

基于模糊综合评价的矿山地质环境评价分析*

柳锐,张电吉,姬立杰,蒋琴琴,聂正

(武汉工程大学 资源与安全工程学院, 湖北 武汉 430205)

摘要:为了精确定量地评价矿山开采对周边地质环境的影响,分析影响矿山周围环境安全的因素,建立了地质灾害、含水层破坏、地形景观破坏、土地资源破坏等4项评价标准和14项指标的多因素多指标评价体系。采用层次分析法确定各指标的权重,定义指标等级,结合模糊数学构建隶属度函数,最后构建模糊综合评价模型。运用该方法,对湖北宜昌某磷矿山的地质环境进行分析评估,得出的结果与实际吻合,验证了模糊综合评价模型的可行性。

关键词: 矿山地质环境;层次分析法;模糊数学;模糊综合评价;隶属度函数

0 引言

我国国民经济的发展离不开矿产资源,但矿产资源经过常年累月的过度开采,会导致矿山及周边地区的地质环境出现一系列问题^[1]。

国外在20世纪70年代就已经运用多种评价方法来评价矿山地质环境。关于矿山地质环境综合评价,国内有关学者也进行多方面的研究。徐友宁等^[2]在研究指标体系的时候,利用指标指数划分危害等级程度。吕文帅^[3]采用模糊综合评价法研究了苍峰铁矿,并且对矿山的恢复规划提供了合理的建议。郁文等^[4]利用层次分析法和模糊综合评价法对靖远县105座矿山的生态地质环境进行评价,应用效果良好。

本文以湖北宜昌某磷矿区为研究背景,研究区属以侵蚀构造为主的中山区,地形复杂,具有北东高南西低,且又有逆向陡峻、顺向较缓的特点。区域内矿产资源丰富,主要以磷矿为主,开采历史悠久,长期的矿山开采已对矿区内环境产生了不同程度的影响。

1 评价体系的建立与分级标准

1.1 矿山地质环境评价体系的建立

根据湖北宜昌某磷矿山地区的相关资料,以及参考专家对指标的选取^[4],本文选取了4个一级指标(地质灾害、含水层破坏、地形地貌景观破坏和土

地资源破坏)和14个二级指标,见表1。

1.2 评价体系分级的标准

参考《全国矿山地质环境调查技术要求实施细则》《矿山地质环境调查评价规范》等相关标准规范要求,再结合湖北宜昌某磷矿的资料进行分级,划分为严重、较严重、较轻3个等级^[5],其分级标准见表2。

2 建立评价模型

2.1 利用层次分析法(AHP)确定权重

AHP^[6]有着定性与定量相结合的特点,具有层次结构的优点,广泛应用于各类工程问题的分析。

2.1.1 建立层次结构

对矿井地质环境进行目标层评估。按属性的不同,把有关矿山地质环境的各种因素分解成几个层次,从上到下确定相互关系。同一个层面的因素,受下层因素的影响,同时也对上层因素产生影响。最下一层是措施层或方案层,也就是质量分级;中间层是指标层或准则层,也就是考核因素。

2.1.2 构建判断矩阵

依据表2的分级标准,对表示重要关系的两个要素选择1~9的比较标度法进行比较,见表3,进而构建判断矩阵。

2.1.3 确定权重

对于创建的判断矩阵 A 有 $AX = \lambda_{\max} X$,本文采用方根法计算 λ 的特征值和特征向量 X 。权重值是特征向量 X 归一化后的分量。

