

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2017.03.08

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

王俊豪¹, 金华丽², 倪天翔¹, 管建军³, 徐维迎¹

(1. 中国地质环境监测院, 北京 100081; 2. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083;
3. 河南理工大学测绘与国土信息工程学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 康乐县地处甘肃东南部, 位于洮河流域下游, 为黄土高原向青藏高原的过渡地带, 是我国泥石流灾害最为严重的地区之一。本文以康乐县境内的 20 条典型泥石流沟为例, 选定 10 个主要影响因子作为泥石流危险度评价的指标, 依据层次分析法确定各因子的权重, 并利用模糊综合评判法对其做出危险性评价。研究表明处于高度危险状态的泥石流沟多达 11 条, 占到总数的 50% 以上, 建议对其进行重点监测和防治。

关键词: 泥石流; 危险度; 层次分析法; 模糊综合评判

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2017)03-0052-06

The application of fuzzy comprehensive evaluation model based on analytic hierarchy process in risk assessment of debris flow gully in Kangle County

WANG Junhao¹, JIN Huali², NI Tianxiang¹, GUAN Jianjun³, XU Weiyang¹

(1. China Institute of Geo-Environmental Monitoring, Beijing 100081, China; 2. School of Water Resources and Environment, China University of Geoscience in Beijing, Beijing 100083, China; 3. School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China)

Abstract: Kangle County is located in the southeastern part of Gansu Province, located in downstream of the Tao River Basin, which is one of the most serious areas of debris flow in the transition zone of the Loess Plateau to the Qinghai-Tibet Plateau. This paper takes 20 typical debris flow gullies in Kangle County as an example and 10 major factors are selected as indicators of debris flow risk assessment. The weight of each factor is determined according to the analytic hierarchy process and the risk assessment is made by fuzzy comprehensive evaluation method. The results show that in a highly dangerous state of debris flow up to 11, more than 50% of the total, it is recommended to focus on monitoring and prevention.

Keywords: debris flows; risk; AHP method; fuzzy comprehensive evaluation

0 前言

泥石流是我国黄土地区主要地质灾害之一。康乐

县所在的甘肃东南部作为我国泥石流灾害最严重的地区之一, 具有分布广、种类多、暴发频繁、规模大、危害重等特征。2010 年 8 月 8 日, 甘肃舟曲遭受特大山洪

收稿日期: 2017-05-23; 修订日期: 2017-06-29

基金项目: 中国地质环境监测院地质调查与地质监测项目(中地环项[2016]DD0402); I48E004007 幅地质灾害调查评价(中国地质调查局地质调查项目经费)

第一作者: 王俊豪(1987-), 男, 河南安阳人, 地质工程专业, 硕士, 主要从事灾害地质、水工环地质等方面的研究工作。E-mail: wangjh@mail.cigem.gov.cn

泥石流,灾害导致1467人遇难和298人失踪,对人民生命财产造成重大损失。泥石流灾害现已成为严重制约当地社会经济可持续发展的重要因素之一。

泥石流发育过程因受地形地貌、地层岩性、水文气象、植被和人类活动等多种因素的影响,具有多样性、复杂性、可变性和不确定性,多种因素相互作用形成了一个复杂的模糊系统^[1-4]。孙广仁等(1997)^[5]以泥石流形成的地质环境背景为基础,运用模糊数学法对西宁市东川北侧北山寺一中庄间泥石流沟进行危险程度判别。刘涛等(2008)^[6]运用层次分析法建立起密云县泥石流危险度评价模型,并取得可靠的研究结果。刘剑刚(2012)^[7]运用层次分析法对辽南泥石流灾害诱发因素进行权重分析得出触发最主要因素为暴雨。孟庆华等(2014)^[8]利用基于模糊数学的层次分析法对陕西省凤县泥石流沟进行危险度评估。马海荣等(2016)^[9]利用基于GIS软件的层次分析法对赛果高速路段泥石流进行危险性分区,并利用该研究区历史泥石流数据验证了该方法的可行性和评价结果的可靠性。在取得成果的背后仍存在一些不足:(1)评价指标的选取过多或过少,指标选取过多致使评价过程过于繁复,指标选取过少不能真实的反映泥石流灾害的危险程度。(2)泥石流危险性评价的少数指标可能存在物理意义重复的情况,无法作严格区分。因此,本文在对康乐县地质环境条件进行详细分析和专家指导的基础上合理选取松散物储量、不良地质现象、冲淤变幅、沟道堵塞程度、下游沟槽横断面形态、主沟纵坡降、流域面积、植被覆盖率、沟谷边坡坡度、人为工程活动这10项指标,利用层次分析法和模糊数学理论对康乐县多条典型泥石流沟进行危险度综合评价,为当地泥石流灾害防治工作提供理论参考依据,对当地进一步做好防灾减灾工作具有重要意义。

