

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2022.06.013

基于多理论模糊联合法的矿洞安全风险评价

吴波^{1,2,3}, 张尧¹, 刘聪¹

(1. 东华理工大学 土木与建筑工程学院, 江西 南昌 330013; 2. 广州城建职业学院 建筑工程学院, 广东 广州 510925;
3. 宁波工程学院 建筑与交通工程学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 将 RSR 理论引入矿洞稳定性的风险评估中, 选取反熵权法对各指标权重进行计算, 对逼近理想解排序法 (TOPSIS)、秩和比法 (RSR) 分别进行加权计算, 充分利用两种方法的各自优势, 通过模糊联合对评价对象进行综合决策分析, 提高评价结果的准确性, 构建完整的改进 TOPSIS 法和 RSR 法模糊联合风险评价模型, 并选取 11 个隐患点样本进行风险排序, 研究结果表明: 整体样本一致率达到 90.9%, 与专家评价结果基本相同, 验证了评价模型的可靠性, 为解决类似工程提供参考。

关键词: 矿洞风险评价; 反熵权法; 逼近理想解排序法; 秩和比法; 模糊联合

中图分类号: U4538

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2022)06-0587-07

Safety risk assessment of mine adit based on multi-theory fuzzy joint method

WU Bo^{1,2,3}, ZHANG Yao¹, LIU Cong¹

(1. School of Civil and Architectural Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;
2. School of Architectural Engineering, Guangzhou City Construction College, Guangzhou 510925, China;
3. School of Architectural and Traffic Engineering, Ningbo University of Technology, Ningbo 315211, China)

Abstract: The RSR theory was introduced into the risk assessment of mine adit stability, the anti-entropy method was selected to calculate the weight of each index, and then the approximate ideal solution ranking method (TOPSIS) and rank sum ratio method (RSR) were calculated respectively. By making full use of the respective advantages of the two methods through fuzzy combination, comprehensive decision analysis was made of the evaluation object and the accuracy was improved of the evaluation results. A complete fuzzy joint risk evaluation model based on improved TOPSIS and RSR methods was constructed, and 11 samples of hidden danger points were selected for risk ranking. Research results show that the overall sample consistency rate is 90.9%, which is basically the same as the expert evaluation results. The reliability of the evaluation model is verified, which provides reference for solving similar projects.

Keywords: mine adit risk assessment; anti-entropy method; approximate ideal solution sorting method; rank sum ratio method; fuzzy union

资源开采是社会经济发展的基础, 为了满足
市场需求, 对矿产资源的开采力度逐渐加大, 由于
大多为地下开采, 故遗留了大量地下废弃矿洞。
资源开采过程破坏了矿体原始应力分布平衡, 导
致岩体局部应力集中, 从而直接影响矿山巷道及

矿洞的稳定性, 随着时间的推移而造成片帮、冒
顶、落石、掉块、大变形、涌水、突泥、断面突变失稳
等一系列矿山灾害, 制约矿山资源安全、旅游开发
的发展。因此, 对废弃矿洞进行安全风险评价, 并
做出相应的加固措施, 对矿洞遗迹的保护与旅游

开发有着重要的意义。

目前对矿硐风险评估采用的基本是多指标综合分析方法,如灰色关联度^[1]、逼近理想解排序法^[2]、突变理论^[3]、粗糙集^[4]、神经网络^[5]、云模型理论^[6]、物元可拓分析理论^[7]、未确知测度理论^[8]等单一理论或多种理论结合的方法,在地下采空区、矿硐方面的风险研究已卓有成效。但本文所研究的实际工程,其勘测的隐患点多为高危、风险等级相似的矿硐局部区域,单一对其进行风险等级评估,是难以做出准确的风险评判与针对性应急加固措施。因此,本文将 RSR 理论^[9-10]引入矿硐稳定性的风险评估中,选取反熵权法^[11]对各指标权重进行计算,再对 TOPSIS、RSR 分别进行加权计算,通过模糊联合充分利用两种方法各自的优

