chinese)]
- [21] PENG S H, LU S C. FLO-2D simulation of mudflow caused by large landslide due to extremely heavy rainfall in southeastern Taiwan during Typhoon Morakot [J]. *Journal of Mountain Science*, 2013, 10(2): 207–218.
- [22] 常鸣, 窦向阳, 唐川, 等. 降雨驱动泥石流危险性评价 [J]. *地球科学*, 2019, 44(8): 2794–2802. [CHANG Ming, DOU Xiangyang, TANG Chuan, et al. Hazard assessment of typical debris flow induced by rainfall intensity [J]. *Earth Science*, 2019, 44(8): 2794–2802. (in Chinese with English abstract)]