

胡家峪铜矿区基于层次分析 一模糊综合评价法的地质环境评价

王秋波

(山西中条山集团 胡家峪矿业公司,山西 运城 043704)

摘要:为加强对胡家峪铜矿区的生态环境管理,保证矿山的可持续发展,有必要对矿区地质环境进行评价。本次评价采用层次分析—模糊综合评价法,通过构建胡家峪铜矿区地质环境评价模型确定各因素对地质环境的影响程度,并结合模糊数学确定地质环境评价得分。结果显示,胡家峪铜矿区地质环境属于良好级别,与矿山之前地质环境评估结果一致,表明该方法在胡家峪铜矿区地质环境评价方面应用结果比较理想。本次评价为矿山以后的环境恢复治理工作提供了参考依据,应重点针对固废排放、水土流失、地面坍塌、粉尘排放等因素进行治理。

关键词:层次分析;评价模型;模糊综合评价;隶属度函数;地质环境;胡家峪

中图分类号:TD167;X141

文献标志码:A

文章编号:1671-4172(2022)03-0116-07

Geological environment evaluation of Hujiayu copper mining area based on AHP and fuzzy comprehensive evaluation

WANG Qiubo

(Hujiayu Mining Company of Shanxi Zhongtiaoshan Group, Yuncheng Shanxi 043704, China)

Abstract: Evaluating geological environment of Hujiayu copper mining area is essential for regional eco-environment management and sustainable development. Hence, using AHP-fuzzy comprehensive evaluation method, this study evaluated multi-factors' impacts on the geological environment in the area by constructing geological environment evaluation model, and scored each effect degree with fuzzy mathematics. The results show that the geological environment of Hujiayu copper mining area is of medium good grade, consistent with the previous assessments in the area and further indicating the method is practicable for the regional geological environment evaluation. It provides the basis for future environmental restoration and governance in Hujiayu copper mining area, which should focus on the treatments on solid wastes, soil erosion, ground collapse and dust discharge.

Key words: analytic hierarchy process (AHP); evaluation model; fuzzy comprehensive evaluation; membership function; geological environment; Hujiayu

胡家峪铜矿区是山西中条山地区胡—篦型铜矿^[1-2]的代表性矿区,位于华北克拉通南缘晋豫活动带^[3],自20世纪50年代开始,至今已开采60余年^[4]。随着开采年限延长和开采程度扩大,矿山地质环境的各方面问题逐渐显现出来,为了矿山的可持续发展和加强生态环境管理,有必要对胡家峪矿区的地质环境进行评价。影响矿山地质环境的因素众多,且各因素之间相互影响,关系复杂,必须选取合理的方法对其进行综合评价。近年来,用于矿山

地质环境评价的方法主要有遥感法^[5-6]、突变综合评价法^[7]、层次分析—模糊综合评价法^[8-9]等。其中遥感法具有宏观、高精度定位、重复监测等特点,但目前人工解译效率及高分辨率影像应用效率较低。突变综合评价法计算简单、人为干扰因素小,但存在评价分值较高的缺陷。层次分析—模糊综合评价法因其系统性、逻辑性、综合性、成本较低^[10]等原因,被广泛应用于地质环境评价,已形成一套较为成熟的评价方法。因此,本文将结合层次分析和模糊综合评价构建胡家峪铜矿区的地质环境综合评价体系,对矿区地质环境进行评价,进而为矿山地质环境的

恢复治理和矿山发展的远景规划提供合理依据。

1 矿区地质特征

胡家峪铜矿区位于中条山中段,是胡一篦型铜矿代表性矿床之一,包括南和沟、桐木沟和老宝滩3个矿体^[11-12]。矿区内地层主要为古元古界中条群,为一套陆源碳酸变质岩沉积建造^[13],由老到新可分为界牌梁组、龙峪组、余元下组、篦子沟组和余家山组^[14]。矿区构造较复杂,主要控矿构造为上玉坡—胡家峪短轴倒转背斜,背斜轴向 NNE,两翼分别向北东、南西弯曲,近似“S”形,背斜核部被剥蚀,两翼分布中条群各组,矿体位于该背斜南部次级褶皱上^[15]。矿区内矿石矿物以金属硫化物为主,包括黄铜矿、黄铁矿和磁黄铁矿等,脉石矿物包括铁白云石、方解石、石英、钠长石等。