势,对评价对象进行综合决策分析,建立改进 TOPSIS 法^[12-14]和 RSR 法模糊联合风险评价模型。

1 矿硐安全风险评价指标体系

矿硐稳定性的影响因素是多方面的,本文基于专业人员的现场调查、地质勘探以及采空区、矿硐等相关论文^[15-17]的研究,将明硐矿硐的相应评价指标的安全风险等级确定为 I、II、III、IV 级,风险大小依次从小到大,确定以岩石质量指标、埋深、高度、跨度、跨高比、顶板面积等定量指标与顶板特征、相邻空区分布、工程布置、节理裂隙、水文因素、地下水对围岩的影响、地质构造、岩体结构等定性指标的 14 个风险评价指标,建立明硐矿硐安全风险评价指标体系,如表 1。

表 1 矿硐安全风险评价指标体系
Tab.1 Index system of safety risk assessment of mine tunnels

评价指标		I	II	III	IV
定量指标	岩石质量指标/%(X ₁)	60~100	50~60	40~50	0~40
	埋深/m(X ₂)	400~1 000	200~400	100~200	0~100
	最大高度/m(X ₃)	0~8	8~20	20~30	30~50
	最大跨度/m(X ₄)	40	40~80	80~120	120~200
	平均跨高比(X ₅)	<1	1~2	2~3	3~10
	顶板面积/m ² (X ₆)	<800	800~1 200	1 200~2 700	2 700~8 000
定性指标	顶板特征(X ₇)	无顶板沉降、开裂变形、垮塌现象	顶板整体相对完整	顶板局部出现沉降、开裂变形、垮塌现象	顶板整体出现沉降、开裂变形、垮塌现象
	相邻空区分布(X ₈)	孤立空区	相邻空区少且相邻较近	相邻空区多,局部连通	空区多且相互连通
	工程布置(X ₉)	矿柱布置规范	矿柱布置不规范	无矿柱或布置不规范	无矿柱或矿柱严重损坏
	节理裂隙(X ₁₀)	不发育	一般发育	较发育	发育
	水文因素(X ₁₁)	无淋水	渗水、潮湿	局部有淋水	局部有跌水
	地下水对围岩的影响(X ₁₂)	无影响	较小的潜蚀和破坏作用	较大的潜蚀和破坏作用	严重的潜蚀和破坏作用
	地质构造(X ₁₃)	无断层、褶皱	褶皱	部分切割	贯穿围岩
	岩体结构(X ₁₄)	完整块状	层状结构	碎裂结构	松散结构

2 安全隐患评估模型

2.1 反熵权改进 TOPSIS 法

熵权法原理,评价指标对评价结果的影响程度用熵值表示,影响程度越大,熵值越小,对应的该指标对评价体系的权重就越大。在计算权重

时,熵权法会因对指标无序程度敏感度过大或过小而出现个别权重分配极端情况。而反熵权法计算得到的权重反差较小,可以避免出现这种情况。

逼近理想解排序法(TOPSIS)基本原理,通过对原始数据进行同趋势化和归一化处理,找出多目标中最优目标和最劣目标,计算欧氏距离,获得

各指标值与理想解的接近程度并进行排序。

1) 构建初始矿硐安全判断矩阵, m 为评价对象数量, n 为待评价指标, $A = (a_{ij})_{mn}$ 为初始数据矩阵。

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

2) 初始数据标准化处理。若 b_{mn} 是逆向指标 (即越小越优型指标) 如式(2) 处理, 若 b_{mn} 是正向指标 (即越大越优型指标) 如式(3) 处理。

$$b_{mn} = \frac{\max_n(a_{mn}) - a_{mn}}{\max_n(a_{mn}) - \min_n(a_{mn})} \quad (2)$$

$$b_{mn} = \frac{a_{mn} - \min_n(a_{mn})}{\max_n(a_{mn}) - \min_n(a_{mn})} \quad (3)$$

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{m1} & \cdots & b_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

3) 计算第 n 个评价指标的反熵值 E_j

$$E_j = - \sum_{i=1}^m x_{ij} \ln(1 - x_{ij}) \quad (5)$$

$$x_{ij} = b_{ij} / \sum_{i=1}^m b_{ij} \quad (6)$$

4) 在反熵值基础上, 计算各指标的客观权重

$$\omega_j = E_j / \sum_{j=1}^n E_j \quad (7)$$

5) 计算加权矩阵

$$C_{ij} = B_{ij} \omega_j \quad (8)$$

6) 确定正、负理想方案 C_{\pm} , 即每列最大值或最小值组成的向量

$$C_j^{\pm} = [\max_{1 \leq i \leq m} \{c_{ij}\}], [\min_{1 \leq i \leq m} \{c_{ij}\}] \quad (9)$$

