

基于模糊层次分析的彭州市牛圈沟泥石流危险度评价

黄猛^{1,2}, 沈军辉^{1,2*}, 李远征^{1,2}, 陈华³, 李宗有³, 何必³

(1. 成都理工大学环境与土木工程学院, 成都 610059;

2. 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), 成都 610059;

3. 四川省交通勘察设计研究院有限公司, 成都 610017)

摘要: 牛圈沟是一条多期次泥石流沟, 沟口堆积扇显示, 该沟历史上曾发生多次大规模泥石流, 汶川地震以来也多次发生小规模的泥石流, 对拟建彭汶高速公路的建设带来潜在危害。本文为在现场地质调研的基础上, 结合无人机影像、遥感影像确定泥石流沟的基本特征, 采用模糊层次分析法构建泥石流危险度评价模型, 选取地形地貌、物源、触发条件为主要因子并针对性地选出10个次要因子对泥石流进行危险度评价。结果表明, 牛圈沟、小牛圈沟、回龙沟、燕子洞沟、横河沟的评价等级为高度危险, 连山沟、飞水岩沟、马场沟、石梁子沟、满板沟的评价等级为轻度危险, 评价结果与泥石流实际调查结果具有良好的 consistency。成果可为彭州市龙门山镇牛圈沟泥石流防灾减灾工作及彭汶高速公路工程建设提供科学依据。

关键词: 彭州市牛圈沟; 泥石流; 危险度评价; 层次分析法; 模糊综合评价

中图分类号: P642.23 **文献标识码:** A

RISK ASSESSMENT OF DEBRIS FLOW IN NIUJUANGOU IN PENGZHOU CITY BASED ON FUZZY ANALYTIC HIERARCHY

HUANG Meng^{1,2}, SHEN Jun-hui^{1,2*}, LI Yuan-zheng^{1,2}, CHEN Hua³, LI Zong-you³, HE Bi³

(1. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection,

Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

3. Sichuan Communication Surveying & Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610017, China)

Abstract: Niujuangou is a multi-stage debris flow gully. The accumulation fan at the gully mouth shows that there have been many large-scale debris flows in the history of the gully, and small-scale debris flows have also occurred many times since the Wenchuan earthquake, which has brought potential threat to the construction of the proposed Pengwen Expressway. Based on the on-site geological investigation, combined with UAV images and remote sensing images to determine the basic characteristics of debris flow gully, the fuzzy analytic hierarchy process is used to construct the risk assessment model of debris flow. The topography, provenance and triggering conditions are selected as the main factors and 10 secondary factors are selected to evaluate the risk of debris flow. The results showed that the evaluation grades of Niujuangou, Xiaoniujuangou, Huilonggou, Yanzidonggou and Henghegou were high hazard, while the evaluation grades of Lianshangou, Feishuiyangou,

Machanggou, Shiliangzigou and Manbangou were mildly dangerous. The evaluation results were in good agreement with the actual investigation results of debris flow. The results can provide a scientific basis for disaster prevention and mitigation of Niujuangou debris flow in Longmenshan Town, Pengzhou City and the construction of Pengwen Expressway project.

Key words: Niujuangou in Pengzhou city; debris flow; risk assessment; analytic hierarchy process; fuzzy comprehensive evaluation

牛圈沟位于彭州市龙门山镇宝山村与团山村交界处,地处湔江上游,是著名的暑期度假胜地,国家森林公园,是当地的旅游业重要收入来源。历史上曾发生多期次泥石流,规模逐渐减小,但汶川地震以来,地质活动频繁,泥石流灾害频发^[1]。牛圈沟近期泥石流灾害频发严重制约了当地的生态建设与经济发展,危及当地人民生命财产安全。同时,拟建彭汶高速公路穿越牛圈沟,在沟域多处展布,泥石流灾害的频发也制约了公路建设的安全性。因此,对牛圈沟进行泥石流危险度评价对当地防灾减灾、公路建设尤为重要。

