



姚有利,寇杰,张孟浩. 基于博弈论组合赋权-TOPSIS 的煤矿“一通三防”风险评估[J]. 矿业安全与环保, 2024, 51(6): 71-78.

YAO Youli, KOU Jie, ZHANG Menghao. Risk assessment of “one-ventilation and three-prevention” in coal mine based on game theory combination weighting-TOPSIS[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2024, 51(6): 71-78.

扫码阅读下载

DOI: 10.19835/j.issn.1008-4495.20230694

基于博弈论组合赋权-TOPSIS 的煤矿 “一通三防”风险评估

姚有利,寇杰,张孟浩

(山西大同大学 煤炭工程学院,山西 大同 037003)

摘要:针对煤矿“一通三防”工作环境复杂、风险隐患多、排查治理不到位等问题,采用查阅文献及相关安全规章制度、专家咨询等方法,选取煤矿企业“一通三防”风险评价指标,结合企业实地调研结果,优化评价指标,构建相应的评价指标体系;采用改进层次分析法和熵权法进行主客观赋权,基于博弈论进行主客观组合权重计算,引入 TOPSIS 综合评价法,构建组合赋权-TOPSIS 评价模型。将构建的模型应用于陕西省咸阳市彬长矿业公司 5 个煤矿的“一通三防”风险评估中,结果表明,构建的组合赋权-TOPSIS 评价模型对煤矿“一通三防”中的风险评估结果与实际情况基本一致。

关键词:煤矿安全管理;煤矿“一通三防”;风险评估;组合赋权;TOPSIS 综合评价法

中图分类号:TD77

文献标志码:A

文章编号:1008-4495(2024)06-0071-08

Risk assessment of “one-ventilation and three-prevention” in coal mine based on game theory combination weighting-TOPSIS

YAO Youli, KOU Jie, ZHANG Menghao

(College of Coal Engineering, Shanxi Datong University, Datong 037003, China)

Abstract: In view of the complex working environment, such as many hidden risks and inadequate investigation and management of one-ventilation and three-prevention in coal mines. By reviewing relevant literature and safety regulations, consulting experts and other methods, the risk evaluation indicators for one-ventilation and three-prevention were selected. The evaluation indicators were optimized and the corresponding evaluation index system was established by combining the results of on-site surveys. The improved analytic hierarchy process and entropy weight method were used to calculate the subjective and objective weights. Based on game theory, the subjective and objective combination weights are calculated. The TOPSIS comprehensive evaluation method was introduced to construct the combination weighting-TOPSIS evaluation model. Finally, according to the application on the risk assessment of one-ventilation and three-prevention in five coal mines in Binchang Mining Company of Xianyang City, Shaanxi Province, the results showed that the constructed combination weighting-TOPSIS evaluation model was basically consistent with the actual situation.

Keywords: coal mine safety management; one-ventilation and three-prevention in coal mine; risk assessment; combination weighting; TOPSIS comprehensive evaluation method

收稿日期:2023-08-13;2024-11-12 修订

基金项目:山西省软科学研究项目(2019041014-3);大同市科技项目(2023067)

作者简介:姚有利(1974—),女,内蒙古商都人,博士,教授,研究方向为煤矿安全工程及应急。E-mail: yyl0908@126.com.

通信作者:寇杰(1997—),男,陕西咸阳人,硕士研究生,研究方向为煤矿安全评价及应急管理。E-mail: KJ15702901070@163.com.

近年来,我国经济进入高质量发展阶段,对能源的需求不断增大。目前,我国的主要化石能源为煤炭。煤炭资源大多为地下开采,矿井地质条件复杂,若风险隐患排查治理不到位则易发生煤矿安全事故^[1-2]。煤尘、瓦斯、地下水、火等是导致煤矿安全事故频发的主要因素,因此,煤矿“一通三防”工作显得尤为重要。煤矿企业应结合“一通三防”工作中的危险源进行分析并采取措施超前处理,才能防患于未

然,有效降低煤炭开采中安全事故的发生概率,保障煤矿企业安全高效生产^[3-5]。

许多学者针对煤矿“一通三防”风险评价做了大量的研究工作。肖军^[6]采用模糊数学理论和层次分析法构建了煤矿“一通三防”安全状况的评价指标体系,建立了煤矿“一通三防”管理中的模糊综合评价系统;李润等^[7]以系统安全可靠性的评价对象,选取通风、防尘、防瓦斯、防火的安全可靠性作为一级评价指标,建立了基于直觉模糊层次分析法的煤矿“一通三防”安全综合评估模型;李闯等^[8-9]基于“安全—健康—环境”(HSE)管理理念构建煤矿“一通三防”系统风险评估体系,采用 WBS-RBS 耦合矩阵风险分析法进行煤矿“一通三防”系统生产作业风险识别,对层次分析法进行改进,利用区间数代替点值进行评价指标权重计算,建立了煤矿“一通三防”系统风险评估模型;基于职业健康、安全与环境 3 个方面 23 个指标构建了“一通三防”风险评价体系,建立了基于作业分解结构—风险分解结构(WBS-RBS)及层次分析法(AHP)的风险评价模型;张学群^[10]构建了煤矿“一通三防”系统安全多级评价指标体系,利用改进模糊层次分析法对体系各层指标权重进行计算,结合专家打分法,定性、定量地对煤矿“一通三防”系统进行了安全等级评定。以上研究成果大多基于某种标准或某种规章制度来选取评价指标,没有结合煤矿企业实际情况进行筛选;在指标权重确定方面,多采用层次分析法等主观性较强的单一权重确定方法;在实例应用方面,大多数学者只提出了相应的评价模型,并没有应用于煤矿企业中。