7) 确定欧氏距离, 即计算评价对象到最优方案、最劣方案的距离。

$$D_i^{\pm} = \left[\sum_{j=1}^n (c_{ij} - c_j^{\pm})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

8) 确定评价对象到最优方案的相对贴近度 S_i

$$S_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (11)$$

2.2 反熵权改进 RSR 法

RSR 法的基本思想是 s 个评价对象 t 个评价指标中, 通过秩转换对指标进行编秩得到无量纲

统计量 RSR, 依据 RSR 数值对各评价指标的评价对象进行排序, 正向指标从大到小排序, 逆向指标从小到大排序, 相同值者取序秩的平均秩, RSR 计算方法如下:

$$RSR = \frac{\sum_{j=1}^t R_{st}}{s \times t} \quad (12)$$

由于本文各评价指标的权重不一致, 需对各评价对象计算加权秩和比 WRSR, 计算方法如下:

$$WRSR = \frac{1}{s} \sum_{j=1}^t \omega_j R_{ij} \quad (13)$$

2.3 TOPSIS 法和 RSR 法模糊联合

TOPSIS 法和 RSR 法均为多指标决策方法, TOPSIS 法更加适用于定量指标的计算, 能够充分利用原始数据计算处理, 从而得到更加准确直观的量化结果, 但是会出现易受部分极端值影响, 导致灵敏度不高的问题。RSR 法通过编秩的方法可以消除极端值所带来的影响, 但是用编秩的方法代替指标数值会影响数据准确性, 造成数据信息丢失。因此本文选取范炤的模糊集理论^[10], 对 TOPSIS 计算得到的 S_i 值和 RSR 值赋权重, 设两者权重 $W_1 : W_2$, 将两者分为 $1 : 0, 0.1 : 0.9, 0.5 : 0.5, 0.9 : 0.1, 0 : 1$ 五档, 通过计算得到 TOPSIS 法和 RSR 法模糊联合数值并进行排序, 依据“择多原则”选择最优对象和最劣对象, 对于综合评价废弃明矾矿硐的安全风险, 有很好的指导作用。

3 工程实例

3.1 数据处理

将反熵权改进 TOPSIS 法和 RSR 法模糊联合评价模型代入温州矾山废弃明矾矿硐进行安全风险评价。通过现场调查、勘查资料等前期工作, 得到矿硐里 11 个隐患点的实测数据, 代入模型进行风险评价。

通过式(2)~(3)对矿硐隐患点实测的原始数值进行同趋化和归一化处理, 结果如表 2。

3.2 反熵权法计算权重

将表 2 中的数据代入式(5)~(6)计算, 得到各个评价指标的反熵值, 再由式(7)计算得到各评价指标的权重值, 结果如表 3。

表 2 明矾矿实测值标准化处理

Tab.2 Standardization of measured values of alum mine tunnels

隐患点	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}
I ₁	0.90	0.23	1.00	1.00	0.89	0.95	0.0	0.00	0.67	1	1.0	1.0	1.00	1
I ₂	1.00	0.81	0.17	0.67	0.92	0.89	0.5	0.67	0.67	1	1.0	0.0	0.33	1
I ₃	0.77	1.00	1.00	0.71	0.52	0.67	1.0	0.67	1.00	1	0.5	0.0	1.00	1
I ₄	1.00	0.23	0.44	0.78	0.92	1.00	1.0	1.00	1.00	1	0.0	1.0	0.33	1
I ₅	0.83	0.00	0.86	0.14	0.00	0.00	0.0	0.67	0.67	1	0.5	0.5	1.00	1
I ₆	0.67	0.05	0.00	0.67	0.97	0.95	1.0	0.67	0.00	1	0.0	0.5	1.00	1
I ₇	0.33	0.70	0.58	0.67	0.77	0.71	1.0	1.00	0.67	1	1.0	0.5	0.33	1
I ₈	0.50	0.32	0.72	0.98	1.00	0.93	1.0	0.67	0.67	1	1.0	0.5	0.67	1
I ₉	0.33	0.44	0.17	0.00	0.49	0.82	1.0	0.67	0.67	1	0.5	0.5	0.00	0
I ₁₀	0.00	0.95	0.78	0.38	0.36	0.64	1.0	1.00	0.67	1	1.0	1.0	0.33	0
I ₁₁	0.17	1.00	0.58	0.62	0.73	0.78	1.0	0.67	0.67	1	0.0	0.5	0.33	0