泥石流危险度是指泥石流的威胁和危害程度^[2]。泥石流危险度的研究一直是个热点话题。刘希林在灰色关联度分析的基础上给出了评价因子选择、权重分配、因子值等级选择、危险度标准^[3];魏星宇等^[4]基于灰色关联度对甘草沟泥石流进行危险性分析;王英杰等^[5]基于最小熵值分析理论,消除因子间的相关性,按照对泥石流危险度的贡献率确定主要因子并对其进行权重计算;陈鹏宇等^[6]以 Spearman 等级相关系数建立泥石流危险度评价的多因子体系及权重分配;张晨等^[7]将粗糙集优化后的层次分析法与信息熵方法相结合,提出一种全新的赋权方式,对泥石流危险度进行计算;孟凡奇等^[8]运用最优传递矩阵改进的层次分析法,可避免一致性检验直接得到因子权重值;李倩等^[9]使用遗传算法改进后的层次分析法对山区泥石流进行危险性评估,与前人获得结果一致;杨秀梅等^[10]基于模糊层次分析法对甘肃省莲麓水电站评估区内泥石流沟进行危险度评价,证明该方法是科学可行的;Chen Cao 等^[11]将熵值法和层次分析法结合起来计算参数权重,基于云模型和分量加权法,建立了泥石流危险性评价分析模型,该方法避免了不确定性问题中的随机性和模糊性,提高了预测结果的合理性;王子健等^[12]采用二级模糊综合评定方法评定泥石流危险度。

因此,本文在详细的现场地质调查基础上,结合无人机影像、遥感影像,分析泥石流的基本特征,合

理地从地形地貌、物源及触发条件中选取 10 个评价因子建立泥石流危险度评价模型,采用层次分析法计算各因子的权重分配,并使用模糊综合评价泥石流的危险度等级。

1 研究区概况

1.1 自然条件

牛圈沟位于彭州市龙门山镇西北部,地处湔江上游白水河流域,沟口地理坐标北纬 $31^{\circ}14'10.39''$,东经 $103^{\circ}47'38.41''$,距彭州市区 30 km。龙门山镇属亚热带湿润季风气候,多年年均降雨量 936.97 mm,1 d 最大降雨量 167.0 mm,降雨多集中在 6~9 月,以暴雨为主。因其气候地域特性,流域内主要植被类型为亚热带植被,植被平均覆盖率高达 60%。

1.2 地形地貌

沟域内地貌类型为构造侵蚀中高山地貌,地势整体北西高、南东低,海拔在 987~4 469 m 之间(图 1),地形主要坡度为 $27^{\circ}\sim 40^{\circ}$,平均坡度 32° (图 2)。

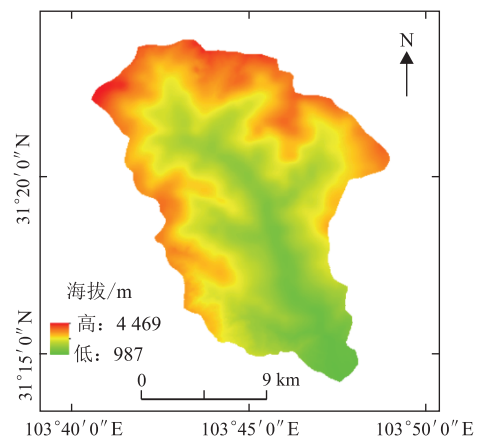


图 1 牛圈沟流域高程分布图

流域总体呈树叶状,主沟长 22.90 km,流域周长 54.95 km,流域面积 129.05 km²,主沟纵坡降 152.05‰。流域内主要发育 9 条支沟,长度在 2~10 km 之间,其中小牛圈沟、回龙沟、马场沟、满板沟位于右岸,连山沟、飞水岩沟、燕子洞沟、石梁子沟、横河沟位于左岸(图 3)。

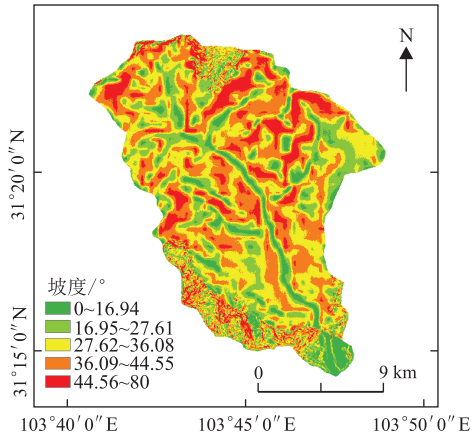


图2 牛圈沟流域坡度分布图

1.3 地层岩性及物源分布

沟域内出露的地层主要为元古界激江-晋宁期、元古界黄水河群(P_{thn})、震旦系下统(Z_a)、二叠系下统(P₁)、三叠系上统须家河组下段(T₃x¹)以及第四系全新统(Q₄)。岩性主要为花岗岩、闪长岩、蛇纹岩、玄武岩、片岩、砂岩、灰岩及煤系地层等,第四系全新统主要由卵砾石、岩屑、残坡积物等组成。

