

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.01.07

基于层次分析法和模糊数学相结合的甘肃 东乡八丹沟泥石流易发性评价

崔志超¹, 王俊豪², 崔传峰¹, 潘国营¹

(1. 河南理工大学, 河南 焦作 454000; 2. 中国地质环境监测院, 北京 100081)

摘要: 八丹沟位于甘肃东乡县, 近年来多次发生泥石流, 对流域内居民生命财产造成了巨大的威胁, 因此对八丹沟泥石流易发性评价是非常必要的。本文在详细分析八丹沟流域特征和动力学特征的基础上, 选取了 11 个评价因子作为八丹沟泥石流易发性评价的指标, 利用层次分析法对各个因子赋予权重, 并且构建模糊数学综合评价模型对八丹沟泥石流进行易发性评价。结果表明: 八丹沟泥石流爆发频率 20 年、50 年、100 年的易发性为中易发, 应加强防范并采取合理的防治措施, 保证当地居民的生命财产安全。

关键词: 泥石流; 易发性; AHP; 模糊综合评价

中图分类号: P694

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2020)01-0044-07

Evaluation of the susceptibility of debris flow in Badan Gully of Dongxiang County of Gansu based on AHP and Fuzzy mathematics

CUI Zhichao¹, WANG Junhao², CUI Chuanfeng¹, PAN Guoying¹

(1. Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China;

2. China Institute of Geo-environment Monitoring, Beijing 100081, China)

Abstract: Badan Gully is located in Dongxiang County of Gansu Province, many debris flow have occur in recent years, which poses a great threat to the life and property of the local residents, therefore it is necessary to evaluate the susceptibility of debris flow in Badan Gully. In this paper, based on the detailed analysis of the characteristics of the Badan Gully and the dynamic characteristics of the basin, 11 evaluation factors were selected as the indicators for the evaluation of the debris flow in the Badan Gully, weight to each factor is assigned by AHP, and fuzzy mathematics comprehensive evaluation model is constructed to evaluate the susceptibility of the debris flow in Badan Gully. The results show that the susceptibility of the outbreak frequency of debris flow in 20 years, 50 years and 100 years is moderately easy. Prevention and control measures should be taken to ensure the safety of life and property of local residents.

Keywords: debris flow; susceptibility; AHP; fuzzy comprehensive evaluation

0 引言

我国泥石流类型众多、爆发频繁、危害严重, 是世界上泥石流分布及危害最集中、规模最大的国家之

一^[1]。我国对泥石流的研究主要集中在近 50 年, 随着数值模拟、3S 技术的逐渐成熟, 对泥石流的研究也逐渐深入^[2]。八丹沟泥石流沟几乎每年有洪水或泥石流发生, 2000—2018 年期间, 八丹沟泥石流沟已发生

收稿日期: 2019-02-25; 修订日期: 2019-04-28

基金项目: 中国地质环境监测院地质调查与地质监测项目: 唐汪川幅地质灾害调查评价(中国地环[2017]DD0402)

第一作者: 崔志超(1994-), 男, 河南濮阳人, 硕士, 主要研究方向工程地质与灾害地质。E-mail: 455425381@qq.com

通讯作者: 王俊豪(1987-), 男, 河南安阳人, 硕士, 主要从事水工环地质方面的研究工作。E-mail: wangjh@mail.cigem.gov.cn

数次规模不等的泥石流,时常造成沟道两岸耕地、道路及村民房屋淤埋和冲毁,累计造成直接经济损失达数十万元。估算威胁人数 522 人,耕地 $8 \times 10^4 \text{ m}^2$,威胁资产 2 026 万元,威胁人数多,威胁资产较大,成为严重制约当地经济可持续发展的重要因素之一。

