

# 基于灰色关联度对掘进面工作环境的 层次综合评价

王素云,凌标灿,夏润,符飞

(华北科技学院 安全工程学院,北京 101601)

**摘要:**对煤矿掘进面作业环境评价是促进煤炭安全生产及个体保护的重要环节,而构建适合煤矿掘进面工作环境特性的评价模型对精准整治井下作业环境具有重要意义。本文提出一套由评价因素体系、评价方法和等级标准构成的煤矿掘进面作业环境评价模型。以煤矿掘进面特点为基础,依据层次分析法建立作业环境评价体系,按照煤矿生产环境标准作出评价等级表,构建基于灰色关联理论的评价模型,以评价指标的关联系数和权重值相结合得到关联度,从而定量评价煤矿掘进面工作环境。以某矿6个掘进面的作业环境为例,阐述了该模型的运用过程。结果表明,该模型具有适合该矿山特性、规范化及定量化的特点。

**关键词:**作业环境;关联系数;层次分析法;评价分级

**中图分类号:**TD76

**文献标识码:**A

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## Hierarchical Comprehensive Evaluation on Working Environment of Driving Face Based on Grey Correlation Analysis

WANG Suyun, LING Biaocan, XIA Run, FU Fei

(School of Safety Engineering, North China Institute of  
Science and Technology, Beijing 101601)

**Abstract:** The evaluation on the working environment of mining face is an important link to promote safety production and individual protection in mines; the construction of an evaluation model suitable for the working environment characteristics is of great significance to realize the precise control of the working environment. This paper proposes an evaluation model composed of evaluation factor system, evaluation method, and grade. On the characteristics of the mining face, a working environment evaluation system was established by the analytic hierarchy process; on the environment standards in mines, an evaluation grade classification was established. Then, in the evaluation model constructed by grey correlation analysis, the correlation degree, obtained by the combination of the correlation coefficients and weights of the evaluation indexes, was used to quantitatively evaluate the working environment of the mining face. The application process of the model was illustrated based on the working environment of six driving faces. The results show that the model is suitable for the mine in terms of characteristics, normalization and quantification.

**Key words:** working environment; correlation coefficient; analytic hierarchy process; evaluation classification

\* 收稿日期:2020-12-03

作者简介:王素云(1997-),女,河南周口人,硕士研究生,从事矿井瓦斯、火灾与粉尘防治技术研究工作,E-mail:1922849517@qq.com

煤炭资源是我国现有资源的主体,约占资源总和的80%。随着国家经济的快速发展,对于能源的需求也迅速增多<sup>[1]</sup>。巷道掘进作为煤矿开采过程中必不可少的环节之一,其工作面环境状况严重影响井下工作人员的身心健康及掘进工效。对影响掘进工作面环境的因素进行科学评估,能够针对性地应对作业环境中的问题并做出相应的改善。关维娟<sup>[2]</sup>等应用随机模拟法,在无评价偏好信息的情况下,对矿井井下工作面环境进行综合评价;欧晓英等<sup>[3]</sup>运用模糊层次评价法对矿井下高温工作环境的危害进行分析,确定了矿井环境的评价等级;吴勇华<sup>[4]</sup>建立了基于模糊相似选择原理的综合评价方法,对矿井热环境进行分析;李瑞银<sup>[5]</sup>等根据煤矿生产实际,从人的生理和心理对劳动环境的适应程度出发,应用模糊评价理论对回采工作面劳动环境状况建立了模糊综合评价模型;孙光裕<sup>[6]</sup>等基于FOWA-模糊综合评价法,从煤矿瓦斯爆炸危险性评价角度,对井下环境进行了分析评价;施式亮<sup>[7]</sup>等利用灰色关联度对掘进面作业环境进行了评价。

上述研究或从单一方面对井下环境进行分析评价,或单纯使用灰色关联分析或层次分析法对工作面环境进行关联度排序,并没有系统的对评价因素进行量化,从而无法具体判断工作面环境处于什么样的级别。本文根据《煤矿安全规程》<sup>[8]</sup>中对影响掘进工作面环境的粉尘、CH<sub>4</sub>、噪声、风速、温度和湿度等因素的规定标准作为参考依据,通过计算标准数据与实际数据的关联度以及确定影响掘进面作业环境因素的权重值,建立基于灰色关联度对掘进面工作环境的层次综合评价模型,评价掘进工作面的实际环境状况。