表 3 熵值权重

Tab.3 Entropy weight

熵值权重	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}
E_j	0.127 8	0.147 2	0.129 5	0.120 8	0.114 7	0.107 9	0.121 4	0.109 9	0.109 2	0.095 3	0.147 0	0.134 7	0.134 9	0.133 5
ω_j	0.073 7	0.084 9	0.074 7	0.069 7	0.066 2	0.062 2	0.070 0	0.063 4	0.063 0	0.055 0	0.084 8	0.077 7	0.077 8	0.077 0

3.3 改进 TOPSIS 法评价结果

将表 3 所求得的权重值对标准化矩阵进行加权处理,通过式(9)~(11)计算得到对最优方案的贴进度,因后续与秩和比法的模糊联合计算过程中的数值大小排序方式要求一致,所以此处选择计算与最劣方案的贴进度, S_i 值结果在 0 ~ 1 之间,值越接近 0,代表风险越小,越接近 1,代表风险越大,11 个隐患点风险评价的 S_i 值结果如表 4。

表 4 11 个隐患点风险评价的 S_i 值

Tab.4 S_i values of risk assessment of 11 hidden danger points			
隐患点	D_i^+	D_i^-	S_i
I ₁	0.016 6	0.033 1	0.334 6
I ₂	0.019 6	0.028 2	0.410 7
I ₃	0.016 0	0.031 6	0.337 0
I ₄	0.020 4	0.029 0	0.413 5

续表			
隐患点	D_i^+	D_i^-	S_i
I ₅	0.024 7	0.024 2	0.504 4
I ₆	0.025 6	0.024 8	0.508 4
I ₇	0.015 5	0.028 0	0.357 0
I ₈	0.014 8	0.029 4	0.334 9
I ₉	0.026 5	0.018 2	0.592 2
I ₁₀	0.019 6	0.029 2	0.401 8
I ₁₁	0.022 9	0.024 0	0.488 3

注: D_i^+ 表示第 i 个隐患点与最高等级风险的距离, D_i^- 表示第 i 个隐患点与最低等级风险的距离, S_i 表示第 i 个隐患点与最低等级风险的接近程度。

3.4 RSR 法评价结果

对原始数据编秩,对正向指标从大到小编秩,对逆向指标从小到大编秩,相同值者取序秩的平均秩,用公式(12)~(13)计算 11 个隐患点风险评价

的 $WRSR$ 值,取值范围 $0 \sim 1$,越接近 0 ,代表风险越小,越接近 1 ,代表风险越大,11 个隐患点风险评价的 $WRSR$ 值结果如表 5。

3.5 反熵权改进 TOPSIS 法和 RSR 法模糊联合评价

根据 2.3 所述模糊集理论,对 S_i 与 $WRSR$ 值

设置权重比例,进行分档计算,即 $S_i : WRSR = (1 : 0;0.1 : 0.9;0.5 : 0.5;0.9 : 0.1;0 : 1)$,得到各档结果并进行排序,整理各隐患点分档结果如表 6 和图 1。

表 5 11 个隐患点风险评价的 $WRSR$ 值
Tab.5 $WRSR$ values of risk assessment of 11 hidden danger points

