

高峰, 高宇旭, 周科平. 基于 RES - 云模型的采空区稳定性评价研究[J]. 灾害学, 2019, 34(1): 17 - 21, 26. [GAO Feng, GAO Yuxu and ZHOU Keping. Goaf Stability Evaluation Based on RES-Cloud Model and Analysis[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(1): 17 - 21, 26. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.01.004.]

基于 RES - 云模型的采空区稳定性评价研究^{*}

高峰, 高宇旭, 周科平

(中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 针对采空区稳定性评价中评价指标间交互作用机制分析不足的问题, 提出了基于 RES(Rock Engineering System) - 云模型的采空区稳定性二维评价方法。选取了 15 个采空区稳定性评价指标, 基于 RES 理论, 通过建立评价指标交互作用矩阵, 分析评价指标间的相互作用, 确定了各个评价指标的权重; 应用云模型理论计算隶属于不同等级的各指标云模型参数, 以指标等级云图的方式进行直观表现, 计算样本综合等级隶属度; 根据最大综合隶属度原则确定采空区的稳定性等级, 引入模糊熵作为第二维评判参量, 表征采空区稳定性的复杂程度。最后, 将该模型应用于云南某锡矿 8 个采空区稳定性评价中, 验证了该评价模型的可行性。

关键词: 采空区; 稳定性评价; 云模型; RES 理论; 模糊熵

中图分类号: X913.4; 45 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000 - 811X(2019)01 - 0017 - 06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.01.004

采空区是地下矿山主要危险源之一, 严重威胁矿山的安全生产, 常引起空区坍塌、大面积冒落及形成空区积水而造成工作面透水事故, 造成人员伤亡和设备损失。因而, 开展采空区稳定性评价和灾害预测具有重要意义。

采空区稳定性受到诸多因子的共同影响, 其稳定性评价一直是采空区防治研究的一个难点和热点问题。关于采空区稳定性评价方法方面, 主要包括单一理论的应用, 如突变级数法理论^[1-2]、贝叶斯判别理论^[3]、物元可拓分析理论^[4]、模糊集对比分析理论^[5]等; 或多种理论结合运用进行评价, 如粒子群算法和支持向量机算法^[6]、模糊综合评判与数值模拟相结合^[7]等。虽然已经取得了一定的成果, 但目前的评价方法较少考虑采空区稳定性影响因子之间的相互作用关系, 因而其评价结果的准确性仍有待提高。

鉴于此, 本文基于 RES 与云模型理论, 探讨采空区稳定性评价的新方法。云模型作为定性定量转换的不确定性模型, 能综合考虑评价过程中评价指标存在的模糊性与随机性, 实现定性语言与定量数值间的自然转换^[8]。同时应用 RES 方法在求取影响因素权重的同时, 可考虑影响因素间的互相作用, 对采空区的稳定性进行更可靠的评价, 为采空区的安全管理提供更有依据。

1 采空区稳定性评价指标体系

采空区稳定性的影响因素众多, 基于现场调

查、地质调查和采空区稳定性指标体系的有关研究^[9-13], 将采空区稳定性划分为 I、II、III、IV 级四个等级, 分别表示极稳、稳固、中稳、不稳。从宏观($X_1, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{14}$)、内部细观特征($X_2, X_3, X_6, X_{12}, X_{13}$)和围岩性能(X_4, X_5, X_{15})三个方面选取 15 个评价指标, 参考相关文献^[9-13], 将对应的指标划分为四个等级(表 1)。

2 采空区稳定性评价 RES - 云模型

2.1 RES 模型的综合评价方法

RES 方法是从确定研究对象的各影响因素开始, 利用二元作用机理分析各因素之间的作用关系, 采用交互作用矩阵对复杂的系统形态加以描述。通过对交互作用矩阵的非对角元素进行编码, 并根据矩阵分析结果, 实现系统主要因素的识别和重要性(即权重)的评估^[14]。