针对上述问题,笔者基于煤矿“一通三防”安全

规章制度、相关标准,采取煤矿企业实地调研等方式选取评价指标;通过实地调研、专家咨询等方式筛选指标,基于事故致因“4M”要素理论构建煤矿“一通三防”风险评价指标体系;采用改进层次分析法和熵权法进行主客观权重确定,将评价指标主客观权重组合赋权,并引入 TOPSIS 综合评价法,构建组合赋权-TOPSIS 综合评价模型,将该模型应用于煤矿企业“一通三防”风险评价研究中,根据评价结果提出相应改进措施,降低煤矿安全事故发生概率,从而保障煤矿企业的安全生产。

1 煤矿“一通三防”风险评价指标体系的确立

煤矿“一通三防”^[11-12]的风险因素较多,选取合理有效的评价指标,构建评价指标体系,是进行风险评价研究的基础。

1) 基于前人对煤矿“一通三防”安全风险评价的研究^[13-15],从事事故致因“4M”理论出发,构建人员因素、设备因素、环境因素、管理因素共 4 个一级评价指标。

2) 依据《煤矿安全规程》《防治煤与瓦斯突出细则》等相关规章,参考矿井通风安全技术措施、矿井瓦斯防治安全技术措施、矿井粉尘防治安全技术措施和矿井防灭火安全技术措施,选取符合煤矿“一通三防”风险的评价指标。

3) 邀请 20 名煤矿安全技术与管理研究方面的高校专家学者和煤矿企业从事“一通三防”的技术管理人员,对所选取的评价指标进行综合判定,剔除、合并或添加部分评价指标,保留合理指标,最终确定 23 个二级指标,构建煤矿“一通三防”风险评价指标体系,如图 1 所示。

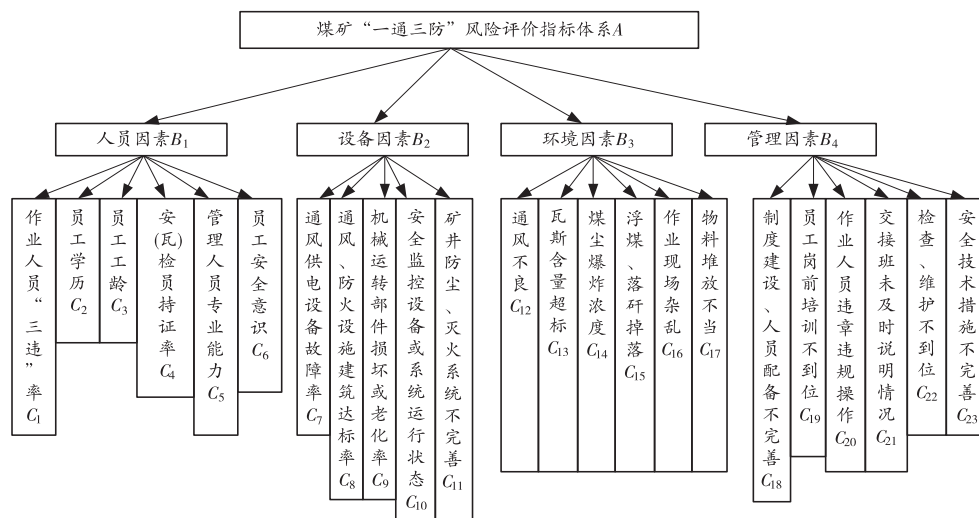


图 1 煤矿“一通三防”风险评价指标体系

Fig. 1 Risk evaluation index system of “one access and three preventions” in coal mine

为了方便专家进行指标打分,对各指标评价标

准或指标含义进行说明,具体见表 1。

表 1 煤矿“一通三防”风险评价指标及释义
Table 1 Risk assessment indicators and interpretations of “one access and three preventions” in coal mines

一级指标	二级指标	指标具体含义或评价标准
人员因素 B_1	作业人员“三违”率 C_1	煤矿安全生产中违章指挥、违章作业、违反劳动纪律等行为的发生概率
	员工学历 C_2	煤矿安全“一通三防”工作人员学历情况
	员工工龄 C_3	煤矿安全“一通三防”工作人员工作年限
	安(瓦)检员持证率 C_4	煤矿“一通三防”中安全检查工和瓦斯检查工持证上岗率
	管理人员专业能力 C_5	煤矿安全生产管理人员专业知识掌握情况和实际应用能力
	员工安全意识 C_6	员工安全责任意识薄弱,未形成良好的安全文化
设备因素 B_2	通风供电设备故障率 C_7	通风机、局部通风机和供电设备发生故障的概率
	通风、防火设施建筑达标率 C_8	通风、防火等辅助设施检验符合标准的概率
	机械运转部件损坏或老化率 C_9	井下掘进、运输等机器设备存在旋转部件等发生老化或损坏的概率
	安全监控设备或系统运行状态 C_{10}	井下作业地点监测监控设备故障或被破坏,实时数据无法掌握
	矿井防尘、灭火系统不完善 C_{11}	井下防尘尘、防灭火系统检测不到位,致使防尘、灭火措施不完善
环境因素 B_3	通风不良 C_{12}	通风机故障或通风构筑物等导致井下局部或区域内风量过小,无法稀释瓦斯粉尘
	瓦斯含量超标 C_{13}	井下各巷道、采掘工作面等局部或区域内瓦斯突然涌出或通风不到位等导致瓦斯浓度超过允许值
	煤尘爆炸浓度 C_{14}	悬浮在空气中的可燃性煤尘达到可能引起爆炸的浓度,煤尘可燃挥发性指数小于 10%属于无爆炸危害性
	浮煤、落研掉落 C_{15}	巷道顶板存在未清理的煤渣或松动的矸石垮塌或坠落的隐患
	作业现场杂乱 C_{16}	井下施工现场物品杂乱、堆放不整齐等
	物料堆放不当 C_{17}	物料堆放超高或堆放次序不正确或堆放杂乱堆放位置不当等
管理因素 B_4	制度建设、人员配备不完善 C_{18}	矿井规章制度建设不到位,各工种尤其安全管理人员配备不到位等可能导致违章违规作业
	员工岗前培训不到位 C_{19}	针对作业人员三级安全教育及专业操作技能培训不足,可能导致作业时发生事故
	作业人员违章违规操作 C_{20}	工人未按照规定及要求擅自违反规定进行作业
	交接班未及时说明情况 C_{21}	交接班时上一班组未将工作情况及隐患等情况告知下一班组,可能导致产生事故
	检查、维护不到位 C_{22}	井下“一通三防”设备或设施、构筑物及管道等未按期检查与维护
	安全技术措施不完善 C_{23}	针对通风、防瓦斯、煤尘和防火等工作的安全技术措施还不到位

