

基于 FAHP 与可变模糊集的矿山生态安全效应评估

薛希龙, 王新民, 胡 勇, 杨 力

(中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘 要: 为了定量评估金属矿山生态安全现状,建立了金属矿山生态安全效应评估指标体系及评估等级标准,采用模糊层次法(FAHP)确定生态安全效应各子系统及其指标的权重,并引入可变模糊集理论,建立基于 FAHP 与可变模糊集的矿山生态安全效应评估耦合模型.利用该模型对安徽某大型铜矿的生态安全效应进行评估,经计算该矿在生产效应、自然禀赋效应和社会经济效应子系统上属于Ⅱ级,在环境效应子系统上属于Ⅲ级,矿山综合生态安全效应状态属于Ⅱ级.结果表明:该模型计算简便、可信度高,与其他评估方法得到的结果相一致,亦符合矿山实际情况.

关 键 词: 模糊层次分析法(FAHP);可变模糊集;矿山生态安全效应;评估指标体系;相对差异函数

中图分类号: TD 853, X 822

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2016)01-0094-06

Ecological Security Effect Evaluation of Mine Based on Fuzzy Analytical Hierarchy Process and Variable Fuzzy Sets

XUE Xi-long, WANG Xin-min, HU Yong, YANG Li

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China. Corresponding author: XUE Xi-long, E-mail: xxl3305@126.com)

Abstract: In order to quantitatively evaluate ecological security current status in metal mines, the evaluation index system and evaluation grading criterions of ecological security effect in metal mines were created. Weights of evaluation subsystem and secondary indexes were obtained by the fuzzy analytical hierarchy process (FAHP). An evaluation integrated model was built for ecological security effect in metal mines on the basis of FAHP and variable fuzzy sets. The model was applied to evaluate ecological security effect for a large copper mine in Anhui province. Through the calculation of the model, the ecological security effect grade of production effect, natural endowment effect and socioeconomic effect was classified as class II; the environmental effect subsystem was classified as class III. The overall evaluation of the copper mine was classified as class II. The results show that the model is reliable and flexible and its results are consistent with the actual situations and those of other models.

Key words: fuzzy analytical hierarchy process(FAHP); variable fuzzy sets; ecological security effect of mines; evaluation index system; relative difference function

矿产资源的开采既促进了人类社会的文明和进步,也造成了矿区及周边生态环境的污染和破坏^[1-2].大规模的地下开采不仅造成了地表大面积沉降,而且导致农作物减产、土地结构变化、土壤及水体污染和地下水系的破坏等,使得矿区生态系统的微气候、水文、植被及生物等环境发生变化,造成整个矿区生态环境的恶化,进而发展为不

可逆转的生态安全问题.矿山生态安全效应评估是协调采矿活动与环境矛盾的重要理论基础工作,对指导矿山生产管理、改善和治理矿区环境以及维持矿区生态平衡具有重要意义.近年来,学者对矿山生态安全效应评估方面的研究已有较多成果,主要有模糊综合评价法^[3]、BP神经网络预测法^[4]和广义线性理论^[5]等,其中传统的模糊综合

收稿日期: 2014-11-17

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2013BAB02B05)

作者简介: 薛希龙(1985-),男,甘肃金昌人,中南大学博士研究生;王新民(1957-),男,安徽安庆人,中南大学教授,博士生导师.

评价法需要人为选取相关隶属函数,增加了评估的主观性和计算工作量;BP 神经网络预测法需要大量训练样本,在实际应用中受大量知识获取瓶颈的限制;而广义线性理论则主要针对线性系统进行评估,很难全面反映非线性系统的特征。而且这些方法在评估过程中很难充分体现事物或现象间的对立统一规律。因此引入可变模糊集理论^[6-7],将其与传统数学方法相融合作为一套量化模式,是解决上述问题的有效途径。可变模糊集是一种解决矛盾相容、定性与定量等不确定性问题的数学工具,以相对隶属函数作为信息处理基础,并可以自我验证评估方法及结果的可靠性。为此本文在广泛调查矿区生态安全效应影响因素的基础上,从生产效应、自然禀赋效应、环境效应和社会经济效益 4 个方面综合考虑,建立基于模糊层次分析法^[8] (fuzzy analytical hierarchy process, FAHP) 与可变模糊集的矿山生态安全效应评估耦合模型,并以安徽某矿区作为评估对象进行应用研究。

