

基于组合赋权-TOPSIS的地下矿山安全风险评价研究^①

覃美满^{1,2,3}, 寇向宇^{1,2,3}, 鄢德波^{1,2,3}, 董培林^{1,2,3}, 魏星^{1,2,3}, 张柏^{1,2,3}

(1.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南长沙 410012; 2.金属矿山安全技术国家重点实验室, 湖南长沙 410002; 3.湖南省智能矿山工程技术研究中心, 湖南长沙 410002)

摘要: 为了科学评价地下矿山的生产运营风险、提升地下矿山安全预防能力,基于地下矿山生产特点选取5个一级指标、16个二级指标构建了地下矿山风险评价指标体系,分别运用层次分析法(AHP)和熵值法(EWM)确定评价指标的主客观权重,采用组合赋权法优化指标综合权重,以提高评价结果的准确性。利用逼近理想解排序法(TOPSIS)评价地下矿山的安全风险状况。以国家矿山安全监察局湖南局组织专家调研的5座矿山为评价样本进行分析,不同模型的安全风险评价结果表明:设备因素维度中的六大系统设备运行状态、环境因素维度中的矿山地质条件、管理因素维度中的工作安全制度3个风险指标权重较大,对矿山安全生产的威胁较为明显;所研究的5座矿山中,钨矿M₂安全风险级别最高,石墨矿M₄的安全风险级别最低。

关键词: 地下矿山; 矿山安全; 安全风险评价; 层次分析法; 熵值法; 组合赋权法; TOPSIS模型

中图分类号: TD853; TD77

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.01.006

文章编号: 0253-6099(2025)01-0035-06

Safety Risk Assessment for Underground Mines Based on Combined Weighting-TOPSIS

QIN Meiman^{1,2,3}, KOU Xiangyu^{1,2,3}, YAN Debo^{1,2,3}, DONG Peilin^{1,2,3}, WEI Xing^{1,2,3}, ZHANG Bai^{1,2,3}

(1. Changsha Mining Research Institute Co., Ltd., Changsha 410012, Hunan, China; 2. State Key Laboratory of Safety Technology for Metal Mines, Changsha 410012, Hunan, China; 3. Hunan Intelligent Mining Engineering Technology Research Center, Changsha 410012, Hunan, China)

Abstract: In order to scientifically assess risks in the production and operation of underground mines and improve the safety prevention and control in underground mining, a risk assessment index system for underground mines was constructed by selecting five primary indices and 16 secondary indices based on the underground mining characteristics. And then, the subjective and objective weights of the assessment indices were determined by using analytic hierarchy process (AHP) and entropy weight method (EWM), and the comprehensive weight of the indices was also optimized by adopting a combined weighting method to improve the accuracy of the assessment results. The safety risk in underground mines was assessed with the Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS). Later, five mines investigated by the experts organized by Hunan Bureau of the State Administration of Mine Safety were taken as samples for assessment with this method. The safety risk assessment results obtained with different models show that three risk indices with higher weights, including operation status of six equipment systems in terms of equipment factor, mine geological conditions in terms of environmental factor, and work safety system in terms of management factor, can bring obvious threat to the mine safety operation. The safety risk assessment of five mines shows that a tungsten mine has the highest risk level, while a graphite mine has the lowest risk level.

Key words: underground mine; mine safety; safety risk assessment; analytic hierarchy process; entropy weight method; combined weighting method; TOPSIS model

① 收稿日期: 2024-08-02

基金项目: 中国五矿科技专项计划(2022ZXB01)

