

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.04.09

# 模糊综合评判法在甘肃陇南武都区石门乡 泥石流危险性评价中的应用

李晓婷<sup>1</sup>, 刘文龙<sup>2</sup>

(1. 河北地质大学勘查技术与工程学院, 河北 石家庄 050000; 2. 北京市地质工程勘察院, 北京 100048)

**摘要:** 武都区石门乡地处白龙江沿岸, 泥石流灾害频发, 严重制约当地经济的可持续发展。为了定量评价泥石流灾害的危险性, 基于武都区石门乡泥石流发育特征和形成条件, 建立了包含地质条件、地形地貌、水动力条件等10个指标的泥石流危险性评价模型, 采用层次分析法对权重进行赋值, 对该地区6条泥石流沟进行了危险性模糊综合评价。结果表明: 研究对象均处于高度危险状态, 其结果与实地调查结果相符。为武都区泥石流的防灾减灾提供了可靠的理论依据。

**关键词:** 泥石流; 危险性评价; 层次分析法; 模糊综合评判法

中图分类号: P694

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2020)04-0071-06

## Application of fuzzy comprehensive evaluation method to debris flow risk evaluation in Shimen Township in Wudu District of Longnan City, Gansu Province

LI Xiaoting<sup>1</sup>, LIU Wenlong<sup>2</sup>

(1. College of Exploration Technology and Engineering, Hebei University of Geosciences, Shijiazhuang, Hebei 050000, China; 2. Beijing Institute of Geological Engineering Survey, Beijing 100048, China)

**Abstract:** Shimen Township, Wudu District is located along the Bailong River, with frequent debris flow disasters, which seriously restricts the sustainable development of the local economy. In order to quantitatively evaluate the risk of debris flow disasters, based on the development characteristics and formation conditions of debris flow in Shimen Township, a debris flow risk evaluation model including 10 indicators including geological conditions, topography, geodynamics and hydrodynamic conditions was established. The weights were assigned, and the comprehensive evaluation of the dangerousness of 6 debris flow ditches in the area was carried out. The result shows that the research subjects are in a highly dangerous state, which is consistent with the result of field investigations. It provides a reliable theoretical basis for disaster prevention and mitigation of debris flow in Wudu District.

**Keywords:** debris flow; risk assessment; analytic hierarchy process; fuzzy comprehensive evaluation

### 0 引言

泥石流是山区常见的一种自然地质灾害, 其发生对山区的生态环境和经济建设有着重大影响。武都区

石门乡江南片的盐土沟、庙沟、草坝子西沟、闸子沟、下东沟和洪水沟泥石流流域内松散固体物质丰富, 流域面积适中, 沟深坡陡。持续强降雨有利雨水迅速汇聚, 汇集以后水势凶猛, 边流动边携带流域内的松散物质,

收稿日期: 2019-11-18; 修订日期: 2020-01-08

第一作者: 李晓婷(1994-), 女, 辽宁盖州人, 地质工程专业, 硕士, 主要从事工程地质等方面的研究工作。E-mail: 1205572682@qq.com

从而形成泥石流。泥石流对石门乡小山坪村、草坝子村、旱地村、枣川村、庙上村和枣川小学的生命财产安全构成极大威胁。因此,武都区石门乡泥石流的危险性评价对该地区的防灾减灾具有重要意义。刘丽等<sup>[1]</sup>基于云南昭通滑坡、泥石流沟泥石流灾害危险度模糊综合评价结果,完成了昭通滑坡、泥石流灾害危险度分区。张汉雄<sup>[2]</sup>进行了人为泥石流灾害严重等级的定量模糊综合评判。魏永明等<sup>[3]</sup>运用关联度分析法和模糊综合评判法对北京市北部山区重点泥石流沟进行了危险度划分。刘加龙等<sup>[4]</sup>采取了基于模糊模式识别理论的模糊综合评判法,对贵州省毕节区域泥石流灾度进行了评价。王学武等<sup>[5]</sup>应用多级模糊综合评判方法对西南某拟建水电站坝址邻近泥石流沟危险性做出了评价。刘涛等<sup>[6]</sup>运用层次分析法对密云县泥石流危险度进行评价。陈明等<sup>[7]</sup>以单沟泥石流沟为研究对象,应用云模型对模糊综合评价进行改善。但取得的成果不足之处在于各地泥石流发生的地形地貌、松散物来源和水源条件等存在很大的差异,因此,本文综合专家指导和对武都区石门乡泥石流概况的具体分析,合理的从当地泥石流的地质条件、地形地貌条件、水动力条件中选取10个指标建立泥石流危险度的评价模型,并通过多层次评价来了解泥石流发生的可能性。