1 基于 FAHP 的权重计算模型

1.1 构造模糊互补判断矩阵

设指标 i 、对象 j 的判断矩阵 $P = (p_{ij})_{m \times n}$, 若满足 $0 \leq p_{ij} \leq 1$, 且 $p_{ij} + p_{ji} = 1 (i, j = 1, 2, \dots, n)$, 则称 P 为模糊互补判断矩阵。式中 p_{ij} 表示指标 i 优于指标 j 的程度, 当 $p_{ij} > 0.5$ 时, 表示指标 i 比指标 j 重要, 且 p_{ij} 越大表示指标 i 比指标 j 越重要, 反之亦然。将各因素两两相互比较, 得到模糊互补判断矩阵 P 。

1.2 计算模糊互补判断矩阵的权重向量与特征矩阵

根据文献^[8]中推导出的公式, 计算模糊互补判断矩阵 P 的权重向量 W , $W = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n]^T$, 其中,

$$\omega_i = \frac{\left(\sum_{j=1}^n p_{ij} + \frac{n}{2} - 1\right)}{n(n-1)}. \quad (1)$$

式中, ω_i 为指标 i 的权重值。

根据权重向量 W 计算 P 的特征矩阵, 其中

$$\sum_{i=1}^n \omega_i = 1 (\omega_i \geq 0). \quad (2)$$

令

$$\omega_{ij} = \frac{\omega_i}{\omega_i + \omega_j}, \quad (3)$$

则称矩阵 $W^* = (\omega_{ij})_{m \times n}$ 为模糊互补判断矩阵 P

的特征矩阵。式中, ω_{ij} 为特征矩阵 W^* 的特征值。

1.3 判定模糊互补判断矩阵的一致性

为使判断结果更好地与实际状况相吻合, 利用模糊互补判断矩阵 P 和其特征矩阵 W^* 的相容性指标 I 来检验其一致性^[9]:

$$I(P, W^*) = \frac{1}{n^2} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n |W_{ij} + W_{ji}^* - 1|. \quad (4)$$

通常情况下当一致性指标 $I < 0.1$ 时, 即可认为所确定的权重是可以接受的。

2 FAHP 与可变模糊集耦合模型

2.1 对立模糊集

根据矛盾双方的对立性与统一性, 设论域 U 上的对立模糊概念 A 与 A^c , 以 A 和 A^c 表示吸引性质和排斥性质, 对 U 中的任意元素 u , 满足 $u \in U$, 在连续统区间 $[1, 0]$ (对 A) 与 $[0, 1]$ (对 A^c) 的任意一点上, 吸引与排斥的相对隶属度分别为 $u_A(u)$ 与 $u_A^c(u)$, 且满足 $u_A(u) + u_A^c(u) = 1, 0 \leq u_A(u) \leq 1, 0 \leq u_A^c(u) \leq 1$ 。令

$$A = \{u, u_A(u), u_A^c(u) | u \in U\}, \quad (5)$$

A 称为 u 的对立模糊集。 $u_A(u)$ 与 $u_A^c(u)$ 的相互关系如图 1 所示。

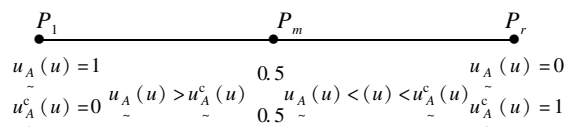


图 1 对立模糊集 A 示意图

Fig. 1 Opposite fuzzy sets A diagram

2.2 相对差异函数与相对隶属函数

对 U 中的任意元素 u , 满足 $u \in U$, 在相对隶属函数的参考连续统数轴上, 设 u 对 A 的相对差异度为 $D_A(u)$, 即

$$D_A(u) = u_A(u) - u_A^c(u). \quad (6)$$

定义映射: $D_A: \rightarrow [-1, 1], u \mapsto D_A(u) \in [-1, 1]$, 则称 $D_A(u)$ 为 u 对 A 的相对差异函数。

