

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2017.01.13

矿山泥石流险情的变权云模型综合预测

梁伟章, 赵国彦

(中南大学资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 为更合理预测矿山泥石流危险性, 将云模型、变权理论和模糊熵理论三者融合, 提出一种矿山泥石流危险性的变权云模型综合预测方法。选取山坡坡度、沟床纵比降、主沟长度、汇水面积、弃渣量、单位面积松散物源量、雨季降雨量、植被覆盖率为指标, 计算各指标隶属于不同等级的云模型参数; 结合变权理论与指标值动态确定不同样本的指标权重; 应用正向高斯云发生器计算综合确定度; 依据最大综合确定度隶属等级判定危险性级别, 且应用模糊熵表示预测等级的模糊性, 为矿山泥石流预警提供更详细的参考依据。最后, 选取秦岭 34 个矿山泥石流实例对所建立模型进行验证, 结果表明, 该方法预测结果与实际吻合, 能满足工程需要。

关键词: 矿山泥石流; 云模型; 变权理论; 模糊熵; 危险性预测

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2017)01-0082-07

Comprehensive prediction of mine debris flow' risk based on weight-varying cloud model

LIANG Weizhang, ZHAO Guoyan

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract: In order to predict the risk of mine debris flow more reasonably, a weight-varying cloud model was proposed by integrating the cloud model, variable weight theory and fuzzy entropy theory. Factors including slope of hill, longitudinal shrinking slope, length of main ditches, catchment area, amount of slag, reserve of solid loose mass of unit area, rainfall of rainy season, and vegetation cover were selected. And the cloud characteristics of each classification index at different levels were calculated. The weight of each index in different samples was determined by combining the variable weight theory and the index value. The comprehensive certainty degrees were calculated by the generation algorithm of Gaussian cloud, and we choose the maximum comprehensive certainty degree to estimate the level of the risk. The fuzzy entropy of comprehensive certainty degrees was also used to indicate the fuzziness of this level, which provided more detail reference for early-warning of mine debris flow. Finally, the effectiveness of this prediction model were verified by 34 examples of mine debris flow from Qinling mountains, The results show that the results satisfyingly agree with reality, which can be of interest from a practical viewpoint.

Keywords: mine debris flow; cloud model; variable weight theory; fuzzy entropy; risk prediction

0 引言

矿山泥石流是矿产资源开发中一种常见的突发性地

质灾害^[1]。由于矿山地表生态环境破坏与大量废弃物堆置不合理, 在强降雨、冰雪消融等水动力诱发下形成矿山泥石流^[2]。它的产生、演化主要受人为因素影响, 除具有

收稿日期: 2016-07-21; 修订日期: 2016-09-01

基金项目: 中南大学中央高校基本科研业务费专项资金资助(2016zzts446); 国家自然科学基金面上项目(51374244)

第一作者: 梁伟章(1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事矿山安全与岩石力学等领域研究。E-mail: 1246585711@qq.com

自然泥石流危害特征外,还带有污染性与频发性^[3]。由于矿山工业场地多分布于泥石流流经的沟谷地区,若发生泥石流,往往会造成重大灾害事故^[2-8]。因此,在灾前预测矿山泥石流危险程度,为矿区泥石流预警提供依据,对于减少矿山生命财产损失具有重要意义。

国内外对于自然泥石流研究成果较为丰富,而对矿山泥石流研究较少。徐友宁等^[4]选取9个定性、定量指标,应用信息熵理论建立矿山泥石流危险度的熵权预测模型;陈华清等^[5]在实地调查基础上,应用AHP法进行矿山泥石流危险度评判;薛喜成等^[6]提出矿山泥石流危险度预测的IGA-BP模型;莫时雄^[7]应用AHP法确定指标权重,提出矿山泥石流危险度的模糊层次综合评判法;郭付三等^[8]基于灾害链效应进行矿山泥石流危险性预测研究。以上方法取得了一定成效,但仍存在一些问题:①矿山泥石流发生受多种因素影响,包含多种不确定与随机性因素,需考虑预测过程的模糊性和随机性;②常权法在矿山泥石流险情评判的灵敏性相对较差。当某指标处于极端危险时,若仍按常权法处理,由于评价指标较多,且各指标权重相对较低,其危险状态在很大程度上会被忽略,从而不能及时、准确反映险情,导致不科学评判结果;③仅采用单一等级评判,无法判别同一危险性等级矿山泥石流的差异性,不能反映各指标隶属等级的不一致性,从而影响矿山泥石流险情控制的合理性。