2 层次分析法

层次分析法^[16-17](Analytic Hierarchy Process)简称 AHP,由 20 世纪 70 年代美国运筹学家 SAATY 提出,是一种定性和定量分析相结合的方法。该方法把复杂的决策问题分解成多组成因素,按隶属关系构成层次结构,通过两两比较判断同类元素的相对重要性。主要步骤包括:1)构建层次评价模型,2)建立判断矩阵,3)计算各层因素相对权重,4)计算属性层因素相对目标层的综合权重。

2.1 构建层次评价模型

结合研究对象所处行业的相关标准和实地情况,考虑因素的差异性和综合性,选取合理的评价因素,根据因素间的隶属关系构建评价模型图,从上到下分为目标层(A)、准则层(B)、属性层(C),使评价模型层次化、系统化。

2.2 建立判断矩阵

通过两两比较同类因素相对上一层有关因素的重要性,分别建立 A-B、B-C 两类判断矩阵,判断矩阵的数值由专业人员依据实际情况给出,具体矩阵

形式如下,其中 p_{ij} 代表相对于上一层某个因素,因素 P_j 较因素 P_i 的重要性,本次比较采用 1~9 数据标度,如表 1 所示。

$$P = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1m} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ p_{m1} & p_{m2} & \cdots & p_{mm} \end{pmatrix}$$

表 1 判断矩阵 1~9 标度

Table 1 The scale 1—9 of judgment matrix	
标度	含义
1	两个因素 P_j 和 P_i 同样重要
3	两个因素 P_j 和 P_i 稍微重要
5	两个因素 P_j 和 P_i 明显重要
7	两个因素 P_j 和 P_i 强烈重要
9	两个因素 P_j 和 P_i 极端重要
2,4,6,8	相邻判断的中间值
上述标度的倒数	因素 P_j 相对因素 P_i 重要的重要性 与因素 P_i 相对因素 P_j 的重要性互为倒数

2.3 计算各层因素相对权重

相对权重指准则层(B)相对目标层(A)和属性层(C)相对准则层(B)的相对权重,采用特征根法计算。求出判断矩阵的最大特征根 $\lambda_{\max}$,并计算其对应的特征向量,经归一化后得到权重向量 N , $N = (n_1, n_2, \cdots, n_n)$,其中 $n_i (i=1, 2, \cdots, n)$ 为相应因素的权重值。

为检验判断矩阵的合理性和准确性,需对矩阵的一致性进行检验,用以下公式计算检验系数 CR:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (1)$$

当 $CR < 0.1$ 时,矩阵满足一致性要求,否则应调整矩阵的取值,直到满足一致性为止。其中 CI 为一致性指标,计算公式如下:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

n 为判断矩阵对应因素的数量,RI 为随机一致性指标,其值由表 2 查询得到。当矩阵通过一致性检验,表明向量 N 可以准确合理的表示各因素的权重,可用于进行后续计算。

表 2 随机一致性指标值

Table 2 The value of random consistent index

矩阵阶数	1	2	3	4	5	6	7	8
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.26	1.36	1.41

2.4 计算各因素综合权重

综合权重指属性层(C)因素相对目标层(A)因素的综合权重,可用式(3)计算:

$$M = Wx \quad (3)$$

$$W = (w_1, w_2, \cdots, w_n)$$

$$M = (m_1, m_2, \cdots, m_n)$$

W 为属性层(C)某类因素的相对权重向量,该类因素隶属于准则层(B)某个因素 X ,因素 X 相对

目标层(A)的权重值为 x , $\mathbf{M}$ 为该类因素相对目标层(A)的综合权重向量, $m_i(i=1,2,\cdots,n)$ 为该类因素对目标层因素(A)的权重值。

3 模糊综合评价

模糊综合评价^[18-19]以模糊数学为基础,对受到多因素影响的事物进行总体评价,该方法根据隶属

度把定性评价转化为定量评价,结果清晰,系统性强,适合解决多种模糊性问题。

3.1 建立因素集及评价集

因素集 U 是评价模型的属性层(C)各因素组成的集合,评价集 V 是评价对象可能出现的所有评价结果组成的集合,本文设定6个评价等级组成评价集,对矿山地质环境进行评价(表3)。