设 $X_0 = [a, b]$ 为实轴上可变模糊集 V 的吸引域, 即 $0 < D_A(u) \leq 1$ 区间, $X = [c, d]$ 为包含 X_0 ($X_0 \subset X$) 的某一范围域区间。根据可变模糊集 V 的定义可知 $[c, a]$ 与 $[b, d]$ 均为 V 的排斥域。设 M

为区间 $[a, b]$ 中 $D_A(u) = 1$ 的点值.

当 x 落入 M 点左侧时,相对隶属函数模型为

$$\left. \begin{aligned} u_A(u) &= 0.5(1 + \frac{x-a}{M-a}), x \in [a, M]; \\ u_A(u) &= 0.5(1 - \frac{x-a}{c-a}), x \in [c, a]. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

当 x 落入 M 点右侧时,相对隶属函数模型为

$$\left. \begin{aligned} u_A(u) &= 0.5(1 + \frac{x-b}{M-b}), x \in [M, b]; \\ u_A(u) &= 0.5(1 - \frac{x-b}{d-b}), x \in [b, d]. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

2.3 FAHP 与可变模糊集耦合模型的求解步骤

步骤 1 根据 FAHP 模型计算各评估指标的权重向量.

步骤 2 将评估对象划分成 c 个生态安全效应等级,每个指标按等级的划分要求分成 c 个区间,构成指标标准区间矩阵 I_{ab} ,其中 $I_{ab} = ([a, b]_{ih})_{m \times c}$.式中: $h = 1, 2, \dots, c$; c 为级别数.

步骤 3 根据指标标准区间矩阵 I_{ab} 确定指标变动区间矩阵 I_{cd} ,其中 $I_{cd} = ([c, d]_{ih})_{m \times c}$.

步骤 4 根据矩阵 I_{ab} 确定区间 $[a_{ih}, b_{ih}]$ 中 $D_A(x) = 1$ 的点对应的值,确定指标 i 、级别 h 的 M 矩阵,其中 $M = (m_{ih})_{m \times c}$.

步骤 5 根据式(7)、式(8)计算评估对象的相对隶属度矩阵 R ,其中 $R = u_A(x_{ij})_h$.对象 j 、指标 i 对级别 h 的综合相对隶属度矩阵 $S' = u'_h(X_j)$,并对 S' 进行归一化处理,得到归一后的综合相对隶属矩阵 $S = u_h(X_j)$,其中,

$$u'_h(X_j) = \left\{ 1 + \left[\frac{\sum_{i=1}^m (\omega_i (1 - u_A(x_{ij})_h))^\alpha}{\sum_{i=1}^m (\omega_i (u_A(x_{ij})_h))^\alpha} \right]^{\frac{\beta}{\alpha}} \right\}^{-1} \quad (9)$$

式中: ω_i 为指标 i 的权重值; α 为可变距离参数; β 为可变优化准则参数.通常 $\alpha = 1$ 为海明距离, $\alpha = 2$ 为欧式距离; $\beta = 1$ 为最小一乘方准则, $\beta = 2$ 为最小二乘方准则.

步骤 6 应用级别特征计算公式^[6]计算评估对象各子系统的生态安全效应等级特征值:

$$H = \sum_{h=1}^c u_h(X_j) h. \quad (10)$$

重复步骤 5,步骤 6 确定评估对象各子系统的生态安全效应综合等级特征值:

$$\bar{H}' = \frac{1}{4} \sum_{t=1}^4 H_t \quad (t = 1, 2, 3, 4). \quad (11)$$

式中: t 为参数 α, β 的 4 种不同组合方式; H 为子系统的生态安全效应等级特征值; \bar{H}' 为子系统的

生态安全效应综合等级特征值.