泥石流发育过程受多种因素的影响,具有多样性、可变性、不确定性,各个因素之间相互影响、相互作用构成了一个复杂的模糊系统^[3-5]。随着学科的交叉,研究人员将数学方法应用泥石流评价中来,建立了多种评价模型。比如朱静^[6]基于层次分析法的评价方法对云南省 40 条典型泥石流沟进行了评价。铁永波等^[7]利用层次分析法对昆明东川城区后山两条泥石流沟进行了评价。岳天祥等^[8]构建了基于信息熵的评价模型,并取得了不错的评价效果。于秀治等^[9]将灰色系统理论运用到北京山区泥石流危险度评价预测中。刘艳等^[10]构建了模糊数学模型,并将其应用到城市减灾管理综合评价上。安玉华等^[11]基于突变理论对乌东德地区泥石流危险度进行多目标评估。李新坡等^[12]应用 GIS 和神经网络方法对云南省泥石流的危险度进行了评价。匡乐红等^[13]基于模糊可拓的评价方法对昭通市的泥石流危险度等级进行了评价。虽然取得了不错的研究成果,但是也存在一些不足:泥石流本身是一种极复杂的地质现象。评价指标的过多过少选取都不能真实的反映泥石流灾害的危险程度,各个评价方法多以县或更大区域为单位,评价多以定性和半定量为主,评价层次不明晰,不能大范围的利用到泥石流评价中来。因此,本文在详细分析八丹沟泥石流流域特征和动力学特征的基础上,根据泥石流灾害的影响因素选取了 11 个评价因子作为八丹沟泥石流易发性评价指标,利用层次分析法对各个因子赋予权重,之后构建模糊数学综合评价模型对八丹沟泥石流进行了易发性评价。这种评级模型的建立充分利用了层次分析法和模糊综合评价的优点,两者有机的结合既考虑了各个影响因子对泥石流的相对重要程度,又全面的评价了各个因子起到的作用,对泥石流的评价合理全面,得到的结果也更加偏向实际,同时可以为八丹沟泥石流灾害防治工作提供理论参考依据及相似地区的研究提供参考。

1 流域概况

1.1 地理位置

八丹沟地处东乡县东部,洮河左岸,科(托)-达(板)公路呈东西向横穿八丹沟的堆积区,且与沟道两

侧便道相通,小型货车可直通拱北滩村,交通较为便利。研究区坐标(沟口):东经 $103^{\circ}39'41.64''$;北纬 $35^{\circ}41'23.43''$ (图 1)。

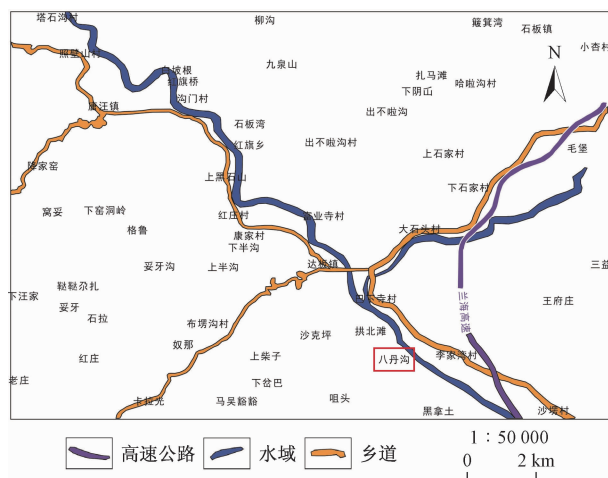


图1 研究区地理位置图

Fig. 1 Geographical location map of the study area

1.2 地层岩性

八丹沟出露的地层岩性主要有新近系泥岩,分布于沟底和沟道两侧,表面呈强风化,产状近水平。第四系上更新统马兰黄土分布广泛,主要披覆于新近系之上,厚度随地形变化较大,具湿陷性、大孔隙,垂直节理发育。在沟口一带沟道左侧出露下白垩统河口群砂砾岩,砂质胶结,层理发育不好。