针对上述问题,笔者将变权理论与云模型理论相结合,并引用模糊熵理论对其优化,提出一种矿山泥石流危险性的综合预测方法。该方法针对问题①,引入云模型理论,综合考虑预测中的模糊性与随机性,实现定性语言与定量数值的转换;针对问题②,采用组合赋权法和变权理论综合确定指标权重,根据各指标取值动态调整权值,以更好反映矿山泥石流真实险情;针对问题③,应用模糊熵作为第二维评判参量,用以表示矿山泥石流险情复杂性,为解决各指标隶属等级不一致问题提供一个新思路。最后以秦岭34个典型矿山泥石流为实例,验证该模型的有效性。

1 预测模型

1.1 云模型

云模型是李德毅等^[9]提出的一种定性概念与其定量表示的不确定性转换模型,可用于处理定性概念中普遍存在的模糊性与随机性。现已应用于智能控制^[10]、岩爆预测^[11]、采空区稳定性评价^[12]等多个领域。

设 U 表示一个定量论域, A 是 U 上的定性概念,若

U 中定量值 x 对 A 的确定度 $U_A(x) \in [0,1]$ 是有稳定倾向的随机数,则 x 在 U 上的分布称为云模型^[13]。在矿山泥石流危险性预测中, U 即某一危险性等级对应的限值; A 代表与这一等级对应的危险性概念(如等级I对应“轻度危险”); x 为矿山泥石流各指标实测值。

云模型用期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e 等3个参数表示危险性概念的数字特征。其中, E_x 是危险性论域中最能反映某一概念的典型样本点; E_n 是代表危险性概念的可度量粒度,同时反映该概念在论域中可被接受的取值范围; H_e 是 E_n 的熵,可理解为不同专家对于 x 隶属于某危险性概念的不确定性度量。矿山泥石流危险性评价指标 i 对某等级标准 j 参数的选取,文献^[10-11]给出了如下公式。

$$E_{xij} = (x_{ij}^1 + x_{ij}^2)/2 \quad (1)$$

$$E_{nij} = (x_{ij}^1 - x_{ij}^2)/6 \quad (2)$$

$$H_{eij} = k \quad (3)$$

式中: x_{ij}^1, x_{ij}^2 ——分别为指标 i 对应等级 j 的上下边界值;

k ——常数。

式(2)中 E_{nij} 的计算是基于高斯云的“3En”规则,云滴约有99.7%的概率落在区间范围内,而当指标值在区间边界附近时,确定度几乎为0,此时结果难以区分。因此,为提高模型区分度,相邻等级边界数值应同时隶属于两等级^[14],且确定度相等,即:

$$E_{nij} = (x_{ij}^1 - x_{ij}^2)/2.355 \quad (4)$$

矿山泥石流危险性预测中的云模型生成应用正向高斯云发生器算法实现,具体步骤为:

(1) 依据分级标准,由式(1)、(3)、(4)计算云模型3个参数;

(2) 生成一个以 E_{nij} 为期望值、 H_{eij} 为标准差的高斯随机数 E'_{nij} ;

(3) 生成一个以 E_{xij} 为期望值、 E'_{nij} 为标准差的高斯随机数 x' ;

(4) 计算确定度:

$$\mu_{ij} = \exp\left[-\frac{(x' - E_{xij})^2}{2E_{nij}^{'2}}\right] \quad (5)$$

(5) 重复步骤(2)~(4),直至生成 N 个云滴为止。

1.2 变权理论确定权重

变权思想最先由汪培庄^[15]提出,强调指标权重应随其状态值变化而变化,以克服常权评价带来的偏差。如:某工程设计需考虑可行性 d_1 与必要性 d_2 两个指标,常权下假设其权重均为0.5,决策函数为 $f = 0.5d_1 + 0.5d_2$ 。若对方案1, $d_1 = 0.1, d_2 = 0.9$;对方案2,

$d_1 = d_2 = 0.5$; 则有 $f_1 = f_2 = 0.5$, 显然结果不合实际。

变权模型可分为惩罚型、激励型和混合型三种类型。由于矿山泥石流影响因素较为复杂, 笔者选择混合型变权法进行研究, 具体步骤为:

(1) 确定常权系数

常权的确定有多种方式。笔者应用组合赋权法, 将主、客观权重结合得到组合权重。主、客观赋权法分别采用 AHP 法^[5]和熵权法^[4], 则组合权重为:

$$W_c = t_1 W_s + t_2 W_o \quad (6)$$

式中: W_s 、 W_o ——分别为主观权重向量和客观权重向量;

t_1 、 t_2 ——分别表示主、客观权重重要程度, 且 $0 \leq t_1$, $t_2 \leq 1$, $t_1 + t_2 = 1$ 。

(2) 构建状态变权向量

状态变权向量选取是变权的核心, 可分为线性、指数型、对数型等。因指数型状态变权向量具有参数确定灵活、扩展性强等优点^[16], 笔者选用指数型状态变权向量进行分析。