沟域内松散物源主要为崩滑物源、坡面物源、沟道物源、冻融物源(图4),物源条件丰富,在暴雨条件下易启动发生泥石流。

1.4 地质构造

沟域位于龙门山断裂带核心区,构造活动强烈,

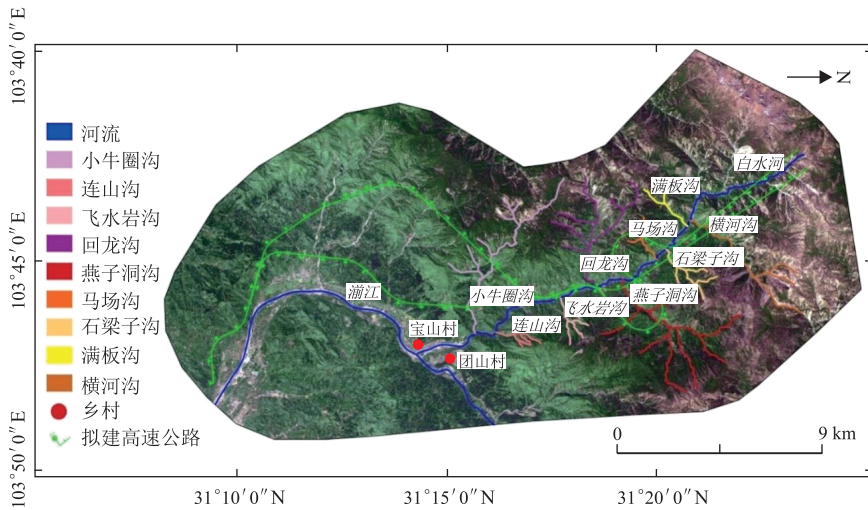


图3 牛圈沟流域9条支沟分布遥感影像图(高分六号)

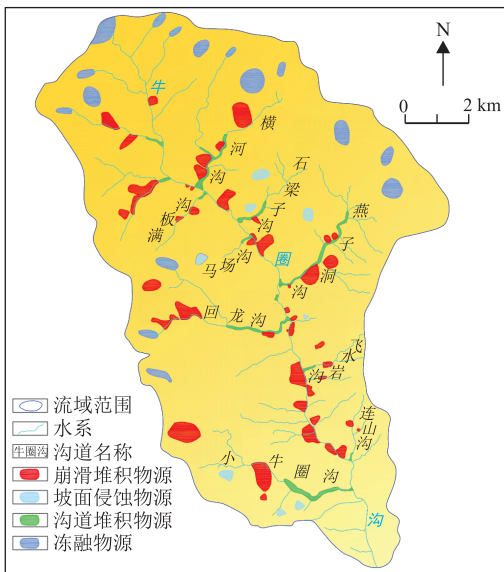


图4 牛圈沟主要物源分布图

主要发育有叠瓦式断裂映秀-北川断裂^[13]。该断裂产状大致为N40°E/NW∠50°~70°,呈北东南西向

穿过牛圈沟,断层破碎带发育,地质条件复杂。

1.5 泥石流活动特征

(1) 历史活动特征

根据野外调查和收集资料分析,牛圈沟是一条多期次泥石流沟,从老到新依次分为Ⅰ期、Ⅱ期、Ⅲ期(图5)。

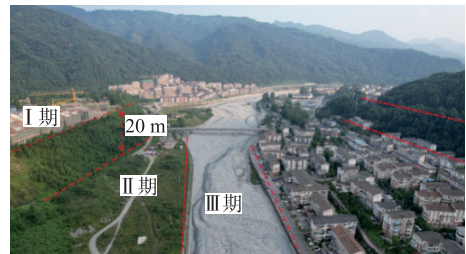


图5 牛圈沟沟口泥石流堆积扇特征

Ⅰ期泥石流堆积扇呈不规则长条扇形,该期泥石流规模最大,泥石流堆积体冲出沟口开始堆积到达湔江,冲撞对岸山体,绝大部分向下游堆积,现残余堆积体宽约550 m,顺河纵向长约900 m,堆积体