作者简介: 覃美满(2000—),男,湖北利川人,硕士研究生,主要从事智能矿山及计算机应用的研究。E-mail: 2667126732@qq.com

通信作者: 寇向宇(1985—),男,河南南阳人,正高级工程师,主要从事智能采矿的研究与开发工作。E-mail: 78871102@qq.com

矿山地下开采涉及的安全风险因素众多,安全、高效开采一直是矿山工作的重中之重,因此,有必要开展矿山安全风险评价^[1-3]。2022年国家矿山安全监察局印发了《关于加强非煤矿山安全生产工作的指导意见》,提出了强化安全生产标准化建设、强化安全风险识别管控的要求,准确整体把握矿山安全风险状况,确保矿山健康生产是矿山企业和地方矿山安全监察部门亟待解决的问题。

众多学者采用不同理论和方法分别就矿山地质环境、机电设备、运行系统、生产工艺等进行了矿山安全风险评价研究,并取得一系列成果^[4-7]。本文根据矿山生产实际特点建立了地下矿山风险评价指标体系,运用层次分析法(AHP)和熵值法(EWM)进行了风险指标的权重计算,组合赋权后结合逼近理想解排序法(TOPSIS)构建地下矿山安全风险评价模型,并根据计算结果对矿山风险状况进行合理评价。

1 风险评价指标体系建立

建立合理的地下矿山风险评价指标体系是进行科学风险评价的基本前提,关乎着评价结果的准确性和合理性,应本着高效准确的原则选取代表性指标。综合矿山生产特点及以往矿山事故案例,建立了人员因素、设备因素、环境因素、管理因素、资质因素5个维度下16个指标的地下矿山风险评价体系,如图1所示。

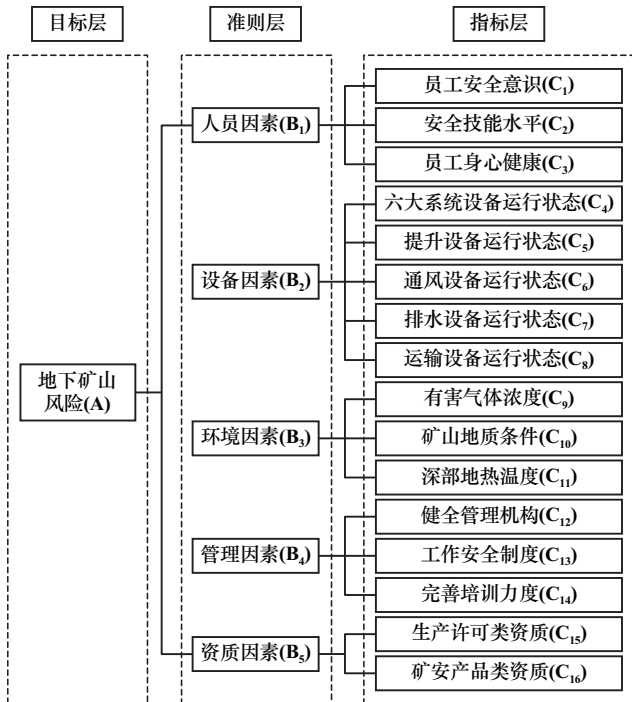


图1 地下矿山风险评价体系

Fig.1 Risk assessment system for underground mines

2 风险评价指标权重确定

风险评价指标权重的确定方法大体可分为主观赋权法、客观赋权法、组合赋权法^[8-9]。其中主观赋权法多数采取综合咨询评分的方式来确定权重,如综合指数法、模糊综合评判法、层次分析法、功效系数法等;客观赋权法根据各指标间相关关系或各指标值变异程度来确定权数,如变异系数法、独立性权重、主成分分析法、熵值法、CRITIC法等;组合赋权法针对主观赋权法和客观赋权法各自的优缺点进行权重融合,如加法合成法、乘法合成法、级差最大化组合、基于客观修正主观等。

2.1 层次分析法(AHP)主观权重确定

层次分析法(AHP)是应用网络系统理论和多目标综合评价方法提出的一种权重确定方法^[10-11],计算步骤如下:

1) 构造判断矩阵。采用如表1所示的1~9标度性方法得到判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$, 以此表示某一层因素的相对重要性。