## 1 运用层次分析法对影响因素进行量化评价

层次分析法(AHP)是一种定性和定量相结合的、系统化、层次化的分析方法,围绕待评价系统的主题,对其影响因素按照不同属性进行分组,根据分组将整个评价系统划分为阶梯状的层次结构<sup>[9]</sup>。掘进工作面作业环境的评价包含很多因素,参考相关研究成果<sup>[10-14]</sup>,将最能够反映掘进面作业环境的因素分为两个准则层,即微气候环境  $A_1$  和空气质量  $A_2$ 。

煤矿微气候是指在井下封闭空间内由温度、湿度、风速、噪声等共同作用的小气候<sup>[15]</sup>。煤炭工业“十三五”规划中,提出建成高效的现代煤炭工业,即煤矿采煤机械化程度达到85%,掘进机械化程度达

到65%<sup>[16]</sup>。随着机械化程度的提升,井下工作人员受到的噪声污染也越发严重,因此将噪声作为评价掘进面工作环境的因素具有重要意义。

由于掘进面没有完整的通风系统,只能依靠局部通风机通风,因此工作面空气质量较差,空气中氧气含量偏低,对工人的身体健康有一定影响。同时,由于爆破所产生的CH<sub>4</sub>、粉尘更是恶化了掘进工作面的作业环境。煤矿粉尘是我国尘肺病最主要的来源,且长期暴露在粉尘环境的工作设备,其寿命和精度都会降低。粉尘浓度过高不仅降低生产效率,而且还具有爆炸的风险。CH<sub>4</sub>是瓦斯的主要成分,瓦斯含量过高会使空气中氧含量降低,致使人缺氧死亡,且当瓦斯含量达到一定值也会产生瓦斯爆炸的危险。

在此构造成对比较矩阵。根据准则层因素确定指标层因素集如下:

$$A = \{A_1, A_2\},$$

$$A_1 = \{A_{11}, A_{12}, A_{13}, A_{14}\},$$

$$A_2 = \{A_{21}, A_{22}, A_{23}\}.$$

式中: $A_1$ 为微气候环境; $A_2$ 为空气质量; $A_{11}$ 为噪声; $A_{12}$ 为温度; $A_{13}$ 为湿度; $A_{14}$ 为风速; $A_{21}$ 为粉尘浓度; $A_{22}$ 为CH<sub>4</sub>体积分数; $A_{23}$ 为O<sub>2</sub>体积分数。

表1为1~9标度的含义。根据1~9标度,对每一层次指标的重要性程度进行两两比较。若因素*i*重要性因素*j*的重要性相反,则 $A_{ij}$ 与 $A_{ji}$ 互为倒数。

表1 1-9标度的含义  
Table 1 Meanings of scale 1 to 9

标度 $A_{ij}$	含义
1	$A_i$ 与 $A_j$ 同等重要
3	$A_i$ 比 $A_j$ 稍微重要
5	$A_i$ 比 $A_j$ 重要
7	$A_i$ 比 $A_j$ 强烈重要
9	$A_i$ 比 $A_j$ 极端重要
2,4,6,8	上述重要性中间值

由此得到的判断矩阵如表2—表4所示。

表2 判断矩阵A  
Table 2 Judgment matrix A

A	$A_1$	$A_2$
$A_1$	1	1/2
$A_2$	2	1

表3 判断矩阵 $A_1$   
Table 3 Judgment matrix  $A_1$

$A_1$	$A_{11}$	$A_{12}$	$A_{13}$	$A_{14}$
$A_{11}$	1	1/4	1/3	1/2
$A_{12}$	4	1	2	4
$A_{13}$	3	1/2	1	2
$A_{14}$	2	1/4	1/2	1