## 1 研究区概况

### 1.1 泥石流沟发育分布、灾害史与威胁对象

武都区石门乡江南片的盐土沟、庙沟、草坝子西沟、闸子沟、下东沟和洪水沟各泥石流流域面积0.16~2.52 km<sup>2</sup>,主沟道长790~2600 m,沟道呈上陡下缓的折线形,平均比降150‰~230‰,主沟道及支沟断面呈“V”字型,除洪水沟沟内有常流水外,其余沟谷均为季节性洪流,江南片各泥石流沟相对分布位置详见图1。以上沟谷以前均有发生泥石流的历史记录,部分沟道也曾发生过多处崩塌、滑坡等地质灾害,造成了人员伤亡和财产损失。武都区石门乡江南片的盐土沟、庙沟、草坝子西沟、闸子沟、下东沟和洪水沟泥石流共计威胁人数约3290人,威胁财产约15160万元。

### 1.2 自然地理与气候条件

盐土沟、庙沟、草坝子西沟、闸子沟、下东沟和洪水沟泥石流均位于武都区石门乡白龙江右岸,7条沟沟口相距较近,沿白龙江呈带状分布。武都区受地域构造支配的山体总体走向为东西向,总地势为西北高,东

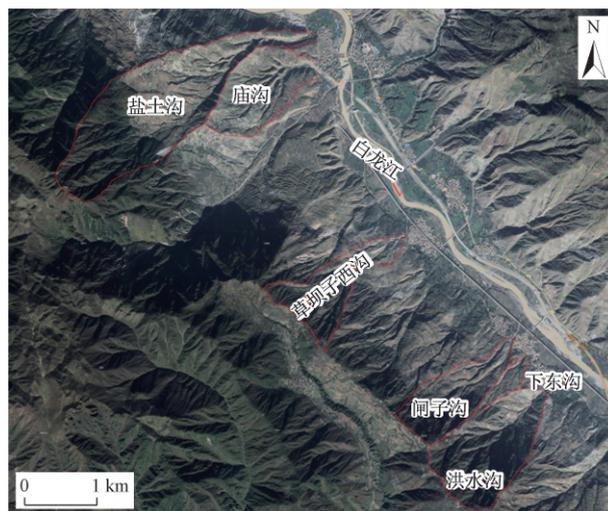


图1 武都区石门乡江南片泥石流沟相对位置平面分布图  
Fig.1 Relative location of debris flow gully in Jiangnan area, Shimimen Township, Wudu District, Longnan City

南低。总的地形特点是沟谷发育、切割强烈、地表起伏大、山势陡峭、相对高差大(1000~1500 m),坡度大。据调查区附近气象站、哨监测资料,武都区多年平均降水量487.2 mm,其中5~9月降水量占全年降水总量的75%~85%。24小时最大降水量为90.5 mm,1h最大降水量40 mm,10min最大降水量16.2 mm。

## 2 多层次泥石流灾害危险度综合评价原理

### 2.1 系统层次结构的建立

武都区石门乡泥石流灾害的致灾因子较多,各个因素的综合作用对泥石流的影响是复杂的。根据该地区的自然地理及地质环境概况和泥石流的形成条件、发育特征等因素,在对野外实际调查数据的基础上,选取沿沟松散物储量 $u_1$ 、不良地质现象 $u_2$ 、沟口泥石流堆积活动程度 $u_3$ 、河沟堵塞程度 $u_4$ 、产砂区沟槽横断面 $u_5$ 、河沟纵坡 $u_6$ 、流域面积 $u_7$ 、流域植被覆盖率 $u_8$ 、沟岸山坡坡度 $u_9$ 、河沟近期一次变幅 $u_{10}$ 这10项因素作为评价因子,建立武都区石门乡泥石流危险性评价因素层次结构模型(图2)。