1 研究区概况

1.1 自然地理

康乐县位于甘肃东南部,位于洮河流域下游左侧,为黄土高原向青藏高原的过渡地带。境内山川交错、河谷相间,地势自西南向东北逐渐变缓,海拔1898~3909 m。根据地貌成因类型和形态特征可将境内地貌分为构造剥蚀中高山、构造剥蚀中山地貌、侵蚀堆积黄土丘陵及侵蚀堆积河谷平原区四种类型。境内河流均属洮河支流,南有冶木河和杨家河;中有苏家集河、胭脂河、中砥河和三岔河;北有流川河。根据甘肃省气候区划,康乐县属低温带半湿润大陆性季风气候区,总的

气候特点是冷、暖、干、湿,四季分明,冬长夏短,春秋相连。年平均气温为7℃,多年最高和最低气温分别为36.1℃(2000年7月24日)和-32.2℃(1991年11月28日)。雨季集中在每年6~9月,年平均降水量为548.4 mm,历史年最大降雨量780.4 mm(1978年),最大单次过程降雨量为135.5 mm,最大日降雨量为81.2 mm,最大小时降雨量为49.9 mm,10分钟最大降雨量为21.6 mm。年平均蒸发量较大,可达1267.1 mm,约为年平均降水量的2.4倍。

1.2 地质构造

康乐县地处黄土高原向青藏高原过渡地带,第四系地层广泛分布,前第四系出露地层主要为震旦系、二迭系、白垩系、新近系。研究区地处西秦岭褶皱带西段和祁连褶皱带东南端的交汇区,受西秦岭褶皱带的控制,构造形迹复杂。区内次级构造轮廓较为发育,主要由临夏、临洮坳陷带和三甲集—虎关隐伏隆起组成(图1)。区内新构造运动的总体特征是以振荡性上升为主,其表现形式为各河谷阶地多以基座阶地为主,基岩山区则多峡谷地貌,并可见小型的褶皱和断裂,另一特征是河谷的差异抬升降性。

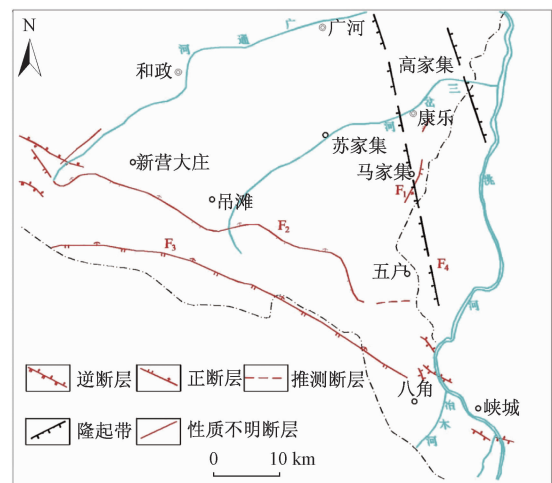


图1 区域地质构造图

Fig.1 Regional geological structure diagram

2 研究方法

2.1 层次分析法

层次分析法 (Analytical Hierarchy Process, 简称AHP法) 是一种综合评判模型方法^[15], 它通过层次化、数量化的手段, 把决策问题的相关元素分为目标、准则、方案等多个层次, 并进行定性分析和定量分析相结合的多准则分析决策方法^[10]。首先, 按照评价目标将相关评价指标构建起判断矩阵, 并建

立起上层对下层的支配关系,将同一层内的指标因素依次进行两两间的相互比较,并将其对上层指标因素的相对重要程度用自然数(1~9)及其倒数做出相应表示。按此即可建立起一个任意指标因素其下层相关指标因素相对重要性的单排序矩阵,进而得出同一层次内不同指标因素的权重。判断矩阵的标度及其含义详见表1。

表1 判断矩阵标度及其含义

Table 1 Scales and meanings of judgment matrix

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	介于上述两个相邻判断值的中间
倒数	因素 <i>i</i> 与 <i>j</i> 相比较的标度是 <i>j</i> 与 <i>i</i> 相比较的标度的倒数