图 1 为多位交互矩阵($N \times N$)的编码, 包涵 N 个影响元素。其中, 非对角线上的元素 I_{ij} 与 I_{ji} 分别表示 P_i 对 P_j 、 P_j 对 P_i 的影响, P_i 所在行的其他元素之和表示 P_i 对其余元素的影响, 称为原因 C_i ; 所在列的其他元素之和表示其他元素对 P_i 的影响, 称为效果 E_i 。通过求取每个元素 $C_i + E_i$, 可以得到各影响因素的重要程度。建立二维坐标系, 绘制每个元素的坐标值(C_i, E_i), 构建元素因果图, 研究各影响因素间的作用关系。并通过式(1)计算 P_i 的权重 w_i 。

^{*} 收稿日期: 2018 - 06 - 04 修回日期: 修改日期: 2018 - 08 - 01

基金项目: 国家自然科学基金(51474252); 中南大学中央高校基本科研业务费专项资金资助(2018zzts760)

第一作者简介: 高峰(1981 -), 湖南怀化人, 博士, 副教授, 主要从事矿山开采、灾害机理与防治方面的研究。

E-mail: csugaofeng@126.com

表 1 评判指标分级标准

分组	评判指标	I 级	II 级	III 级	IV 级
定量指标	采空区规模 $X_1/\text{万 m}^3$	$0 \leq X_1 \leq 0.5$	$0.5 < X_1 \leq 1.0$	$1.0 < X_1 \leq 5.0$	$X_1 > 5.0$
	暴露面积 X_2/m^2	$0 \leq X_2 \leq 800$	$800 < X_2 \leq 1200$	$1200 < X_2 \leq 2700$	$X_2 > 2700$
	埋深 X_3/m	$0 \leq X_3 \leq 100$	$100 < X_3 \leq 200$	$200 < X_3 \leq 300$	$X_3 > 300$
	岩石抗压强度 X_4/MPa	$X_4 > 200$	$100 < X_4 \leq 200$	$50 < X_4 \leq 100$	$0 < X_4 \leq 50$
	RQD 值 X_5	$90 < X_5 \leq 100$	$60 < X_5 \leq 90$	$30 < X_5 \leq 60$	$0 < X_5 \leq 30$
	高跨比 X_6	$X_6 > 1$	$0.5 < X_6 \leq 1$	$0.33 < X_6 \leq 0.5$	$0 \leq X_6 \leq 0.33$
评分值		10	(6, 9]	(3, 6]	[0, 3]
定性指标	开采扰动影响 X_7	开采范围无爆破作业影响	开采范围采场作业影响较小	开采范围采场作业影响较大	开采范围采场作业影响很大
	相邻空区分布 X_8	影响范围内无其他采空区	相邻采空区少且体积小	相邻采空区分布较为分散	相邻近的采空区多且体积大
	工程布置 X_9	运输、采准、切割巷道及采场布置合理, 充分考虑采场稳定性	运输、采准、切割巷道及采场布置较合理, 考虑了采场稳定性	运输、采准、切割巷道及采场布置不合理, 没有考虑采场稳定性	运输、采准、切割巷道及采场布置极不合理
	水文因素 X_{10}	无淋水	围岩可见水迹	雨季有淋水	长期淋水
	地质构造 X_{11}	无断层、褶皱构造	断层和褶皱构造少	断层部分切割或褶皱影响大	断层贯穿围岩和矿体
	围岩支护 X_{12}	支护合理	支护一般	支护不合理	无支护
	顶板特征 X_{13}	无顶板沉降、开裂变形、垮塌现象	顶板整体相对完整, 无明显开裂、变形	局部出现顶板沉降、开裂变形、垮塌	顶板整体沉降、开裂变形、垮塌现象
	地表特征 X_{14}	无地表移动变形	地表移动变形不明显	地表出现移动变形、明显沉降	地表移动变形明显、出现地表塌陷
	岩体结构 X_{15}	节理裂隙不发育	节理裂隙一般发育	节理裂隙较发育	节理裂隙十分发育

$$w_i = \frac{(C_i + E_i)}{\sum_{i=1}^n (C_i + E_i)} \times 100\% \quad (1)$$

$$\begin{cases} E_x = (a + b)/2; \\ E_n = (b - a)/6; \\ h_e = k. \end{cases} \quad (3)$$