表3 矿山地质环境评价集

Table 3 Mine geological environment evaluation set

评价等级	优秀	较优秀	良好	较差	差	极差
分数 S	≥ 90	80	70	60	50	≤ 40

3.2 确定隶属度

组织专业人员根据表3中的评价等级对属性层(C)因素进行打分,隶属度函数表示某因素评价得分对于矿山地质环境评价集的隶属程度,本次采用三角形分布函数作为隶属度函数(图1)。

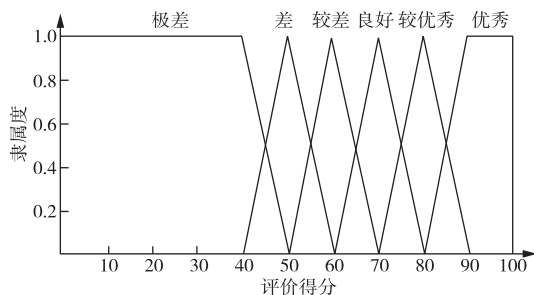


图1 隶属度函数

Fig. 1 The membership function

隶属度函数计算公式如下, $U(x)$ 为隶属度函数, x 为评价因素得分:

$$\begin{aligned}
 \text{优秀 } \Delta U(x) &= \begin{cases} 0 & 0 \leq x < 80 \\ (x-80)/10 & 80 \leq x < 90 \\ 1 & 90 \leq x \leq 100 \end{cases} \\
 \text{较优秀 } U(x) &= \begin{cases} 0 & 0 \leq x < 70 \\ (x-70)/10 & 70 \leq x < 80 \\ (90-x)/10 & 80 \leq x < 90 \\ 0 & 90 \leq x \leq 100 \end{cases} \\
 \text{良好 } U(x) &= \begin{cases} 0 & 0 \leq x < 60 \\ (x-60)/10 & 60 \leq x < 70 \\ (80-x)/10 & 70 \leq x < 80 \\ 0 & 80 \leq x \leq 100 \end{cases} \\
 \text{较差 } U(x) &= \begin{cases} 0 & 0 \leq x < 50 \\ (x-50)/10 & 50 \leq x < 60 \\ (70-x)/10 & 60 \leq x < 70 \\ 0 & 70 \leq x \leq 100 \end{cases}
 \end{aligned}$$

$$\text{差 } U(x) = \begin{cases} 0 & 0 \leq x < 40 \\ (x-40)/10 & 40 \leq x < 50 \\ (60-x)/10 & 50 \leq x < 60 \\ 0 & 60 \leq x \leq 100 \end{cases}$$

$$\text{极差 } U(x) = \begin{cases} 1 & 0 \leq x < 40 \\ (50-x)/10 & 40 \leq x < 50 \\ 0 & 50 \leq x \leq 100 \end{cases}$$

3.3 模糊综合评价

根据以上结果进行模糊综合评价,步骤如下:

1) 构建属性层(C)评价矩阵:根据隶属度函数和专业人员打分得出因素集即属性层(C)评价矩阵 R , r_{ij} 表示因素集中的第 i 个元素对应评价集中第 j 个元素的隶属度, n 为评价因素个数。

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix}$$

2) 计算准则层(B)评价向量: $\mathbf{B}_i = \mathbf{W}_i \mathbf{R}_i$, $\mathbf{W}_i$ 为属性层因素相对权重向量, $\mathbf{R}_i$ 为属性层评价矩阵($i=1,2,\cdots,n$)。

3) 构建准则层评价矩阵: $\mathbf{B} = [\mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2, \cdots, \mathbf{B}_n]^T$

4) 计算目标层(A)评价向量: $\mathbf{A} = \mathbf{Y} \mathbf{B}$, $\mathbf{Y}$ 为准则层因素权重向量。

5) 计算综合评价得分: $F = \mathbf{A} \mathbf{S}^T$, $\mathbf{S} = (90, 80, 70, 60, 50, 40)$ 。