表面坡度约 $5^{\circ} \sim 8^{\circ}$; II 期泥石流堆积体与 I 期泥石流堆积体以扇叠扇形式形成两个堆积平台,扇形体堆积顺河长约 700 m,纵向长约 440 m,与 I 期高差约 20 m; III 期泥石流堆积扇整体呈不规则长舌性,堆积体顺河长约 700 m,纵向长约 200 m,厚度约 5 ~ 7 m。总体来说,规模逐渐减小。

(2) 近期活动特征

“5.12”地震前,牛圈沟泥石流活动不活跃。地震后沟内发生多处崩塌、滑坡,松散物质较多,为泥石流的发生提供了充足的物源条件。根据现场走访调查,2012 年、2013 年及 2019 年暴雨期间,牛圈沟内洪水猛增,沟内存在泥石流活动,以水石流为主,曾冲出较多物源,堆积于河道,部分冲入湔江河谷(图 6、图 7)。



图 6 回龙沟沟道多次泥石流堆积



图 7 主沟道见多级台坎

2 泥石流危险度研究方法

2.1 层次分析法

层次分析法(AHP)是将决策相关元素分解成多个层次,建立判断矩阵,对矩阵最大特征值对应的特征向量进行归一化处理得到元素权重值,以此作为评价的基础^[14]。

2.1.1 判断矩阵构建

对于同一层次的不同元素,通过比较各元素对目标元素的影响情况两两对比建立判断矩阵。判断

矩阵的表达式如下:

$$A = (a_{ij})_{n \times n}, a_{ij} > 0, a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}, (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

其中, a_{ij} 是元素 a_i 对于 a_j 的相对重要程度,本文摒弃了 1~9 及其倒数的标度方法^[15],采用指数标度的方法,主要优点是其构造一致性矩阵能力强、符合客观排序、与人们思维性一致^[16]。各标度及其含义见表 1。

表 1 判断矩阵标度及含义

标度	含义
$e^{0/4}$	两个因子相比较,具有相同的重要性
$e^{2/4}$	两个因子相比较,前者比后者略微重要
$e^{4/4}$	两个因子相比较,前者比后者较为重要
$e^{6/4}$	两个因子相比较,前者比后者非常重要
$e^{8/4}$	两个因子相比较,前者比后者极其重要
$e^{1/4}, e^{3/4}, e^{5/4}, e^{7/4}$	表示上述判断的中间值
倒数	因素 i 与 j 相比较的标度是 j 与 i 相比较的标度的倒数

2.1.2 权重向量计算

权重向量计算表达式为:

$$AW = \lambda_{\max} W \quad (2)$$

其中, λ_{\max} 为最大特征值; W 为特征向量。

2.1.3 一致性检验

计算一致性指标 CI :

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

计算一致性比例 CR :

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4)$$

RI 为随机一致性指标(表 2),当 $CR < 0.1$ 时一致性检验通过。

表 2 随机一致性指标

n	1	2	3	4	5	6	7	8
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41

2.2 模糊综合评价

模糊综合评价是应用模糊变换原理及最大隶属度原则对多种因素制约的事物或对象进行总体评价^[17]。

2.2.1 评价集与隶属度函数的确定

参考前人研究成果,泥石流危险度等级划分为轻度、中度、高度、极度^[2]。建立泥石流危险度评价集, $V = (v_1, v_2, v_3, v_4)$ 。

模糊综合评价的关键在于确定因子隶属度。根据评价等级,本文拟采用半梯形分布函数来确定各因子隶属度^[17]。具体函数如下:

$$u_1(v) = \begin{cases} 1 & v \leq v_1 \\ \frac{v_2 - v}{v_2 - v_1} & v_1 < v < v_2 \\ 0 & v \geq v_2 \end{cases} \quad (5)$$

$$u_2(v) = \begin{cases} 0 & v \leq v_1 \text{ 或 } v \geq v_3 \\ \frac{v - v_1}{v_2 - v_1} & v_1 < v < v_2 \\ \frac{v_3 - v}{v_3 - v_2} & v_2 \leq v \leq v_3 \end{cases} \quad (6)$$

$$u_3(v) = \begin{cases} 0 & v \leq v_2 \text{ 或 } v \geq v_4 \\ \frac{v - v_2}{v_3 - v_2} & v_2 < v < v_3 \\ \frac{v_4 - v}{v_4 - v_3} & v_3 \leq v \leq v_4 \end{cases} \quad (7)$$

$$u_4(v) = \begin{cases} 0 & v \leq v_3 \\ \frac{v - v_3}{v_4 - v_3} & v_3 < v < v_4 \\ 1 & v \geq v_4 \end{cases} \quad (8)$$