表 4 判断矩阵  $A_2$   
Table 4 Judgment matrix  $A_2$

$A_2$	$A_{22}$	$A_{23}$	$A_{24}$
$A_{22}$	1	1	1/4
$A_{23}$	1	1	1/4
$A_{24}$	4	4	1

计算矩阵  $A_1$  每一行的元素乘积  $M_i$ , 求出  $M_i$  的  $n$  次方根  $\bar{W}_i$ , 对  $\bar{W}$  规范化, 即所求的特征向量  $W_i$

$$W_i = \frac{\bar{W}_i}{\left(\sum_{j=1}^n \bar{W}_j\right)}, \quad (1)$$

计算特征向量的最大特征根

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{nW_i}. \quad (2)$$

表 5 平均随机一致性指标  $I_R$

Table 5 Mean random consistency index  $I_R$

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_R$	0	0	0.85	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

权重排序为:  $W_{12} > W_{13} > W_{14} > W_{11}$ ,  $I_{CR} = 0.017 < 0.1$ , 所以  $A_1$  具有满意的一致性。

权重排序为:  $W_{23} > W_{22} = W_{21}$ ,  $I_{CR} = 0.0669 < 0.1$ , 所以  $A_2$  具有满意的一致性。

目标层对准则层  $A_1$  的权重为:

$$W = 0.3333 \times [0.0937 \ 0.4914 \ 0.2689 \ 0.1460]^T = [0.0312 \ 0.1638 \ 0.0896 \ 0.0487]^T.$$

目标层对准则层  $A_2$  的权重为:

$$W = 0.6667 \times [0.1667 \ 0.1667 \ 0.6667]^T = [0.1111 \ 0.1111 \ 0.4445]^T.$$

## 2 灰色关联度分析

灰色关联度分析 (Grey Relation Analysis,

判断矩阵  $A$  权重值为  $W = [0.3333 \ 0.6667]$ .

判断矩阵  $A_1: \lambda_{\max} = 4.0458$  权重值为  $W = [0.0937 \ 0.4914 \ 0.2689 \ 0.1460]$ .

判断矩阵  $A_2: \lambda_{\max} = 3$  权重值为  $W = [0.1667 \ 0.1667 \ 0.6667]$ .

计算一致性指标  $I_C$  和平均随机一致性指标  $I_{CR}$ 。

$$I_C = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n - 1)}, \quad (3)$$

$$I_{CR} = \frac{I_C}{I_R}. \quad (4)$$

查找相应的平均随机一致性指标  $I_R$  值 (表 5),

当  $I_{CR} < 0.1$  时, 判定矩阵通过一致性检验。

GRA) 是研究在两个或多个系统中, 通过比较构成标准系统因素与被比较系统因素的关联度, 评定被比较系统的标准程度。其关联度越高表明被比较系统越接近标准系统。针对某煤矿的 6 个掘进工作面噪声、温度、湿度、风速、一氧化碳含量、粉尘浓度、甲烷含量和氧气含量的六组数据, 根据煤矿安全生产规程以及职业卫生健康标准对生产环境的要求, 选出最符合标准的数据作为最优数据, 计算最优数据与其他数据的关联系数和关联度, 如表 6 所示。

以最优序列为基数对  $A_1$ 、 $A_2$  的样本数据进行归一化处理, 如表 7 和表 8 所示。

表 6  $A_1$  和  $A_2$  样本数据

Table 6 Sample data of  $A_1$  and  $A_2$

序列	噪声/dB	温度/ $^{\circ}\text{C}$	湿度/%	风速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\rho_{\text{粉尘}}/(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\varphi(\text{CH}_4)/\%$	$\varphi(\text{O}_2)/\%$
1	90	28	85	2.5	11.80	0.27	21.7
2	38	22	56	1.9	3.83	0.58	20.5
3	55	20	92	1.5	7.45	0.76	19.8
4	64	24	63	0.9	5.64	0.98	18.6
5	78	25	75	1.2	9.87	0.85	17.3
6	15	16	68	1.0	8.66	0.45	19.1
最优	15	16	56	2.5	3.83	0.27	21.7

表 7  $A_1$  和  $A_2$  归一化数据

Table 7 Normalization data of  $A_1$  and  $A_2$

序列	噪声/dB	温度/ $^{\circ}\text{C}$	湿度/%	风速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\rho_{\text{粉尘}}/(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\varphi(\text{CH}_4)/\%$	$\varphi(\text{O}_2)/\%$
1	6.000	1.750	1.518	1.000	3.081	1.000	1.000
2	2.533	1.375	1.000	0.760	1.000	2.148	0.945
3	3.667	1.250	1.643	0.600	1.945	2.815	0.912
4	4.267	1.500	1.125	0.360	1.473	3.630	0.857
5	5.200	1.563	1.339	0.480	2.577	3.148	0.797
6	1.000	1.000	1.214	0.400	2.261	1.667	0.880
最优	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