隐患点	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	R_8	R_9	R_{10}	R_{11}	R_{12}	R_{13}	R_{14}	WRSR
I_1	0.22	0.76	0.11	0.07	0.33	0.12	0.74	0.70	0.41	0.60	0.25	0.16	0.19	0.35	0.46
I_2	0.11	0.34	0.71	0.45	0.20	0.31	0.63	0.44	0.41	0.60	0.25	0.82	0.66	0.35	0.57
I_3	0.37	0.13	0.11	0.28	0.53	0.56	0.32	0.44	0.09	0.60	0.59	0.82	0.19	0.35	0.49
I_4	0.11	0.68	0.60	0.21	0.26	0.06	0.32	0.13	0.09	0.60	0.85	0.16	0.43	0.35	0.44
I_5	0.29	0.93	0.22	0.70	0.73	0.68	0.74	0.44	0.41	0.60	0.59	0.50	0.19	0.35	0.67
I_6	0.44	0.85	0.82	0.45	0.13	0.19	0.32	0.44	0.69	0.60	0.85	0.50	0.19	0.35	0.62
I_7	0.63	0.42	0.49	0.35	0.40	0.50	0.32	0.13	0.41	0.60	0.25	0.50	0.66	0.35	0.55
I_8	0.52	0.59	0.37	0.14	0.07	0.25	0.32	0.44	0.41	0.60	0.25	0.50	0.43	0.35	0.48
I_9	0.63	0.51	0.71	0.77	0.60	0.37	0.32	0.44	0.41	0.60	0.59	0.50	0.86	0.77	0.73
I_{10}	0.81	0.25	0.30	0.63	0.66	0.62	0.32	0.13	0.41	0.60	0.25	0.16	0.66	0.77	0.60
I_{11}	0.74	0.13	0.49	0.56	0.46	0.44	0.32	0.44	0.41	0.60	0.85	0.50	0.66	0.77	0.67

注: $R_1 \sim R_{14}$ 表示 1 ~ 14 列指标的秩; $WRSR$ 表示加权秩和比。

表 6 基于反熵权改进 TOPSIS 法和 RSR 法模糊联合的 11 个隐患点风险评价排序结果
Tab.6 Ranking results of risk assessment of 11 hidden danger points based on fuzzy combination of improved TOPSIS method and RSR method with anti-entropy weight

隐患点	S_i	排序	WRSR	排序	$0.1WRSR + 0.9S_i$	排序	$0.5WRSR + 0.5S_i$	排序	$0.9WRSR + 0.1S_i$	排序
I_1	0.334 6	11	0.456 3	10	0.346 8	11	0.395 5	11	0.444 1	10
I_2	0.410 7	6	0.571 6	6	0.426 8	5	0.491 2	6	0.555 5	6
I_3	0.337 0	9	0.489 5	8	0.352 2	9	0.413 2	9	0.474 2	8
I_4	0.413 5	5	0.440 2	11	0.416 2	7	0.426 8	8	0.437 5	11
I_5	0.504 4	3	0.672 2	2	0.521 2	2	0.588 3	2	0.655 4	2
I_6	0.508 4	2	0.621 3	4	0.519 7	3	0.564 9	4	0.610 0	4
I_7	0.357 0	8	0.545 7	7	0.375 8	8	0.451 3	7	0.526 8	7
I_8	0.334 9	10	0.476 8	9	0.349 1	10	0.405 9	10	0.462 6	9
I_9	0.592 2	1	0.734 4	1	0.606 4	1	0.663 3	1	0.720 2	1
I_{10}	0.401 8	7	0.597 5	5	0.421 3	6	0.499 6	5	0.577 9	5
I_{11}	0.488 3	4	0.669 4	3	0.506 4	4	0.578 8	3	0.651 3	3

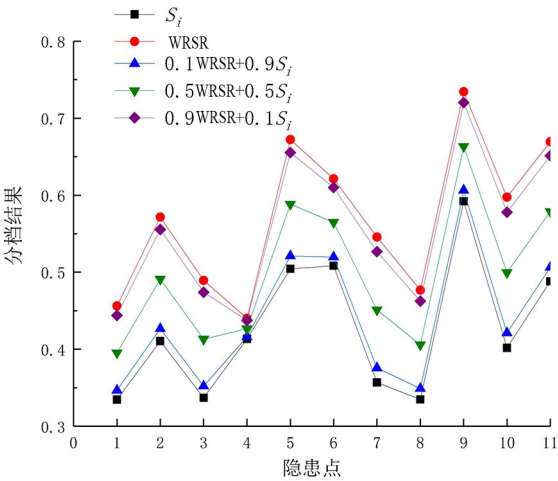


图 1 各隐患点分档结果

Fig.1 Grading results of each hidden danger point

3.5 结果分析

由表 6 和图 1 中的数据可知,依据“择多原则”选择隐患点排序为 I_9 、 I_5 、 I_{11} 、 I_6 、 I_{10} 、 I_2 、 I_7 、 I_4 、 I_3 、 I_8 、 I_1 ,从排序可知,在明矾矿硐风险较高的样本中,9 号、5 号、11 号、6 号、10 号、2 号、7 号隐患点是其中风险最严重的矿硐。