2 煤矿“一通三防”风险评价模型的构建

2.1 风险评价流程

在煤矿管理工作中,“一通三防”风险评价对危险源识别、排查及采取措施预防治理具有重要的作用。为了保证风险评价的合理性和有效性,基于系统工程理论及思想进行煤矿“一通三防”的风险评价研究。评价流程如图 2 所示。

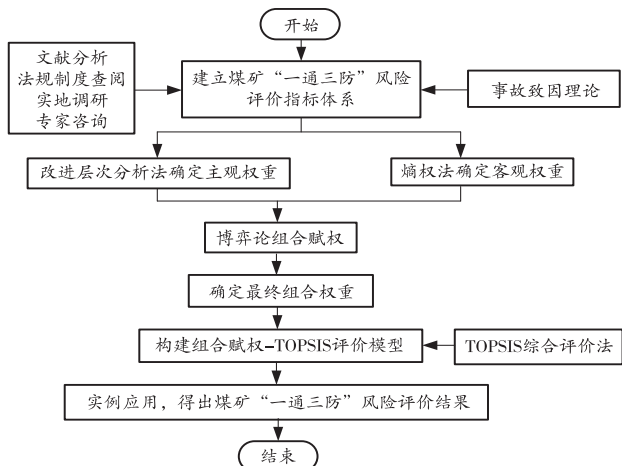


图 2 评价流程图

Fig. 2 Evaluation flow chart

2.2 组合赋权确定指标权重

2.2.1 改进层次分析法主观赋权

主观赋权法是指专家、个人根据专业知识和以

往工作经验对评价指标进行重要性判断,从而确定指标权重的方法。常见的主观赋权法有德尔菲法、层次分析法 (Analytic hierarchy process, AHP)、序关系分析法 (G1 法) 等^[16]。传统的层次分析法采用九标度对指标两两重要性进行判别,得出的判断矩阵要进行一致性检验。若不符合一致性条件,则需要反复调整判断矩阵的数据,进而加大了工作量和计算量,不利于评价工作的顺利开展^[17]。为了减少一致性检验的计算量和工作量,采用改进层次分析法 (Improved hierarchical analysis method, IAHP),即用三标度法代替九标度法,来确定煤矿“一通三防”风险评价指标的主观权重。改进层次分析法确定指标权重的步骤如下:

1) 构建判断矩阵 A

将准则层的风险评价因素与目标层的重要性进行两两比较,构建出准则层判断矩阵 A (见式(1))。同理,可以确定指标层的判断矩阵。

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

$$a_{ij} = \begin{cases} 0, i \text{ 元素不如 } j \text{ 元素重要} \\ 1, i \text{ 元素和 } j \text{ 元素一样重要} \\ 2, i \text{ 元素比 } j \text{ 元素重要} \end{cases} \quad (2)$$

2) 计算判断矩阵 B

$$B = (b_{ij})_{m \times n} \quad (3)$$

$$b_{ij} = \begin{cases} \frac{r_i - r_j}{r_{\max} - r_{\min}}(b_m - 1) + 1, & r_i > r_j \\ 1, & r_i = r_j \\ \left(\frac{r_i - r_j}{r_{\max} - r_{\min}}(b_m - 1) \right)^{-1} + 1, & r_i < r_j \end{cases} \quad (4)$$

$$r_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad (5)$$

$$r_{\max} = \max(r_i) \quad (6)$$

$$r_{\min} = \min(r_i) \quad (7)$$

$$b_m = \frac{r_{\max}}{r_{\min}} \quad (8)$$

3) 确定最优传递矩阵 C

$$C = (c_{ij})_{m \times n} \quad (9)$$

$$c_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \log \frac{b_{ik}}{b_{jk}} \quad (10)$$

4) 计算拟优一致矩阵 D

$$D = (d_{ij})_{m \times n} \quad (11)$$

$$d_{ij} = 10^{c_{ij}} \quad (12)$$

5) 计算指标权重

指标权重是通过拟优一致矩阵 D 的特征向量求取,这里采用几何平均法(见式(13))计算,得到特征向量集 $\bar{W} = \{\bar{w}_1, \bar{w}_2, \dots, \bar{w}_n\}$,将 $\bar{W}$ 归一化处理,得出特征向量集 $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ 为准则层的评价指标权重。

$$\bar{w}_k = \left(\prod_{i=1}^n d_{ki} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (13)$$