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

表1 判断矩阵赋值方法

Table 1 Weight assignment of judgment matrix

梯度	含义
1	两因素相比,具有同样重要性
3	两因素相比,一个因素比另一个因素稍微重要
5	两因素相比,一个因素比另一个因素明显重要
7	两因素相比,一个因素比另一个因素强烈重要
9	两因素相比,一个因素比另一个因素极端重要
2,4,6,8	上述两相邻判断的中值
倒数	因素j与i比较的判断, $a_{ji} = 1/a_{ij}$

2) 计算判断矩阵因素权重。结合标度值,利用式(2)~(5)对式(1)进行归一化处理得出判断矩阵A的各个因素权重 ω_i 。

$$\alpha_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (2)$$

$$\beta_i = \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} \quad (3)$$

$$\omega_i = \frac{\beta_i}{\sum_{i=1}^n \beta_i} \quad (4)$$

$$\omega_l = (\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n)^T \quad (5)$$

式中: α_{ij} 为矩阵 A 的列向量归一化; β_i 为矩阵第 i 行的行向量总和; ω_i 为矩阵归一化的实际权重; ω_l 为判断矩阵中评价因素权向量。

3) 判断矩阵的层次单排序权向量及一致性检验。计算各矩阵最大特征值 λ_{\max} , 利用一致性指标 CI 和表 2 中的随机一致性指标 RI 进行一致性检验。

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(A\omega)_i}{\omega_i} \quad (6)$$

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (7)$$

$$CR_{\text{单}} = \frac{CI}{RI} \quad (8)$$

式中: $(A\omega)_i$ 为向量 $A\omega$ 的第 i 个分量。 $CR < 0.1$ 时, 判断矩阵通过一致性检验, 反之则需要再次修正。

表 2 随机一致性指标

Table 2 Random consistency index

矩阵阶数 n	1	2	3	4	5	6	7	8
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41

4) 判断矩阵的层次总排序权向量及一致性检验。为了避免单排序一致性检验存在非一致累加的现象, 层次总排序也有必要进行一致性检验。

$$CR_{\text{总}} = \frac{\sum_j \omega_j CI_j}{\sum_j \omega_j RI_j} \quad (9)$$

式中: ω_j 为指标层矩阵的特征向量值; CI_j 为单排序一致性指标; RI_j 为对应的平均一致性指标。最后将通过一致性检验的指标层对方案总目标的权向量记为 ω_A 。

2.2 熵值法 (EWM) 客观权重确定

在信息论中熵是对无序性的一种度量, 因此可以利用熵值来评价某个方案指标的离散程度^[12]。运用熵值法 (EWM) 确定主观权重的计算步骤如下。

1) 构造评价矩阵。针对评价方案的 m 个评价样本和 n 个评价指标, 建立 0~100 赋分的评价矩阵 B , 记为 $B = (b_{ij})_{m \times n}$ 。

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ b_{m1} & b_{m2} & \dots & b_{mn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

2) 样本数据标准化处理。为维护评价矩阵的有效性, 对其进行正向指标和负向指标的无量纲化处理。

$$b_{ij}^+ = \frac{b_{ij} - \min b_{ij}}{\max b_{ij} - \min b_{ij}} \quad (11)$$

$$b_{ij}^- = \frac{\max b_{ij} - b_{ij}}{\max b_{ij} - \min b_{ij}} \quad (12)$$

式中: b_{ij}^+ 为矩阵 B 的正向指标; b_{ij}^- 为矩阵 B 的负向指标。

3) 计算评价指标的熵值和熵权。对评价指标进行权重分配后得出熵值 φ_j 和熵权 ω_B 。

$$\rho_{ij} = \frac{b_{ij}}{\sum_{i=1}^m b_{ij}} \quad (13)$$

$$\varphi_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m \rho_{ij} \ln \rho_{ij} \quad (14)$$