* 收稿日期: 2023-04-27

作者简介: 柳锐(1997—),男,安徽滁州人,硕士研究生,研究方向为安全工程,E-mail:1840576127@qq.com。

表 1 矿山地质环境评价体系

目标层 A	准则层 B	指标层 C
矿山地质环境评价 A	地质灾害 B1	规模大小 C1
		影响对象 C2
		直接经济损失 C3
		受威胁人数 C4
	含水层破坏 B2	正常涌水量 C5
		主要含水层破坏情况 C6
		地表水漏失情况 C7
		生产生活供水情况 C8
	地形地貌景观破坏 B3	破坏原生地形地貌的程度 C9
		对各种类型自然保护区的影响程度、人文景观的影响程度、风景旅游区的影响程度 C10
		对主要交通干线内地形地貌景观影响程度 C11
	土地资源破坏 B4	占用破坏耕地情况 C12
		占用破坏林地情况 C13
		占用破坏荒山或未开发利用土地情况 C14

表 2 分级标准

一级因子	二级因子	严重	较严重	较轻
地质灾害	规模大小	大	较大	小
	影响对象	城市安全、乡镇安全、重要行政村安全、重要交通干线安全、重要工程设施安全、各类保护区安全。	村庄安全、居民聚集区安全、一般交通要道安全、工程设施更重要的安全。	居住分散,户型一般小,设施齐全。
	直接经济损失	>500 万元	100~500 万元	<100 万元
	受威胁人数	>100 人	10~100 人	<10 人
含水层破坏	正常涌水量	>10 000 m ³ /d	3000~10 000 m ³ /d	<3000 m ³ /d
	主要含水层破坏情况	水位回落较多,呈现干涸状态。	水位下降的幅度比较大,已经到了有一半被压低的地步。	水位下降幅度小。
	地表水漏失情况	严重	较严重	未漏失
地形地貌景观破坏	生产生活供水情况	集中水源地供水受到影响,生产生活用水供应面临一定困难,水源地供水面临较大困难。	影响到部分生产生活供水。	未影响到生产生活供水。
	对原生地形地貌破坏程度。	大	较大	小
	对各类自然保护区、人文景观和风景旅游区的影响程度。	严重	较重	较轻
土地资源破坏	对内地形地貌景观城市周边主要交通干线的影响程度。	严重	较重	较轻
	破坏耕地面积	>10 亩	≤10 亩	无
	破坏林地面积	>30 亩	20~30 亩	≤20 亩
	占用未开发利用荒山或毁损土地面积	大于 300 亩	200~300 亩	小于 200 亩

2.1.4 层次单排序

相对上一层因素而言,对本层所有因素的相对重要性的排序称为层次单排序^[7]。构建每个单级的

判断矩阵,并计算其相应的权重,从而对单级排序进行一致性检查。验证判断矩阵需要一致性和随机性的检查,并检查通过判断矩阵所求的特征向量

(权)是否合理,表4为8阶以内的RI指标值, n 为阶数。

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

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

式中, CI 为所求的一次性指标; CR 为一致性比率,当 $CR < 0.1$ 时,认为具有一致性,否则继续调整。

表3 判断矩阵标度及其含义

标度数值	含义
1	两个因素相比,同等重要。
3	两个因素相比,前者比后者稍微重要。
5	两个因素相比,前者比后者明显重要。
7	两个因素相比,前者比后者强烈重要。
9	两个因素相比,前者比后者极端重要。
2, 4, 6, 8	前面所说的两个相邻估计尺度之间,就是它的重要程度。
倒数	如果元素 p 和 q 的重要比是 A_{pq} , 那么元素 q 和 p 的重要比是 $A_{pq} = 1/A_{pq}$ 。

表4 平均随机一致性指标值

阶段 n	指标 RI	阶段 n	指标 RI
1	0	5	1.12
2	0	6	1.24
3	0.58	7	1.32
4	0.90	8	1.41

2.1.5 层次总排序

同单排序步骤一样,计算所有层的所有因素的相对重要性,再进行排序称为层次总排序^[8]。要对等级分总排名计算结果的一致性进行评价,必须计算出与单次排名相似的检查量,见式(3)、式(4)、式(5)。

$$CI = \sum_{k=1}^n W_k CI_k \quad (3)$$

$$RI = \sum_{k=1}^n W_k RI_k \quad (4)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (5)$$

