

## 煤炭加工与环保



移动扫码阅读

王佳奇,卢明银,王庆雄,等.基于熵权法-云模型保水开采生态环境评价研究[J].煤炭科学技术,2022,50(4):291-298.

WANG Jiaqi, LU Mingyin, WANG Qingxiong, *et al.* Study on ecological environment assessment of water conservation mining based on entropy weight method and cloud model[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(4): 291-298.

## 基于熵权法-云模型保水开采生态环境评价研究

王佳奇<sup>1</sup>, 卢明银<sup>1</sup>, 王庆雄<sup>2</sup>, 王旭锋<sup>1</sup>, 李贤功<sup>1</sup>, 翟文睿<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221000; 2. 国能神东煤炭集团有限责任公司, 陕西 神木 719315)

**摘要:**随着煤矿绿色开采技术的成熟应用,我国矿区的生态环境得到了明显改善,特别是西部生态脆弱矿区的生态环境实现了正向演替。因此为了量化衡量矿区生态环境的改善效果,反映绿色开采技术对矿区生态环境恢复的作用,基于绿色开采中的保水开采技术,提出了一套以保水开采技术为基础的矿区生态环境评价指标体系。在该评价体系中,采用较为客观的熵权法来对各个指标进行赋权以减少指标赋权时的专家主观性,并且为了兼顾评价信息的随机性与模糊性,采用能够描述信息随机性与模糊性的云模型理论作为建模基础,构建了一套以熵权法和云模型为基础的保水开采生态环境评价模型。该模型能够量化给出保水开采技术对矿区生态环境的改善效果,达到对以保水开采技术为主的矿区生态环境评价的目的。另外,通过实地调研选择神东矿区的哈拉沟煤矿为例,借助本评价模型对哈拉沟矿区生态环境进行评价并对本评价模型的合理性进行验证。结果表明:哈拉沟矿区的生态环境水平位于评语级“优”与评语级“良”之间,总体处于一个较好水平,和哈拉沟矿区生态环境状况相一致,从而验证了本评价模型的合理性;但通过评价云图也可看出评价结果偏向“良”的评语级,也反映了哈拉沟煤矿的生态环境状况还有提升空间,并结合分析结果给出了矿区后期应注意塌陷面积和塌陷深度等方面的改善建议。研究表明:本评价模型能够客观地对保水开采技术实施后的矿区生态环境水平进行量化评价,并能够给出矿区生态环境改善的建议,以达到科学利用保水开采技术,实现矿区生态环境良性发展的目的。

**关键词:**绿色开采;保水开采;生态环境评价;熵权法;云模型

中图分类号:TD823

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2022)04-0291-07

## Study on ecological environment assessment of water conservation mining based on entropy weight method and cloud model

WANG Jiaqi<sup>1</sup>, LU Mingyin<sup>1</sup>, WANG Qingxiong<sup>2</sup>, WANG Xufeng<sup>1</sup>, LI Xiangong<sup>1</sup>, ZHAI Wenrui<sup>1</sup>

(1. School of Mining Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221000, China; 2. CHN Energy

Shendong Coal Group Co., Ltd., Shenmu 719315, China)

**Abstract:** With the mature application of green mining technology in coal mines, the ecological environment of China's mining areas in China has been significantly improved, especially the ecological environment of ecologically fragile mining areas in the west has achieved positive succession. Therefore, in order to quantitatively evaluate the ecological environment of mining area and reflect the purpose of green mining technology to promote the improvement of ecological environment in mining area, this paper puts forward a set of evaluation index system of ecological environment in mining area based on water conservation mining technology in green mining. In this evaluation system, each index was weighted by using the more objective entropy weight method to reduce the subjectivity of experts when the index was weighted. The cloud model theory which can describe the randomness and fuzziness of the information was used as the modeling basis, and a set

收稿日期:2022-10-09

责任编辑:黄小雨

DOI:10.13199/j.cnki.cst.LS20-039

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2015CB251600)

作者简介:王佳奇(1996—),男,河南洛阳人,博士研究生。E-mail:1903145915@qq.com

of water conservation mining ecological environment evaluation model based on entropy weight method and cloud model was constructed, which can quantify the impact of water conservation mining technology on mining ecology and the improvement effect of environment can realize the purpose of ecological environment evaluation of mining area based on water conservation mining technology. In addition, through field investigation, Halagou Coal Mine in Shendong Mining Area was selected as an example to evaluate the ecological environment of Halagou Coal Mine with the help of this evaluation model, and the rationality of the evaluation model was verified. The results show that: the ecological environment level of Halagou Mining Area is between the evaluation level of "excellent" and the evaluation level of "good", which is generally in a good level. This evaluation result is consistent with the field ecological environment situation of Halagou, which verifies the rationality of the evaluation model. However, it can be seen from the evaluation cloud map that the evaluation results tend to be "good", which also reflects that the ecological environment of the Haragou Coal Mine still has room for improvement. In general, through the construction and case verification of the evaluation model of water conservation mining, this paper shows that the evaluation model can objectively evaluate the ecological environment level of the mining area after the implementation of the water conservation mining technology, and can give suggestions for improving the ecological environment of the mining area, so as to achieve the purpose of scientific utilization of water conservation mining technology and realize the benign cycle of ecological environment in mining area.