#### 2.1.1 判断矩阵的构建及权重的确定

本文引用A. L. Satty教授建议的1~9的整数及其倒数的标度方法<sup>[8-10]</sup>。根据1~9标度法,按两两比较的结果构造判断矩阵。求判断矩阵的最大特征值及其对应的特征向量,再对特征向量进行归一化后记 $W$ (权重)。

可得出上述方案层各影响因素的权重值(表1~表3)。

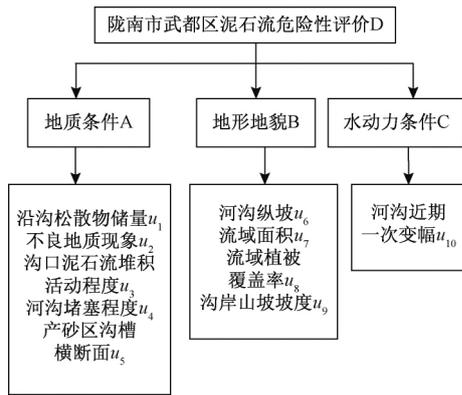


图 2 评价因素层次结构模型图

Fig.2 Evaluation factor hierarchy model

表 1 准则层 D 的权重

Table 1 Weight of criterion layer D

| D | A   | B   | C | 权重    |
|---|-----|-----|---|-------|
| A | 1   | 1/2 | 2 | 0.311 |
| B | 2   | 1   | 2 | 0.493 |
| C | 1/2 | 1/2 | 1 | 0.196 |

表 2 方案层 A 的权重

Table 2 Weight of scheme layer A

| A     | $u_1$ | $u_2$ | $u_3$ | $u_4$ | $u_5$ | 权重    |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $u_1$ | 1     | 3     | 2     | 2     | 1/2   | 0.254 |
| $u_2$ | 1/3   | 1     | 1/3   | 1/3   | 1/3   | 0.074 |
| $u_3$ | 1/2   | 3     | 1     | 2     | 1/2   | 0.192 |
| $u_4$ | 1/2   | 3     | 1/2   | 1     | 1/2   | 0.146 |
| $u_5$ | 2     | 3     | 2     | 2     | 1     | 0.334 |

表 3 方案层 B 的权重

Table 3 Weight of scheme layer B

| B     | $u_6$ | $u_7$ | $u_8$ | $u_9$ | 权重    |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $u_6$ | 1     | 1/3   | 1/3   | 1/2   | 0.107 |
| $u_7$ | 3     | 1     | 2     | 2     | 0.415 |
| $u_8$ | 3     | 1/2   | 1     | 2     | 0.293 |
| $u_9$ | 2     | 1/2   | 1/2   | 1     | 0.185 |

2.1.2 判断矩阵的一致性检验

为了衡量矩阵两两不相容所造成的  $y_{Max}$  和  $W$  的误差, 则需构建一个一致性指标  $CI$ , 再查找相应的平均随机一致性指标  $RI$ <sup>[11-12]</sup>。计算一致性比例  $CR = CI/RI$ 。当  $CR < 0.1$  时, 认为判断矩阵满足一致性要求。否则应该对判断矩阵做适应修改。

经过计算检验各矩阵的一致性均可接受。

2.2 模糊综合评判模型

按照泥石流危险度程度大小可将其划分为 4 个等级: 无危险、轻度危险、中度危险、高度危险, 建立泥石流的危险度评价集, 即  $V = (V_1, V_2, V_3, V_4) = (\text{无危险},$