式中, W_k 为准则层中第 k 个因素的权重值; CI_k 为第 k 个因素的一致性指标值; RI_k 为第 k 个因素的随机一致性指标值。

2.2 模糊数学评价

矿山环境综合评价体系具有较大的不确定性

和模糊性,涉及的因素多,复杂性也高。因此,选择模糊数学理论^[9]进行评价分析是比较恰当的。

2.2.1 因子集评价集的建立

评价因子集合 $P = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$, 其中 m 为评价指标的数量;评价等级集合 $Q = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_n\}$, 其中 n 为评价等级集的数量。

2.2.2 隶属度函数

虽然创建不同的函数会受到模糊概念的干扰,但是在某个模糊的评估中确定采用同样的函数,模糊这种思想就可以被体现出来,而且结果是科学合理的,因此,本文选取了相对适合的梯形隶属度函数 $g(x)_A, g(x)_B, g(x)_C$ 。式(6)为较轻隶属度标准,式(7)为较严重隶属度标准,式(8)为严重隶属度标准。

$$g(x)_A = \begin{cases} 1, & x \leq x_1 \\ \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1}, & x_1 < x < x_2 \\ 0, & x \geq x_2 \end{cases} \quad (6)$$

$$g(x)_B = \begin{cases} \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}, & x_1 < x < x_2 \\ 1, & x_2 < x < x_3 \\ \frac{x_4 - x}{x_4 - x_3}, & x_3 < x < x_4 \\ 0, & x > x_4, x < x_1 \end{cases} \quad (7)$$

$$g(x)_C = \begin{cases} 0, & x \leq x_3 \\ \frac{x - x_4}{x_4 - x_3}, & x_3 < x < x_4 \\ 1, & x \geq x_4 \end{cases} \quad (8)$$

其中:

$$x_2 = x_1 + @ (x_3 - x_1) \quad (9)$$

$$x_4 = x_3 + @ (x_5 - x_3) \quad (10)$$

式中, x 为实测值,随机抽取; x_1, x_3, x_5 为3个不同层次评定的标准值; x_2 和 x_4 是集中过渡区间评估上限;@取值为0.5。

2.2.3 构建模糊矩阵

由以上方法得出各测评要素的隶属关系,代入式(11),即得到一个相应的模糊矩阵^[10],为某个因素单独的模糊矩阵。

$$R = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} \quad (11)$$

2.3 模糊综合评价

模糊综合评价^[11]首先考虑某个单独的因素评

价,考虑各个因素的影响与其相应权重,然后再进行综合考虑,通过权重向量和模糊矩阵的相乘运算得到评价结果,见式(12)。

$$P = W \times R = \{P_1, P_2, \dots, P_n\} \quad (12)$$

式中,权重 W 由 3.1 中计算所得; R 为式(11)所得; P 是相乘后的综合评价结果,并且按照模糊数学法中最大隶属度来区分等级程度。

本文综合评价体系设置了两个层次,各要素的二级综合评价完成后,再对其进行一级综合评价。

3 实例分析

3.1 评价指标权重的计算

根据表 1 创建的指标体系,再通过专家打分和相关从业人员的建议,得出两两因素之间的比较矩阵,再通过 SPSSPRO 软件计算,结果见表 5 至表 9。表 5 至表 9 为单层次排序一致性检验,判断得出矩阵都符合一致性。

表 5 目标层 A 判断矩阵

目标层 A	B1	B2	B3	B4
B1	1	2	3	5
B2	1/2	1	4	2
B3	1/3	1/4	1	1
B4	1/5	1/2	1	1
单层权重	0.4821	0.2913	0.1106	0.1158
权重排序	1	2	4	3

注:一致性检验 $\lambda_{\max} = 4.111; CI = 0.037; CR = 0.042 < 0.1$ 。

表 6 准则层 B1 判断矩阵

准则层 B1	C1	C2	C3	C4
C1	1	2	1/5	0.125
C2	1/2	1	2/5	0.111
C3	5	2.5	1	0.5
C4	8	9	2	1
单层权重	0.0801	0.0654	0.2678	0.5867
权重排序	4	3	2	1