P_1			i 列: 其他因素对 P_i 的影响	$C_i = \sum_{j=1}^n l_{ij}$
		P_i		
i 行: P_i 对其他因素的影响			P_n	
效果 $E_i = \sum_{j=1}^n l_{ij}$				

图 1 RES 交互作用矩阵

2.2 云模型的模糊综合评价方法

设 U 是用精确数值表示的论域, $x \in U$, C 是论域 U 上的定性概念, 任意定量值 x 在定性概念 C 上都有且只有一个对应的隶属度 $\mu_c(x)$, 且 $\mu_c(x) \in [0, 1]$, $\mu_c(x)$ 是一个具有稳定倾向的随机数。隶属度 $\mu_c(x)$ 在论域 U 上的分布称为云^[15-16]。

$$\mu_c(x) \in [0, 1] \forall x \in U, x \rightarrow \mu_c(x). \quad (2)$$

期望 E_x , 熵 E_n , 超熵 H_e 是云模型理论的 3 个参数。若指标等级标准具有双边界限, 如 $x \in (a, b)$, 则其云模型参数计算式如下:

式中: k 为常数, 可以根据评语集的模糊熵进行调整。若指标等级标准只有单边界限, 如, $x \in (a_j, +\infty)$, 可先根据数据的上限或下限, 确定其缺省的期望值, 也可采用式(3)计算。单边界限情况下采用半云描述。

正向云发生器: 若 x 满足 $x \sim N(E_x, E_n'^2)$, 其中 $E_n' \sim N(E_x, E_n^2)$, 则

$$\mu_c(x) = \exp[-(x - E_x)^2 / 2(E_n')^2]. \quad (4)$$

当 x 已知, 结合云数字特征, 运用式(4)进行计算即可得云滴 $\text{drop}(x, \mu)$ 。

采空区稳定性风险评价因子云模型数字特征确定后, 运用正向正态云发生器, 将影响采空区稳定性评价的 15 个评价指标生成相对应的云模型, 定性指标 $X_7 \sim X_{15}$ 因等级划分与评分机制均相同, 故其等级风险云图均相同, 故而选取部分($X_1 \sim X_9$)等级风险云图列如图 2。图 2 中, 横坐标对应不同影响因子的定量取值, 纵坐标代表云模型中云滴对应某一风险等级的确定度。通过以上“云化”方式, 将不同安全评价语言转化为统一的评语标准, 15 个风险指标的危险性可以通过“低度风险”、“中度风险”、“高度风险”、“极高风险”这 4 个评语等级来描述, 同时云模型也可体现其量化特