式中: d_{ki} 为拟优一致矩阵元素值; k 为矩阵行数; i 为矩阵列数。

$$w_k = \frac{\bar{w}_k}{\sum_{k=1}^n \bar{w}_k} \quad (14)$$

式中: $\bar{w}_k$ 为采用几何平均法计算出的特征向量值; w_k 为归一化处理后的特征向量值; n 为指标个数。

2.2.2 熵权法客观赋权

客观赋权法是从原始数据之间的关系出发,运用一定的数学方法来确定指标权重的方法。常见的客观赋权法有因子分析法(Factor analysis)、熵权法、CRITIC 法。熵权法反映各评价指标的变化程度,通过信息熵值对各评价指标的权重进行计算,得到符合实际情况的客观权重^[18]。

采用熵权法确定煤矿“一通三防”风险评价指标的客观权重,具体步骤如下:

1) 构建原始数据矩阵。设煤矿“一通三防”系统风险评价的 m 个样本(专家打分)和 n 个评价风险因素,构成原始数据矩阵:

$$D = (d_{ij})_{m \times n}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

2) 数据标准化处理。风险评价指标并不全为效益型指标,如作业人员“三违”率为成本型指标,数值越小越好。因此,需要对数据进行标准化处理,其中效益型指标和成本型指标的处理方式如下:

$$r_{ij} = \frac{d_{ij} - \min_j d_{ij}}{\max_j d_{ij} - \min_j d_{ij}} \quad (16)$$

$$r_{ij} = \frac{\max_j d_{ij} - d_{ij}}{\max_j d_{ij} - \min_j d_{ij}} \quad (17)$$

式中: d_{ij} 为指标原始数据; r_{ij} 为标准化处理后的各指标值; $\max_j d_{ij}$ 、 $\min_j d_{ij}$ 为第 j 项指标的最大值、最小值。

3) 计算评价指标的信息熵值 e_j :

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m p_{ij} \cdot \ln p_{ij} \quad (18)$$

$$p_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^m r_{ij}} \quad (19)$$

若 $r_{ij} = 0$, $p_{ij} = 0$, 则 $p_{ij} \cdot \ln p_{ij}$ 无数学意义。故修正指标值比重,定义如下:

$$p_{ij} = \frac{r_{ij} + 10^{-4}}{\sum_{i=1}^m (r_{ij} + 10^{-4})} \quad (20)$$

4) 计算评价指标的客观权重 w_j :

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)}, 0 \leq w_j \leq 1, \text{ 且 } \sum_{j=1}^n w_j = 1 \quad (21)$$

2.2.3 基于博弈论组合赋权

为了降低主客观赋权中权重的片面性,将 IAHP 法确定的主观权重 w_1 和熵权法确定的客观权重 w_2 作为博弈的双方,基于博弈论的思想,计算得出最优综合权重,具体步骤如下:

1) 主客观权重线性组合:

$$w^* = \beta_1 w_1^T + \beta_2 w_2^T \quad (22)$$

式中: w^* 为组合权重向量; β_1 、 β_2 为权重系数, $\beta_1 > 0$, $\beta_2 > 0$ 。

2) 优化组合。基于博弈论思想,对线性组合的权重系数 β_1 和 β_2 进行优化,使得 w^* 与主客观权重 w_1 和 w_2 离差和最小。获取最优组合系数的对策模型如下:

$$\begin{aligned} \min(\|w^* - w_1\|_2 + \|w^* - w_2\|_2) = \\ \min(\|\beta_1 w_1^T + \beta_2 w_2^T - w_1\|_2 + \|\beta_1 w_1^T + \beta_2 w_2^T - w_2\|_2) \end{aligned} \quad (23)$$

3) 解优化组合系数。根据矩阵微分原理,对式(22)和式(23)进行一阶求导,满足导数条件如下:

$$\begin{cases} \beta_1 w_1 w_1^T + \beta_2 w_1 w_2^T = w_1 w_1^T \\ \beta_1 w_2 w_1^T + \beta_2 w_2 w_2^T = w_2 w_2^T \end{cases} \quad (24)$$

根据式(24)得出系数 β_1 和 β_2 。

4) 计算最优综合权重。将得出的 β_1 和 β_2 进行归一化处理, 得出最优组合系数 β_1^* 、 β_2^* , 代入式(22)得出最优的综合组合权重 w^* :

$$w^* = \beta_1^* w_1^T + \beta_2^* w_2^T \quad (25)$$

2.3 组合赋权-TOPSIS 评价模型构建

TOPSIS 评价模型通过评价对象与理想化目标的接近程度, 确定评价对象的优劣程度, 即评价对象与正理想解及负理想解的距离进行排序。若评价对象离正理想解越近, 离负理想解越远, 则为最优; 反之则为最差^[19-20]。

采用 TOPSIS 综合评价法对煤矿“一通三防”风险进行评价, 具体步骤如下:

1) 确定初始矩阵。 m 个评价样本(专家打分)形成样本集 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$, 每个样本对应指标构成样本指标集 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 。构建初始矩阵 Y :

$$Y = \begin{bmatrix} y_1(x_1) & \cdots & y_1(x_n) \\ \vdots & & \vdots \\ y_m(x_1) & \cdots & y_m(x_n) \end{bmatrix} \quad (26)$$

2) 构建加权标准化矩阵。将初始矩阵标准化后的矩阵与求出的综合权重向量相乘, 得出加权后的标准化矩阵 C :

$$C = (c_{ij})_{m \times n} = w \cdot B = w \cdot (b_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} w_1 b_{11} & \cdots & w_n b_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ w_1 b_{m1} & \cdots & w_n b_{mn} \end{bmatrix} \quad (27)$$