$$\omega_B = \frac{1 - \varphi_j}{\sum_{j=1}^n (1 - \varphi_j)} \quad (15)$$

式中 ρ_{ij} 是评价矩阵中第 i 个评价样本第 j 个评价指标的权重。

2.3 综合权重确定

层次分析法 (AHP) 依赖于专家自身的工程经验来确定各评价指标的权重, 具有较强的主观随意性; 熵值法 (EWM) 根据原始数据之间的关系来确定权重, 具有较强的理论依据, 对样本数据的依赖程度较高。为了平衡 2 种权重方法的优缺点, 使指标权重更加科学合理, 采用拉格朗日乘子法计算组合权重 ω ^[13-14]。

$$\omega = \frac{\sqrt{\omega_A \omega_B}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{\omega_A \omega_B}} \quad (16)$$

3 TOPSIS 风险因素评价模型

TOPSIS 是一种构造评价问题的正理想解和负理想解的多目标决策方法, 通过计算每个方案的相对贴近度以靠近正理想解和远离负理想解的程度来对方案进行排序, 从而选出最优方案^[15-16]。其具体算法步骤如下。

1) 构造规范化矩阵。设包含 m 个评价样本、 n 个评价指标的多属性决策问题的决策矩阵 $C = (c_{ij})_{m \times n}$, 用向量规范化方法求得规范化决策矩阵 $E = (e_{ij})_{m \times n}$ 。

$$e_{ij} = \frac{c_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m c_{ij}^2}} \quad (17)$$

2) 确定正、负理想解。设定正、负理想解分别为 E_j^+ 、 E_j^- 。

$$E_j^+ = \{\max(e_{11}, e_{12}, \dots, e_{1n}), \dots, \max(e_{m1}, e_{m2}, \dots, e_{mn})\} \quad (18)$$

$$E_j^- = \{\min(e_{11}, e_{12}, \dots, e_{1n}), \dots, \min(e_{m1}, e_{m2}, \dots, e_{mn})\} \quad (19)$$

3) 计算欧式距离。采用欧氏距离测度样本指标与正、负理想解的距离 D_i^+, D_i^- 。

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n \omega (e_{ij} - E_j^+)^2} \quad (20)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n \omega (e_{ij} - E_j^-)^2} \quad (21)$$

4) 计算方案相对贴近度。对相对贴近度 F_i 的大小进行排序 (F_i 越大, 方案越优), 从多个方案中确定评价结果最好的样本, 为矿山风险安全管理提供决策依据。

$$F_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (22)$$

4 实例运用

为了验证模型在地下矿山安全风险评价的有效性和合理性, 国家矿山安全监察局湖南局协调湖南省内安全监察单位、高校单位、科研企业单位相关专家组成专家团队, 对湖南省内部分非煤地下矿山按照如图1所示的地下矿山风险评价体系进行了相关调研, 具体包括中国五矿集团有限公司下属的1座钨钼多金属矿山 M_1 、1座钨矿山 M_2 、1座锡矿山 M_3 和中国建材集

团有限公司下属的2座石墨矿山 M_4 和 M_5 。运用本文方法进行地下矿山风险评价。

4.1 权重计算

4.1.1 层次分析法(AHP)主观权重计算

根据式(1)和表1组织专家对指标进行打分、赋值后得到 A, B_1, B_2, B_3, B_4 以及 B_5 的判断矩阵。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/4 & 1/2 & 2 \\ 3 & 1 & 2/3 & 2 & 5 \\ 4 & 3/2 & 1 & 2 & 7 \\ 2 & 1/2 & 1/2 & 1 & 4 \\ 1/2 & 1/5 & 1/7 & 1/4 & 1 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 2 \\ 2 & 1 & 3 \\ 1/2 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 4/3 & 3/2 & 3 \\ 1/2 & 1 & 2/3 & 3/4 & 2 \\ 3/4 & 3/2 & 1 & 1 & 2 \\ 2/3 & 4/3 & 1 & 1 & 2 \\ 1/3 & 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}, B_3 = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 3 \\ 2 & 1 & 5 \\ 1/3 & 1/5 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/2 \\ 3 & 1 & 2 \\ 2 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}, B_5 = \begin{bmatrix} 1 & 2/3 \\ 3/2 & 1 \end{bmatrix}$$