步骤 7 根据式(12)确定评估对象的综合生态安全效应等级特征值:

$$\bar{H} = \sum_{r=1}^s (\bar{H}'_r w_r). \quad (12)$$

式中: $r = 1, 2, 3, \dots, s$; s 为评估对象子系统个数; w_r 为各子系统权重; \bar{H} 为评估对象综合生态安全效应等级特征值.对于评估对象的综合生态安全效应等级特征值 \bar{H} ,当 $1.0 < \bar{H} \leq 1.5$,属于 I 级;当 $1.5 < \bar{H} \leq 2.5$,属于 II 级;当 $2.5 < \bar{H} \leq 3.5$,属于 III 级;当 $3.5 < \bar{H} \leq 4.5$,属于 IV 级;当 $4.5 < \bar{H} \leq 5.0$,属于 V 级.

3 工程应用

3.1 评估指标体系的建立及其矿山现状特征值

金属矿区生态安全受诸多因素的影响,结合其生态安全效应评估系统的内涵与目标,通过理论分析、参阅文献^[10-11]、工程类比和咨询专家,把矿山生态安全效应评估系统分为 4 个子系统:一是生产效应(P_1),包括矿石品位(I_1),共生矿物品位(I_2),金属综合回收率(I_3),年尾矿利用率(I_4),年废石利用率(I_5)和单位能耗(I_6);二是自然禀赋效应(P_2),包括矿区年降水量(I_7),矿区人口密度(I_8)和矿区植被覆盖率(I_9);三是环境效应(P_3),包括生物多样性指数(I_{10}),地下水综合污染指数(I_{11}),空气污染指数(I_{12}),土地复垦率(I_{13}),地质灾害面积比(I_{14});四是社会经济效应(P_4),包括生产管理指数(I_{15}),环保投入比例(I_{16}),矿山经济贡献率(I_{17})和科技人员贡献率(I_{18}).参照矿山生态环境方面的国家标准及规范并借鉴其他学者的研究成果^[3-5],提出表 1 所示的定量指标分类、赋值标准,相应地把矿山生态安全效应分为 5 个等级,依次是: I 级(理想); II 级(良好); III 级(预警); IV 级(较差); V 级(恶劣).

本文将安徽省某大型铜矿矿区生态安全系统作为研究对象,以 2011 ~ 2012 年为研究时间间隔,利用 FAHP 与可变模糊集耦合模型对该矿区生态安全效应进行评估.通过现场调查、查阅文献及咨询专家,获取该矿区各子系统及评估指标的现状特征值,如表 2 所示.

3.2 评估指标权重计算

根据该矿的实际情况并结合专家意见,对一级子系统及二级评估指标两两进行重要性比较,得到一级子系统及二级指标的模糊互补判断矩阵 P 和 $P_1 \sim P_4$.限于篇幅,仅列出一级子系统的模

糊互补判断矩阵 P . 各子系统和其二级指标权重 的计算结果见表 3.

表 1 金属矿山生态安全效应评估指标及评价等级标准
Table 1 Evaluation index system and grading criterions of ecological security effect in metal mines