式中: C 为加权标准化矩阵; B 为标准化后矩阵; w 为基于博弈论计算得出的综合权重。

3) 确定风险因素正、负理想解:

$$\begin{cases} C^+ = \{(\max_m(c_{ij})_{m \times n} | n \in J_1), \min_m(c_{ij})_{m \times n} | n \in J_2\} \\ C^- = \{(\min_m(c_{ij})_{m \times n} | n \in J_1), \max_m(c_{ij})_{m \times n} | n \in J_2\} \end{cases} \quad (28)$$

式中: C^+ 、 C^- 分别为正、负理想解; J_1 、 J_2 分别为效益型指标、成本型指标。

4) 计算欧氏距离。计算样本指标到正、负理想解的距离, 公式如下:

$$\begin{cases} d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - c_j^+)^2} \\ d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - c_j^-)^2} \end{cases} \quad (29)$$

式中 d_i^+ 、 d_i^- 分别为样本指标到正、负理想解的距离。

5) 贴近度计算及排序:

$$E_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (30)$$

式中 E_i 为贴近度, $0 \leq E_i \leq 1$ 。

当 $E_i = 0$ 时, 样本指标为负理想解; 当 $E_i = 1$ 时, 样本指标为正理想解。将贴近度按从大到小顺序排

序, 数值越高, 代表样本指标越优。

3 工程应用实例

3.1 工程背景

通过对陕西彬长矿业公司的 5 个煤矿实地调研, 搜集相应文献资料, 得到各煤矿“一通三防”工作中的风险因素数据, 用来量化评估其煤矿的安全管理效果。5 个煤矿主采 4# 煤层, 开采方式为立井、斜井单水平开拓, 采用综采放顶煤回采工艺, 中央并列式通风和分区式通风, 水文地质类型复杂, 大多为高瓦斯矿井, 煤层或底板有冲击风险。笔者将构建的组合赋权-TOPSIS 评价模型应用于这 5 个煤矿“一通三防”的风险评估过程中。

3.2 安全风险等级判据

根据风险因素数值, 将煤矿“一通三防”安全风险分为 4 个等级: IV 级(低风险)、III 级(一般风险)、II 级(较大风险)、I 级(重大风险)。安全风险等级评价标准见表 2。评价等级临界值依据煤炭行业相关规程及文献^[21-22]确定。

表 2 安全风险等级评价标准

Table 2 Evaluation criteria for security risk levels

评价指标	I 级	II 级	III 级	IV 级
$C_1/\%$	≥ 16	< 12	< 8	< 6
C_2	< 1.5	< 2.0	< 2.5	> 3.0
C_3	< 2	< 4	< 6	> 10
$C_4/\%$	< 80	≥ 85	≥ 90	≥ 95
C_5	< 60	≥ 70	≥ 80	≥ 90
C_6	< 60	≥ 70	≥ 80	≥ 90
$C_7/\%$	< 20	< 15	< 10	< 5
$C_8/\%$	< 80	> 85	> 90	> 95
$C_9/\%$	< 20	< 15	< 10	< 5
C_{10}	< 65	≥ 75	≥ 85	≥ 95
C_{11}	< 65	≥ 75	≥ 85	≥ 95
C_{12}	< 65	≥ 75	≥ 85	≥ 95
C_{13}	< 65	≥ 75	≥ 85	≥ 95
$C_{14}/(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	< 10	< 8	< 6	< 4
C_{15}	< 65	≥ 75	≥ 85	≥ 95
C_{16}	< 65	≥ 75	≥ 85	≥ 95
C_{17}	< 65	≥ 75	≥ 85	≥ 95
C_{18}	< 65	≥ 75	≥ 85	≥ 95
C_{19}	< 65	≥ 75	≥ 85	≥ 95
C_{20}	< 65	≥ 75	≥ 85	≥ 95
C_{21}	< 65	≥ 75	≥ 85	≥ 95
C_{22}	< 65	≥ 75	≥ 85	≥ 95
C_{23}	< 65	≥ 75	≥ 85	≥ 95

3.3 指标权重的确定

1) 改进层次分析法计算主观权重

以准则层($B_1 \sim B_4$)为例, 根据改进层次分析法计算主观权重步骤进行计算。专家根据自身工作经验和专业知识, 对准则层相对于目标层的 4 个评价指标之间的重要性进行评判, 形成 $A-B$ 判断矩阵, 见表 3。

表 3 A-B 判断矩阵
Table 3 A-B judgment matrix

A	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄
B ₁	1	2	2	2
B ₂	0	1	2	0
B ₃	0	0	1	0
B ₄	0	2	2	1

根据式(3)~(12),计算判断矩阵 B 、最优传递矩阵 C 、拟优一致矩阵 D 。采用几何平均法(见式(13))计算得出拟优一致矩阵 D 的特征向量 $\bar{W}$,将特征向量 $\bar{W}$ 归一化处理,得到准则层的系统风险评价指标权重 $W = \{w_1, w_2, w_3, w_4\} = \{0.407, 0.210, 0.166, 0.218\}$ 。同理,按照同样的步骤计算出指标层的评价指标权重结果。指标层的风险评价指标权重计算结果为 $W_1 = \{0.325, 0.125, 0.168, 0.265, 0.067, 0.050, 0.268, 0.228, 0.102, 0.317, 0.089, 0.206, 0.310, 0.215, 0.034, 0.114, 0.121, 0.034, 0.134, 0.312, 0.204, 0.201, 0.115\}$ 。