轻度危险, 中度危险, 高度危险)。建立泥石流危险指标等级及赋值表(表 4)。

表 4 泥石流危险指标等级及其赋值表

Table 4 Debris flow risk factor level and its assignment table

| 影响因素                                                             | 无危险 ( $V_1$ ) | 轻度危险 ( $V_2$ ) | 中度危险 ( $V_3$ ) | 高度危险 ( $V_4$ ) |
|------------------------------------------------------------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| 沿沟松散物储量 $u_1 / ( \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2} )$ | <1            | 1 ~ 5          | 5 ~ 10         | >10            |
| 不良地质现象 $u_2$                                                     | 无             | 轻微             | 中等             | 严重             |
| 沟口泥石流堆积活动程度 $u_3$                                                | 弱             | 中等             | 强              | 极强             |
| 河沟堵塞程度 $u_4$                                                     | 无             | 轻微             | 中等             | 严重             |
| 产砂区沟槽横断面 $u_5$                                                   | 平坦型           | 复式断面           | 宽 U 型谷         | V 型、U 型、谷中谷    |
| 河沟纵坡 $u_6 / (^\circ)$                                            | <3            | 3 ~ 6          | 6 ~ 12         | >12            |
| 流域面积 $u_7 / \text{km}^2$                                         | >100          | 10 ~ 100       | 5 ~ 10         | 0.2 ~ 5        |
| 流域植被覆盖率 $u_8 / \%$                                               | >60           | 30 ~ 60        | 10 ~ 30        | <10            |
| 沟岸山坡坡度 $u_9 / (^\circ)$                                          | <15           | 25 ~ 15        | 32 ~ 25        | >32            |
| 河沟近期一次变幅 $u_{10}$                                                | 弱             | 中等             | 强              | 极强             |

以庙沟为例, 根据庙沟的评价因子实际取值(表 5), 求得评价因素  $U$  对评价集  $V$  的隶属度, 从而建立模糊关系矩阵  $R$ <sup>[13-14]</sup>。根据指标越大越优的特性, 现选定半梯形分布模型进行隶属度函数的设计, 所设计的隶属度函数如下<sup>[15-17]</sup>:

$$Y_{v1}(x_i) = \begin{cases} 1 & x_i \leq e_1 \\ \frac{e_2 - x_i}{e_2 - e_1} & e_1 < x_i \leq e_2 \\ 0 & x_i > e_2 \end{cases}$$

$$Y_{v2}(x_i) = \begin{cases} 0 & x_i \leq e_1, x_i \geq e_3 \\ \frac{x_i - e_1}{e_2 - e_1} & e_1 < x_i \leq e_2 \\ \frac{e_3 - x_i}{e_3 - e_2} & e_2 < x_i < e_3 \end{cases}$$

$$Y_{v3}(x_i) = \begin{cases} 0 & x_i \leq e_2, x_i \geq e_4 \\ \frac{x_i - e_2}{e_3 - e_1} & e_2 < x_i \leq e_3 \\ \frac{e_4 - x_i}{e_4 - e_3} & e_3 < x_i < e_4 \end{cases}$$

$$Y_{v4}(x_i) = \begin{cases} 0 & x_i \leq e_3 \\ \frac{x_i - e_3}{e_4 - e_3} & e_3 < x_i \leq e_4 \\ 1 & e_4 < x_i \end{cases}$$

式中:  $x_i$ ——各因子实际值;

$e_i$ ——评价集的上下界限。

表 5 庙沟的评价因子实际取值

Table 5 Actual value of the evaluation factor of Miaogou

| 评价因子 | $u_1 / (\times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$ | $u_2$               | $u_3$      | $u_4$            | $u_5$    |
|------|--------------------------------------------------------|---------------------|------------|------------------|----------|
| 实际取值 | 17.73                                                  | 严重                  | 强          | 轻微               | V 型      |
| 评价因子 | $u_6 / (^\circ)$                                       | $u_7 / \text{km}^2$ | $u_8 / \%$ | $u_9 / (^\circ)$ | $u_{10}$ |
| 实际取值 | 14                                                     | 1.00                | 40         | 34               | 强        |

$$R_A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0.43 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0.83 & 0.17 & 0 & 0 \\ 0 & 0.67 & 0.20 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_C = [0 \quad 0.50 \quad 0.28 \quad 0]$$