6) 将综合评价得分与评价集对比得出地质环境评价等级。

4 地质环境评价过程

4.1 矿区地质环境评价模型

根据DD2014-05矿山地质环境调查评价规范,结合胡家峪矿区实地情况,本次评价选取矿山基本情

况、矿山地质条件、地质灾害、三废排放、环境恢复治理5项作为准则层(B)因素,选取矿山性质、生产规模、开采方式、人口居住密度、开采矿种、地质构造、岩性组合、地形地貌、水土流失、地面塌陷、泥石流、崩塌类问题、矿井突水、废水排放、固废排放、粉尘排放、植被恢复、废石综合利用、废石场尾矿库塌陷区监测、扬尘治理、边坡治理等21项作为属性层(C)因素,以此构建胡家峪铜矿区地质环境评价模型(图2)。

类问题、矿井突水、废水排放、固废排放、粉尘排放、植被恢复、废石综合利用、废石场尾矿库塌陷区监测、扬尘治理、边坡治理等21项作为属性层(C)因素,以此构建胡家峪铜矿区地质环境评价模型(图2)。

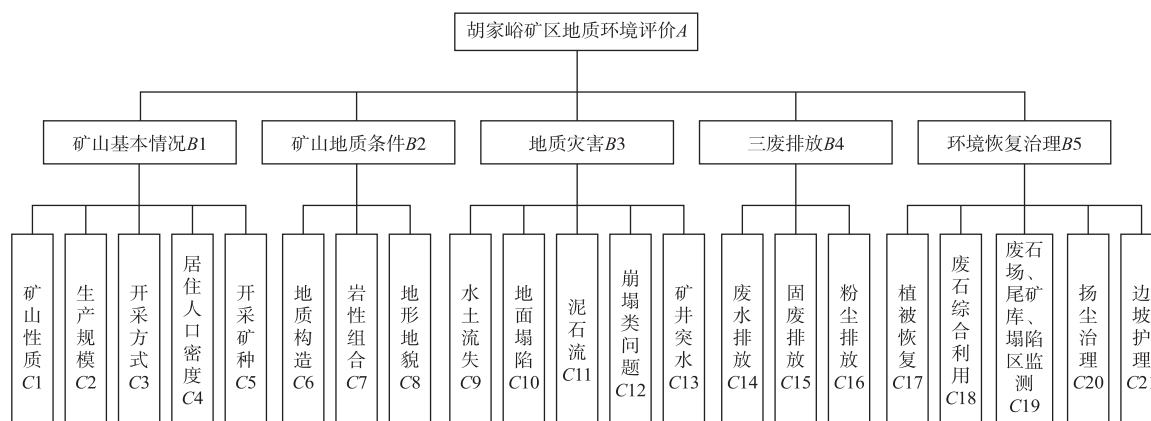


图2 胡家峪铜矿区地质环境评价模型

Fig. 2 Geological environment evaluation model of Hujiayu copper mining area

4.2 构建判断矩阵

根据地质环境评价模型,构建准则层(B)各因素相对目标层(A)的判断矩阵,矩阵从左至右,从上至下对应因素B1至B5,通过各因素两两比较,得到以下矩阵:

$$A-B = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/6 & 1/7 & 1/4 \\ 3 & 1 & 1/5 & 1/6 & 1/4 \\ 6 & 5 & 1 & 1/2 & 2 \\ 7 & 6 & 2 & 1 & 3 \\ 4 & 4 & 1/2 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$

同理,构建属性层(C)各因素相对准则层(B)对应因素的判断矩阵为:

$$B1-C = \begin{bmatrix} 1 & 1/5 & 1/7 & 1/3 & 1/2 \\ 5 & 1 & 1/3 & 3 & 4 \\ 7 & 3 & 1 & 4 & 5 \\ 3 & 1/3 & 1/4 & 1 & 2 \\ 2 & 1/4 & 1/5 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B2-C = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 3 \\ 1/5 & 1 & 1/2 \\ 1/3 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B3-C = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 5 & 3 & 7 \\ 2 & 1 & 5 & 4 & 8 \\ 1/5 & 1/5 & 1 & 1/2 & 2 \\ 1/3 & 1/4 & 2 & 1 & 3 \\ 1/7 & 1/8 & 1/2 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B4-C = \begin{bmatrix} 1 & 1/5 & 1/3 \\ 5 & 1 & 3 \\ 3 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B5-C = \begin{bmatrix} 1 & 1/7 & 1/2 & 1/5 & 1/3 \\ 7 & 1 & 6 & 2 & 3 \\ 2 & 1/6 & 1 & 1/5 & 1/2 \\ 5 & 1/2 & 5 & 1 & 3 \\ 3 & 1/3 & 2 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$