2.2 模糊综合评判法

综合评判是对受多因素影响的现象或者事物进行总体的评价,在评价的过程中如果涉及到模糊因素,就称为模糊综合评价,其核心主要是利用参数之间的模糊关系代替数学假设,并在此基础之上求得解析关系。确定隶属度是进行模糊综合评价最为关键的环节之一,隶属度函数的确定方法有很多种,但没有统一的固定模式。构建隶属度函数模型通常需要一定的判定技巧,其正确性往往需要多次反馈与修改。

按照泥石流“无危险、轻度危险、中度危险、高度危险”4级评价标准及其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^[11-12],所设计的隶属度函数如下:

$$Y_{v1}(c_i) = \begin{cases} 1, c_i \leq s_1 \\ \frac{s_2 - c_i}{s_2 - s_1}, s_1 < c_i \leq s_2 \\ 0, c_i > s_2 \end{cases}$$

$$Y_{v2}(c_i) = \begin{cases} 0, c_i \leq s_1, c_i \geq s_3 \\ \frac{c_i - s_1}{s_2 - s_1}, s_1 < c_i \leq s_2 \\ \frac{s_3 - c_i}{s_3 - s_2}, s_2 < c_i < s_3 \end{cases}$$

$$Y_{v3}(c_i) = \begin{cases} 0, c_i \leq s_2, c_i \geq s_4 \\ \frac{c_i - s_2}{s_3 - s_1}, s_2 < c_i \leq s_3 \\ \frac{s_4 - c_i}{s_4 - s_3}, s_3 < c_i \leq s_4 \end{cases}$$

$$Y_{v4}(c_i) = \begin{cases} 0, c_i \leq s_3 \\ \frac{c_i - s_3}{s_4 - s_3}, s_3 < c_i \leq s_4 \\ 1, s_4 < c_i \end{cases} \quad (1)$$

式中: S_i ——评价集的上下界线;

c_i ——各因子实际值。

3 结果与分析

3.1 泥石流危险度评价指标的选取

层次分析法指标的选定主要遵循三大原则,即泥石流的发生原则、指标综合性原则和主导性原则,重点强调评价方法应有的可操作性。影响泥石流形成、发展、运动和堆积的环境影响因素是多样的,各因素的综合作用对泥石流产生的影响又都是积极的。根据该地区的地形地貌、地质构造、地层岩性、植被条件和人类工程活动等特征因素,在对野外实际调查数据综合分析的基础之上,现选取松散物储量 u_1 、不良地质现象 u_2 、冲淤变幅 u_3 、沟道堵塞程度 u_4 、下游沟槽横断面形态 u_5 、主沟纵坡降 u_6 、流域面积 u_7 、植被覆盖率 u_8 、沟谷边坡坡度 u_9 、人为工程活动 u_{10} 这 10 项因素作为评价因子^[13],建立泥石流危险度评价指标体系(图2)。其中,泥石流主沟纵坡降作为主导影响因子,是影响泥石流发生的主要因素之一,其决定了泥石流在形成和发生过程中的速度快慢。主沟纵坡降的值越大,对泥石流的形成就越有利,且一旦形成后越不易消亡。同时,泥石流的动能也越大,其破坏性也就越强^[2]。

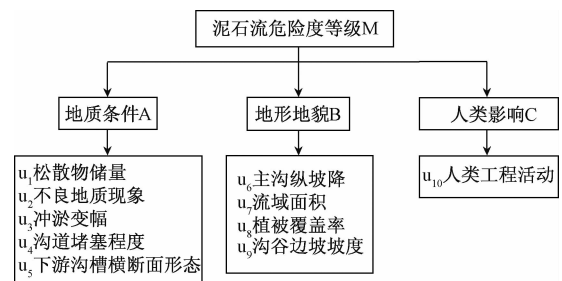


图2 泥石流危险度评价指标体系

Fig. 2 Assessing indices system of the debris flows

按照层次分析法,可计算得出上述方案层各影响因素的权重值(表2、表3和表4)。

表2 准则层权重分配

Table 2 Rule layer weight distribution

M	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 3 方案层 A 的权重分配

Table 3 Scheme layer A weight distribution

	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	权重
u_1	1	2	3	2	2	0.341
u_2	1/2	1	2	2	3	0.258
u_3	1/3	1/2	1	1/2	2	0.126
u_4	1/2	1/2	2	1	2	0.180
u_5	1/2	1/3	1/2	1/2	1	0.095