子系统	二级指标	指标计算及 量化方法	生态安全效应评估等级				
			I 级 (理想)	II 级 (良好)	III 级 (预警)	IV 级 (较差)	V 级 (恶劣)
生产 效应 P_1	矿石 (Cu) 品位 $I_1/\%$	入选品位	>1.5	1.5 ~ 0.9	0.9 ~ 0.7	0.7 ~ 0.5	0.5 ~ 0.3
	共生矿 (S) 品位 $I_2/\%$	出矿实际指标	>18	18 ~ 15	15 ~ 12	12 ~ 10	10 ~ 8
	金属综合回收率 $I_3/\%$	实际指标	>90	90 ~ 85	85 ~ 78	78 ~ 70	<70
	年尾矿利用率 $I_4/\%$	尾矿利用量/年尾矿量	>70	70 ~ 50	50 ~ 30	30 ~ 15	15 ~ 0
	年废石利用率 $I_5/\%$	废石充填量/年废石量	>85	85 ~ 65	65 ~ 45	45 ~ 25	25 ~ 0
	单位能耗 $I_6/(\text{kg} \cdot \text{t}^{-1})$	折单位矿石消耗标准煤	<4.5	4.5 ~ 5.0	5.0 ~ 5.7	5.7 ~ 6.5	>6.5
自然 禀赋 效应 P_2	矿区年降水量 I_7/mm	年内矿区平均降水量	>1400	1400 ~ 1200	1200 ~ 800	800 ~ 400	<400
	矿区人口密度 $I_8/(\text{人} \cdot \text{km}^{-2})$	矿区人口/矿区总面积	0 ~ 50	50 ~ 100	100 ~ 200	200 ~ 300	300 ~ 400
	矿区植被覆盖率 $I_9/\%$	植被覆盖面积/矿区面积	>85	85 ~ 75	75 ~ 55	55 ~ 35	<35
生态 环境 效应 P_3	生物多样性指数 I_{10}	$H = -\sum_{i=1}^s p_i \ln p_i$ ①	>2	2 ~ 1.5	1.5 ~ 1	1 ~ 0.5	0.5 ~ 0
	地下水综合污染指数 I_{11}	$PI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_i}{S_i} \right)$ ②	0 ~ 0.6	0.6 ~ 0.8	0.8 ~ 1.0	1.0 ~ 2.0	>2.0
	空气污染指数 I_{12}	矿区年内平均值	0 ~ 50	50 ~ 100	100 ~ 200	200 ~ 300	>300
	土地复垦率 $I_{13}/\%$	复垦面积/总破坏面积	>12	12 ~ 9	9 ~ 7	7 ~ 5	5 ~ 0
	地质灾害面积比 $I_{14}/\%$	地质灾害面积/矿区面积	0 ~ 2	2 ~ 4	4 ~ 6	6 ~ 8	>10
经济 社会 效应 P_4	生产管理指数 I_{15}	采用专家打分	1 ~ 0.8	0.8 ~ 0.6	0.6 ~ 0.4	0.4 ~ 0.2	0.2 ~ 0
	环保投入比例 $I_{16}/\%$	年环保投入/矿区年产值	>1	1 ~ 0.8	0.8 ~ 0.5	0.5 ~ 0.3	0.3 ~ 0
	矿山经济贡献率 $I_{17}/\%$	矿区年产值/当地 GDP	>3.5	3.5 ~ 2.5	2.5 ~ 1.5	1.5 ~ 1	1 ~ 0
	科技人员贡献率 $I_{18}/\%$	科技人员数/矿区人数	>8	8 ~ 5	5 ~ 3	3 ~ 1	1 ~ 0

注:①采用 Shanon - Wiener 指数公式计算,式中, H 为生物多样性指数, s 为物种数, p_i 为第 i 类物种的相对丰度;②采用综合污染指数法计算,式中, PI 为地下水综合污染指数, C_i 为评价指标监测值, S_i 为评价指标标准值, n 为参与评价的水质指标数.