注:一致性检验 $\lambda_{\max} = 4.171; CI = 0.057; CR = 0.064 < 0.1$ 。

将表 5 至表 9 统计,得到表 10 的总排序,并且检验其一致性。由公式(3)、式(4)、式(5)可算出: CI 为 0.0327; RI 为 0.8274; CR 为 0.0395。经检验,符合一致性。

3.2 模糊综合评判

根据上述建立的评价指标体系,可得出评价因

表 7 准则层 B2 判断矩阵

准则层 B2	C5	C6	C7	C8
C5	1	2	10/3	4
C6	1/2	1	5/3	5/2
C7	3/10	3/5	1	3/2
C8	1/4	2/5	2/3	1
单层权重	0.483	0.255	0.153	0.108
权重排序	1	2	3	4

注:一致性检验 $\lambda_{\max} = 4.006; CI = 0.002; CR = 0.002 < 0.1$ 。

表 8 准则层 B3 判断矩阵

准则层 B3	C9	C10	C11
C9	1	1/3	1/5
C10	3	1	1/3
C11	5	3	1
单层权重	0.1047	0.2583	0.637
权重排序	3	2	1

注:一致性检验 $\lambda_{\max} = 3.039; CI = 0.019; CR = 0.037 < 0.1$ 。

表 9 准则层 B4 判断矩阵

准则层 B4	C12	C13	C14
C12	1	1/5	1/8
C13	5	1	1/3
C14	8	3	1
单层权重	0.0675	0.2713	0.6612
权重排序	3	2	1

注:一致性检验 $\lambda_{\max} = 3.044; CI = 0.022; CR = 0.042 < 0.1$ 。

表 10 目标 A 权重总排序

目标层	准则层		因素层		权重	排序
	准则	权重	因素	权重		
A	B1	0.482	C1	0.085	0.041	10
			C2	0.065	0.031	11
			C3	0.265	0.128	3
			C4	0.585	0.282	1
	B2	0.291	C5	0.483	0.141	2
			C6	0.255	0.074	5
			C7	0.154	0.044	7
			C8	0.108	0.031	11
	B3	0.111	C9	0.105	0.012	11
			C10	0.258	0.029	9
			C11	0.637	0.071	6
			C12	0.068	0.008	14
	B4	0.116	C13	0.271	0.031	11
			C14	0.661	0.077	4

子集 $B = \{B_1, B_2, B_3, B_4\}$, $B_1 = \{C_1, C_2, C_3, C_4\}$, $B_2 = \{C_5, C_6, C_7, C_8\}$, $B_3 = \{C_9, C_{10}, C_{11}\}$, $B_4 = \{C_{12}, C_{13}, C_{14}\}$ 。按照表 2 与章节 2.2 得到评价等级集 $V = \{\text{较轻, 较严重, 更严重}\}$ 。

本文以地质灾害中的规模大小指标因子为例, 由式(6)至式(11)可得规模大小评鉴指标隶属度函数, 见式(13)至式(15)。

较轻函数:

$$g(x)_A = \begin{cases} 1, & x \leq 1 \\ \frac{1.5-x}{0.5}, & 1 < x < 1.5 \\ 0, & x \geq 1.5 \end{cases} \quad (13)$$

较严重函数:

$$g(x)_B = \begin{cases} \frac{x-1}{0.5}, & 1 < x < 1.5 \\ 1, & 1.5 < x < 2 \\ \frac{2.5-x}{0.5}, & 2 < x < 2.5 \\ 0, & x > 2.5, x < 1 \end{cases} \quad (14)$$

严重函数

$$g(x)_C = \begin{cases} 0, & x \leq 2 \\ \frac{x-2.5}{0.5}, & 2 < x < 2.5 \\ 1, & x \geq 2.5 \end{cases} \quad (15)$$