### 3 研究区泥石流灾害危险性评价

当权重向量  $W$  和模糊关系矩阵  $R$  已知时,即可对泥石流的危险性进行模糊综合评判。根据  $O = W \times R$  ( $O$  表示模糊综合评判集) (2) [18-21],可取得一级模糊综合评判:

$$W_A = (0.254 \quad 0.074 \quad 0.192 \quad 0.146 \quad 0.334)$$

$$W_B = (0.107 \quad 0.415 \quad 0.293 \quad 0.185)$$

$$W_C = 1$$

$$O_A = W_A \cdot R_A =$$

$$(0.254 \quad 0.074 \quad 0.192 \quad 0.146 \quad 0.334) \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0.43 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$(0 \quad 0.146 \quad 0.083 \quad 0.662)$$

$$O_B = W_B \cdot R_B =$$

$$(0.107 \quad 0.414 \quad 0.293 \quad 0.185) \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0.83 & 0.17 & 0 & 0 \\ 0 & 0.67 & 0.20 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$(0.345 \quad 0.267 \quad 0.059 \quad 0.292)$$

$$O_C = W_C \cdot R_C = 1 [0 \quad 0.50 \quad 0.28 \quad 0] = (0 \quad 0.50 \quad 0.28 \quad 0)$$

二级模糊综合评判:

$$O_D = W \cdot \begin{bmatrix} B_A \\ B_B \\ B_C \end{bmatrix} =$$

$$(0.311 \quad 0.493 \quad 0.196) \begin{bmatrix} 0 & 0.146 & 0.083 & 0.662 \\ 0.345 & 0.267 & 0.059 & 0.292 \\ 0 & 0.500 & 0.280 & 0 \end{bmatrix} =$$

$$(0.170 \quad 0.275 \quad 0.110 \quad 0.350)$$

经过归一化得,  $O_D = (0.187 \quad 0.304 \quad 0.122 \quad 0.387)$ 。

根据最大隶属度原则,在  $O_D$  中选择最大值,最大值对应的等级就是该条泥石流沟危险性综合评判的结果。 $O_D$  中最高值为 0.387,即高度危险。因此综合评价结果显示庙沟泥石流的危险度等级为高。

依据上述方法,分别对盐土沟、草坝子西沟、闸子沟、下东沟、洪水沟进行危险性评价(表 6 为区域内 5 条泥石流沟的评价因子实际取值)。如下:

$$O_{\text{盐土沟}} = (0.234 \quad 0.320 \quad 0.029 \quad 0.417)$$

$$O_{\text{草坝子西沟}} = (0.184 \quad 0.175 \quad 0.037 \quad 0.604)$$

$$O_{\text{闸子沟}} = (0.199 \quad 0.249 \quad 0.156 \quad 0.396)$$

$$O_{\text{下东沟}} = (0.215 \quad 0.101 \quad 0.068 \quad 0.616)$$

$$O_{\text{洪水沟}} = (0.169 \quad 0.279 \quad 0.156 \quad 0.396)$$

根据最大隶属度原则,所选的武都区石门乡 5 条泥石流沟的最后评价结果见表 7。

通过对盐土沟、草坝子西沟、闸子沟、下东沟、洪水沟的模糊综合评判结果进行对比分析,综合评判结果显示该 5 条泥石流沟均处于高度危险状态。

表 6 区域内 5 条泥石流沟的评价因子实际取值

Table 6 Actual values of 5 debris flow ditches in the study area

| 沟谷名称  | 评价因子 | $u_1 / (\times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$ | $u_2$ | $u_3$ | $u_4$ | $u_5$ | $u_6 / (^\circ)$ | $u_7 / \text{km}^2$ | $u_8 / \%$ | $u_9 / (^\circ)$ | $u_{10}$ |
|-------|------|--------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|------------------|---------------------|------------|------------------|----------|
| 盐土沟   | 实际取值 | 26.09                                                  | 严重    | 极强    | 轻微    | V 型   | 13               | 2.52                | 40         | 32               | 中等       |
| 草坝子西沟 | 实际取值 | 44.87                                                  | 中等    | 极强    | 轻微    | V 型   | 15               | 1.01                | 40         | 34               | 极强       |
| 闸子沟   | 实际取值 | 13.90                                                  | 严重    | 强     | 轻微    | V 型   | 16               | 0.87                | 50         | 36               | 强        |
| 下东沟   | 实际取值 | 6.51                                                   | 中等    | 极强    | 轻微    | V 型   | 12               | 0.17                | 50         | 34               | 极强       |
| 洪水沟   | 实际取值 | 18.81                                                  | 严重    | 强     | 轻微    | V 型   | 15               | 1.48                | 50         | 37               | 强        |