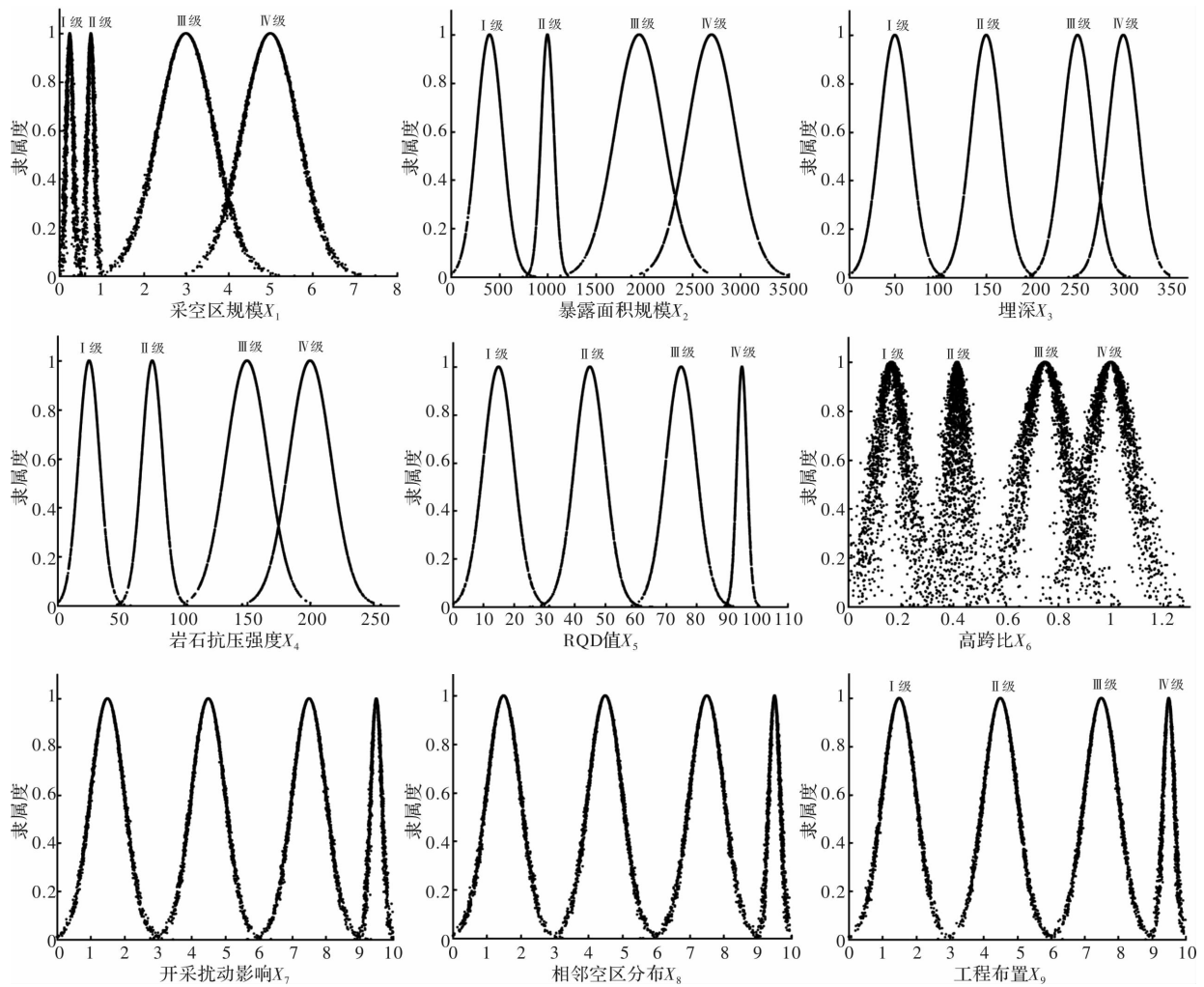


图2 评价指标等级云图

征,在此前提下,综合二级评语层各指标的评价结果,可确定采空区稳定性等级状况。

引入模糊熵理论^[12],进一步表示采空区稳定性的复杂程度,实现从稳定性等级和复杂程度两个纬度对采空区进行评价,并得到最终的二维评价结果 (L, E) 。模糊熵 E 计算过程如下:

$$E = m \sum_{i=1}^n [\mu_i \ln \mu_i + (1 - \mu_i) \ln (1 - \mu_i)]; \quad (5)$$

$$m = -\frac{1}{\ln [(n-1)^{1-n} n^n]} \quad (6)$$

式中: n 是总等级数, $i=1, 2, \dots, n$; μ_i 是采空区稳定性对应等级 i 的隶属度; m 是标准化系数,由式(5)和(6)计算即可得到综合隶属度向量的复杂度。依据上述模糊熵公理,现将等级综合评价结果的复杂度与模糊熵 E 的对应关系规定为: $[0, 0.25]$, $(0.25, 0.50]$, $(0.50, 0.75]$, $(0.75, 1]$,依次对应模糊性较低、模糊性一般、模糊性较高、模糊性极高。对于模糊性较低或者模糊性一般的采空区,即各评判指标隶属等级相差不大,表示该采空区稳定性复杂度较低;而对于模糊性较高或者模糊性极高的采空区,即各评判指标隶属等级相差较大,表示该采空区稳定性复杂度较高。