表 8 1-6 与最优序列归一化差值  
Table 8 Normalization difference between the optimal sequence and sequence 1-6

序列	噪声/dB	温度/℃	湿度/%	风速/(m·s <sup>-1</sup> )	ρ <sub>粉尘</sub> /(mg·m <sup>-3</sup> )	φ(CH <sub>4</sub> )/%	φ(O <sub>2</sub> )/%
1	5.000	0.750	0.518	0	2.081	0	0
2	1.533	0.375	0	0.240	0	1.148	0.055
3	2.667	0.250	0.643	0.400	0.945	1.815	0.088
4	3.267	0.500	0.125	0.640	0.473	2.630	0.143
5	4.200	0.563	0.339	0.520	1.577	2.148	0.203
6	0	0	0.214	0.600	1.261	0.667	0.120

2.1 求灰色关联系数

灰色关联系数  $\delta_i(k)$  用来衡量标准系统数据与

被比较系统数据在各个时刻的差别程度,具体计算

公式如下:

$$\delta_i(k) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (5)$$

式中:  $\rho$  为分辨系数,一般在 0~1 之间,通常取 0.5。

将  $\rho = 0.5, \Delta \min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| = 0,$

$\Delta \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)| = 5$  代入(5) 计算关联系数公式得到下式:

$$\delta_i(k) = \frac{5 \times 0.5}{|\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + 5 \times 0.5} \quad (6)$$

根据式(6)得到  $A_1, A_2$  的关联系数如表 9 所示。

表 9  $A_1$  和  $A_2$  关联系数

Table 9 Correlation coefficient of  $A_1$  and  $A_2$

序列	噪声/dB	温度/℃	湿度/%	风速/(m·s <sup>-1</sup> )	ρ <sub>粉尘</sub> /(mg·m <sup>-3</sup> )	φ(CH <sub>4</sub> )/%	φ(O <sub>2</sub> )/%
1	0.333	0.769	0.828	1.000	0.546	1.000	1.000
2	0.620	0.870	1.000	0.912	1.000	0.685	0.978
3	0.484	0.909	0.796	0.862	0.726	0.579	0.966
4	0.434	0.833	0.952	0.796	0.841	0.487	0.946
5	0.373	0.816	0.881	0.828	0.613	0.538	0.925
6	1.000	1.000	0.921	0.807	0.665	0.790	0.954

2.2 计算评价系统关联度和评价标准

根据评价指标的关联系数与其权值相结合建立

综合评价模型,计算 6 个参评系统的关联度<sup>[17]</sup>。

表 10 评价系统关联度

Table 10 Correlation degree of the evaluation system

序列	噪声/dB	温度/℃	湿度/%	风速/(m·s <sup>-1</sup> )	ρ <sub>粉尘</sub> /(mg·m <sup>-3</sup> )	φ(CH <sub>4</sub> )/%	φ(O <sub>2</sub> )/%	关联度
1	0.333	0.769	0.828	1.000	0.546	1.000	1.000	0.876
2	0.620	0.870	1.000	0.912	1.000	0.685	0.978	0.918
3	0.484	0.909	0.795	0.862	0.726	0.579	0.966	0.852
4	0.434	0.833	0.952	0.796	0.841	0.487	0.946	0.803
5	0.373	0.816	0.881	0.828	0.613	0.538	0.925	0.798
6	1.000	1.000	0.921	0.806	0.665	0.789	0.954	0.903
权重	0.031 2	0.163 8	0.089 6	0.048 7	0.111	0.111	0.445	—