2) 熵权法计算客观权重

基于熵权法计算指标权重,需要获取指标的原始数据。对彬长矿区 5 个煤矿“一通三防”风险情况进行实地调研,分析影响煤矿“一通三防”的风险因素。作业人员“三违”率 C_1 ,安(瓦)检员持证率 C_4 ,通风供电设备故障率 C_7 ,通风、防火设施建筑达标率 C_8 ,机械运转部件损坏或老化率 C_9 ,煤尘爆炸浓度 C_{14} 等因素可以根据调研真实情况填写;其他影响因素可以根据表 2 划分安全风险等级、确定临界值数据。

邀请煤矿企业“一通三防”管理人员和一线作业人员等进行打分,每个煤矿获取专家打分的平均值,补充原始数据。煤矿调研数据见表 4。

表 4 煤矿调研数据
Table 4 Coal mine survey data

评价指标	煤矿 1	煤矿 2	煤矿 3	煤矿 4	煤矿 5
$C_1/\%$	5.2	2.4	9.0	4.1	3.7
C_2	1.9	2.8	1.7	1.6	2.1
C_3	4.3	5.2	5.0	4.8	6.1
$C_4/\%$	93	90	89	79	91
C_5	87	84	73	83	88
C_6	90	86	89	78	85
$C_7/\%$	4.3	5.8	2.0	8.9	11.7
$C_8/\%$	89	92	82	71	79
$C_9/\%$	2.4	3.7	5.3	8.1	10.3
C_{10}	95	90	93	88	85
C_{11}	85	87	82	83	88
C_{12}	90	91	89	93	87
C_{13}	90	80	90	85	95
$C_{14}/(\text{mg}\cdot\text{m}^{-3})$	7	5	8	7	6
C_{15}	88	85	72	75	87
C_{16}	92	93	81	90	89
C_{17}	90	74	91	92	93

表 4(续)

评价指标	煤矿 1	煤矿 2	煤矿 3	煤矿 4	煤矿 5
C_{18}	90	79	89	91	81
C_{19}	85	80	70	90	95
C_{20}	95	97	83	85	90
C_{21}	80	97	94	88	86
C_{22}	91	85	89	91	74
C_{23}	75	74	71	89	81

根据式(16)~(20)及表 4 原始调研数据,计算评价指标权重。

3) 基于博弈论计算指标综合权重

根据式(22)~(25),将计算得出的主客观权重进行组合赋权,得到基于博弈论的组合权重结果,见表 5,权重分布如图 3 所示。

表 5 指标组合权重计算结果
Table 5 Calculation results of indicator portfolio weights

指标	改进层次分析法	熵权法	博弈论组合权重
C_1	0.325	0.053	0.093
C_2	0.125	0.041	0.028
C_3	0.168	0.046	0.042
C_4	0.265	0.051	0.073
C_5	0.067	0.036	0.013
C_6	0.050	0.035	0.009
C_7	0.264	0.045	0.064
C_8	0.228	0.040	0.049
C_9	0.102	0.037	0.020
C_{10}	0.317	0.057	0.097
C_{11}	0.089	0.036	0.017
C_{12}	0.206	0.043	0.048
C_{13}	0.310	0.058	0.097
C_{14}	0.215	0.047	0.054
C_{15}	0.034	0.036	0.007
C_{16}	0.114	0.037	0.023
C_{17}	0.121	0.039	0.025
C_{18}	0.034	0.035	0.006
C_{19}	0.134	0.037	0.027
C_{20}	0.312	0.054	0.091
C_{21}	0.204	0.046	0.051
C_{22}	0.201	0.041	0.044
C_{23}	0.115	0.036	0.022

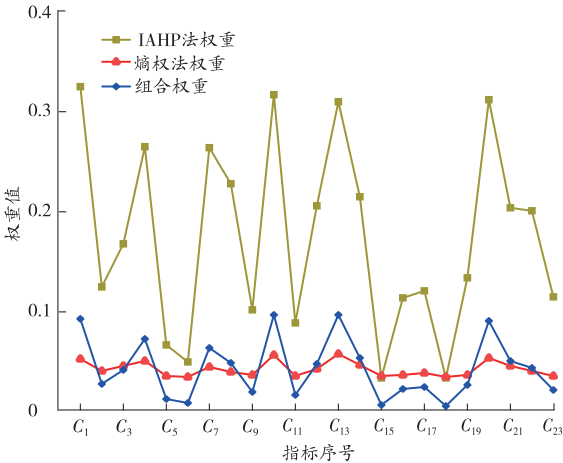


图 3 权重分布

Fig. 3 Weight distribution

3.4 TOPSIS 综合评价

根据式(16)和式(17),将表4的原始数据进行标准化处理,得到标准化后矩阵 B ;再根据表5计算得出的组合权重结果,按式(27)将标准化后矩阵加权处理得到加权标准化矩阵 C 。即:

$$B = \begin{bmatrix} 0.575 & 0.250 & \cdots & 0.222 & 2 \\ 1.000 & 0.000 & \cdots & 0.166 & 7 \\ 0 & 0.083 & \cdots & 0 & \\ 0.742 & 4 & 0 & \cdots & 1.000 & 0 \\ 0.803 & 0 & 0.4167 & \cdots & 0.555 & 6 \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$C = \begin{bmatrix} 0.053 & 5 & 0.007 & 0 & \cdots & 0.004 & 9 \\ 0.093 & 0 & 0.028 & 0 & \cdots & 0.003 & 7 \\ 0 & 0.002 & 3 & \cdots & 0 & \\ 0.069 & 0 & 0 & \cdots & 0.022 & 0 \\ 0.074 & 7 & 0.011 & 7 & \cdots & 0.012 & 2 \end{bmatrix} \quad (32)$$