1.3 地质构造

流域处于祁吕贺山字型构造和陇西旋卷构造体系的复合部位,属祁吕贺山字型构造体系前缘西翼东南端的临夏-临洮凹断束的一部分,流域内构造相对简单,主要为东部洮河西岸的黑山断裂,新构造运动明显,主要以垂直升降运动为主,形成典型的黄土沟壑地形,流域内各河谷形成多级阶地,阶地多呈基座式,且在各河谷两岸呈不对称分布,表现为震荡性及差异性抬升。流域属地震活动强烈区,流域抗震设防烈度为Ⅶ度,设计基本地震加速度值为 $0.20g$,场地特征周期为 $0.45s$ 。

1.4 气象水文

据东乡县气象局资料,年平均气温 5.6℃,最高气温 33.5℃,最低气温 -23℃,标准冻土深度 120 cm。调查区光照充足,年日照时数 2 506.7 h,年总辐射量为 139.9 kcal/cm²。

八丹沟区域多年平均降水量 539.6 mm, 24 小时最大 64.7 mm (1970 年 8 月 18 日), 1 小时最大

45 mm,降水主要集中于6月至9月,占全年降水总量的70.4%,多年平均蒸发量为1 421.2 mm,是年均降水量的2.6倍(图2)。降水多以暴雨和连阴雨的形式出现,年均暴雨天数2.9 d,最长连续降雨天数15 d。

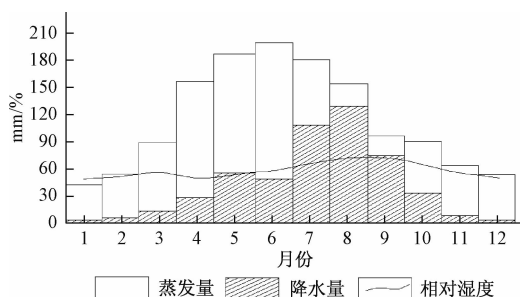


图2 东乡县气象站气象要素图

Fig.2 meteorological elements map at Dongxiang County weather station

1.5 流域特征

八丹沟地处东乡县东部,洮河左岸,发源于岔巴村南侧山体的沟脑处,沟谷总体呈东西向展布,地势西高东低,流域面积13.14 km²。流域最高高程约2 300 m,最低高程约1 770 m,相对高差560 m,主沟道总长5.8 km,沟床平均总坡降比约88‰。流域内沟谷发育,主要发育3条大的支沟,呈“树枝状”分布,支沟沟长均达2.0 km(图3),坡面发育规模不等的冲沟,断面多呈典型“V”字型,冲沟切割密度4.0 km/km²,切割深度为5~15 m不等。沟坡两侧坡度上缓下陡,坡度25°~60°,沟坡脚局部近直立,在主沟和支沟的上游,沟道两侧的坡体坡度达到40°以上。

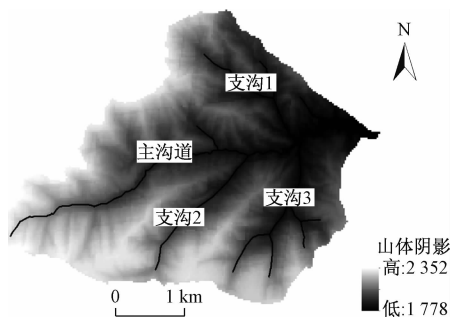


图3 八丹沟山体阴影

Fig.3 Hill shade of Badan Gully

2 层次分析法(AHP)

层次分析法,简称AHP,是20世纪90年代由美国运筹学家萨蒂提出的一种定性定量相结合、系统化、

层次化的分析方法。AHP首先将目标划分为若干层次,对每一层次中的因子进行两两对比,得到任意两个因子的相对比较值,进而构建每个层次下的判断矩阵。计算各层次判断矩阵的最大特征值和对应的特征向量,通过对判断矩阵的一致性检验结果,检验判断矩阵的元素取值的合理性,最后经归一化处理得到判断矩阵中各个因子相对于它所对应的层次中所有因子的权重值。