表 2 安徽某铜矿生态安全效应评估指标特征值
Table 2 Evaluation index characteristic value of ecological security effect in a copper mine, Anhui province

二级指标	$I_1/\%$	$I_2/\%$	$I_3/\%$	$I_4/\%$	$I_5/\%$	$I_6/(\text{kg} \cdot \text{t}^{-1})$	I_7/mm	$I_8/(\text{人} \cdot \text{km}^{-2})$	$I_9/\%$
指标特征值	0.93	15.65	88	69.15	66	6.26	1360	232	77.26
二级指标	I_{10}	I_{11}	I_{12}	$I_{13}/\%$	$I_{14}/\%$	I_{15}	$I_{16}/\%$	$I_{17}/\%$	$I_{18}/\%$
指标特征值	1.423	0.93	132	6.53	2.18	0.92	0.55	2.32	7.38

$$P = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.8 & 0.3 & 0.7 \\ 0.2 & 0.5 & 0.4 & 0.5 \\ 0.7 & 0.6 & 0.5 & 0.7 \\ 0.3 & 0.5 & 0.3 & 0.5 \end{bmatrix}.$$

根据式(4)计算得到模糊互补判断矩阵 P 和 $P_1 \sim P_4$ 的相容性指标分别为 $I_P = 0.090$, $I_{P_1} = 0.086$, $I_{P_2} = 0.068$, $I_{P_3} = 0.048$, $I_{P_4} = 0.035$, 均小于 0.1, 因此表 3 中各项指标的权重是合理的.

3.3 基于可变模糊集的矿山生态安全效应评估
3.3.1 相对隶属度计算

限于篇幅,本文仅列出矿山生态安全效应子系统 P_1 的相对隶属度详细计算过程.

1) 由表 1 得到矿山生态安全效应子系统 P_1 的二级指标标准区间矩阵:

$$I_{ab}^{P_1} =$$

$$\begin{bmatrix} [3.0, 1.5] & [1.5, 0.9] & [0.9, 0.7] & [0.7, 0.5] & [0.5, 0.3] \\ [25, 18] & [18, 15] & [15, 12] & [12, 10] & [10, 8] \\ [100, 90] & [90, 85] & [85, 78] & [78, 70] & [70, 50] \\ [100, 70] & [70, 55] & [50, 30] & [30, 15] & [15, 0] \\ [100, 85] & [85, 65] & [65, 45] & [45, 25] & [25, 0] \\ [0, 4.5] & [4.5, 5.0] & [5.0, 5.7] & [5.7, 6.5] & [6.5, 8.0] \end{bmatrix}.$$

2) 由标准区间矩阵 $I_{ab}^{P_1}$ 和步骤 2 得到生态安全效应子系统 P_1 的二级指标可变区间矩阵:

$$I_{cd}^{P_1} = \begin{bmatrix} [3.0, 0.9] & [3.0, 0.7] & [1.5, 0.5] & [0.9, 0.3] & [0.7, 0.3] \\ [25, 15] & [25, 12] & [18, 10] & [15, 8] & [12, 8] \\ [100, 85] & [100, 78] & [90, 70] & [85, 50] & [78, 50] \\ [100, 50] & [100, 30] & [70, 15] & [50, 0] & [30, 0] \\ [100, 65] & [100, 45] & [85, 25] & [65, 0] & [45, 0] \\ [0, 5.0] & [0, 5.7] & [4.5, 6.5] & [5.0, 8.0] & [5.7, 8.0] \end{bmatrix}.$$

表 3 生态安全系统二级评估指标权重分配
Table 3 Assessment index weights of ecological security system

准则层		指标层	
一级指标	权重	权重	二级指标
生产效应 P_1	0.275	I_1	0.183
		I_2	0.177
		I_3	0.153
		I_4	0.160
		I_5	0.157
		I_6	0.170
自然禀赋效应 P_2	0.217	I_7	0.383
		I_8	0.283
		I_9	0.334
生态环境效应 P_3	0.291	I_{10}	0.220
		I_{11}	0.200
		I_{12}	0.205
		I_{13}	0.195
		I_{14}	0.180
		I_{15}	0.267
经济社会效应 P_4	0.217	I_{16}	0.258
		I_{17}	0.258
		I_{18}	0.217