对各评价指标的权值与关联系数乘积之和得到关联度,关联度越接近 1 说明相关性越好。

由表 10 可知,关联度排序为:

$$r_2 > r_6 > r_1 > r_3 > r_4 > r_5.$$

$$r_i = \sum_{k=1}^n W_k \delta_i(k). \quad (7)$$

表 11 评价等级表

Table 11 Evaluation grade

评价等级	噪声/dB	温度/℃	湿度/%	风速/(m·s <sup>-1</sup> )	ρ <sub>粉尘</sub> /(mg·m <sup>-3</sup> )	φ(CH <sub>4</sub> )/%	φ(O <sub>2</sub> )/%
I	0~20	15~18	50~60	2~2.5	2~4	0.2~0.4	21~22
II	20~40	18~21	60~70	1.5~2	4~6	0.4~0.6	20~21
III	40~60	21~24	70~80	1.0~1.5	6~8	0.6~0.8	19~20
IV	60~80	24~27	80~90	0.5~1.0	8~10	0.8~1.0	18~19
V	>80	27~30	90~100	0~0.5	10~12	1.0~1.2	17~18

根据表 11 对每个参评系统的具体数据进行评分,评分结果与各自的权重值组合,得到参评系统的

最终排序结果如表 12 所示。

表 12 评价系统得分及排序表  
Table 12 Score and ranking of the evaluation system

序列	A <sub>11</sub>	A <sub>12</sub>	A <sub>13</sub>	A <sub>14</sub>	A <sub>21</sub>	A <sub>22</sub>	A <sub>23</sub>	总分
1	60	60	70	100	60	100	100	85.10
2	90	80	100	100	100	90	90	90.88
3	80	90	60	80	80	80	80	79.87
4	70	80	90	70	90	70	70	75.67
5	70	70	80	80	70	70	60	66.95
6	100	100	90	70	70	90	90	88.78
权重	0.031 2	0.163 8	0.089 6	0.048 7	0.111 1	0.111 1	0.444 5	—

根据中值法对综合得分总分等级评价,评价结果如表 13 所示。

表 13 评价标准  
Table 13 Evaluation standard

评价区间	>90	85~90	80~85	75~80	<75
评价结果	优	良	中等	较差	差

由此可见,基于灰色关联度的层次分析综合评价模型对 2 号掘进面评价结果为优,1 号和 6 号掘进面评价结果为良好,3 号和 4 号掘进面评价结果为较差,5 号掘进面评价结果为差。

### 3 结论

1)应用层次分析法建立了掘进面作业环境评价模型,根据对作业环境的影响因素确定目标层、准则层、指标层,利用 9 标度法建立判断矩阵,逐步得到目标层相对于指标层的权重,能够反映各影响因素的重要性,从而能够对整治掘进面工作环境的重点

做出清晰的判断。

2)通过对掘进面工作环境各个影响因素的数据进行无量纲化处理,解决了因量纲不同造成数据无法比较的问题。基于灰色关联算法求出参比系统中各因素与最优系统中各因素的关联系数,进一步确定参比系统的关联度。

3)采用基于灰色关联度的层次分析综合评价模型,将各影响因素的权重值与关联系数结合,确定参比系统的关联度。同时参照煤矿生产相关规定及标准确定分级和得分标准,得到最终的得分情况,根据此得分对 6 个参照系统进行评价。

4)由各影响因素的权重值与关联系数,结合得到的关联度排序与根据权重值和各因素参照评价等级表所得到的综合得分具有一致的排序性,均为 2 号>6 号>1 号>3 号>4 号>5 号,验证了该模型的合理性。