4.3 计算相对权重与综合权重

根据前述计算方法,得出以上6个判断矩阵的最大特征根 $\lambda_{\max}$ 及权重向量 N ,且矩阵检验系数均小于0.1,均通过一致性检验,进而得到所有因素的相对权重值及综合权重值(见表4)。

根据表4可以看出,影响胡家峪矿区地质环境的准则层(B)因素中,三废排放因素权重最高,其次为地质灾害和环境恢复治理两个因素,矿山地质条件和基本情况权重最小。属性层(C)综合权重中,固废排放所占权重最高,达到27.47%,地面坍塌和粉尘排放权重较大,达到10%以上,水土流失、废石综合利用、扬尘治理权重较小,在5%~10%,其余因素权重很小,均在5%以下,部分因素权重未到1%。根据以上分析,三废排放类因素对矿区地质环境造成的影响最大,尤其是固废和粉尘排放问题;地质灾害类因素影响较大,其中地面坍塌和水土流失影响突出;环境恢复治理类因素影响也较高,与前两类因素不同的是,该类因素对矿区地质环境产生正面影响,可以抵消前两类因素对环境造成的部分影响,其中废石综合利用和扬尘治理影响突出;矿山基本情况和地质条件对矿区地质环境影响最小。

表 4 胡家峪铜矿区地质环境各因素权重

Table 4 The weight of each factor of geological environment in Hujiayu copper mining area

目标层	准则层	权重/%	检验系数	属性层	权重/%	检验系数	综合权重/%
胡家峪 矿区地 质环境 评价 A	矿山基本情况 B1	4.20	0.042 5	矿山性质 C1	4.89	0.031 3	0.21
				生产规模 C2	26.30		1.10
				开采方式 C3	48.66		2.04
				人口居住密度 C4	12.36		0.52
				开采矿种 C5	7.79		0.33
	矿山地质条件 B2	7.10		地质构造 C6	64.83	0.003 6	4.61
				岩性组合 C7	12.20		0.87
				地形地貌 C8	22.97		1.63
	地质灾害 B3	28.01		水土流失 C9	31.11	0.015 3	8.72
				地面塌陷 C10	44.95		12.59
				泥石流 C11	7.39		2.07
				崩塌类问题 C12	12.17		3.41
				矿井突水 C13	4.38		1.23
				废水排放 C14	10.47		4.52
	三废排放 B4	43.12		固废排放 C15	63.70	0.037 0	27.47
				粉尘排放 C16	25.83		11.14
				植被恢复 C17	5.01		0.88
	环境恢复治理 B5	17.56		废石综合利用 C18	44.00	0.019 5	7.73
				废石场、尾矿库、 塌陷区监测 C19	7.36		1.29
				扬尘治理 C20	30.30		5.32
				边坡护理 C21	13.34		2.34

4.4 地质环境综合评价

经以上层次分析,得到矿区地质环境评价模型中各层因素的权重,据此对地质环境进行综合评价。本次评价邀请地质专家和矿山地质人员,根据评价

集 V 中的等级划分,对因素集 U 中各元素打分,分数越高表示对矿山地质环境影响越小或越有利于环境恢复,然后根据隶属度函数计算因素评价得分和对于评价集中各等级的隶属度(见表 5)。

表 5 胡家峪铜矿区地质环境各因素评价得分

Table 5 Scores of various factors of geological environment in Hujiayu copper mining area