根据以上层次判断矩阵, 采用式(2)~(8)计算准则层、指标层的单层次指标权重及其一致性检验, 结果如表3所示。

表3 判断矩阵层次分析法(AHP)权重及一致性检验

Table 3 Weights of judgment matrix in AHP and consistency measure

层次	矩阵	λ_{max}	CI	CR	ω_i
准则层	A	5.022 3	0.005 6	0.005 0	$\omega_A = (0.095 7, 0.288 8, 0.382 4, 0.181 9, 0.051 1)^T$
	B_1	3.009 2	0.004 6	0.007 9	$\omega_{B_1} = (0.297 0, 0.539 6, 0.163 4)^T$
	B_2	5.014 9	0.003 7	0.003 3	$\omega_{B_2} = (0.307 2, 0.163 5, 0.220 2, 0.209 7, 0.099 4)^T$
指标层	B_3	3.003 7	0.001 8	0.003 2	$\omega_{B_3} = (0.309 0, 0.581 6, 0.109 5)^T$
	B_4	3.009 2	0.004 6	0.007 9	$\omega_{B_4} = (0.163 4, 0.539 6, 0.297 0)^T$
	B_5	2.000 0	0	0	$\omega_{B_5} = (0.400, 0.600)^T$

根据式(9)综合各层权重信息计算可得: $CR_{总} = 0.005 7 < 0.1$, 故上述各层均通过了一致性检验, 并获得所有指标层对总目标的权向量, 记为 $\omega_c = (0.028 4, 0.051 6, 0.015 6, 0.088 7, 0.047 2, 0.063 6, 0.060 6, 0.028 7, 0.118 1, 0.222 4, 0.041 9, 0.029 7, 0.098 2, 0.054 0, 0.020 4, 0.030 7)^T$ 。

4.1.2 熵值法(EWM)客观权重计算

$M_1 \sim M_5$ 矿山专家调研打分结果如表4所示。采用式(10)~(15)计算各评价样本指标层的熵值和熵权, 其中 $C_1 \sim C_8, C_{10}, C_{12} \sim C_{16}$ 为效益型指标, 按照正理想解来计算, C_9, C_{11} 为成本型指标, 按照负理想解来计算, 得到各评价样本指标层的熵值 φ_j 和熵权 ω_B 见表5。

表4 矿山对应评价指标调研评分

Table 4 Score of corresponding assessment indices for mines

矿 山	B ₁			B ₂			B ₃			B ₄			B ₅			
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	C ₁₆
M_1	85	87	78	72	83	68	72	78	79	86	74	85	79	85	76	83
M_2	76	82	80	84	87	79	74	85	82	80	78	77	82	92	73	75
M_3	85	81	91	93	73	83	69	86	85	85	92	88	72	74	85	81
M_4	84	77	76	89	79	84	81	93	87	87	86	84	89	87	80	87
M_5	93	71	70	76	84	86	78	85	90	74	75	66	94	73	91	69

4.1.3 综合权重计算

根据式(16)求得各评价指标权重值如图2所示。由图2可知: 运用层次分析法(AHP)得出的有害气体

表 5 评价矩阵熵值法(EWM)熵值及熵权

Table 5 Entropy values and weights of judgement matrix in EWM

评价指标	φ_j	ω_B
C ₁	0.972 8	0.024 9
C ₂	0.946 5	0.048 9
C ₃	0.913 1	0.079 4
C ₄	0.926 7	0.067 1
C ₅	0.965 1	0.032 0
C ₆	0.910 3	0.082 0
C ₇	0.923 3	0.070 2
C ₈	0.980 9	0.017 4
C ₉	0.946 2	0.049 2
C ₁₀	0.969 7	0.027 7
C ₁₁	0.889 9	0.100 7
C ₁₂	0.843 6	0.143 0
C ₁₃	0.933 4	0.060 9
C ₁₄	0.929 0	0.065 0
C ₁₅	0.942 8	0.052 3
C ₁₆	0.913 3	0.079 3