其中, v 为各因子实际值, v_j 为评价等级上下限。

2.2.2 模糊评价矩阵建立

对各因子 u_i 进行评价, 通过半梯形函数计算出各因子对评价集 v_j 的隶属度 r_{ij} , 确定各因子模糊关系矩阵:

$$R = (r_{ij})_{m \times n} \quad (9)$$

3 研究区泥石流危险度评价

3.1 评价因子选取

泥石流灾害的发生是多种因素共同作用的结果, 根据研究区的自然条件以及地质环境结合泥石流形成条件及发育特征等因素, 在野外实际调查走访基础上, 选取图 8 所示 10 个因子建立层次结构模型, 研究区各项参数及各评价因子危险度等级赋值见表 3、表 4。

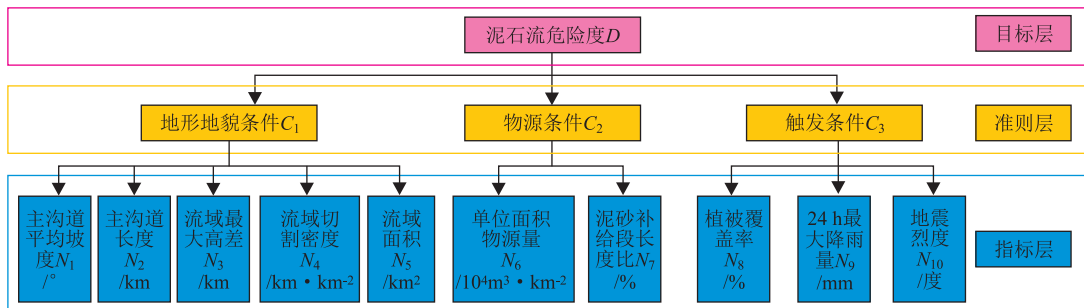


图 8 泥石流危险度评价层次结构模型

表 3 研究区危险度评价参数值

沟名	N ₁	N ₂	N ₃	N ₄	N ₅	N ₆	N ₇	N ₈	N ₉	N ₁₀
牛圈沟	8.65	22.90	3.48	2.06	129.05	187.22	43.31	60	167.0	VIII
小牛圈沟	16.20	9.63	2.35	1.11	14.63	119.5	39.46	70	167.0	VIII
连山沟	33.56	2.34	1.43	2.15	1.33	25.50	11.06	60	167.0	VIII
飞水岩沟	33.66	2.27	1.42	2.20	1.63	21.33	12.32	60	167.0	VIII
回龙沟	20.09	6.40	2.13	1.25	13.10	122.70	38.72	70	167.0	VIII
燕子洞沟	14.28	9.30	2.25	1.19	20.37	113.20	40.90	70	167.0	VIII
马场沟	35.58	2.30	1.43	1.92	1.37	38.99	19.71	55	167.0	VIII
石梁子沟	30.26	3.33	1.50	1.47	4.21	35.16	21.66	55	167.0	VIII
满板沟	29.02	2.65	1.40	1.73	1.89	36.47	22.72	55	167.0	VIII
横河沟	18.53	6.25	2.14	0.80	12.40	135.30	39.13	50	167.0	VIII

表 4 评价因子危险度等级及赋值

评价因子	危险度等级			
	轻度 v_1	中度 v_2	高度 v_3	极度 v_4
N ₁	≤10	10~20	20~35	≥35
N ₂	≤1	1~3	3~10	10~20
N ₃	≤0.5	0.5~1.0	1.0~3.0	≥3.0
N ₄	≤5	5~10	10~25	≥25
N ₅	≤0.5	0.5~5	5~35	35~100
N ₆	≤10	10~100	100~200	≥200
N ₇	≤10	10~30	30~60	≥60
N ₈	≥60	30~60	10~30	≤10
N ₉	≤25	25~50	50~100	≥100
N ₁₀	I~III	IV~VI	VII~VIII	IX~XII