3.2 确定评价集和隶属度

按照泥石流危险性程度大小,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

石流的评价集即 $V = (V_1, V_2, V_3, V_4) = (I \text{ 级、II 级、III 级、IV 级})$,评价标准见表 5^[5,14]。

表 4 方案层 B 权重分配

Table 4 Scheme layer B weight distribution

	u_6	u_7	u_8	u_9	权重
u_6	1	3	2	2	0.386
u_7	1/3	1	2	2	0.249
u_8	1/2	1/2	1	1/3	0.143
u_9	1/2	1/2	3	1	0.222

表 5 单沟泥石流危险因子等级及其赋值表

Table 5 Single gully risk factor levels and its assignment table

评价因子	无危险 (I)	轻度危险 (II)	中度危险 (III)	高度危险 (IV)
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	一般	轻微	中等	严重
冲淤变幅 u_3 / m	≤ 0.2	0.2 ~ 1	1 ~ 2	≥ 2
沟道堵塞程度 u_4	无	轻微	中等	严重
下游沟槽横断面形态 u_5	平坦型	复式断面	拓宽 U 型谷	V 型谷
主沟纵坡降 $u_6 / \%$	≤ 3	3 ~ 6	6 ~ 12	≥ 12
流域面积 u_7 / km^2	≥ 100	10 ~ 100	5 ~ 10	≤ 5
植被覆盖率 $u_8 / \%$	≥ 60	30 ~ 60	10 ~ 30	≤ 10
山坡坡度 $u_9 / (^\circ)$	≤ 15	15 ~ 25	25 ~ 32	≥ 32
人类工程活动 u_{10}	弱	中等	强	极强

注:该等级均为中国地质调查局野外灾害采集系统中专家划分。

以小个沟泥石流沟为例说明模糊综合评判的过程,由其实取值(表 6)和公式(1),可求得评价因素 $U(u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6, u_7, u_8, u_9, u_{10})$ 对评价集 $V(v_1, v_2, v_3, v_4)$ 的隶属度,从而建立模糊关系矩阵 R 。

表 6 小个沟泥石流各因子实际值表

Table 6 Actual value table of xiaogou' factors

评价因子	$u_1 / (\times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	u_2	u_3 / m	u_4	u_5	$u_6 / \%$
实际取值	30	中等	0.3	轻微	V 型谷	41.99
评价因子	u_7 / km^2	$u_8 / \%$	$u_9 / (^\circ)$	u_{10}		
实际取值	4.59	25	30	强		

$$R_A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0.89 & 0.13 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0.47 & 0.56 & 0 & 0 \\ 0.25 & 0.75 & 0 & 0 \\ 0.02 & 0.98 & 0 & 0 \\ 0 & 0.29 & 0.29 & 0 \end{bmatrix} R_C = [0 \quad 0 \quad 1 \quad 0]$$

3.3 泥石流危险度综合评判

根据上述方法所求出的模糊关系矩阵 R ,再用模

糊权向量将各行进行综合,便可得到该评价事物从总体角度上对各等级模糊子集的隶属程度,也就是所谓的模糊综合评价结果向量^[15]。继而将评价级 V 上的一个模糊子集 B 引入,则该模糊子集 B 称模糊评级。

$$B = \{b_1, b_2 \cdots b_n\}$$

$$B = W \times R (W \text{ 为某一层权重})^{[15-16]}$$

准则层模糊综合评判:前面已算出准则层各指标的权重 $W_A = (0.344, 0.138, 0.240, 0.096, 0.182)$; $W_B = (0.324, 0.179, 0.188, 0.138, 0.073, 0.098)$; $W_C = 1$ 故得:

$$B_{\text{地质条件}} = W_A \times R_A = (0.339, 0.194, 0.257, 0.095, 0.115)$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0.89 & 0.13 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = (0.229, 0.128, 0.194, 0.45)$$

$$B_{\text{地形地貌}} = W_B \times R_B = (0.324, 0.179, 0.188, 0.138, 0.$$

$$073, 0.098) \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0.47 & 0.56 & 0 & 0 \\ 0.25 & 0.75 & 0 & 0 \\ 0.02 & 0.98 & 0 & 0 \\ 0 & 0.29 & 0.29 & 0 \end{bmatrix} = (0.124, 0.$$

$$309, 0.028, 0.503)$$

$$B_{\text{人类影响}} = W_C \times R_C = 1 \times [0 \quad 0 \quad 1 \quad 0] = (0, 0, 1, 0)$$