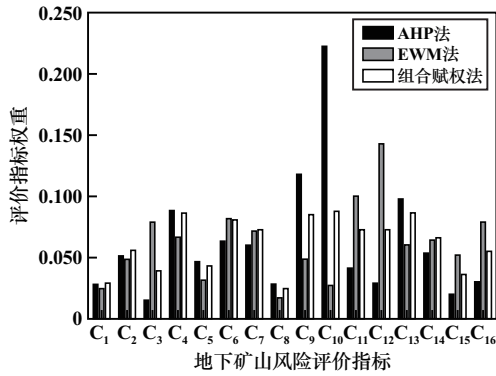


图 2 评价指标权重对比

Fig.2 Comparison of weights of assessment indices

浓度 C₉、矿山地质条件 C₁₀ 权重主观判断过于强烈;运用熵值法(EWM)得出的深部地热温度 C₁₁、健全管理结构 C₁₂ 权重过于依赖样本数据;组合赋权法正好综合了两者的缺陷,使风险指标权重合理得当,修正后设备因素维度中的六大系统设备运行状态 C₄、环境因素维度中的矿山地质条件 C₁₀ 和管理因素维度中的工作安全制度 C₁₃ 分别以 0.086 5、0.088 1 和 0.086 8 占据较大权重,对矿山安全生产的威胁较为明显。

4.2 TOPSIS 法综合评价

根据式(17)~(22)对表 4 数据进行规范化,依次计算各评价指标的正理想解、负理想解、欧式距离和贴近度,结果如表 6 所示。同时比较了 AHP-TOPSIS 法、EWM-TOPSIS 法、组合赋权-TOPSIS 法地下矿山风险评价模型贴近度结果,如图 3 所示。由表 6 与图 3 可知,5 座矿山样本在不同模型下得到的安全风险由高到低的顺序如下:AHP-TOPSIS 模型 M₂>M₃>M₅>M₁>M₄;EWM-TOPSIS 模型下 M₂>M₅>M₁>M₄>M₃;组合赋

权-TOPSIS 模型 M₂>M₅>M₁>M₃>M₄。由调研情况得知,钨矿山 M₂ 曾发生冒顶片帮事故,石墨矿山 M₅ 曾发生透水事故,多金属矿山 M₁ 曾发生悬拱坍塌事故,锡矿山 M₃ 曾发生罐笼坠落事故,石墨矿山 M₄ 未发现相关事故报道,所调研矿山样本中钨矿山 M₂ 安全风险级别最高、石墨矿山 M₄ 的安全风险级别最低,根据事故发生年代和严重性排序为 M₂>M₅>M₁>M₃。AHP-TOPSIS 模型与 EWM-TOPSIS 模型的评价结果与矿山实际风险状况有一定的偏差,组合赋权-TOPSIS 模型所评价的矿山样本安全状态与专家实地调研分析情况基本一致。

表 6 矿山样本正负理想解、欧式距离及贴近度

Table 6 Positive and negative ideal solutions, Euclidean distance, and nearness degree of mine samples

矿山	正理想解 E _j ⁺	负理想解 E _j ⁻	欧式距离 D _j ⁺	欧式距离 D _j ⁻	贴近度 F _i	评价排序
M ₁	0.487 7	0.378 9	0.063 1	0.063 6	0.501 7	3
M ₂	0.498 5	0.400 9	0.060 5	0.046 4	0.433 8	5
M ₃	0.513 2	0.385 4	0.071 4	0.077 9	0.521 8	2
M ₄	0.490 9	0.428 6	0.030 7	0.041 1	0.572 8	1
M ₅	0.503 1	0.367 2	0.081 2	0.080 9	0.499 0	4