3.2 权重分配

根据本文对层次分析法的描述, 构建各因子判断矩阵, 检验判断矩阵一致性并计算各因子的权重值, 计算结果如表 5~表 9 所示。

根据计算结果, 满足一致性检验, 该层次结构模型具有合理性。

表 5 准则层判断矩阵及一致性检验

D	C ₁	C ₂	C ₃	CR
C ₁	$e^{0/4}$	$1/e^{3/4}$	$1/e^{5/4}$	
C ₂	$e^{3/4}$	$e^{0/4}$	$1/e^{2/4}$	0
C ₃	$e^{5/4}$	$e^{2/4}$	$e^{0/4}$	

表 6 地形地貌条件判断矩阵及一致性检验

C_1	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	CR
N_1	$e^{0/4}$	$e^{2/4}$	$1/e^{3/4}$	$e^{1/4}$	$e^{2/4}$	0.011 2
N_2	$1/e^{2/4}$	$e^{0/4}$	$1/e^{3/4}$	$1/e^{2/4}$	$e^{1/4}$	
N_3	$e^{3/4}$	$e^{3/4}$	$e^{0/4}$	$e^{2/4}$	$e^{3/4}$	
N_4	$1/e^{1/4}$	$e^{2/4}$	$1/e^{2/4}$	$e^{0/4}$	$e^{1/4}$	
N_5	$1/e^{2/4}$	$1/e^{1/4}$	$1/e^{3/4}$	$1/e^{1/4}$	$e^{0/4}$	

表 7 物源条件判断矩阵及一致性检验

C_2	N_6	N_7	CR
N_6	$e^{0/4}$	$e^{2/4}$	0
N_7	$1/e^{2/4}$	$e^{0/4}$	

表 8 触发条件判断矩阵及一致性检验

C_3	N_8	N_9	N_{10}	CR
N_8	$e^{0/4}$	$1/e^{3/4}$	$1/e^{3/4}$	0
N_9	$e^{3/4}$	$e^{0/4}$	$e^{0/4}$	
N_{10}	$e^{3/4}$	$e^{0/4}$	$e^{0/4}$	

表 9 层次总排序判断矩阵及权重分配

C 层次	C_1	C_2	C_3	W
N 层次	0.151 3	0.320 4	0.528 3	
N_1	0.209 3	0	0	0.031 7
N_2	0.140 1	0	0	0.021 2
N_3	0.328 9	0	0	0.049 8
N_4	0.188 7	0	0	0.028 6
N_5	0.132 9	0	0	0.020 1
N_6	0	0.622 5	0	0.199 4
N_7	0	0.377 5	0	0.123 0
N_8	0	0	0.191 1	0.101 0
N_9	0	0	0.404 5	0.213 7
N_{10}	0	0	0.404 5	0.213 7

3.3 泥石流危险度评价

根据公式(5~8)以及评价因子指标值与实际值,以小牛圈沟为例计算泥石流沟的模糊矩阵 R 。

$$R = \begin{bmatrix} 0.380 & 0.620 & 0 & 0 \\ 0 & 0.053 & 0.947 & 0 \\ 0 & 0.325 & 0.675 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.679 & 0.321 & 0 \\ 0 & 0.805 & 0.195 & 0 \\ 0 & 0.685 & 0.315 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

同理可得到其余 8 条泥石流沟的模糊矩阵。根据上述权重分配得到评价因子权重向量 $W = (0.031 7, 0.021 2, 0.049 8, 0.028 6, 0.020 1, 0.199 4, 0.123 0, 0.101 0, 0.213 7, 0.213 7)$,通过

模糊变换 $B = W * R$, 确定危险度评价模糊子集 B (表 10)。

表 10 研究区各泥石流沟模糊子集

沟名	模糊子集 B			
牛圈沟	0.161 3	0.093 8	0.442 2	0.304 8
小牛圈沟	0.141 6	0.295 4	0.351 5	0.213 7
连山沟	0.434 6	0.110 9	0.253 1	0.213 7
飞水岩沟	0.435 4	0.125 5	0.227 5	0.213 7
回龙沟	0.129 6	0.320 1	0.338 9	0.213 7
燕子洞沟	0.147 7	0.295 6	0.345 2	0.213 7
马场沟	0.334 9	0.197 5	0.224 4	0.245 4
石梁子沟	0.311 1	0.228 5	0.248 8	0.213 7
满板沟	0.315 9	0.229 9	0.242 7	0.213 7
横河沟	0.100 6	0.323 2	0.364 7	0.213 7