2.3 RES - 云模型的综合评价方法

将RES模型和云模型融合,在得到较为客观的权重的同时,充分考虑各个元素之间的影响作用;运用云模型理论,构建隶属度模型可以降低评价过程中的模糊性和随机性影响,得到更为可信的评价结果。

3 工程实例

本文将该方法应用于云南锡业集团下属矿山复杂空区群稳定性评价,对该评价体系进行验证。根据前期的空区探测与工程地质调查等工作,获得了8个采空区的实测指标值(表2)。

应用专家打分法对交互矩阵进行打分,综合多名专家的打分表,得到最终评分交互矩阵,如表3所示。可以看出,绝大多数评价指标两两之间均存在复杂相互作用关系。依据表3的专家评分交互矩阵,将每一行的作用数值加和得到原因参数 C_i ,将每一列的作用数值加和得到效果参数 E_i ,加和 E_i 与 C_i 得到每个评价指标的影响强度, C_i 减 E_i 得到每个评价指标的优势度参数,利用公式(1)得到每个指标的权重系数,如表4所示。

表 2 样本评价指标实测值

空区 编号	采空区稳定性评价指标														
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}
1	1.656	2070	350	60	40	0.35	4	2	7	4	7	6	7	10	6
2	2.36	2950	350	60	40	0.20	6	3	7	4	7	4	6	10	6
3	3.592	4490	350	60	40	0.17	6	7	7	6	7	5	6	10	6
4	0.58	290	350	60	40	3.10	3	8	7	4	5	6	6	10	6
5	1.012	2863	300	55	35	0.17	3	7	6	4	7	6	6	9	6
6	1.012	2530	350	60	40	0.83	2	7	7	4	7	6	1	10	4
7	2.85	1900	350	60	40	0.60	3	10	7	4	4	6	1	10	4
8	0.525	750	350	60	40	0.58	2	10	7	6	6	4	2	10	4

表 3 专家评分交互矩阵

采空区稳定性评价指标															
X_1	4	1	0	0	2	0	1	1	0	0	3	4	3	0	
4	X_2	0	1	0	2	3	0	1	0	0	2	3	3	0	
0	0	X_3	2	0	1	1	0	1	2	1	2	2	1	0	
3	3	2	X_4	0	2	1	0	0	0	2	3	3	2	2	
2	2	2	2	X_5	3	1	0	0	0	1	1	2	1	2	
2	3	0	0	0	X_6	1	1	0	0	0	4	3	0	0	
1	2	1	0	0	2	X_7	1	1	0	0	2	1	0	0	
1	1	0	0	0	1	0	X_8	1	0	0	1	0	0	0	
0	0	0	0	0	1	1	1	X_9	1	0	1	0	0	0	
1	1	0	0	0	0	1	0	0	X_{10}	0	1	2	0	1	
3	3	1	4	3	2	0	0	2	0	X_{11}	3	2	0	1	
0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	X_{12}	3	1	0	
2	2	1	0	0	1	1	0	0	0	0	2	X_{13}	2	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X_{14}	0	
1	1	0	2	2	1	1	0	0	0	3	2	2	1	X_{15}	

表 4 评价指标各项参数值

评价指标	C	E	$C-E$	$C+E$	w_i
采空区规模 X_1 /万 m^3	19	20	-1	39	0.101
暴露面积 X_2/m^2	19	22	-3	41	0.106
埋深 X_3/m	13	8	5	21	0.054
岩石抗压强度 X_4/MPa	23	11	12	34	0.088
RQD 值 X_5	19	5	14	24	0.062
高跨比 X_6	14	19	-5	33	0.085
开采扰动影响 X_7	11	12	-1	23	0.060
相邻空区分布 X_8	5	5	0	10	0.026
工程布置 X_9	5	7	-2	12	0.031
水文因素 X_{10}	7	3	4	10	0.026
地质构造 X_{11}	24	7	17	31	0.080
围岩支护 X_{12}	7	27	-20	34	0.088
顶板特征 X_{13}	11	27	-16	38	0.098
地表特征 X_{14}	0	14	-14	14	0.036
岩体结构 X_{15}	16	6	10	24	0.062
总计	193	193	0	386	1