9 号的隐患原因是一断裂构造沿矿硐边界附近展布,对围岩产生切割破坏作用,流纹斑岩及混染岩无自稳能力,断裂构造为基岩导水构造,侧壁渗水较严重,易产生侵蚀软化,因此断裂构造附近存在崩落隐患,增加必要的支护措施加固围岩,防治可能发生的崩落隐患,另外还需要加强排水处理,以减少地下水侵蚀带来的病害影响。

5 号隐患是因为顶板次生开裂变形严重,顶板隐患总面积约占 2 430 m²,矿硐高度一般 3~7 m,地下水对节理裂隙、次生裂隙和层理构造等围岩结构面产生一定的潜蚀破坏作用,因此顶板围岩存在冒落及掉块隐患,要增加必要的支护措施加固围岩,防治可能发生的崩落隐患,另外需要加强排水处理,以减少地下水侵蚀带来的病害影响。

11 号隐患是因为矿硐局部见淋雨状出水,溜渣口见跌水现象,流量 600~800 mL/min,加之地下水对围岩结构面产生一定的潜蚀破坏作用,因此顶板围岩存在冒落及掉块隐患,需增加必要的支护措施加固围岩,防治可能发生的崩落隐患,另外需要加强排水处理,以减少地下水侵蚀带来的病害影响。

6 号隐患是因为顶板次生开裂密集带,局部

见掉块现象,底板坡顶贴近多个矿柱,易造成矿柱破坏失稳,测量控制点 D70 西侧约 20 m 处为较大矿柱,上层硐室地下水通过柱体,并从底端排出,最大流量>10 L/min,跌水现象严重,跌落噪声大,易造成冲刷破坏。

10 号、2 号和 7 号隐患点处地质情况相似,断裂构造沿采空区边缘地带展布,充填流纹斑岩,岩石易产生软化,属软质岩,局部见有泥化现象,锤击易散,为不利软弱结构面,易造成切割破坏,围岩存在塌陷隐患。

1 号、8 号、3 号、4 号是风险相对较小的矿硐,根据隐患排查治理的先后,可先对其采取监控措施,其中 4 号隐患点的排序差别较大,综合排查 4 号隐患点,附近有断层构造、斜窟、跌水影响,存在崩塌等隐患,但是由于距离较远,此处先增加监控措施进行防控。

在本文风险评价中,因为选取的样本均为风险较大的隐患点,风险等级主要为Ⅲ级(不稳定)和Ⅱ级(监控),根据图 1 可知,4 号隐患点的多方法排序差别较大,得出分级判别标准的临界点为样本排序差别较大的样本点,为确保判别标准的准确性,通过选择样本进行分析验证,结果表明该判别标准在本文矿硐风险评价中是适用的。与专家评价结果进行对比、分析可知,仅 5 号隐患点预测结果与实际勘测评价结果不一致,整体样本一致率达到 90.9%。对比结果如表 7。

表 7 隐患点风险评价对比结果		
Tab.7 Comparison results of risk assessment of hidden danger points		
隐患点	本文模型预测评价	实际勘测评价
I_1	11 (监控)	Ⅱ(监控)
I_2	6 (不稳定)	Ⅲ(不稳定)
I_3	9 (监控)	Ⅱ(监控)
I_4	8 (监控)	Ⅱ (监控)
I_5	2 (不稳定)	Ⅱ(监控)
I_6	4 (不稳定)	Ⅲ(不稳定)
I_7	7 (不稳定)	Ⅲ(不稳定)
I_8	10 (监控)	Ⅱ (监控)
I_9	1 (不稳定)	Ⅲ(不稳定)
I_{10}	5 (不稳定)	Ⅲ(不稳定)
I_{11}	3 (不稳定)	Ⅲ(不稳定)

4 结论

1) 对影响明矾矿洞稳定性的关键指标进行数字化处理,针对实际工程需求建立基于反熵权改进 TOPSIS 法和 RSR 法模糊联合的风险评价模型,得到隐患点风险严重的大小排序,可为后续类似工程提供有益参考。