按照最大隶属度原则,最大值对应泥石流危险度等级。通过表 10 可得出,牛圈沟、小牛圈沟、回龙沟、燕子洞沟、横河沟的评价等级为高度危险,连山沟、飞水岩沟、马场沟、石梁子沟、满板沟的评价等级为轻度危险,与现场实际调查结果基本吻合。因此,本文提出的泥石流危险度评价结果能反映出泥石流暴发的真实情况。

4 结论

本文采用指数标度的层次分析法计算因子权重分配,基于模糊综合对研究区内泥石流沟进行危险度评价。主要结论如下:

(1) 根据牛圈沟泥石流发育特征分析,牛圈沟是一条多期次泥石流沟,历史上曾发生 3 次大规模泥石流,在沟口形成 3 个堆积扇,扇体规模逐渐减小。汶川地震以来,松散物源增加,小规模泥石流灾害频发,丰富的物源条件可能诱发更大规模泥石流灾害。

(2) 模糊层次分析结果表明,牛圈沟、小牛圈沟、回龙沟、燕子洞沟、横河沟的评价等级为高度危险,连山沟、飞水岩沟、马场沟、石梁子沟、满板沟的评价等级为轻度危险。

(3) 评价结果符合现场调查结果,表明这种评价方法可行,选取的评价因子是有效的,其结果可为当地防灾减灾工作及工程建设提供一定的科学依据。

参考文献

[1] 罗恒,沈军辉,宋欢欢.九绵高速工棚沟泥石流发育特征及危险性分析[J].科学技术与工程,2017,17(32):31-36.
 [2] 刘希林,唐川.泥石流危险性评价[M].北京:科学出版社,1995.

- [3] 刘希林. 泥石流危险度判定的研究[J]. 灾害学, 1988, 3(3): 10-15.
- [4] 魏星宇, 沈军辉, 吴俊杰, 等. 泸-石高速甘草沟泥石流发育特征及危险性分析[J]. 自然灾害学报, 2022, 31(6): 229-238.
- [5] 王英杰, 王磊, 荣起国, 等. 基于熵值理论的泥石流评价因子选取[J]. 交通运输工程学报, 2014, 14(2): 28-33.
- [6] 陈鹏宇, 乔景顺, 彭祖武, 等. 基于等级相关的泥石流危险因子筛选与危险度评价[J]. 岩土力学, 2013, 34(5): 1409-1415.
- [7] 张晨, 王清, 陈剑平, 等. 金沙江流域泥石流的组合赋权法危险度评价[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 831-836.
- [8] 孟凡奇, 李广杰, 李明, 等. 逐步判别分析法在筛选泥石流评价因子中的应用[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2925-2929.
- [9] 李倩, 杨志全, 杨溢, 等. 基于GA-AHP和云物元分析法的山区泥石流危险性评估[J]. 地质灾害与环境保护, 2021, 32(4): 14-18.
- [10] 杨秀梅, 梁收运. 基于模糊层次分析法的泥石流危险度评价[J]. 地质灾害与环境保护, 2008, 19(2): 73-78.
- [11] Cao C, Xu P, Chen J, et al. Hazard Assessment of Debris-Flow along the Baicha River in Heshigten Banner, Inner Mongolia, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2016, 14(1): 30.
- [12] 王子健, 肖盛燮, 戴廷利, 等. 泥石流危险度模糊综合评判方法及应用[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2008, 27(5): 794-798.
- [13] 葛永刚, 宋国虎, 郭朝旭, 等. 四川彭州龙门山镇“8·18”泥石流灾害特征与成灾模式分析[J]. 水利学报, 2012, 43(S2): 147-154.
- [14] 王俊豪, 金华丽, 倪天翔, 等. 基于层次分析法的模糊综合评判模型在康乐县泥石流沟危险性评价中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2017, 28(3): 52-57.
- [15] 许树柏. 实用决策方法层次分析法原理[M]. 天津: 天津大学出版社, 1988.
- [16] 高培. 基于指数标度模糊层次分析法的银厂沟泥石流危险性评价研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2021.
- [17] 沈简, 饶军, 傅旭东. 基于模糊综合评价法的泥石流风险评价[J]. 灾害学, 2016, 31(02): 171-175.

作者简介: 黄猛(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事地质灾害分析与工程地质研究. E-mail: 1261576575@qq.com

通讯作者: 沈军辉(1964—), 男, 教授, 博士, 主要从事工程地质和环境地质研究. E-mail: shenjnhui@cdu.cn