#### 参考文献:

- [1] 郭力.我国煤炭绿色开采技术的发展研究[J].内蒙古煤炭经济,2017(21):20,37.
- [2] 关维娟,陈明强,赵志根,等.随机模拟法在矿山井下工作面环境评价中的应用[J].工业安全与环保,2016,42(2):86-89.  
GUAN W J, CHEN M Q, ZHAO Z G, et al. Application of stochastic simulation in environment assessment of mine underground working face[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2016, 42(2): 86-89.
- [3] 欧晓英,杨胜强,于宝海,等.矿井热环境评价及其应用[J].中国矿业大学学报,2005(3):323-326.  
OU X Y, YANG S Q, YU B H, et al. Evaluation of thermal environment in mine and its application[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2005(3): 323-326.
- [4] 吴勇华.矿井气候环境的综合评价[J].陕西煤炭,2002(2):3-6.  
WU Y H. Synthetic evaluation on climate environment of mine[J]. Shaanxi Coal, 2002(2): 3-6.
- [5] 李瑞银,李堂军.煤矿工作面工作环境模糊评价方法与应用[J].煤炭科技,2007(3):24-26.  
LI R Y, LI T J. Fuzzy evaluation method and application of working environment in coal mine working face[J]. Coal Science and Technology Magazine, 2007(3): 24-26.
- [6] 孙光裕,江泽标,康向涛,等.基于 FOWA-模糊综合评价法的煤矿瓦斯爆炸危险性评价研究[J].数学的实践与认识,2019,49(7):261-269.  
SUN G Y, JIANG Z B, KANG X T. Study on hazard assessment of coal mine gas explosion based on Fowa-Fuzzy comprehensive evaluation[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2019, 49(7): 261-269.
- [7] 施式亮,刘宝琛,王海桥.掘进工作面作业环境评价模型及应用[J].矿冶工程,1998(3):3-5.  
SHI S L, LIU B C, WANG H Q. Evaluation model and application of working environment in heading face[J]. Mining and Metallurgy Engineering, 1998(3): 3-5.
- [8] 国家安全生产监督管理总局,国家煤矿安全监察局.煤矿安全规程[M].北京:煤炭工业出版社,2016.
- [9] 王岩松.基于层次分析法的城市隧道合理埋置深度研究[C]//中冶建筑研究总院有限公司.2020年工业建筑学术交流会议

- 文集(上册).北京:工业建筑杂志社,2020:227-231.
- [10] 王明,邓权龙,田冬梅,等.煤矿井下职业危害的未确知测度评价模型及应用[J].矿业安全与环保,2019,46(4):54-58.  
WANG M,DENG Q L,TIAN D M,et al. Evaluation model of uncertainty measurement on occupational hazard in coal mine [J]. Mining Safety and Environmental Protection,2019,46(4):54-58.
- [11] 周宣赤,吴裕祥,安凤平,等.基于未确知属性层次的井下作业环境综合评价[J].煤炭技术,2010,29(2):93-96.  
ZHOU X C,WU Y X,AN F P,et al. Comprehensive evaluation of working environment under mines based on unascertained analytic hierarchical model[J]. Coal Technology,2010,29(2):93-96.
- [12] 任大伟,徐小华,梁亚敏,等.煤矿井下作业疲劳影响因素及对策研究[J].煤矿安全,2019,50(3):231-234.  
REN D W,XU X H,LIANG Y M,et al. Study on influence factors and countermeasures of underground work fatigue in coal mine[J]. Safety in Coal Mines,2019,50(3):231-234.
- [13] 高佳南,吴奉亮,李文福.基于最小二乘法的优化组合权重模型在矿井环境舒适度评价中的应用[J].安全与环境工程,2020,27(5):177-183.  
GAO J N,WU F L,LI W F. Application of least square method based optimal combined weight model in comfort evaluation of mine environment[J]. Safety and Environmental Engineering,2020,27(5):177-183.
- [14] 关于印发煤炭工业发展“十三五”规划的通知[EB/OL]. [http://www.nea.gov.cn/2016-12/30/c\\_135944439.htm](http://www.nea.gov.cn/2016-12/30/c_135944439.htm),2016-12-30.
- [15] 邢媛媛,王恩元,陈燕文.基于可变模糊识别理论的煤矿掘进工作面环境评价的研究[J].矿业安全与环保,2019,46(5):109-113.  
XING Y Y,WANG E Y,CHEN Y W. Study on environmental assessment of coal mine driving face based on variable fuzzy recognition theory[J]. Mining Safety and Environmental Protection,2019,46(5):109-113.
- [16] 关维娟,陈明强,赵志根.基于随机模拟法的煤矿采掘工作面作业环境评价[J].煤炭技术,2015,34(4):16-18.  
GUAN W J,CHEN M Q,ZHAO Z G. Evaluation of working environment of coal mining face based on stochastic simulation method[J]. Coal Technology,2015,34(4):16-18.
- [17] 刘方.基于灰色关联度的模糊层次组合矿山地质环境评价模型研究[D].西安:长安大学,2014.

(编辑:安 娜)