由式(28)得出相对应的正、负理想解分别为 $C^+ = \{0, 0.028, 0, 0.042, 0, 0.073, 0, \cdots, 0.022, 0\}$ 、 $C^- = \{0.093, 0, 0, 0, 0, \cdots, 0\}$ 。

由式(29)和式(30)计算最终每个评价指标的正、负理想解距离 d_i^+ 、 d_i^- 和相对贴近度 E_i ,结果见表6。计算结果能够反映各个煤矿的实际情况和贴近度排序趋势,评价结果如图4所示。

表6 理想解和贴近度计算结果

Table 6 Calculation results of ideal solution and proximity

煤矿企业	d_i^+	d_i^-	E_i	排序
煤矿1	0.113 7	0.184 3	0.618 5	1
煤矿2	0.165 6	0.153 8	0.481 5	4
煤矿3	0.139 8	0.172 0	0.551 6	2
煤矿4	0.175 7	0.114 4	0.394 3	5
煤矿5	0.158 8	0.159 3	0.500 8	3

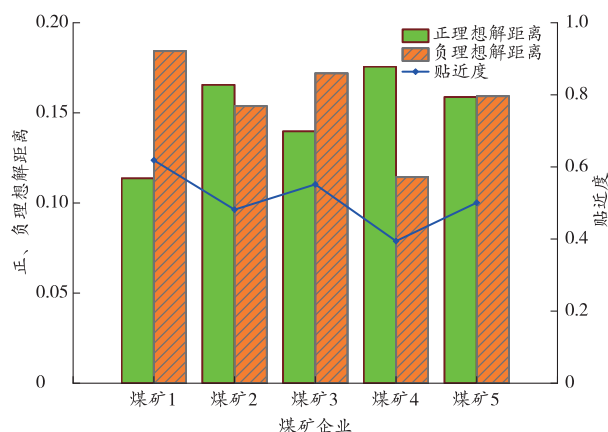


图4 评价结果

Fig. 4 Ranking evaluation results

3.5 评价结果分析

由表6和图4可知,评价指标贴近度计算结果由大到小依次为:煤矿1、煤矿3、煤矿5、煤矿2、煤矿4。贴近度的值越大,表明评价效果越好。因此,煤矿企业“一通三防”风险最低的是煤矿1,其次是

煤矿3、煤矿5、煤矿2,煤矿4“一通三防”的安全风险最高。

由调研情况及评价结果可知,煤矿2和煤矿4由于受教育水平较低,许多员工对专业理论知识不理解、专业设备操作不熟练,同时矿井安全预防性检查不到位、隐患排查不及时、安全技术措施不到位或设备发生故障未及时维护等原因导致评价指标贴近度值偏低。因此,煤矿2和煤矿4需要加强对员工的专业知识培训和岗前安全培训,完善煤矿“一通三防”的安全技术措施,保障企业安全生产。

由表5和图3可知,作业人员“三违”率、安全监控设备或系统运行状态、瓦斯含量超标、作业人员违章违规操作4个风险因素评价指标组合权重值为0.009以上,说明煤矿企业比较重视员工的安全操作,煤矿开采状况的实时监控及瓦斯检测工作;管理人员专业能力,矿井防尘、灭火系统不完善,浮煤、落矸掉落等指标组合权重值较低,说明煤矿企业需要加强对煤矿安全管理人才的引进和培训工作,尤其要注重煤矿开采作业现场的安管理工作。

4 结束语

1)基于事故致因理论,通过实地调研、专家咨询等方式筛选指标,构建了煤矿“一通三防”风险评价指标体系,包含4个一级指标和23个二级指标。

2)基于博弈论思想组合赋权,将由改进层次分析法计算出的主观权重和熵权法计算得到的客观权重进行组合权重计算,得出评价指标的综合权重,避免了单一方法计算权重带来的主观或客观因素影响,有利于评价指标体系中权重的精准化确定。

3)以陕西彬长矿业公司的5个煤矿为研究对象,将构建好的组合赋权-TOPSIS评价模型应用于“一通三防”风险评价研究中,结果表明,构建的评价模型对煤矿“一通三防”中的风险评估结果与实际情况基本一致。

参考文献(References):

- [1] 张俭让,加茸茸,闫振国,等.煤矿“一通三防”泛在学习模式的应用研究[J].煤炭工程,2017,49(5):143-145.
ZHANG Jianrang, JIA Rongrong, YAN Zhenguo, et al. Application of ubiquitous learning pattern for “Ventilation and Protection of Methane, Dust and Fire” in coal mine[J]. Coal Engineering, 2017, 49(5): 143-145.
- [2] 卢鉴章.我国煤矿一通三防技术的发展与进步[J].煤炭科学技术,2007,35(1):8-13.
LU Jianzhang. Development and advantage of ventilation and protection of fire, gas and dust technology in China coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2007, 35(1): 8-13.
- [3] 连会青,徐斌,田振燕,等.矿井水情监测与灾害风险预警平台设计与实现[J].煤田地质与勘探,2021,49(1):198-207.
LIAN Huiqing, XU Bin, TIAN Zhentao, et al. Design and