2.1 构造判断矩阵

利用AHP分析时,对同一层次的指标,通过两两比较的方式,建立判断矩阵,层次 W 包含了事件 $W_1, W_2, \dots, W_n$ 。判断矩阵的表达式为:

$$W = [W_1, W_2, W_i, W_n] \quad (1)$$

$$W_i = [W_{i1}, W_{i2}, \dots, W_{ij}, \dots, W_{in}] \quad (2)$$

其中, W_{ij} 是因素 W_i 对于 W_j 的相对重要程度,通常用自然数1~9及其倒数来表示,数值越大,表明 W_i 相对 W_j 的重要程度越高,判断矩阵的标度及其含义见表1。

表1 判断矩阵标度及其含义

Table 1 Judgment matrix scale and its meaning

标度	含义
1	两个因子相比较,两者具有相同的重要性
3	两个因子进行比较,前者比后者略微重要
5	两个因子进行比较,前者比后者较为重要
7	两个因子进行比较,前者比后者非常重要
9	两个因子进行比较,前者比后者极其重要
2,4,6,8	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

2.2 求特征向量和及对应的特征根

根据构建的判断矩阵,求其特征向量和特征根,将判断矩阵归一化处理:

$$\overline{W}_{ij} = \frac{W_{ij}}{\sum_{k=1}^m W_{ik}} \quad (i, j = 1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

将归一化的判断矩阵按行相加得到 $\overline{U}_i$:

$$\overline{U}_i = \sum_{j=1}^m \overline{W}_{ij} \quad (i, j = 1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

计算判断矩阵的最大特征根 $\lambda_{\max}$:

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{\sum_{i=1}^m \overline{W}_{ij} U_j}{U_j} \quad (5)$$

2.3 一致性检验

对构造好的判断矩阵进行一致性检验。一致性指标:

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad (6)$$

式中: λ ——正互反矩阵的最大特征值, $\lambda > n$ 。

随机性指标 RI 如表 2 所示。

表 2 随机性指标 RI
Table 2 Randomness index RI

n	1	2	3	4	5	6	7	8
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41

定义一致性比率:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (7)$$

通常认为, $CR < 0.1$ 时通过一致性检验。

3 模糊数学综合评价

3.1 理论原理

模糊数学综合评价的原理,即两个论域 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ (u 为评价因子), $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ (v_j 为评价等级)^[14]。

对 U 中的各个因子做单因子评价 $f(u_i)$, 则隶属函数 f 可以看做 $U \rightarrow V$ 的模糊映射, 得出

$$R = (r_{ij})_{n \times m} \quad (8)$$

式中: r_{ij} ——因子集中各因子对应评价中 V 中的隶属度。

所谓综合评判, 可用 $B = A \times R$ 模式进行描述, B 为 $r \times n$ 阶的行列矩阵为评价矩阵, A 为权重集, 是因素 U 中的一个模糊子集的向量表示, 为一个 $r \times m$ 阶行矩阵。

$B = \{b_1, b_2, \dots, b_m\}$, n 为评价级别, m 为参评因子总数, b_i 表示被评价事物所对应的评价等级, 根据最大隶属性原则, $\max \{b_i\}$ 所对应的评价等级即为最终评价结果。

3.2 建立评价因子集 U 和评价集 V

根据上述评价因子的选取, 可以看出影像泥石流风险度的因子比较多, 类型不同, 所以建立二级模糊综合评价模型, 用地形地貌、地质条件、外部条件因子构成 3 个一级因子集:

$$\begin{aligned} A &= \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\} \\ B &= \{u_6, u_7, u_8, u_9\} \\ C &= \{u_{10}, u_{11}\} \end{aligned} \quad (9)$$

式中: A ——地形地貌因子;

B ——地质条件因子;

C ——外部条件因子。

三个一级因子集构成二级因子集:

$$M = \{A, B, C\} \quad (10)$$

根据泥石流地质灾害分级标准, 将八丹沟泥石流的易发程度确定分为 4 个等级: 不易发、低危险、中易发、高易发。

$V = \{\text{不易发(I)}, \text{低易发(II)}, \text{中易发(III)}, \text{高易发(IV)}\}$ 分级评价标准见表 3。