以表 4 中的原因 C 、效果 E 分别为横纵坐标,得到采空区稳定性评价指标间的作用-效果($C-E$)图,如图 3 所示。每个指标在作用-效果坐标系中的位置表明了指标间的交互作用模式,指标坐标位

于 $C-E$ 线以下说明该指标具有较强的优势参数,位于 $C-E$ 线以上的指标具有较次的优势参数。由图 3 可知,最大优势参数是地质构造,其对采空区稳定性的影响最大;最小优势参数为地表特征,结合表 3 可知,地表特征主要受到其他评价指标的作用,而没有对其他评价指标产生影响作用。

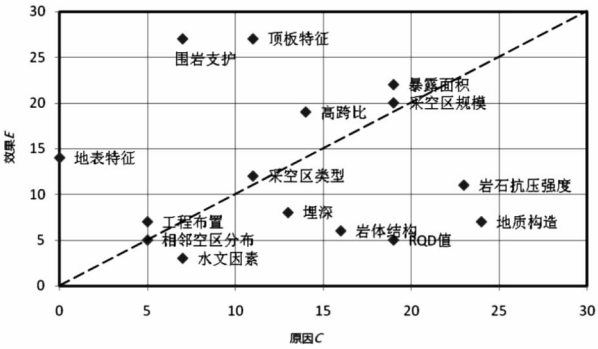


图 3 采空区稳定性评价模型评价指标 $C-E$ 图

图 4 显示每个评价指标的相互作用强度,其中暴露面积 X_2 、采空区规模 X_1 、顶板特征 X_{13} 、岩石抗压强度 X_4 和围岩支护 X_{12} 对采空区稳定性影响较大。这些指标的微小变化能对采空区的稳定性产生较大的影响。

表 5 采空区稳定性评价结果

采空区样本	C_I	C_{II}	C_{III}	C_{IV}	E	评价结果
1	0.036612	0.002302	0.170483	0.020512	0.503172	(III, 模糊性较高)
2	0.036622	0.001222	0.121862	0.234055	0.246489	(IV, 模糊性较低)
3	0.036871	0.001508	0.213238	0.095544	0.684792	(III, 模糊性较高)
4	0.112061	0.038754	0.037568	0.000681	0.578883	(I, 模糊性较高)
5	0.323927	0.033813	0.087439	0.000407	0.479121	(I, 模糊性一般)
6	0.079318	0.116644	0.33868	0.010842	0.522844	(III, 模糊性较高)
7	0.039077	0.461854	0.334862	0.001262	0.767968	(II, 模糊性极高)
8	0.097155	0.149132	0.330612	0.004082	0.530388	(III, 模糊性一般)

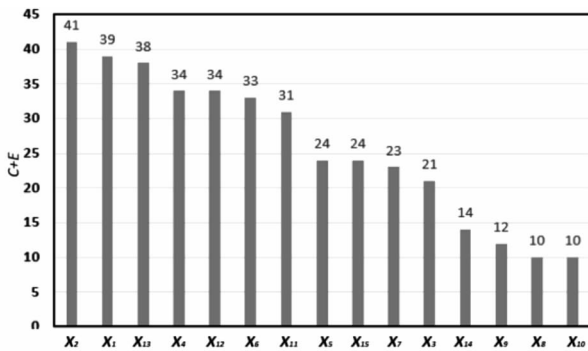


图 4 采空区稳定性评价模型评价指标影响强度

将表 2 中的实测数据应用于云模型计算中, 通过式(3)求取云模型的三个参数(E_x , E_n , H_e)。将该三个参数带入式(4), 计算出样本中各个评价指标对于四个稳定性等级的隶属度, 结合求得的评价指标权重, 求出采空区样本对于各个稳定性等级的综合隶属度。根据最大综合隶属度原则确定每个采空区样本的稳定性级别, 通过式(5)、式(6)计算评判样本综合隶属度的模糊熵, 以进一步反映采空区稳定性的复杂度, 最终的评价结果详见表 5。