3) 根据指标的物理特性和工程实际情况,由步骤 4 得到 P_1 的二级指标对应的 M 矩阵:

$$M^{P_1} = \begin{bmatrix} 3.0 & 1.2 & 0.8 & 0.6 & 0.3 \\ 25.0 & 16.5 & 13.5 & 11.0 & 8.0 \\ 100.0 & 87.5 & 81.5 & 74.0 & 50.0 \\ 100.0 & 60.0 & 40.0 & 22.5 & 0 \\ 100 & 75 & 55 & 35 & 0 \\ 0 & 4.75 & 5.35 & 6.10 & 8.00 \end{bmatrix}.$$

4) 根据标准区间矩阵 $I_{ab}^{P_1}$ 、可变区间矩阵 $I_{cd}^{P_1}$ 和 M^{P_1} 矩阵,利用式(7),式(8)计算出子系统 P_1 的相对隶属度矩阵:

$$u_A(X_{P_1}) = \begin{bmatrix} 0.025 & 0.550 & 0.475 & 0 & 0 \\ 0.108 & 0.717 & 0.392 & 0 & 0 \\ 0.300 & 0.900 & 0.200 & 0 & 0 \\ 0.479 & 0.543 & 0.021 & 0 & 0 \\ 0.025 & 0.550 & 0.475 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.150 & 0.800 & 0.350 \end{bmatrix}.$$

5) 根据步骤 5 计算出子系统 P_1 在参数 α, β 不同组合下归一化后的综合相对隶属度矩阵:

$$u_h(X_{P_1}) = \begin{bmatrix} \alpha=1, \beta=1 & 0.128 & 0.458 & 0.247 & 0.116 & 0.051 \\ \alpha=1, \beta=2 & 0.039 & 0.741 & 0.184 & 0.031 & 0.005 \\ \alpha=2, \beta=1 & 0.141 & 0.363 & 0.221 & 0.184 & 0.091 \\ \alpha=2, \beta=2 & 0.066 & 0.590 & 0.194 & 0.125 & 0.025 \end{bmatrix}.$$

重复上述步骤得到子系统 $P_2 \sim P_4$ 归一化后

的综合相对隶属矩阵 $u_h(X_{P_2})$, $u_h(X_{P_3})$ 和 $u_h(X_{P_4})$.

3.3.2 矿山生态安全效应综合等级特征值计算

应用式(10),式(11)计算各子系统对级别 h 的生态安全效应等级特征值 H 和生态安全效应综合等级特征值 \bar{H}' ,得到的评估结果见表 4. 最后根据式(12)计算得到该矿综合生态安全效应等级特征值 \bar{H} , $\bar{H} = 2.474$.

表 4 各子系统生态安全效应评估结果
Table 4 Ecological security effect evaluation results of each subsystem

子系统	H				\bar{H}'	等级				
	$\alpha=1, \beta=1$		$\alpha=1, \beta=2$				$\alpha=2, \beta=1$		$\alpha=2, \beta=2$	
	$\alpha=1, \beta=1$	$\alpha=1, \beta=2$	$\alpha=2, \beta=1$	$\alpha=2, \beta=2$						
P_1	2.503	2.223	2.723	2.452	2.475	II				
P_2	2.542	2.304	2.603	2.398	2.462	II				
P_3	2.867	2.504	2.609	2.634	2.653	III				
P_4	2.273	2.189	2.315	2.194	2.243	II				

3.4 评估结果分析

由上述评估结果可知,该矿综合生态安全效应等级特征值为 2.474,表明该矿生态安全系统处于良好状态. 从子系统层面来看,生产效应、自然禀赋效应和社会经济效应 3 个子系统的生态安全效应等级为良好,环境效应子系统的生态安全效应处于预警状态,表明矿山在促进安全高效生产的同时,对经济社会的发展产生了积极推动作用,而对由于采矿生产引起的环境破坏的治理力度不够,其限制因素主要体现在环保投入、水土恢复和污染指数等方面. 因此,该矿在今后的生产中对生态安全还需进一步改善.