3.3 隶属函数的确定

模糊数学综合评判的关键在于因子隶属度的描述, 隶属度可以通过隶属函数来确定, 确定隶属函数的方法有很多, 诸如三分法、德尔菲法及模糊统计法等, 本文在阅读大量文献的基础上, 确定使用“梯形分布”函数来确定各因子的隶属度:

$$R_1 = \begin{cases} 1, & x < s_1; \\ \frac{3s_1 + s_2 - 4x}{s_2 - s_1}, & s_1 \leq x \leq \frac{3s_1 + s_2}{4}; \\ 0, & x > \frac{3s_1 + s_2}{4} \end{cases} \quad (11)$$

$$R_2 = \begin{cases} 0, & x < s_1, x > \frac{3s_2 + s_3}{4}; \\ \frac{4x - 4s_1}{s_2 - s_1}, & s_1 \leq x \leq \frac{3s_1 + s_2}{4}; \\ 1, & \frac{3s_1 + s_2}{4} \leq x \leq \frac{s_1 + 3s_2}{4}; \\ \frac{3s_2 + s_3 - 4x}{s_2 - s_1}, & \frac{s_1 + 3s_2}{4} < x \leq \frac{3s_2 + s_3}{4} \end{cases} \quad (12)$$

$$R_3 = \begin{cases} 0, & x < \frac{s_1 + 3s_2}{4}, x > s_3; \\ \frac{4x - s_1 - 3s_2}{s_3 - s_1}, & \frac{s_1 + 3s_2}{4} \leq x < \frac{3s_2 + s_3}{4}; \\ 1, & \frac{3s_2 + s_3}{4} \leq x \leq \frac{s_2 + 3s_3}{4}; \\ \frac{4s_3 - 4x}{s_3 - s_2}, & \frac{s_2 + 3s_3}{4} < x \leq s_3 \end{cases} \quad (13)$$

$$R_4 = \begin{cases} 0, & x < \frac{s_2 + 3s_3}{4}; \\ \frac{4x - s_2 - 3s_3}{s_3 - s_2}, & \frac{3s_3 + s_2}{4} \leq x \leq s_3; \\ 1, & x > s_3 \end{cases} \quad (14)$$

式中: x ——评价因子的实测值与计算值;

s_1, s_2, s_3 ——表 1 中的各因子分界值;

R_1, R_2, R_3 及 R_4 ——因子对应个评价等级的隶

属度。

表 3 易发性评价因子分级表

Table 3 Grading of evaluation factor of susceptibility

级别	一次最大冲 出量/ 10^4 m^3	流域面积/ km^2	主沟长度/ km	流域相对 高差/ km	主沟纵 坡降/%	松散固体物质 储量/ 10^4 m^3	24h 最大 降雨量/ mm	植被覆 盖率/%	沟道堵塞 程度	人类工程 活动	下游沟槽横 断面形态
I	≤ 1	≤ 0.5	≤ 1	≤ 0.2	≤ 5	≤ 10	≤ 25	≤ 50	无	弱	平坦型
II	1 ~ 10	0.5 ~ 10	1 ~ 5	0.2 ~ 0.5	5 ~ 15	10 ~ 100	25 ~ 50	35 ~ 50	轻微	中等	复式断面
III	10 ~ 100	10 ~ 35	5 ~ 10	0.5 ~ 1	15 ~ 30	100 ~ 200	50 ~ 100	20 ~ 35	中等	强	拓宽 U 型谷
IV	≥ 100	≥ 35	≥ 10	≥ 1	≥ 30	≥ 200	≥ 100	≥ 20	严重	极强	V 型谷