## 4 结论

使用层次分析法的模糊综合评判模型对武都区石门乡泥石流危险性进行评价,其结果与该区的实际情况具有较好的一致性。研究表明,该评价模型能较好的应用于武都区石门乡泥石流的危险性评价中,是一种具有较强的科学性和有效性的评价方法。

表7 评价结果的对比分析

Table 7 Comparative analysis of evaluation results

| 沟谷名称  | 模糊危险性 | 评价结果 |
|-------|-------|------|
| 盐土沟   | 0.417 | 高度危险 |
| 草坝子西沟 | 0.604 | 高度危险 |
| 闸子沟   | 0.396 | 高度危险 |
| 下东沟   | 0.616 | 高度危险 |
| 洪水沟   | 0.396 | 高度危险 |

## 参考文献:

- [1] 刘丽,王士革. 云南昭通滑坡泥石流危险度模糊综合评判[J]. 山地研究, 1995, 13(4): 261-266. [LIU L, WANG S G. Fuzzy comprehensive evaluation on landslide and debris flow risk degree in zaotong, Yunnan [J]. Mountain Research, 1995, 13(4): 261-266. (in Chinese) ]
- [2] 张汉雄. 人为泥石流灾害严重等级的定量模糊综合评判[J]. 自然灾害学报, 1996, 5(3): 60-70. [ZHANG H X. A fuzzy comprehensive judgement on the serious degree of artificial debris flow disaster [J]. Journal of Natural Disasters, 1996, 5(3): 60-70. (in Chinese) ]
- [3] 魏永明,谢又予,伍永秋. 关联度分析法和模糊综合评判法在泥石流沟谷危险度划分中的应用——以北京市北部山区怀柔、密云两县为例[J]. 自然灾害学报, 1998, 7(2): 112-120. [WEI Y M, XIE Y Y, WU Y Q. Applications of relativity analysis method and fuzzy synthetical assessment method in classification of dangerous degree of debris flow [J]. Journal of Natural Disasters, 1998, 7(2): 112-120. (in Chinese) ]
- [4] 刘加龙,吕希奎,刘贵应. 模糊综合评判法在泥石流灾度评价中的应用[J]. 地质科技情报, 2001, 20(4): 86-88. [LIU J L, LYU X K, LIU G Y. Fuzzy comprehensive evaluation method to evaluate debris-flow hazard degree [J]. Geological Science and Technology Information, 2001, 20(4): 86-88. (in Chinese) ]
- [5] 王学武,石豫川,黄润秋,等. 多级模糊综合评判方法在泥石流评价中的应用[J]. 灾害学, 2004, 19(2): 1-6. [WANG X W, SHI Y C, HUANG R Q, et al. Application of multi-layer fuzzy comprehensive evaluation method in debris flow assessment [J]. Journal of Catastrophology, 2004, 19(2): 1-6. (in Chinese) ]
- [6] 刘涛,张洪江,吴敬东,等. 层次分析法在泥石流危险度评价中的应用——以北京市密云县为例[J]. 水土保持通报, 2008, 28(5): 6-10. [LIU T, ZHANG H J, WU J D, et al. Application of analytic hierarchy process in debris flow risk degree assessment—A case study of Miyun County, Beijing City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, 28(5): 6-10. (in Chinese) ]
- [7] 陈明,王运生,梁瑞锋,等. 基于云模型的单沟泥石流危险性模糊综合评价[J]. 人民长江, 2018, 49(10): 66-71. [CHEN M, WANG Y S, LIANG R F, et al. Fuzzy comprehensive evaluation for hazard of single-gully debris flow based on cloud model [J]. Yangtze River, 2018, 49(10): 66-71. (in Chinese) ]
- [8] 梁波,吴连波. 模糊综合评判法在隧道施工灾害中的应用[C]. 2008年全国隧道监控量测与反分析专题研讨会论文集, 2008: 14-21. [LIANG B, WU L B. Application of fuzzy comprehensive evaluation method in tunnel construction disasters [C]. Proceedings of 2008 National Symposium on Tunnel Monitoring Measurement and Anti-Analysis, 2008: 14-21. (in Chinese) ]
- [9] 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. [XU S B. Principles of analytic hierarchy [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1988. (in Chinese) ]
- [10] 肖盛燮,王平义,吕恩琳. 模糊数学在土木与水利工程中的应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004. [XIAO S X, WANG P Y, LYU E L. Application of fuzzy mathematics in civil engineering and hydraulic engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese) ]
- [11] 王莲芬,许树柏. 层次分析法引论[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1990. [WANG L F, XU S B. Introduction to analytic hierarchy [M]. Beijing: China Renmin University Press, 1990. (in Chinese) ]
- [12] 贾磊,李源,章岩. 隧道突水突泥灾害的模糊预测和控制措施[J]. 灾害学, 2014, 29(2): 69-71. [JIA L, LI Y, ZHANG Y. Fuzzy-prediction and control measures for water bursting and mud surging of