准则层	属性层	得分	隶属度					
			优秀 90	较优秀 80	良好 70	较差 60	差 50	极差 40
矿山 基本情况	矿山性质	95	1.0	0	0	0	0	0
	生产规模	75	0	0.5	0.5	0	0	0
	开采方式	89	0.9	0.1	0	0	0	0
	人口居住密度	82	0.2	0.8	0	0	0	0
	开采矿种	85	0.5	0.5	0	0	0	0
矿山 地质条件	地质构造	76	0	0.6	0.4	0	0	0
	岩性组合	78	0	0.8	0.2	0	0	0
	地形地貌	68	0	0	0.8	0.2	0	0
地质灾害	水土流失	78	0	0.8	0.2	0	0	0
	地面塌陷	74	0	0.4	0.6	0	0	0
	泥石流	83	0.3	0.7	0	0	0	0
	崩塌类问题	88	0.8	0.2	0	0	0	0
	矿井突水	92	1.0	0	0	0	0	0
三废排放	废水排放	83	0.3	0.7	0	0	0	0
	固废排放	68	0	0	0.8	0.2	0	0
	粉尘排放	72	0	0.2	0.8	0	0	0
环境 恢复治理	植被恢复	87	0.7	0.3	0	0	0	0
	废石综合利用	78	0	0.8	0.2	0	0	0
	废石场、尾矿库、塌陷区监测	92	1.0	0	0	0	0	0
	扬尘治理	82	0.2	0.8	0	0	0	0
	边坡护理	86	0.6	0.4	0	0	0	0

根据表5可知,仅地形地貌及固废排放评价得分在70分以下,表明对矿区地质环境影响最严重;生产规模、地质构造、岩性组合、水土流失、地面坍塌、粉尘排放、废石综合利用得分在70~80,表明对矿区地质环境影响较严重,其余因素得分均在80分以上,表明对矿区地质环境影响较轻或有利于地质环境恢复。具体分析如下:

胡家峪矿区位于山区,地形起伏很大,坡度陡峻,故地形地貌比较复杂,矿山生产过程中产生大量采矿废石和选矿尾矿等固体废物,废石除部分综合利用外,其余部分储存于废石场内,选矿尾矿均堆存于尾矿库内,这些固体废物会使覆盖范围及周边的土壤、植被等生态系统遭受损毁,改变原有地形和地理景观,坡度过陡时,可能引发安全事故,故二者得分最低,对矿区地质环境影响最严重;胡家峪生产规模属于中型矿山,矿区内断层、褶皱等地质构造发育,岩石类型组合复杂,主要岩石有十六种,矿区水土流失严重,一半以上土壤侵蚀属于极强烈侵蚀,目前大部分边坡已通过修建浆砌石挡墙、绿化等措施进行防护处理,矿区有一处地面塌陷坑,塌陷坑上方土壤侵蚀强烈,无植被覆盖,矿区废石综合利用进度较慢,废石场扬尘对大气造成污染,目前通过定时洒水降尘、覆盖黄土、恢复植被等措施进行处理,故这些因素得分较低,对矿区地质环境影响较严重。

根据3.3及表5求得准则层评价矩阵 B 如下:

$$B = \begin{bmatrix} 0.550 & 0.318 & 0.131 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.486 & 0.467 & 0.046 & 0 & 0 \\ 0.163 & 0.504 & 0.331 & 0 & 0 & 0 \\ 0.031 & 0.125 & 0.716 & 0.127 & 0 & 0 \\ 0.249 & 0.662 & 0.088 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

由 $Y = (0.042, 0.071, 0.280, 1, 0.431, 2, 0.175, 6)$ 得到目标层评价向量 $A = (0.126, 2, 0.359, 5, 0.456, 0, 0.058, 2, 0, 0)$,进而综合评价得分 $F = AS^T = 75.53$ 。根据评价等级划分标准,可知胡家峪铜矿区地质环境评价等级总体属于良好级别。

有关部门之前通过现场踏勘、实地访谈等方法对胡家峪矿区地质环境现状进行了评估,得出矿山根据环保要求采取了针对生态、大气、水环境污染的防治措施,地质环境恢复治理取得了一定效果,但仍然存在一些问题,主要包括塌陷区岩石裸露、废石场及尾矿库压占土地、废石场内及道路两侧扬尘严重等,总体认为矿区地质环境良好,但环境恢复治理任务仍然艰巨。模糊评价结果与有关部门评估结果总体一致,符合实际情况,所以层次分析—模糊综合评价法