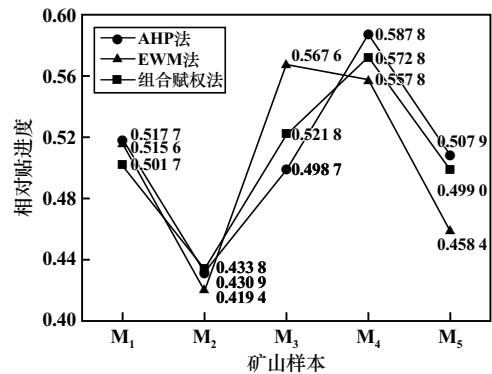


图 3 各评价方法相对贴近度

Fig.3 Relative nearness degree of each assessment method

5 结论

1) 综合矿山生产特点及以往矿山事故案例,全面分析了影响地下矿山安全生产的风险因素,建立了包含人员因素、设备因素、环境因素、管理因素、资质因素 5 个维度下的 16 个地下矿山风险评价指标。

2) 采用了层次分析法(AHP)和熵值法(EWM)进行了地下矿山风险指标的主、客观赋权,并通过组合赋权法对指标权重进行了综合优化,既克服了主观赋权法的主观随意性,又弥补了客观赋权法对样本数据的高度依赖性,有效提高了所建立评价模型处理多目标

决策问题的能力。

3) 基于组合赋权-TOPSIS 的分析结果表明,设备因素维度中的六大系统设备运行状态、环境因素维度中的矿山地质条件和管理因素维度中的工作安全制度对矿山安全生产的威胁较大,所研究的5座矿山中,钨矿山 M_2 安全风险级别最高、石墨矿山 M_4 的安全风险级别最低。

参考文献(References):