- tunnel [J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29 (2): 69-71. (in Chinese) ]
- [13] 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, 7(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, 7(2): 72-77. (in Chinese) ]
- [14] 王春磊,吴云刚,隗锦涛. 模糊综合评判法在泥石流危险度评价中的应用 [J]. 安全与环境工程, 2010, 17(3): 14-16. [WANG C L, WU Y G, YU J T. Fuzzy comprehensive evaluation for risk assessment on debris flow [J]. Safety and Environmental Engineering, 2010, 17(3): 14-16. (in Chinese) ]
- [15] 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. [WANG J H, JIN H L, NI T X, et al. The application of fuzzy comprehensive evaluation model based on analytic hierarchy process in risk assessment of debris flow gully in Kangle County [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2017, 28(3): 52-57. (in Chinese) ]
- [16] 杨涛,唐川,朱金勇,等. 四川省汶川县绵虬镇小流域泥石流危险性评价 [J]. 长江科学院院报, 2018, 35(10): 82-87. [YANG T, TANG C, ZHU J Y, et al. Hazard assessment of debris flow in small watershed of Miansi Town, Wenchuan, Sichuan Province [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(10): 82-87. (in Chinese) ]
- [17] 杨艳,张绪教,叶培盛,等. 基于模糊数学法评价滇西保山地区麻柳河泥石流沟的危险性 [J]. 地质通报, 2012, 31(增刊1): 351-355. [YANG Y, ZHANG X J, YE P S, et al. Fuzzy comprehensive evaluation for risk assessment of the Malanghe debris flow gully in Baoshan area, western Yunnan Province [J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(Sup1): 351-355. (in Chinese) ]
- [18] 王学良,李建一. 基于层次分析法的泥石流危险性评价体系研究 [J]. 中国矿业, 2011, 20(10): 113-117. [WANG X L, LI J Y. Study on indexes system for assessing debris flow risk based on AHP [J]. China Mining Magazine, 2011, 20(10): 113-117. (in Chinese) ]
- [19] 尚慧,王明轩,罗东海,等. 基于函数赋值模型与模糊综合评判法的单沟泥石流危险性评价 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(1): 61-69. [SHANG H, WANG M X, LUO D H, et al. Single gully debris flow hazard assessment based on function assignment model and fuzzy comprehensive evaluation method [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(1): 61-69. (in Chinese) ]
- [20] 于志凡,邓英尔,赵甫. 日地沟泥石流危险性的模糊数学法评价 [J]. 路基工程, 2016(1): 44-49. [YU Z F, DENG Y E, ZHAO F. Evaluation on fuzzy mathematics method for analyzing risk of ridigou debris flow [J]. Subgrade Engineering, 2016(1): 44-49. (in Chinese) ]
- [21] 方志华,许万忠. 基于模糊综合评判法的沟谷泥石流易发性研究 [J]. 价值工程, 2014, 33(24): 89-90. [FANG Z H, XU W Z. Study on susceptibility of vally debris flow based on the multi-level fuzzy comprehensive evaluation method of fuzzy comprehensive evaluation [J]. Value Engineering, 2014, 33(24): 89-90. (in Chinese) ]