为验证评估结果的可靠性,将本文评估结果与其他常用评估模型得到的结果进行比较,比较结果见表 5,结果表明本文的评估结果与其他方法得到的结果基本一致,而且与矿山实际情况相吻合,说明该模型应用于矿山生态安全效应评估是合理的,评估结果较为可靠.

表 5 各种评估模型得到的结果
Table 5 Results of other evaluation models

评估方法	级别特征值	评估等级	评判结果
FAHP 与可变模糊集耦合模型	2.474	II	良好
模糊综合评价模型 ^[3]	2.413	II	良好
AHP-可拓学模型 ^[12]	2.496	II	良好

4 结 论

1) 基于 FAHP 与可变模糊集原理,结合金属

矿山的生态环境属性,建立矿山生态安全效应评估模型,在评估过程中体现了对矿山生态系统各要素之间对立统一规律的整体把握,而各子系统之间的有机结合,也凸显了对矿山生态安全变化规律的本质认识。

2) 利用该模型对安徽某矿的生态安全效应进行评估,评估结果与其他评估方法得到的结果相一致,也符合矿山实际情况,说明应用该模型对矿区生态安全效应的评估是有效合理的,为改善和治理矿山环境提供了参考依据。

3) 该模型在评估过程中通过参数的变化,体现了其根据工程实际情况可变的优点,并通过取4种不同参数组合下评估结果的平均值,提高了评估结果的准确性。

参考文献:

- [1] Wang Z D. Application of green bio-mining technology for coal under villages in environmental protection[J]. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 2014, 6(6): 2120-2124.
- [2] Favas P J C, Pratas J, Gomes M E P, et al. Selective chemical extraction of heavy metals in tailings and soils contaminated by mining activity; environmental implications[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2011, 111(3): 160-171.
- [3] 刘亮. 矿山环境效应影响评价系统研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2006.
(Liu Liang. The systematic research of evaluation on the mine's environmental effect influence[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2006.)
- [4] 齐朔风. 矿山生态安全的BP神经网络评价方法与应用研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2010.
(Qi Shuo-feng. The evaluation methods and applied research of BP neural network on mine ecological safety [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2010.)
- [5] 曾晟, 杜雪明, 谭凯旋. 基于广义线性理论的铀矿生态环境安全评价[J]. *矿冶工程*, 2014, 34(2): 27-30.
(Zeng Sheng, Du Xue-ming, Tan Kai-xuan. Evaluation of eco-environmental security for uranium mine based on generalized linear theory [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2014, 34(2): 27-30.)
- [6] Chen S Y, Guo Y. Variable fuzzy sets and its application in comprehensive risk evaluation for flood-control engineering system[J]. *Fuzzy Optimization and Decision Making*, 2006, 5(2): 153-162.
- [7] Zhang D, Wang G L, Zhou H C. Assessment on agricultural drought risk based on variable fuzzy sets model[J]. *Chinese Geographical Science*, 2011, 21(2): 167-175.
- [8] Zhang X L, Wang L H. Choosing an appropriate construction project delivery method using FAHP in China[C]// 2009 IEEE the 16th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. Beijing, 2009: 78-82.
- [9] 徐泽水. 模糊互补判断矩阵的相容性及一致性研究[J]. 解放军理工大学(自然科学版), 2002, 3(2): 94-96.
(Xu Ze-shui. Research on compatibility and consistency of fuzzy complementary judgement matrices[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science)*, 2002, 3(2): 94-96.)
- [10] Frouz J, Kalčík J, Velichová V. Factors causing spatial heterogeneity in soil properties, plant cover, and soil fauna in a non-reclaimed post-mining site [J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37: 1910-1913.
- [11] Benzaazoua M, Bussière B, Demers I, et al. Integrated mine tailings management by combining environmental desulphurization and cemented paste backfill: application to mine Doyon, Quebec, Canada [J]. *Minerals Engineering*, 2008, 21(4): 330-340.
- [12] Liu D J, Zou Z H. Water quality evaluation based on improved fuzzy matter-element method [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, 24(7): 1210-1216.