对于效益型指标, 选择激励型变权模型。当指标值高于警戒上限值时, 指标权重随状态值增大而增大, 激励高水平指标。

$$S_i(X) = \begin{cases} \frac{\alpha_1(x-\beta_1)}{e^{\gamma_{imax}-\gamma_{imin}}} & x > \beta_1 \\ 1 & x \leq \beta_1 \end{cases} \quad (7)$$

式中: α_1 ——激励水平, $\alpha_1 > 0$ 且 α_1 越大, 激励效果越明显;

β_1 ——警戒上限值。 γ_{imax} 、 γ_{imin} 分别为指标 i 最大值和最小值。

对于成本型指标, 选择惩罚型变权模型。当指标值低于警戒下限值时, 指标权重随状态值减小而增大, 惩罚低水平指标。

$$S_i(X) = \begin{cases} \frac{-\alpha_2(x-\beta_2)}{e^{\gamma_{imax}-\gamma_{imin}}} & x < \beta_2 \\ 1 & x \geq \beta_2 \end{cases} \quad (8)$$

式中: α_2 ——惩罚水平, $\alpha_2 > 0$ 且 α_2 越大, 惩罚效果越明显;

β_2 ——警戒下限值。

(3) 计算变权向量

结合常权向量 W_c 与状态变权向量 $S(X)$, 计算样本各指标变权向量 $W(X)$:

$$W(X) = \frac{W_c \cdot S(X)}{\sum_{i=1}^m [w_{ci} S_i(X)]} \quad (9)$$

式中: $W_c \cdot S(X)$ ——Hardarmard 乘积;

w_{ci} ——指标 i 的常权重;

m ——指标数。

1.3 综合确定度计算

依据正向高斯云发生器算法, 计算各指标值隶属于各等级的确定度。为提高结果可靠性, 需多次运行正向高斯云发生器求平均值, 即为指标 i 隶属于等级 j 的确定度 μ_{ij} :

$$\mu_{ij} = \sum_{l=1}^L \mu_{ij}^l / L \quad (10)$$

式中: μ_{ij}^l ——指标 i 隶属于等级 j 第 l 次计算的确定度;

L ——正向高斯云发生器运行次数。

结合变权法确定的指标权重, 计算矿山泥石流各危险性等级综合确定度 U_j :

$$U_j = \sum_{i=1}^m \mu_{ij} w_{ci} \quad (11)$$

1.4 等级综合判定

由最大综合确定度隶属级别, 即可确定矿山泥石流危险性等级。由于各等级综合确定度大小并不一致, 仅由等级一个维度难以完全反映矿山泥石流危险度特征。因此, 笔者在云模型基础上引入 De Luca 与 Trimini^[17] 以模糊集形式定义的模糊熵, 进一步表示危险性等级模糊程度, 计算公式为:

$$H = -\frac{1}{k} \sum_{j=1}^n [U_j \ln U_j + (1 - U_j) \ln(1 - U_j)] \quad (12)$$

式中: U_j ——矿山泥石流样本各等级综合确定度;

n ——等级数;

k ——标准化系数, 一般取 $n \ln 2$ 。

当 U_j 越接近 0.5 时, H 值越大, 表明矿山泥石流危险性不确定性越大, 各指标间隶属等级相差较大, 结果越难评定。当 U_j 越接近 0 或 1 时, 规定 $0 \ln 0 = 0$, H 值接近于 0, 此时结果越易评定。

2 评价指标体系的建立

评价指标体系的建立是矿山泥石流危险性预测的基础。依据矿山泥石流形成机理, 结合矿区工程实际, 建立矿山泥石流危险性评价指标体系^[3-7]。该指标体系包含 3 个准则层: 地形地貌特征 I_1 , 以山坡坡度 X_1 (°)、沟床纵比降 X_2 (%)、主沟长度 X_3 (km)、汇水面积 X_4 (km²) 4 个指标分析; 物源特征 I_2 , 以弃渣量 X_5 (10⁴ m³)、单位面积松散物源量 X_6 (10⁴ m³/km²)² 个指标分析; 水文植被特征 I_3 , 以雨季降雨量 X_7 (mm)、植被覆盖率 X_8 (%) 2 个指标分析。各指标的选取依据描述如下:

(1) 山坡坡度 X_1 : 指沟谷两岸山坡平均坡度。矿山排出的废弃物增大了山坡坡度, 坡度越大, 坡体稳定

性越差。

(2) 沟床纵比降 X_2 : 指相对高差与主沟长度比值, 反映了泥石流势能。沟床纵比降越大, 泥石流水力越大, 破坏性越强。

(3) 主沟长度 X_3 : 指泥石流主要沟道长度, 反映泥石流流程与规模。主沟长度越长, 沿途接纳物质越多, 破坏性越强。

(4) 流域面积 X_4 : 指沟谷流域分水岭所围面积。流域面积越大, 坡面疏松物质越易被带入沟谷, 直接影响泥石流规模。

(5) 弃渣量 X_5 : 指矿山采、选矿等排放废弃物总量, 为泥石流形成提供大量物质来源。矿区弃渣量越多, 越易形成泥石流。

(6) 单位面积松散物源量 X_6 : 指物源总量与汇水面积比值, 反映松散物质集中程度。单位面积松散物质越多, 泥石流发生概率和危险性越大。

(7) 雨季降雨量 X_7 : 由于诱发泥石流雨水多发生于雨季, 故选择雨季平均降雨量为指标。大气降水是泥石流组成部分, 也是泥石流诱发条件。降雨量越大, 泥石流发生概率越高。

(8) 植被覆盖率 X_8 : 指植被占地总面积比值。植被可影响坡体结构与物质组成, 能够减少水土流失, 直接决定坡体稳定性。植被覆盖率越高, 越难形成泥石流。

依据前人研究^[3-8], 将泥石流危险性分为 4 个等级, 评价等级集 $R = \{C_1, C_2, C_3, C_4\}$, 分别表示 I 级、II 级、III 级、IV 级, 即轻度、中度、重度和极度危险性。每个评价指标等级标准均按单因素分类法确定。指标 X_1 、 X_2 、 X_4 、 X_5 分级标准参考文献^[4]选取。由于矿山泥石流评价研究文献较少, 故对于其他指标, 笔者参照相关自然泥石流研究成果进行分级。 X_3 、 X_6 分级标准参考文献^[18]选取, X_7 、 X_8 分级标准参考文献^[19]选取。各指标分级标准见表 1。

表 1 矿山泥石流危险性分级标准

Table 1 Classification standard of mine debris flow risk								
等级	$X_1/(^{\circ})$	$X_2/(%)$	X_3/km	X_4/km^2	$X_5/10^4 \text{ m}^3$	$X_6/(10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2)$	X_7/mm	$X_8/\%$
I	<40	<20	<1	<0.8	<2	<30	<50	>60
II	40~42	20~35	1~5	0.8~2.9	2~16	30~100	50~100	40~60
III	42~45	35~50	5~10	2.9~5	16~30	100~1 000	100~500	20~40
IV	>45	>50	>10	>5	>30	>1 000	>500	<20

3 实例应用

为验证所建立模型的可行性, 笔者以文献^[20]秦岭 34 个典型矿山泥石流为例进行分析, 各指标实测数据见表 2。由于矿区资源开发强度高, 且矿石品位低, 产生了大量废石、尾矿等固体废弃物。不但为泥石流形成提供了丰富物质来源, 而且加大了沟谷两侧边坡坡度。曾多次发生泥石流事故, 给矿山造成了严重经济损失与环境污染。因此, 很有必要对矿山泥石流危险度进行预测, 为矿山及时预警提供建议与对策。

(1) 计算各指标确定度

依据分级标准, 由式(1)、(3)、(4)计算云模型参数。对于只知上、下边界的等级 I 和 IV, 取 $E_{ni1} = E_{ni2}$, $E_{ni3} = E_{ni4}$, 然后由式(1)求出 E_{xi1} 和 E_{xi4} , 超熵 H_e 取 0.01。通过正向高斯云发生器生成相应云模型, 且由于等级 I 和 IV 分别处于等级左右边界, 故分别采用半降高斯云模型和半升高斯云模型。为使预测结果更合理, 对于小于 E_{xi1} 和大于 E_{xi4} 的云滴, 确定度取为 1。然后将矿山泥石流实测值代入各指标云模型, 并运行 1 000 次, 由式(10)得出样本各指标不同危险等级确定度。以指标 X_1 为例进行分析, 云模型参数计算为:

$$\begin{bmatrix} E_{x1j} \\ E_{n1j} \\ H_{e1j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 39.0 & 41.0 & 43.5 & 46.5 \\ 0.85 & 0.85 & 1.27 & 1.27 \\ 0.01 & 0.01 & 0.01 & 0.01 \end{bmatrix}$$