目标层的模糊综合评价: $B_M = W \times R = (0.311, 0.$

$$493, 0.196) \begin{bmatrix} 0.229 & 0.128 & 0.194 & 0.45 \\ 0.124 & 0.309 & 0.028 & 0.503 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} =$$

$$(0.132, 0.192, 0.270, 0.388)$$

根据最大隶属度原则,评价结果中的最高值为 0.388,即高度危险(IV)。因此,综合评价结果显示小个沟泥石流沟的危险度等级为高。

依据上述方法现另选定康乐县境内其余 19 条典型泥石流沟(玉家沟、孙家庄沟、果园沟、齐家沟、马莲滩、姬家沟、古洞沟、坡湾沟、八路沟、张家沟、窑窑沟、上沟、叶苏沟、水沟、安寺沟、麻湾沟、何家沟、大白山沟、张家庄夹死牛沟)为研究对象,分别对其进行危险度评价,同样利用模糊综合评价法,确定上述 19 条泥石流沟各自的模糊评级分别为: $B_{\text{玉家沟}} = (0.25, 0.415, 0.05, 0.265)$; $B_{\text{孙家庄沟}} = (0.136, 0.166, 0.09, 0.332)$; $B_{\text{果园沟}} = (0.182, 0.252, 0.16, 0.406)$; $B_{\text{齐家沟}} = (0.237, 0.014, 0.263, 0.486)$; $B_{\text{马莲滩}} = (0.379, 0.228, 0.207, 0.202)$; $B_{\text{姬家沟}} = (0.229, 0.294, 0.154, 0.288)$; $B_{\text{古洞沟}} = (0.427, 0.165, 0.197, 0.227)$; $B_{\text{坡湾沟}} = (0.568, 0.125, 0.073, 0.365)$; $B_{\text{八路沟}} = (0.15, 0.318, 0.16, 0.372)$; $B_{\text{张家沟}} = (0.455, 0.357, 0.046, 0.136)$; $B_{\text{窑窑沟}} = (0.238, 0.409, 0.036, 0.313)$; $B_{\text{上沟}} = (0.203, 0.325, 0.107, 0.365)$; $B_{\text{叶苏沟}} = (0.174, 0.157, 0.349, 0.32)$; $B_{\text{水沟}} = (0.152, 0.102, 0.3, 0.259)$; $B_{\text{安寺沟}} = (0.179, 0.351, 0.071, 0.401)$; $B_{\text{麻湾沟}} = (0.187, 0.147, 0.064, 0.247)$; $B_{\text{何家沟}} = (0.183, 0.239, 0.088, 0.289)$; $B_{\text{大白山}} = (0.143, 0.223, 0.03, 0.408)$; $B_{\text{张家庄夹死牛沟}} = (0.223, 0.34, 0.036, 0.402)$ (限于篇幅原因,此 19 条泥石流沟的计算过程省略)。根据最大隶属度原则,所选的康乐县 20 条泥石流沟的最后评价结果见表 7。

表 7 评价结果的对比分析

Table 7 Comparement of the evaluation result

沟谷名称	模糊危险性	评价结果	沟谷名称	模糊危险性	评价结果
小个沟	0.388	高度危险	张家沟	0.455	无危险
玉家沟	0.415	轻度危险	窑窑沟	0.409	轻度危险
孙家庄沟	0.332	高度危险	上沟	0.365	高度危险
果园沟	0.406	高度危险	叶苏沟	0.349	中度危险
齐家沟	0.486	高度危险	水沟	0.3	中度危险
马莲滩	0.379	无危险	安寺沟	0.401	高度危险
姬家沟	0.294	轻度危险	麻湾沟	0.247	高度危险
古洞沟	0.427	无危险	何家沟	0.289	高度危险
坡湾沟	0.568	无危险	大白山沟	0.408	高度危险
八路沟	0.372	高度危险	张家庄	0.402	高度危险

4 结论

(1)通过对模糊综合评判结果进行对比分析,预测在康乐县所选 20 条泥石流沟中,有 11 条高度危险,2 条中度危险,3 条轻度危险,4 条无危险。其中处于高度危险的泥石流沟占到 55%,建议对该地区进行重点监测和防治。