2) 通过将 TOPSIS 法和 RSR 法模糊联合,弥补了单一使用 TOPSIS 法导致部分极端值对数据结果的影响,和 RSR 法在编秩过程导致数据信息缺失的不足之处,充分利用两种方法各自的优势,对评价对象进行综合决策分析,提高了评价结果的准确性,例如评价指标 X_{10} 在 TOPSIS 法中受到极端值影响,通过 RSR 法的编秩综合分析,发挥该指标在评价模型中的实际作用,提高评价结果

的准确性,同时增加评价模型的可信度。

3) 通过对风险相对较高的 11 个样本隐患点的风险评价,总结分析 9 号、5 号、11 号、6 号、10 号、2 号、7 号隐患点是风险严重的矿洞,1 号、8 号、3 号、4 号是风险相对较小的矿洞,与现场实际崩落情况对比结果基本相同,仅 5 号隐患点预测结果与实际勘测评价结果不一致,整体样本一致率达到 90.9%。验证了模型的可靠性,也为类似矿洞风险评估提供了一种新思路。

4) 根据模糊联合的分档结果分析可知,由于 4 号隐患点的多方法排序差别较大,因此将样本中排序差别较大的样本点作为风险分级的临界点,为确保判别标准的准确性,本文通过选择样本进行分析验证,结果表明该判别标准在矿洞风险评价中是适用的。

参考文献:

- [1] 程爱宝,王新民,刘洪强.灰色层次分析法在地下采空区稳定性评价中的应用[J].金属矿山,2011(2):17-21.
- [2] 赵博,赵钰琼,王佳敏,等.基于 TOPSIS 理论的采空区边坡危险性评判模型[J].自然灾害学报,2020,29(6):164-171.
- [3] 黄慎.突变理论在采空区稳定性中的应用研究[D].福州:福州大学,2019.
- [4] 程爱宝,古德生,刘洪强.基于 AHP 与粗糙集理论的采空区稳定性影响因素权重分析[J].中国安全生产科学技术,2011,7(9):50-55.
- [5] 裴艳宇,吴佳宁,孙秋迪,等.改进的 GA-BP 复杂采空区危险等级评价模型[J].地下空间与工程学报,2021,17(S2):978-984.
- [6] 赵乐乐,王亮,侯起阳,等.基于 PCA-RA 和云模型的采空区建设场地稳定性评价[J].金属矿山,2022(3):197-204.
- [7] 李强,张海云.基于改进层次分析法-可拓理论的采空区稳定性评估模型研究[J].采矿技术,2021,21(3):60-63.
- [8] 周源.采空区失稳灾害风险评估的未确知测度模型及应用[J].矿业研究与开发,2013,33(5):70-72,94.
- [9] 包新宇,杨迪,王嘉淇,等.秩和比法、改良 TOPSIS 法及模糊联合法综合评价视力不良效果的比较[J].中华疾病控制杂志,2020,24(11):1356-1360.
- [10] 范焰. TOPSIS 法与秩和比法模糊联合对卫生事业管理质量的综合评价[J].中国医院统计,2000,7(4):214-216.
- [11] 邢媛媛,张飞飞.基于 AEM-TOPSIS 的煤炭自然风险评价研究[J].煤炭工程,2021,53(11):131-134.
- [12] 张天赐,万莉莉,王倩,等.基于灰色关联逼近理想解排序法的航班时刻表评估[J].科学技术与工程,2022,22(5):2124-2129.
- [13] 吴广源,张海涛,王金荣.基于组合赋权和理想解法-灰色关联的公路工程施工安全评价[J].科学技术与工程,2021,21(15):6441-6445.
- [14] WU B, LU M, HUANG W, et al. A case study on the construction optimization decision scheme of urban subway tunnel based on the TOPSIS method[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2020, 24(11): 3488-3500.
- [15] 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.
- [16] 李倩,彭孟长,马存金,等.非煤矿山采空区风险指标体系研究[J].中国安全生产科学技术,2017,13(7):106-110.
- [17] 马海涛,贺红生,付士根.采空塌陷影响因素及稳定性分级方法研究[J].中国安全生产科学技术,2008,4(5):37-41.

(责任编辑:陈雯)