生成的云模型见图 1, 图中横坐标表示指标 X_1 取值, 纵坐标表示确定度, 从左至右依次表示指标 X_1 危险性 I 级至 IV 级对应的云。将样本 1 的指标 X_1 取值 ($x=40$) 带入云模型中, 得到该指标值隶属各等级确定度分别为: $\mu_I = 0.499$, $\mu_{II} = 0.499$, $\mu_{III} = 0.023$, $\mu_{IV} = 0$ 。由于 $x=40$ 位于等级 I、II 的边界, 难以判断属于哪一等级, 而确定度计算结果 $\mu_I = \mu_{II} > \mu_{III} > \mu_{IV}$, 与实际相符。同理可计算出样本其它指标值隶属各等级的确定度。

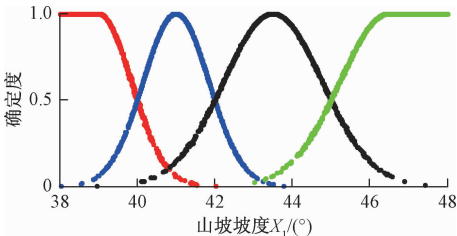


图 1 指标 X_1 隶属于危险性等级的云模型
Fig. 1 Cloud model for X_1

(2) 计算指标变权重

根据 AHP 法和熵权法计算的主、客观权重分别为:

$W_s = [0.124\ 6\ 0.127\ 5\ 0.091\ 3\ 0.102\ 5\ 0.138\ 7\ 0.148\ 2\ 0.147\ 0\ 0.120\ 2]$ 、 $W_o = [0.128\ 7\ 0.117\ 2\ 0.151\ 0\ 0.127\ 8\ 0.128\ 6\ 0.108\ 8\ 0.157\ 0\ 0.081\ 0]$,由式(6)计算组合权重,设主、客观权重重要度相同,即 $t_1 = t_2 = 0.5$,则 $W_c = [0.126\ 7\ 0.122\ 4\ 0.121\ 2\ 0.115\ 2\ 0.133\ 6\ 0.128\ 5\ 0.152\ 0\ 0.100\ 6]$ 。

由式(7)~(9)计算各样本变权向量,取 $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$,且对于效益型指标,警戒上限值 β_1 取为等级 IV 下边界值;对于成本型指标,警戒下限值 β_1 取为等级 I 上边界值。以样本 4 为例说明计算过程,由式(7)、(8)

计算变权向量: $S(X) = [1.153\ 6\ 1.285\ 7\ 1.000\ 0\ 1.000\ 0\ 1.000\ 0\ 1.000\ 0\ 1.000\ 0]$,则由式(9)计算变权向量为: $W(X) = [0.138\ 6\ 0.149\ 2\ 0.114\ 9\ 0.109\ 2\ 0.126\ 7\ 0.121\ 8\ 0.144\ 1\ 0.095\ 4]$ 。 X_1 、 X_2 指标值高于警戒上限值,因此其权重得到了激励。

(3) 综合预测结果

结合求得的指标确定度与权重,由式(11)计算样本各等级综合确定度(表 2)。依据最大综合确定度隶属等级,即可判定样本危险度级别。然后由式(12)、式(13)计算样本综合确定度的模糊熵,进一步表示泥石流危险度复杂性,最终预测结果见表 2,表中同时列出了模糊综合评判法预测结果。

表 2 指标统计值与预测结果^[20]Table 2 Measured data of indexes and prediction results^[20]