(2)引发泥石流的因素繁多,使用模糊综合评判法可根据各因素对泥石流危险度的贡献率来评价其危险性,使评判结果更加科学和客观,可为预判泥石流发展趋势和做好防灾减灾工作提供可靠的依据。

参考文献:

- [1] 匡乐红,刘宝琛,姚京成.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 Le hong, LIU Bao chen, YAO Jing cheng. Research on regionalization of debris flow risk degree with fuzzy and extension method[J]. Journal of Catastrophology, 2006, 21(1): 68-72.
- [2] 郭万铭,焦金鱼.基于模糊综合评判法分析的岷县洮河流域单沟泥石流危险性评价[J].地质灾害与环境保护,2010,21(2):15-37.
GUO Wan ming, JIAO Jin yu. A three-dimensional stability analysis of excavating slope deformation in suffer areas of Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2010, 21(2): 15-37.
- [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,2007,18(4):62-66.
MAI Hua shan, XU Lin rong, KUANG Le hong. Fuzzy comprehensive evaluation of debris flows hazard base on "superentropy"[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2007, 18(4): 62-66.
- [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 Wei, REN Guang ming, ZUO San sheng. Fuzzy comprehensive evaluation method to judge dangerous degree of debris flow[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(2): 138-140.
- [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害评价中的应用[J].青海环境,1997,7(2):72-77.
SUN Guang ren, BI Hai liang. Fuzzy comprehensive evaluation for discrimination and risk assessment on

- debris flow [J]. Journal of Qinghai Environment, 1997, 7(2): 72-77.
- [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): 6-12.
- LIU Tao, ZHANG Hongjiang, WU Jingdong, 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): 6-12.
- [7] 刘剑刚. 层次分析法在辽南泥石流危险度评价中的应用[J]. 长春师范大学学报, 2012, 31(6): 51-55.
- LIU Jiangang. Application of AHP in southern liaoning debris flow risk assessment [J]. Journal of Changchun Normal University, 2012, 31(6): 51-55.
- [8] 孟庆华, 孙伟锋, 张春山, 等. 陕西凤县泥石流灾害危险性评估[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(1): 121-131.
- MENG Qinghua, SUN Weifeng, ZHANG Chunshan, et al. Hazard assessment of debris flow in Fengxian County of Shannxi Province [J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23(1): 121-131.
- [9] 马海荣, 程新文, 陈联君, 等. 基于GIS与层次分析法的公路泥石流危险性评价[J]. 公路工程, 2016, 41(1): 33-37.
- MA Hairong, CHENG Xinwen, CHEN Lianjun, et al. Hazard evaluation of debris flow along highway based on GIS and AHP [J]. Highway Engineering, 2016, 41(1): 33-37.
- [10] 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 Xueliang, LI Jianyi. Study on indexes system for assessing debris flow risk based on AHP [J]. China Mining Magazine, 2011, 20(10): 113-117.
- [11] 眭素刚, 范柱国. 模糊综合评判在大水窖泥石流危险度评价中的应用[J]. 地质学刊, 2010, 34(1): 22-27.
- SUI Sugang, FAN Zhuguo. Application of fuzzy comprehensive evaluation in mudflow in Dashuiqing Gully [J]. Journal of Geology, 2010, 34(1): 22-27.
- [12] 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(2): 351-355.
- YANG Yan, ZHANG Xujiao, YE Peisheng, 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(2): 351-355.
- [13] 王昕. 泥石流沟危险度的模糊评判[J]. 重庆师范学院学报, 2002, 19(1): 22-25.
- WANG Xin. A Fuzzy appraisal of the risk degree of debris flows [J]. Journal of Chongqing Normal University, 2002, 19(1): 22-25.
- [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 Chunlei, WU Yungang, YU Jintao. Fuzzy comprehensive evaluation for risk assessment on debris flow [J]. Safety and Environment Engineering, 2010, 17(3): 14-16.
- [15] 邓文佳. 炮手沟泥石流的危险度评价[J]. 环境科学与管理, 2012, 37(11): 176-179.
- DENG Wenjia. Evaluation on risks of Paoshougou debris flow [J]. Environmental Science and Management, 2012, 37(11): 176-179.
- [16] 郭嗣琮, 陈刚. 信息科学中的软件计算方法[M]. 大连: 东北大学出版社, 2001.
- GUO Sicong, CHEN Gang. Soft computing methods in information science [M]. Dalian: Northeastern University Press, 2001.