接着创建每个要素的模糊矩阵。 R_1, R_2, R_3, R_4 分别为地质灾害、含水层破坏、地形地貌景观、土地资源的模糊矩阵, 见式(16)。

$$\mathbf{R}_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \mathbf{R}_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (16)$$

$$\mathbf{R}_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \mathbf{R}_4 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

3.3 模糊综合评价及分析

表 10 中综合了所有的权重, 进行综合计算后, 可以得到相应的分析结果, 模糊综合评价是用每个指标的权重向量乘以相应的模糊矩阵。

3.3.1 二级模糊综合评价

(1) 地质灾害评价及分析。 $P_1 = W_1 \times R_1 = [0.67, 0.265, 0.065]$, 由结果可得其隶属程度主要集中在较轻的等级, 说明地质灾害影响研究区内的地质环境程度较低。据现场调查, 该研究区属丘

陵地带, 地势平缓, 植被覆盖良好, 无崩塌、滑坡、泥石流等自然灾害, 矿山目前主要存在以采空区地面塌陷为主的地质环境问题, 矿山为深井开采, 对地面破坏较小。矿区塌陷坑稳定后, 对塌陷区南部区域进行了复垦, 已整治为耕地, 面积约 4.49 hm^2 ; 而在塌陷区北部区域, 当地村民在塌陷较浅区域种植农作物, 此区域面积约 2.18 hm^2 , 其中林地 0.34 hm^2 , 水田 0.54 hm^2 , 草地 0.98 hm^2 , 村庄 0.32 hm^2 。因此, 该塌陷区现基本处于稳定状态, 塌陷区无建筑及地面设施, 对其他分散性居民危害较小。因此, 研究区内因矿山地质环境引发的地质灾害总体上影响不大。

(2) 含水层破坏评价及分析。 $P_2 = W_2 \times R_2 = [0.255, 0.154, 0.591]$, 从结果来看, 这一指标层的隶属程度主要集中为严重程度, 表明含水层破坏对研究区矿山地质环境的影响程度较大。本区水文地质条件较复杂, 涌水量的应对情况也复杂, 但是矿山有足够的排水设备预防可能产生的问题。矿山处于地下水排泄区, 地下水丰富, 矿坑排水量较大, 目前排水能力约为 $22\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ 。随着矿山开采向深部延伸, 根据 2014 年的“核实报告”中涌水量估算结果, 未来矿坑排水量正常约为 $28\,406 \text{ m}^3/\text{d}$, 最大 $34\,287 \text{ m}^3/\text{d}$, 矿山疏干排水量增大后, 不但影响附近居民供水水源减少或枯竭, 同时会引起区域性水位持续下降, 对含水层造成较大破坏, 对区域水均衡有较大影响。当地居民生活用水主要为自来水供水, 农田灌溉用水主要取自熊家湾水库, 因此含水层破坏对周边居民用水的影响较小。受含水层破坏程度的影响总体上是严重的。

(3) 地形地貌景观破坏评价及分析。 $P_3 = W_3 \times R_3 = [1, 0, 0]$, 从结果来看, 这一指标层的隶属程度主要集中在较轻的等级上, 表明受地形地貌景观破坏影响程度较轻, 目前已基本恢复正常, 研究区内地表植物长势繁茂, 植被覆盖良好。区内耕地面积小, 主要种植玉米、棉花等旱作物, 生态环境保持较好。矿山开采以井下开采为主, 破坏程度较轻, 对地形地貌景观造成损害较小。采空区地面塌陷对地形地貌景观造成一定破坏, 但造成的影响不大, 破坏程度也不大。对人文景观影响较小, 对风景旅游区影响较小, 对城市周边影响较大, 对主要交通干线两侧影响较小。从总体上看, 研究区内的矿山地质环境受地形地貌景观破坏影响较轻。