样本编号	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	U_I	U_{II}	U_{III}	U_{IV}	文中方法	模糊熵	文献[20]	模糊综合评判 ^[7]
大黑沟	40	38.9	1.8	1.37	4.78	46.2	257	70	0.280 9	0.591 8	0.415 2	0.102 6	II	0.820 6	次危险	II
夹山沟	45	36.7	0.6	0.74	3.12	84.9	259	70	0.294 5	0.426 1	0.455 0	0.165 0	III	0.873 1	次危险	II
寨子沟	50	28.6	2.1	1.23	2.96	43.5	261	60	0.335 3	0.678 1	0.358 4	0.143 5	II	0.838 8	次危险	II
水晶湾	50	64.3	0.8	0.32	3.17	153	264	50	0.497 6	0.527 8	0.547 0	0.289 0	III	0.962 9	危险	II
关门沟	70	28.8	2.2	1.69	6.14	39.7	265	50	0.322 9	0.803 2	0.433 7	0.228 8	II	0.845 0	危险	II
银母寺	60	30.8	1.3	0.45	3.27	100	268	30	0.392 9	0.527 2	0.599 6	0.188 5	III	0.906 8	危险	II
八卦沟	40	13.6	5.8	17.4	27.9	25.5	266	50	0.448 3	0.443 2	0.559 9	0.248 9	III	0.943 8	次危险	III
核桃沟	50	35.7	1.4	0.77	3.38	67.8	275	60	0.350 2	0.414 8	0.518 4	0.144 0	III	0.875 1	危险	II
磨门沟	50	29.4	1.7	0.61	3.56	71.8	276	60	0.351 7	0.648 0	0.366 8	0.143 7	II	0.851 8	次危险	II
蚂蝗沟	45	36.9	1.9	1.45	1.14	41.6	279	70	0.263 6	0.494 2	0.457 1	0.164 8	II	0.866 5	次危险	II
长沟	45	26.0	2.7	2.27	2.59	31.4	279	70	0.246 8	0.584 6	0.399 5	0.164 2	II	0.848 5	次危险	II
二里河	50	38.8	1.9	5.05	1.23	30.4	268	50	0.428 1	0.536 2	0.564 3	0.258 4	III	0.946 6	危险	II
硝洞湾	60	38.9	1.1	0.52	8.23	106	268	40	0.320 1	0.519 0	0.534 9	0.184 5	III	0.895 8	次危险	III
柳树沟	50	44.4	1.8	1.29	1.35	44.8	276	40	0.538 9	0.508 9	0.512 4	0.158 2	I	0.904 5	危险	I
水晶沟	65	55.7	2.6	1.61	6.71	37.1	277	70	0.497 4	0.566 7	0.610 7	0.414 6	III	0.980 7	危险	II
国安寺	55	13.0	5.8	12.09	0.00	23.2	282	60	0.619 6	0.464 5	0.564 8	0.297 7	III	0.953 5	次危险	III
梨家沟	55	19.0	1.6	0.96	0.00	83.3	284	40	0.403 3	0.551 0	0.416 8	0.162 4	II	0.894 6	次危险	II
朱家坝	75	23.3	0.5	0.37	0.00	97.3	274	30	0.507 0	0.500 8	0.524 7	0.260 5	III	0.954 6	次危险	III
邓家台	50	21.5	2.2	2.13	0.00	28.2	260	40	0.370 6	0.583 8	0.407 2	0.143 7	II	0.873 3	次危险	II
吴家沟	45	10.6	4.7	5.59	0.14	22.5	358	80	0.512 4	0.314 4	0.498 2	0.388 1	I	0.963 5	不危险	I
贯沟	40	7.4	6.8	11.03	2.55	21.6	359	90	0.517 6	0.402 7	0.415 9	0.221 1	I	0.926 6	不危险	I
煤沟	50	46.1	1.3	2.05	2.52	41.9	360	70	0.388 7	0.591 4	0.550 1	0.266 4	II	0.940 4	不危险	II
唐家沟	40	11.9	4.2	8.58	0.63	24.6	358	80	0.555 6	0.381 6	0.407 2	0.218 6	I	0.919 0	不危险	I
炭草沟	40	13.6	2.2	2.43	0.71	33.3	360	80	0.446 6	0.500 3	0.330 3	0.100 8	II	0.843 1	不危险	II
银洞梁	40	11.0	2.0	2.02	36.9	54.2	243	40	0.333 2	0.345 0	0.373 2	0.266 2	III	0.907 5	危险	II
寺沟	50	13.7	5.8	10.49	43.12	23.8	244	60	0.663 3	0.565 5	0.511 3	0.638 3	IV	0.961 4	危险	III
木桶沟	60	49.5	5.1	6.50	4.94	22.8	245	60	0.451 1	0.537 7	0.599 3	0.348 8	III	0.971 5	危险	III
蒋家沟	60	49.3	2.1	0.87	16.0	40.2	246	20	0.290 7	0.487 7	0.546 0	0.279 7	III	0.927 8	危险	III
二道沟	55	27.3	1.1	0.41	10.3	132	247	60	0.360 8	0.554 6	0.389 9	0.162 7	II	0.883 4	危险	II
三道沟	60	33.3	1.2	0.71	16.4	93.7	247	60	0.339 9	0.450 4	0.586 3	0.183 0	III	0.894 0	危险	II
四道沟	40	31.2	0.8	0.39	2.69	129	246	60	0.331 3	0.388 3	0.244 3	0.162 2	II	0.828 9	危险	II
三台山	50	11.5	4.0	3.90	1.30	23.9	233	70	0.515 3	0.367 7	0.473 6	0.149 7	III	0.887 2	次危险	III
上坪	50	21.0	0.8	0.20	1.35	221	235	70	0.532 6	0.349 8	0.370 3	0.146 8	III	0.869 2	次危险	III
后沟	40	11.2	7.1	6.08	0.00	16.5	240	80	0.244 7	0.271 7	0.432 6	0.126 6	III	0.793 9	次危险	II