4 结论

(1) 选取了 15 个影响采空区稳定性的评价指标, 引入 RES 理论, 采用专家打分法, 建立了采空区稳定性多因子交互作用矩阵, 反应了各个评价指标之间的复杂作用关系。

(2) 对采空区稳定性多因子交互作用矩阵进行分析, 得到评价指标的 $C-E$ 坐标图与影响强度图, 表明对采空区稳定性影响最大的评价指标分别为暴露面积、采空区规模、顶板特征、岩石抗压强度强度和围岩支护; 评价指标内地质构造成为最大优势参数, 其对采空区稳定性系统的影响最大; 最小优势参数为地表特征, 地表特征以受到其他评价指标的作用为主, 而对其他评价指标没有影响作用。

(3) 引入了模糊熵对同稳定性等级的采空区进行了进一步评价, 反映了采空区稳定性的复杂度, 使评价结果更具有参考价值。

参考文献:

- [1] 陈娇, 罗周全, 侯造水. 基于改进突变级数法的金属矿采空区稳定性评价[J]. 中国安全生产科学技术, 2013, 9(11): 17-24.
- [2] 王新民, 柯愈贤, 鄢德波, 等. 基于熵权法和物元分析的采空区危险性评价研究[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(6): 71-78.
- [3] 吴启红, 万世明, 彭文祥. 一种多层采空区群稳定性的综合评价法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(6): 2324-2330.
- [4] ZHOU Jian, LI Xibing, Mitri S, et al. Identification of large-scale goaf instability in underground mine using particle swarm optimization and support vector machine[J]. International journal of mining science and technology, 2013, 23(5): 701-707.
- [5] HU Jianhua, SHANG Junlong, ZHOU Keping, et al. Hazard degree identification of goafs based on scale effect of structure by RS-TOPSIS method[J]. Journal of Central South University, 2015, 22(2): 684-692.
- [6] 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.
- [7] 刘涛. 基于 AHP-Fuzzy 法的采空区危险性评价[J]. 有色金属(矿山部分), 2016(5): 49-52.
- [8] 科平, 田勇刚. 基于因子交互作用矩阵的采空区危险度评价研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(10): 107-112.
- [9] 汪朝, 郭进平, 王李管. 采空区危险性的支持向量机识别[J]. 重庆大学学报, 2015, 38(4): 85-90, 127.
- [10] 冯岩, 王新民, 程爱宝, 等. 采空区危险性评价方法优化[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(7): 2881-2888.
- [11] 杜坤, 李夕兵, 刘科伟, 等. 采空区危险性评价的综合方法及工程应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(9): 2802-2811.
- [12] HUDSON J. Rock engineering systems. Theory and Practice[M]. Ellis Horwood Limited Publisher, 1992.
- [13] LIU Zaobao, SHAO Jianfu, XU Weiya. Comprehensive stability evaluation of rock slope using the cloud model-based approach[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(6): 2239-2252.
- [14] 魏博文, 黄海鹏, 徐镇凯. 基于云模型和组合赋权的岩体质量二维评价模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(S1): 3092-3099.
- [15] 丁世飞, 朱红, 许新征, 等. 基于熵的模糊信息测度研究[J]. 计算机学报, 2012, 35(4): 796-801.
- [16] 李晓超, 钟登华, 任炳显, 等. 基于模糊 RES-云模型的坝基岩体可灌性评价研究[J]. 水利学报, 2017, 48(11): 1311-1323.

(下转第 26 页)