表 5 方案层 B 权重分配

Table 5 Weight allocation of scheme layer B

	u_6	u_7	u_8	u_9	权重
u_6	1	1	2	2	0.317
u_7	1	1	3	3	0.389
u_8	1/2	1/3	1	2	0.172
u_9	1/2	1/3	1/2	1	0.122

表 6 方案层 C 权重分配

Table 6 Weight allocation of scheme layer c

	u_{10}	u_{11}	权重
u_{10}	1	2	0.667
u_{11}	1/2	1	0.333

表 7 准则层权重分配

Table 7 Weight allocation of criterion layer

	A	B	C	权重
A	1	2	2	0.493
B	1/2	1	2	0.311
C	1/2	1/2	1	0.196

4 八丹沟泥石流易发性评价

4.1 评价因子的选取

层次分析法评价因子的选取遵循三大原则,即发生原则、综合原则及主导性原则。本文结合八丹沟的流域特征及动力学特征,访问历史等确定了八丹沟泥石流 11 个评价因子:主沟纵坡降 u_1 ,流域面积 u_2 ,植被覆盖 u_3 ,相对高差 u_4 ,主沟长度 u_5 ,松散物储量 u_6 ,一次最大冲出量 u_7 ,不良地质现象 u_8 ,下游沟槽断面形态 u_9 ,24 h 最大降雨 u_{10} ,人类工程活动 u_{11} 。将目标层进行层次分级(图 4)。

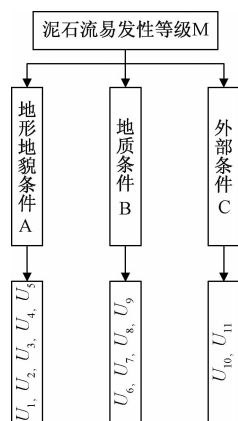


图 4 泥石流易发因子层次分级图

ig. 4 Level hierarchy of debris flow prone factors

4.2 权重的确定

按照层次分析法确定各方案层中各个因子的权重值(表 4、表 5、表 6、表 7)。

表 4 方案层 A 权重分配

Table 4 Weight allocation of scheme layer A

	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	权重
u_1	1	2	3	2	3	0.370
u_2	1/2	1	2	1	2	0.206
u_3	1/3	1/2	1	1/2	1	0.109
u_4	1/2	1	2	1	2	0.206
u_5	1/3	1/2	1	1/2	1	0.109

通过上述 4 个表格可以得到的八丹沟泥石流 11 个评级因子的总体权重, $W = [0.181, 0.102, 0.054, 0.102, 0.054, 0.098, 0.121, 0.054, 0.038, 0.131, 0.065]$ 。

4.3 一致性检验

根据公式 5 求得可以求得判断矩阵 A 的 $\lambda_{\max}$, 判断矩阵 A 为 5×5 阶的行列矩阵, 所以 $n = 5$, 根据公式 6、7 可以求解 CI 和 CR, 经计算可得 $CI = 0.0033$, $CR = 0.0029$, 随机一致性比率 $CR < 0.1$ 说明判断矩阵 A 具有一致性, 不需要调整判断矩阵的元素取值, 经归一化处理后得到判断矩阵 A 的 $W = [0.370, 0.206, 0.109, 0.206, 0.109]$ 。依次对应各个因子相对于它所对应的层次中所有因子的权重值。同理按照此方法对其他判断矩阵进行一致性检验, 检验各个判断矩阵的一致性, 检验结果如表 8, 结果显示各个判断矩阵均不需要调整判断矩阵的元素取值, 上述所得的权重值合理。

表8 各判断矩阵一致性检验结果

Table 8 Consistency test results of each judgment matrix

	A	B	C	M
$\lambda_{\max}$	5.013 3	4.081 3	2	3.053 6
CI	0.003 3	0.027 1	0	0.026 8
CR	0.002 9	0.030 1	0	0.046 2