在胡家峪矿区地质环境评价方面有较好的适用性。

5 结论

1)依据矿区实际情况选取特定因素,成功构建胡家峪铜矿区地质环境评价模型,得出各因素相对权重与综合权重,结果显示三废排放类因素对矿区地质环境影响最大,尤其是固废和粉尘排放问题;地质灾害类因素影响较大,其中地面塌陷和水土流失影响突出;环境恢复治理类因素有利于地质环境恢复,影响也较大,其中废石综合利用和扬尘治理影响突出,其余因素对矿山地质环境影响较小。

2)通过模糊综合评价对矿区地质环境进行定量分析,得出胡家峪铜矿区地质环境评价等级属于良好级别,与矿山之前地质环境评估结果整体一致,表明该评价方法在胡家峪矿区地质环境评价方面应用结果比较理想。

3)根据评价结果,固废排放、水土流失、地面坍塌、粉尘排放等因素对矿区地质环境影响严重,在接下来的环境恢复治理中应重点对这些因素进行治理,进一步改善矿区生态环境,实现矿山的可持续发展。

参 考 文 献

- [1] 耿艳光. 中条山南河沟、桐木沟铜矿钠长岩和矿床成因研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2018.
GENG Yanguang. Study on the genesis of albite rock and deposits in Nanhegou and Tongmugou copper deposits in Zhongtiao Mountain [D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing),2018.
- [2] 黄维平,孙丰月,张晗,等. 山西中条山胡篁型铜矿床岩石地球化学特征[J]. 世界地质,2013,32(2):212-220.
HUANG Weiping, SUN Fengyue, ZHANG Han, et al. Petrology and geochemistry characteristic of Hu-Bi copper deposit in Zhongtiao Mountains of Shanxi province[J]. Global Geology,2013,32(2):212-220.
- [3] 段庆松,宋会侠,杜利林,等. 古元古代全球静寂期岩浆活动——以华北克拉通南缘中条山 2.3 Ga 横岭关花岗岩为例[J]. 地球科学,2020,45(9):3372-3385.
DUAN Qingsong, SONG Huixia, DU Lilin, et al. The magmatic activity in paleoproterozoic global magmatic quiescence: take the~2.3 Ga Henglingguan granites from Zhongtiaoshan in the southern north China Craton as an example[J]. Earth Science, 2020,45(9):3372-3385.
- [4] 姚志伟. 喷锚支护在胡家峪矿的应用[J]. 有色金属(矿山部分),2008,60(2):50-51.
YAO Zhiwei. Application of anchor spraying support in Hujiayu deposit. [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2008,60(2):50-51.
- [5] 陈俊奇. 基于RS和GIS的矿山地质环境调查与评价[D]. 北