由于文献^[20]将矿山泥石流危险性分为3个等级,即危险、次危险、不危险,笔者在此基础上将其分为4个等级,即在危险的基础上又分为重度危险和极度危险,以提高泥石流险情的灵敏性。由表2可知,19个样本评判结果与文献^[20]相符;11个样本评判结果与文献^[20]稍微偏大,由于文中应用变权思想确定权重,险情越高的指标权重得到了激励,导致评判结果偏大。这有利于矿山提高警惕,及时采取措施处理险情更高的指标;4个样本评判结果与文献^[20]不符,对样本5、14、29、31应用模糊综合评判法^[7]进行判别,得到综合评判式分别为: $B_5 = (0.199\ 7, 0.535\ 4, 0.138\ 4, 0.126\ 7)$ 、 $B_{14} = (0.341\ 9, 0.225\ 1, 0.275\ 9, 0.157\ 3)$ 、 $B_{29} = (0.330\ 9, 0.375\ 3, 0.152\ 0, 0.126\ 7)$ 、 $B_{31} = (0.389\ 7, 0.449\ 9, 0.160\ 6, 0)$ 。由最大隶属度原则,样本14应为I级,样本5、29、31都应II级,与文中方法相同。因此,将变权云模型应用于矿山泥石流危险性预测是可行的。同时,文中计算了各综合确定度的模糊熵,进一步表示矿山泥石流复杂程度。不同方法都是基于不同角度对矿山泥石流危险性进行判别,但评判结果仍会有些差异,由结果分析可知,其产生原因主要有两个,一是各指标权重的确定具有较大不同;二是样本各指标的隶属等级相差较大,即各等级综合确定度的模糊熵较大,模糊熵越大,表明该样本各指标间隶属等级相差较大,评判结果越难确定。建议矿山在采取预防措施时,先处理高等级样本,再处理低等级、高模糊熵样本,最后处理低等级、低模糊熵样本;重点关注高风险指标,及时预警。

4 结论

针对矿山泥石流危险性预测存在的问题,提出了一种变权云模型综合预测方法,实例证明该方法有效,得出如下结论:

(1) 综合考虑地形地貌特征、物源特征、水文植被特征等影响因素,应用云模型对矿山泥石流危险性进行预测,实现了各指标与泥石流危险性等级的不确定性映射,综合考虑了预测中的模糊性与随机性。

(2) 在常权基础上引入混合变权思想确定指标权重,结合指标取值动态调整权值,更能反映不同矿山泥石流真实危险状况。

(3) 引入模糊熵表征矿山泥石流危险性的不确定程度,从等级和复杂度两个角度进行综合预测,为矿山泥石流采取预防措施提供了更详细参考依据。

(4) 矿山泥石流危险性评判指标体系和分级标准

值得进一步完善,此方法也可应用于自然泥石流等预测工作。

参考文献:

- [1] 文光菊,杨乐,邓文杰. 重庆山区矿山泥石流沟形态特征——以奉节县汾河矿区为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(3): 46-50.
WEN Guangju, YANG Le, DENG Wenjie. Morphological characteristics of mine debris flow gullies in mountain area of Chongqing's mountain area——taking Fenhe mining area in Fengjie county as an example[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, 26(3): 46-50.
- [2] 张丽萍,唐克丽. 矿山泥石流[M]. 北京:地质出版社, 2001.
ZHANG Liping, TANG Keli. Mine debris flow[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2001.
- [3] 刘丽,陈洪凯. 矿山泥石流灾害成因与防治对策[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2009, 28(5): 915-920.
LIU Li, CHEN Hongkai. Causes of mine debris flow disaster and its countermeasures[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2009, 28(5): 915-920.
- [4] 徐友宁,陈社斌,袁汉春,等. 潼关金矿区矿渣型泥石流熵权评价[J]. 地质科技情报, 2006, 25(5): 101-104.
XU Youning, CHEN Shebing, YUAN Hanchun, et al. Entropy weight assessment on slag mudslide potentiality parameter in Tongguan gold mine area[J]. Geological Science and Technology Information, 2006, 25(5): 101-104.
- [5] 陈华清,徐友宁,张江华,等. 小秦岭大湖峪矿渣型泥石流的物源特征及其危险度评价[J]. 地质通报, 2008(8): 1292-1298.
CHEN Huaqing, XU Youning, ZHANG Jianghua, et al. Source characters and risk assessments of mine slag-type debris flows in the Dahu valley, Xiaoqinling, China[J]. Geological Bulletin of China, 2008(8): 1292-1298.
- [6] XUE Xicheng, BI Jisong, CHEN Lingling, et al. Dangerous degree evaluation system of mine debris flow based on IGA-BP[J]. International Journal of Modern Education & Computer Science, 2011, 3(3): 15-24.
- [7] 莫时雄,程峰,王杰光,等. 典型金属矿山泥石流潜势度的模糊层次综合评判[J]. 中国地质灾害与