4.4 模糊矩阵建立

对各个因子 u_i 进行单因子评价,依据上述的“梯形分布”函数来确定各因子相对于评价级的隶属度,通过计算得到各个因子集的模糊矩阵 R 。下面以泥石流爆发频率为 100 年为例列举各个判断矩阵。

$$R_A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.361 & 0.639 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0.325 & 0.675 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.8 & 0 \end{pmatrix}$$

$$R_B = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0.593 & 0.407 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$R_C = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0.705 & 0.295 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

4.5 易发性评价

根据所求的模糊矩阵和各因子的权重,计算各准则层的模糊评价。

$$B_A = W_A \times R_A = (0.370 \quad 0.206 \quad 0.109 \quad 0.206 \quad 0.109)$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.361 & 0.639 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0.325 & 0.675 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.8 & 0 \end{pmatrix} = (0 \quad 0.533 \quad 1 \quad 0.466 \quad 9 \quad 0)$$

$$B_B = W_B \times R_B$$

$$= (0.317 \quad 0.389 \quad 0.172 \quad 0.122) \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0.593 & 0.407 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$= (0.230 \quad 7 \quad 0.158 \quad 3 \quad 0.294 \quad 0 \quad 0.317)$$

$$B_C = W_C \times R_C$$

$$= (0.667 \quad 0.333) \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0.705 & 0.295 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$= (0 \quad 0 \quad 0.470 \quad 2 \quad 0.529 \quad 8)$$

目标层等模糊综合评价:

$$B = W \times R = (0.493 \quad 0.311 \quad 0.196)$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0.533 \quad 1 & 0.466 \quad 9 & 0 \\ 0.230 \quad 7 & 0.158 \quad 3 & 0.294 \quad 0 & 0.317 \\ 0 & 0 & 0.470 \quad 2 & 0.529 \quad 8 \end{pmatrix}$$

$$= (0.072 \quad 0.312 \quad 0.414 \quad 0.202)$$

根据最大隶属度原则,评价结果中的最大值为 0.414,其所对应的评价级别为中易发(Ⅲ)。因此,八丹沟泥石流爆发频率为 100 年易发性综合评价等级为中易发。同理可以得出爆发频率为 20 年、50 年的评价结果,经计算爆发频率为 20 年、50 年的评价结果中的最大值均为 0.452,评价等级为中易发。

5 结论

(1) 本文在详细分析八丹沟流域特征和动力学特征的基础上,选取了 11 个评价因子作为八丹沟泥石流易发性评价的指标,利用层次分析法获取各个指标的权重,结果为 $W = [0.181, 0.102, 0.054, 0.102, 0.054, 0.098, 0.121, 0.054, 0.038, 0.131, 0.065]$ 。

(2) 通过构建模糊综合评价模型,合理的评价了八丹沟泥石流爆发频率为 20 年、50 年、100 年的易发性,评价结果为中等易发。该评价模型选取的指标全面,考虑各个因子之间的模糊关系,使得评价结果更加全面真实。该结果可以为八丹沟泥石流灾害防治工作提供参考,建议加强防范并采取合理的防治措施以保证当地的居民财产安全。

参考文献:

- [1] 陈宁生,等. 泥石流勘查技术[M]. 北京:科学出版社,2011:2-4. [CHEN N S, et al. Investigation technology for debris flow [M]. Beijing: Science Press, 2011:2-4. (in Chinese)]
- [2] 余斌,唐川,等. 泥石流动力特性与活动规律研究[M]. 北京:科学出版社,2016. [YU B, TANG C, et al. Dynamic characteristics and activity law of debris flow [M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)]
- [3] 麦华山,徐林荣,匡乐红. 基于超熵理论的泥石流危险性模糊综合评判[J]. 地质灾害与环境保护, 2007,47(4):62-66. [MAI H S, XU LR, KUANG Y H. Fuzzy comprehensive evaluation of debris flow hazard based on super entropy theory[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2014,47(3):177-184. (in Chinese)]
- [4] 陈伟,任光明,左三胜. 泥石流危险度的模糊综合评判[J]. 水土保持研究,2006,13(2):138-140. [CHEN W, REN G M, ZUO S S. Fuzzy