- 京:中国地质大学(北京),2017.
- CHEN Junqi. Mine geological environment survey and evaluation based on RS and GIS[D]. Beijing:China University of Geosciences(Beijing),2017.
- [6] 马世斌,李生辉,安萍,等. 青海省聚乎更煤矿区矿山地质环境遥感监测及质量评价[J]. 国土资源遥感,2015,27(2):139-145.
- MA Shibin, LI Shenghui, AN Ping, et al. Remote sensing monitoring and quality evaluation for the mine geological environment of the Juhugeng coal mining area in Qinghai province[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2015, 27(2):139-145.
- [7] 孙小飞,邵怀勇,肖礼晓,等. 基于突变理论的红格钒钛磁铁矿矿区矿山地质环境评价[J]. 有色金属(矿山部分),2017,69(1):40-43,100.
- SUN Xiaofei, SHAO Huaiyong, XIAO Lixiao, et al. Geological environment evaluation for Hongge vanadium titanomagnetite mining area based on catastrophe theory [J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2017, 69(1):40-43,100.
- [8] 郭瑶. 基于层次分析法的矿山地质环境影响评价研究[J]. 环境科学与管理,2018,43(4):174-177.
- GUO Yao. Influence evaluation of mine geological environment based on analytic hierarchy process[J]. Environmental Science and Management, 2018, 43(4):174-177.
- [9] 王洋,马施民. 变权模糊综合法在矿山地质环境评价中的应用——以潞安矿区为例[J]. 安全与环境学报,2016,16(4):353-358.
- WANG Yang, MA Shimin. Application of the comprehensive fuzzy variable weight method to the mining geo-environment evaluation: A case study sample in Lu'an mine[J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(4):353-358.
- [10] 董双发,李名松,张剑峰,等. 辽宁鞍山地区基于层次分析法的矿山地质环境评价[J]. 矿产勘查,2017,8(3):504-513.
- DONG Shuangfa, LI Mingsong, ZHANG Jianfeng, et al. Analytical hierarchy process — based mine geological environment evaluation system in Anshan area, Liaoning[J]. Mineral Exploration, 2017, 8(3):504-513.
- [11] 张瀚夫,田艳丽,张晓军. 山西胡家峪桐木沟铜矿床深部矿体预测[J]. 世界地质,2011,30(3):352-358.
- ZHANG Hanfu, TIAN Yanli, ZHANG Xiaojun. Predication of deep ore body in Tongmugou copper deposit of Hujiayu, Shanxi province[J]. Global Geology, 2011, 30(3):352-358.
- [12] 庞雪娇. 山西中条山南和沟、老宝滩铜矿床矿化富集规律及矿床成因探讨[D]. 吉林:吉林大学,2010.
- PANG Xuejiao. Study on the enrichment regularities and the ore genetic rules of Nanhegou and Laobaotan copper deposits in Zhongtiaoshan, Shanxi province [D]. Jilin: Jilin University, 2010.
- [13] 李志丹,李效广,曾威,等. 中条山地区铜矿壳源流体成矿:来自铜矿峪、胡家峪流体包裹体氦、氩同位素的证据[J]. 地质学报,2019,93(9):2245-2259.
- LI Zhidan, LI Xiaoguang, ZENG Wei, et al. Crustal-fluid origin for copper mineralization in the Zhongtiaoshan region: Evidence of He and Ar isotopes from fluid inclusions in the Tongkuangyu and Hujiayu deposits[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(9):2245-2259.
- [14] 王子维,杨言辰,韩世炯,等. 中条山胡家峪铜矿区含矿岩系的地球化学特征及其地质意义[J]. 黄金,2014,35(3):26-32.
- WANG Ziwei, YANG Yanchen, HAN Shijiong, et al. Geochemical characteristics of ore-bearing rocks of the Hujiayu copper district in Zhongtiao Mountain and their geological significance[J]. Gold, 2014, 35(3):26-32.
- [15] 夏丽红. 中条山南和沟铜矿床地质特征及成矿地质条件分析[J]. 矿产与地质,2008,22(6):525-527.
- XIA Lihong. Geological characteristics and ore-forming geological conditions of the Nanhegou copper deposit in Zhongtiaoshan [J]. Mineral Resources and Geology, 2008, 22(6):525-527.
- [16] 向欣,罗煜,程红胜,等. 基于层次分析法和模糊综合评价的沼气工程技术筛选[J]. 农业工程学报,2014,30(18):205-212.
- XIANG Xin, LUO Yu, CHENG Hongsheng, et al. Biogas engineering technology screening based on analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(18):205-212.
- [17] 刘莉,余宏明,程江涛. 层次分析—模糊综合评价法在滑坡工程中的应用[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2008,30(2):43-47.
- LIU Li, YU Hongming, CHENG Jiangtao. Application of analytic hierarchy process—fuzzy comprehensive evaluation method to landslide engineering [J]. Journal of China Three Gorges University(Natural Sciences), 2008, 30(2):43-47.
- [18] 陈光伸,胡辉,胡涛,等. 基于 AHP-SCA-模糊综合评价法的露天矿安全评价应用研究[J]. 有色金属(矿山部分),2021,73(2):47-52.
- CHEN Guangshen, HU Hui, HU Tao, et al. Application research on the open-pit safety evaluation on the basis of AHP-SCA-Fuzzy comprehensive evaluation method [J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2021, 73(2):47-52.
- [19] 沈简,饶军,傅旭东. 基于模糊综合评价法的泥石流风险评价[J]. 灾害学,2016,31(2):171-175.
- SHEN Jian, RAO Jun, FU Xudong. Assessment on debris flow risk based on fuzzy comprehensive evaluation method [J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(2):171-175.

(编辑:周叶)