- implementation of mine water hazard monitoring and early warning platform[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(1): 198-207.
- [4] 孙佳, 孙殿阁, 李莉莉, 等. 煤矿“一通三防”安全状况的模糊综合评价[J]. 矿业安全与环保, 2005, 32(6): 74-75.
- SUN Jia, SUN Diange, LI Lili, et al. Fuzzy integral evaluation of safety state of “one-ventilation and three-prevention” in coal mines[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2005, 32(6): 74-75.
- [5] 李志, 范佩磊. 煤矿安全监控系统与“一通三防”管理的预警联动[J]. 工矿自动化, 2010, 36(4): 71-72.
- LI Zhi, FAN Peilei. System and management of one through three prevention of coal mine[J]. Industry and Mine Automation, 2010, 36(4): 71-72.
- [6] 肖军. 试析煤矿“一通三防”安全状况的模糊综合评价[J]. 内蒙古煤炭经济, 2016(17): 79.
- XIAO Jun. Analysis on fuzzy comprehensive evaluation of safety status of “one ventilation and three prevention” in coal mine[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2016(17): 79.
- [7] 李润, 李强. 直觉模糊 AHP 的煤矿“一通三防”安全性研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2017(2): 39-42.
- LI Run, LI Qiang. The study of “ventilation and protection of methane, dust and fire” in coal mine based on intuitionistic fuzzy AHP[J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2017(2): 39-42.
- [8] 李闯. 基于 HSE 的贵州某矿一通三防系统风险评估研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2018.
- LI Chuang. Risk assessment of one-ventilation and three-prevention system of a mine in Guizhou based on HSE[D]. Guiyang: Guizhou University, 2018.
- [9] 李闯, 袁梅, 陈银, 等. 基于 WBS-RBS 的贵州某矿“一通三防”系统风险评估[J]. 煤矿安全, 2018, 49(9): 297-300.
- LI Chuang, YUAN Mei, CHEN Yin, et al. Risk assessment of one-ventilation and three-prevention system of a mine in Guizhou based on WBS-RBS[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(9): 297-300.
- [10] 张学群. 基于改进模糊层次分析法的煤矿一通三防系统安全评价[J]. 中国矿山工程, 2022, 51(2): 8-12.
- ZHANG Xuequn. Assessment on ventilation-and-three-preventions safety system of coal mine based on improved fuzzy analytic hierarchy process[J]. China Mine Engineering, 2022, 51(2): 8-12.
- [11] 周建. 基于“一通三防”的矿井智能管控技术研究与应用[J]. 中国煤炭, 2024, 50(6): 59-66.
- ZHOU Jian. Research and application of mine intelligent control technology for mine ventilation and gas, coal dust and fire prevention[J]. China Coal, 2024, 50(6): 59-66.
- [12] 王振平, 闫振国, 岳宁, 等. 矿井“一通三防”智能管控系统研究[J]. 煤矿安全, 2022, 53(9): 193-197.
- WANG Zhenping, YAN Zhenguo, YUE Ning, et al. Research on intelligent control system of “one ventilation and three prevention” in coal mines[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(9): 193-197.
- [13] 许鹏飞, 赵浩, 付恩三, 等. 煤矿系统性安全风险评价指标体系及应用[J]. 煤炭工程, 2023, 55(5): 135-140.
- XU Pengfei, ZHAO Hao, FU Ensan, et al. Evaluation index system of coal mine systematic safety risk and its application[J]. Coal Engineering, 2023, 55(5): 135-140.
- [14] 郜彤, 刘赞, 黄鹤, 等. 煤矿安全风险评价指标体系优化研究[J]. 煤矿安全, 2020, 51(12): 296-300.
- GAO Tong, LIU Yun, HUANG He, et al. Study on optimization of coal mine safety risk evaluation index system[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(12): 296-300.
- [15] 张景钢, 王清焱, 赵淑枫. 基于贝叶斯网络的 HAZOP-LOPA 煤矿安全风险评价方法应用研究[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(1): 114-120.
- ZHANG Jinggang, WANG Qingyan, ZHAO Shufeng. Application of HAZOP-LOPA coal mine safety risk assessment method based on Bayesian network[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(1): 114-120.
- [16] 李敬强, 樊天辰, 胡超, 等. 基于组合赋权-TOPSIS 的民航法定自查人员培训效果评估[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(11): 4901-4907.
- LI Jingqiang, FAN Tianchen, HU Chao, et al. Evaluation of training effect of civil aviation statutory self-inspection personnel based on combined weighting-TOPSIS method[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(11): 4901-4907.
- [17] 王君莉. 基于改进层次分析法的煤矿电气安全评价指标权重确定[J]. 黑龙江科技大学学报, 2023, 33(1): 51-55.
- WANG Junli. Determination on electrical safety evaluation index weight of coal mine based on improved analytic hierarchy process[J]. Journal of Heilongjiang University of Science & Technology, 2023, 33(1): 51-55.
- [18] 朱峰, 张宏伟. 基于“AHP+熵权法”的 CW-TOPSIS 冲击地压评判模型[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(1): 128-133.
- ZHU Feng, ZHANG Hongwei. “AHP + entropy weight method” based CW-TOPSIS model for predicting rockburst[J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(1): 128-133.
- [19] 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. Slope stability evaluation based on comprehensive weight and TOPSIS[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(Sup. 1): 133-137.
- [20] 贾宝山, 尹彬, 王翰钊, 等. AHP 耦合 TOPSIS 的煤矿安全评价模型及其应用[J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(8): 99-105.
- JIA Baoshan, YIN Bin, WANG Hanzhao, et al. AHP coupled TOPSIS-based model for evaluating coal mine safety and its application[J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(8): 99-105.
- [21] 李文俊. 煤矿与非煤矿山安全评价指导手册[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2006.
- [22] 乔国厚. 煤矿安全风险综合评价与预警管理模式研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2013.
- QIAO Guohou. A study on the coal mine safety comprehensive evaluation and risk warning management mode[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2013.

(责任编辑: 樊淑兰)