(4) 土地资源破坏评价及分析。 $P_4 = W_4 \times R_4 = [0.068, 0.661, 0.271]$,从结果来看,指标层的隶属程度主要集中在等级较严重级别,表明土地资源破坏影响程度较大。究其原因,主要是采空区地面塌陷造成熊家湾矿段井下开采对土地资源的破坏,其次是工业场地压占、破坏土地造成3个生产井口(1[#]、3[#]、5[#])的破坏,此外还有矿山道路压占土地造成的破坏影响程度。矿山6[#]井硐已停产多年,其工业场地已进行地质灾害治理并已复垦。从总体上看,土地资源破坏对研究区矿山地质环境的冲击较大。

3.3.2 一级模糊综合评价

由式(16)和二级模糊综合评价计算可综合评价模型为:

$$R = \begin{bmatrix} 0.67 & 0.265 & 0.065 \\ 0.255 & 0.154 & 0.591 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0.068 & 0.661 & 0.271 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$U = W \times R = [0.516, 0.2492, 0.2347] \quad (18)$$

评价模型评估结果表明,矿山地质环境隶属程度较轻,研究区矿山地质环境总体上状况较好。但含水层破坏对地质环境的影响相对较大,应引起重视。

4 结论

(1) 结合层次分析法(AHP)和模糊数学评价法对矿山地质环境进行综合评价,这种综合方法能避免人为主观因素的影响,量化处理定性因子,使评价结果具有较好的客观性。

(2) 通过层次分析法(AHP)选取地质灾害、含水层破坏、地形地貌景观破坏、土地资源破坏等4个方面的14个因子,得出因子的权重值,再通过模糊

数学进行二级模糊评价分析,最终对一级进行模糊综合评价分析。根据调查结果,并结合隶属严重程度破坏情况,本研究区的矿井地质环境等级综合评价结果为较轻;对地质灾害和地形地貌景观破坏情况评估为较轻等级;对土地资源破坏评估为较严重;对含水层破坏情况评估为严重。结果反映了本研究区域内的矿山地质环境影响,为今后矿山地质环境保护和恢复治理提供了依据。

(3) 基于模糊综合法的矿山地质环境综合评价,相对于其他的评价方法,具有简单易操作、科学合理的优点,对某些矿山的评价适用性比较高,验证了该评价模型的可行性。

参考文献:

- [1] 杨金中, 聂洪峰, 荆青青. 初论全国矿山地质环境现状与存在问题[J]. 国土资源遥感, 2017, 29(2): 1-7.
- [2] 徐友宁, 袁汉春, 何芳, 等. 矿山环境地质问题综合评价指标体系[J]. 地质通报, 2003(10): 829-832.
- [3] 吕文帅. 苍峰铁矿地质环境影响评价及治理规划[D]. 山东: 山东农业大学, 2015.
- [4] 郁文, 丁国轩, 樊小鹏, 等. 基于层次分析-模糊综合评价模型的矿山地质生态环境研究[J]. 三峡生态环境监测, 2021, 6(2): 26-35.
- [5] 何芳, 徐友宁, 袁汉春. 矿山环境地质问题综合评价客观权重确定方法探讨[J]. 中国地质, 2008(2): 337-343.
- [6] 张进德, 张德强, 田磊. 全国矿山地质环境调查与综合评估技术方法探讨[J]. 地质通报, 2007(2): 136-140.
- [7] 郭金玉, 张忠彬, 孙庆云. 层次分析法的研究与应用[J]. 中国安全科学学报, 2008(5): 148-153.
- [8] 黄德才. 层次分析方法中层次单排序的新方法[J]. 控制与决策, 1998(6): 90-93.
- [9] 雷远鸣. 对AHP层次总排序方法的扩展[J]. 系统工程理论与实践, 1992(6): 63-65.
- [10] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(7): 93-100.
- [11] 王季方, 卢正鼎. 模糊控制中隶属度函数的确定方法[J]. 河南科学, 2000(4): 348-351.