- [1] 王佳斌,李国清,强兴邦,等. 基于双重预防体系的矿山安全风险智能分析系统[J]. 金属矿山, 2024(1):99-108.
WANG Jiabin, LI Guoqing, QIANG Xingbang, et al. Intelligent analysis system for mine safety risks based on dual prevention system[J]. Metal Mines, 2024(1):99-108.
- [2] 毕洪涛,李国清. 黄金矿山安全生产闭环管理体系研究[J]. 黄金, 2014,35(8):1-4.
BI Hongtao, LI Guoqing. Research on the closed-loop management system of safety production in gold mines[J]. Gold, 2014,35(8):1-4.
- [3] 郭对明,李国清,胡乃联,等. 基于文本挖掘的矿山安全隐患大数据分析可视化[J]. 工程科学学报, 2022,44(3):328-338.
GUO Duiming, LI Guoqing, HU Nailian, et al. Big data analysis and visualization of mining safety hazards based on text mining[J]. Journal of Engineering Science, 2022,44(3):328-338.
- [4] 刘建坡,武峰,王人,等. 基于模糊综合评价的深部巷道破坏定量风险评估[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2022,43(5):733-739.
LIU Jianpo, WU Feng, WANG Ren, et al. Quantitative risk assessment of deep roadway damage based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science Edition), 2022,43(5):733-739.
- [5] 邢志刚. 基于 AHP-TOPSIS 的煤矿机电安全评价模型及应用[J]. 煤炭技术, 2021,40(4):142-145.
XING Zhigang. Model and application of coal mine mechanical and electrical safety evaluation based on AHP-TOPSIS[J]. Coal Technology, 2021,40(4):142-145.
- [6] 邢秉江. 煤矿排水与通风系统安全风险评估与管控[J]. 能源与节能, 2024(4):54-57.
XING Bingjiang. Safety risk assessment and control of coal mine drainage and ventilation system[J]. Energy and Energy Conservation, 2024(4):54-57.
- [7] 宋学朋,柯愈贤,魏美亮,等. 基于多维云模型的充填管道堵塞风险评估[J]. 煤炭科学技术, 2021,49(9):95-102.
SONG Xuepeng, KE Yuxian, WEI Meiliang, et al. Risk assessment of filling pipeline blockage based on multidimensional cloud model[J]. Coal Science and Technology, 2021,49(9):95-102.
- [8] 宋冬梅,刘春晓,沈晨,等. 基于主客观赋权法的多目标多属性决策方法[J]. 山东大学学报(工学版), 2015,45(4):1-9.
SONG Dongmei, LIU Chunxiao, SHEN Chen, et al. Multi objective and multi-attribute decision-making method based on subjective and objective weighting method[J]. Journal of Shandong University (Engineering Edition), 2015,45(4):1-9.
- [9] 冯占科,钱旺,彭建川. 基于综合权重-TOPSIS 的露天矿边坡稳定性评价[J]. 工矿自动化, 2023,49(增刊1):133-137.
FENG Zhanke, QIAN Wang, PENG Jianchuan, et al. Stability evaluation of open-pit mine slope based on comprehensive weight TOPSIS[J]. Industrial and Mining Automation, 2023,49(S1):133-137.
- [10] GOLDEN B L, WASIL E A, HARKER P T. The analytic hierarchy process, applications and studies[M]. Springer-Verlag: Berlin-Heidelberg, 1989.
- [11] MOERS F. Discretion and bias in performance evaluation: The impact of diversity and subjectivity[J]. Accounting, Organizations and Society, 2005,30(1):67-80.
- [12] 刘朱紫,刘阳阳,谢荣荣,等. 基于熵值法事故再现异常结果识别与融合[J]. 中国安全科学学报, 2023,33(6):96-104.
LIU Zhuzi, LIU Yangyang, XIE Rongrong, et al. Identification and fusion of abnormal results in accident recurrence based on entropy method[J]. Chinese Journal of Safety Science, 2023,33(6):96-104.
- [13] 赵黎,李正国,粟登峰,等. 基于 GRA-AHP 联合极差分析复合算法的边坡稳定性影响因素敏感性分析[J]. 矿冶工程, 2024,44(1):31-34.
ZHAO Li, LI Zhengguo, SU Dengfeng, et al. Sensitivity analysis of slope stability influencing factors based on GRA-AHP combined range analysis composite algorithm[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(1):31-34.
- [14] 李筱,许钧,张成旭,等. 基于 CWM-TOPSIS 模型的金属矿山企业安全管控能力评价[J]. 黄金科学技术, 2024,32(1):100-108.
LI Xiao, XU Jun, ZHANG Chengxu, et al. Evaluation of safety control capability of metal mining enterprises based on CWM-TOPSIS model[J]. Gold Science and Technology, 2024,32(1):100-108.
- [15] 刘超,祁赞朴,宋章伦,等. 基于组合赋权法和响应面法的竖井支护参数优化研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(2):16-20.
LIU Chao, QI Yunpu, SONG Zhanglun, et al. Parameter optimization for shaft support based on combined weighting and response surface methodology[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(2):16-20.
- [16] 姜福川,周师,吴增彤,等. 基于熵权-TOPSIS 法的煤矿安全投入决策分析[J]. 中国安全科学学报, 2021,31(7):24-29.
JIANG Fuchuan, ZHOU Shi, WU Zengtong, et al. Analysis of coal mine safety investment decision based on entropy weight TOPSIS method[J]. Chinese Journal of Safety Science, 2021,31(7):24-29.
- 引用本文: 覃美满,寇向宇,鄢德波,等. 基于组合赋权-TOPSIS 的地下矿山安全风险评价研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(1):35-40.
QIN Meiman, KOU Xiangyu, YAN Debo, et al. Safety risk assessment for underground mines based on combined weighting-TOPSIS[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(1):35-40.