- comprehensive evaluation method to judge dangerous degree of debris flow [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13 (2): 138 - 140. (in Chinese)]
- [5] 孙广仁,毕海良. 模糊数学综合评判法在泥石流沟判别与危险度评价中的应用[J]. 青海环境, 1997 (2): 72 - 77. [SUN G R, BI H L. Application of fuzzy mathematics comprehensive evaluation method in determining and risk assessment of debris flow ditch [J]. Journal of Qinghai Environment, 1997 (2): 72 - 77. (in Chinese)]
- [6] 朱静. 泥石流沟判别与危险度评价研究[J]. 干旱区地理, 1995, 18 (3): 63 - 71. [ZHU J. Study on discrimination and risk assessment of debris flow ditch [J]. Dry Area Geography, 1995, 18 (3): 63 - 71. (in Chinese)]
- [7] 铁永波,唐川. 层次分析法在单沟泥石流危险度评价中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17 (4): 79 - 84. [TIE Y B, TANG C. Application of analytic hierarchy process in risk assessment of single gutter debris flow [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2006, 17 (4): 79 - 84. (in Chinese)]
- [8] 岳天祥,艾南山,张英保. 论流域系统稳定性的判别指标[J]. 水土保持学报, 1989, 3 (2): 20 - 28. [YUE T X, AI N S, ZHANG Y B. Discrimination index of stability of river basin system [J]. Research of Soil and Water Conservation, 1989, 3 (2): 20 - 28. (in Chinese)]
- [9] 于秀治,韦京莲. 灰色系统理论在北京山区泥石流危险度评价预测中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004 (1): 121 - 123. [YU X Z, WEI J L. Application of grey system theory in risk assessment and prediction of debris flow in Beijing Mountain Area [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004 (1): 121 - 123. (in Chinese)]
- [10] 刘艳,康仲远,赵汉章,等. 我国城市减灾管理综合指标体系的研究[J]. 自然灾害学报, 1999, 8 (2): 61 - 66. [LIU Y, KANG Z Y, ZHAO H Z, et al. Research on the comprehensive index system of urban disaster reduction management in China [J]. Journal of Natural Disasters, 1999, 8 (2): 61 - 66. (in Chinese)]
- [11] 安玉华,王清,张晨,等. 基于突变模型的泥石流危险度评价[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42 (1): 355 - 372. [AN Y H, WANG Q, ZHANG C, et al. Debris flow risk assessment based on catastrophe model [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition) 2012, 42 (1): 355 - 372. (in Chinese)]
- [12] 李新坡,莫闻多. 应用 GIS 和神经网络方法进行泥石流危险度评价的研究-以云南省为例[J]. 水土保持研究, 2005, 12 (4): 7 - 9. [LI X B, MO W D. Study on risk assessment of debris flow using GIS and neural network method: a case study of Yunnan Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2005, 12 (4): 7 - 9. (in Chinese)]
- [13] 匡乐红,刘宝琛. 基于模糊可拓方法的泥石流危险度区划研究[J]. 灾害学, 2006, 21 (1): 68 - 72. [KUANG Y H, LIU B C. Research on debris flow risk zoning based on fuzzy extension method [J]. Disaster Science, 2006, 21 (1): 68 - 72. (in Chinese)]
- [14] 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 (2): 171 - 175. [SHEN J, RAO J, FU X D. Debris flow risk assessment based on fuzzy comprehensive evaluation method [J]. Disaster Science, 2016, 31 (2): 171 - 175. (in Chinese)]

敬告作者和读者

为适应我国科技信息化建设的需要,扩大作者、读者学术交流渠道,本刊已加入《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》及《中文科技期刊数据库》。今后,本刊将作者著作权使用费与本刊稿酬一次性付给。如果作者不同意将文章编入上述数据库,请在投稿时声明,本刊将作适当处理。谢谢!

《中国地质灾害与防治学报》编辑部