- 防治学报, 2009, 20(2): 41-45.
- MO Shixiong, CHENG Feng, WANG Jieguang, et al. Fuzzy hierarchic evaluation for debris flow potential of typical metal mine [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2009, 20(2): 41-45.
- [8] 郭付三, 周春梅, 杜娟. 基于灾害链效应的小秦岭乱石沟矿山泥石流风险评价[J]. 安全与环境工程, 2015, 22(2): 25-31.
- GUO Fusan, ZHOU Chunmei, DU Juan. Risk assessment of mine debris flow in xiaoqinling luanshi valley based on disaster chain effect[J]. Safety and Environment Engineering, 2015, 22(2): 25-31.
- [9] 李德毅, 孟海军, 史雪梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展, 1995, 32(6): 16-21.
- LI Deyi, MENG Haijun, SHI Xuemei. Membership clouds and membership cloud generators [J]. Computer R & D, 1995, 32(6): 16-21.
- [10] 张秀玲, 赵文保, 徐腾, 等. 基于 T-S 云推理网络的板形智能控制对比研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(11): 4461-4467.
- ZHANG Xiuling, ZHAO Wenbao, XU Teng, et al. Contrastive on flatness intelligent control via T-S cloud inference network [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(11): 4461-4467.
- [11] 王迎超, 靖洪文, 张强, 等. 基于正态云模型的深埋地下工程岩爆烈度分级预测研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(4): 1189-1194.
- WANG Yingchao, JING Hongwen, ZHANG Qiang, et al. A normal cloud model-based study of grading prediction of rockburst intensity in deep underground engineering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(4): 1189-1194.
- [12] 赵国彦, 梁伟章, 洪昌寿. 采空区稳定性的改进云模型二维评判[J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(10): 102-108.
- ZHAO Guoyan, LIANG Weizhang, HONG Changshou. Improved cloud model for two dimensional stability evaluation of goaf[J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(10): 102-108.
- [13] 刘常昱, 李德毅, 杜鹄, 等. 正态云模型的统计分析[J]. 信息与控制, 2005, 34(2): 236-239.
- LIU Changyu, LI Deyi, DU Yi, et al. Some statistical analysis of the normal cloud model [J]. Information and Control, 2005, 34(2): 236-239.
- [14] 周启刚, 张晓媛, 王兆林. 基于正态云模型的三峡库区土地利用生态风险评价[J]. 农业工程学报, 2014, 30(23): 289-297.
- ZHOU Qigang, ZHANG Xiaoyuan, WANG Zhaolin. Land use ecological risk evaluation in Three Gorges reservoir area based on normal cloud model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(23): 289-297.
- [15] 汪培庄. 模糊集与随机集落影[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1985.
- Wang Peizhuang. Fuzzy sets and stochastic sets projection [M]. Beijing: Beijing Normal University Press, 1985.
- [16] 李德清, 李洪兴. 变权决策中变权效果分析与状态变权向量的确定[J]. 控制与决策, 2004, 19(11): 1241-1245.
- LI Deqing, LI Hongxing. Analysis of variable weights effect and selection of appropriate state variable weights vector in decision making [J]. Control and Decision, 2004, 19(11): 1241-1245.
- [17] LUCA A. De, TERMINI S. A definition of a non-probabilistic entropy in the setting of fuzzy sets theory [J]. Information and Control, 1972, 20(4): 301-312.
- [18] 单博, 陈剑平, 王清. 基于最小熵理论和未确知测度理论的泥石流敏感性分析[J]. 岩土力学, 2014(5): 1445-1454.
- SHAN Bo, CHEN Jianping, WANG Qing. Debris flow susceptibility analysis based on theories of minimum entropy and uncertainty measurement [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014(5): 1445-1454.
- [19] 王念秦, 薛瑶琼, 李少兵, 等. 基于粗糙集理论的泥石流易发性综合评判模型[J]. 水土保持研究, 2014, 21(3): 246-250.
- WANG Nianqin, XUE Yaoqiong, LI Shaobing, et al. Debris flow liability comprehensive evaluation model on rough set theory [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(3): 246-250.
- [20] 薛喜成. 秦岭典型矿山泥石流发育规律及环境效应研究[D]. 西安科技大学, 2008.
- XUE Xicheng. Research on the development law and environmental effect of typical mine debris flow in Qinling mountains [D]. Xi'an University of Science and Technology, 2008.