**Key words:** green mining; water conservation mining; ecological environment assessment; entropy weight method; cloud model

## 0 引言

为解决西北干旱缺水矿区的煤矿开采与水资源保护相矛盾的生态环境问题,中国矿业大学的钱鸣高院士于2003年提出煤矿的保水开采技术<sup>[1]</sup>。自从保水开采这一技术概念提出后,近年来无论是在理论创新或实际应用方面的研究均已比较成熟。在理论创新方面:张兆威<sup>[2]</sup>将部分充填开采与保水开采技术相结合,对部分充填保水开采的机理、技术特征与充填工艺进行了分析;肖民<sup>[3]</sup>研究了将离层注浆技术运用到保水开采中,并对注浆离层的参数进行模拟分析。马立强等<sup>[4]</sup>针对近距离煤层与极近距离浅表水下保水开采条件问题,研究解决了反复开采扰动区域覆岩导水裂隙协同控制与采掘面涌水灾害监测预警等难题;师本强<sup>[5]</sup>分析了影响保水开采的各种因素,提出陕北浅埋煤层矿区保水开采的区域划分体系。而在保水开采技术应用方面:李猛等<sup>[6]</sup>以五沟煤矿CT101充填工作面为例,对以固体充填为主的保水开采方法进行了验证;马立强等<sup>[7]</sup>以神东矿区补连塔煤矿32202长壁工作面为例,论证了以快速推进工作面为核心的长壁工作面保水开采技术;吕广罗等<sup>[8]</sup>以永陇矿区崔木煤矿为例,对巨厚砂砾岩含水层下特厚煤层保水开采进行分区与实践研究。综上分析可以看出,现阶段针对保水开采的研究已经十分成熟,无论是在技术融合创新方面,或者实地矿区应用方面,均有大量文献研究。而保水开采等一系列绿色开采技术提出的最终目的是解决煤炭开采与矿区生态环境相矛盾的问题,但现阶段的研究主要集中在保水开采技术下的煤炭如何实现高效安全开采,对保水开采下的矿区生态环境研究几乎没有,忽略了对矿区生态环境的研究,或者

是单一的研究矿区生态环境状况,未将保水开采技术与其联系起来进行综合考虑,具有片面性。

因此,从保水开采技术的角度出发,利用熵权法与云模型理论构建了一套保水开采生态环境评价模型,借此将保水开采技术与矿区生态环境相结合,并选取神东矿区哈拉沟煤矿为例,对其矿区生态环境状况进行评价,验证了本文构建模型的合理性,旨在利用本评价体系对保水开采技术实施后的矿区生态环境进行客观评价,得到矿区生态环境的量化评价结果,借此说明保水开采技术的实施有助于矿区生态环境的改善,能够减少开采对生态环境的破坏,为煤炭的合理开采与生态环境良性循环提供科学的指导,实现煤矿产业的绿色发展。

## 1 熵权法和云模型理论

### 1.1 熵权法

熵权法是一种利用指标熵值来决定指标权重的赋权方法,它与传统权重确定方法不同,能够避免权重确定时主观性过强的问题,其主要求解步骤如下<sup>[9]</sup>:

1) 构建初始指标矩阵:设有 $m$ 个评价对象,每个评价对象有 $n$ 个评价指标,则可以得到初始的评价指标矩阵 $R = (r_{ij})_{m \times n}$  ( $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ ),其中 $r_{ij}$ 为第 $i$ 个评价对象的 $j$ 类评价指标的评价数据。

2) 计算指标熵值:根据评价数据,计算评价体系中第 $j$ 项的熵值:

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

式中: $p_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^m r_{ij}}$ ,  $r_{ij}$ 为第 $i$ 个评价对象的 $j$ 类评价指标

标的评价数据。

3) 指标权重的确定:根据所求熵值,计算第 $j$ 项指标的差异性系数 $f_j: f_j = 1 - H_j$ ,指标的差异性系数反映了指标包含的信息数据量,也就是指标的重要程度。其值越大,说明该指标包含的信息量也越大,重要程度就越高,反之则越低。因此,第 $j$ 项指标的熵权为 $\omega_j = f_j / \sum f_j, (j=1, 2, \dots, n)$ ,依次计算,就可得到整个评价指标体系的权重向量为 $W = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ 。

## 1.2 云模型

云模型主要是反映事物概念的模糊性与随机性,构成定性和定量的相互映射关系,从而将二者集成起来。主要有 $E_x, E_n, H_e$ 三个数字特征,通过它们可以反映所描述概念的模糊性与随机性<sup>[10]</sup>。在云模型的数字特征中, $E_x$ 为该模糊对象的数学期望值; $E_n$ 为可反应该模糊对象“宽度”的熵值,熵值越大,则该模糊信息的不确定性的程度也就越高,在反映该模糊信息的云图上表现为云的水平方向宽度越大; $H_e$ 为熵值 $E_n$ 不确定性的超熵值,超熵值增大,模糊信息的离散程度与随机性也随之增高,云层越厚。

云模型中2个最重要的算法为正向云发生器和逆向云发生器。正向云发生器在已知3个特征数字的情况下用来生成所需数量的云滴,逆向云发生器实现从给定的云滴样本中反求出3个数字特征,从而实现对样本数据的定性评价。下面给出2种算法的步骤<sup>[11]</sup>。

算法1:正向云发生器算法。

输入:某个定性概念期望值( $E_x$ )、熵( $E_n$ )以及超熵( $H_e$ ),并给定云滴数量 $N$ 。

输出:数域空间的 $N$ 个云滴对应的定量位置以及云滴所表征的定性概念的确定度。

1) 生成以 $E_n$ 为期望,且以 $H_e$ 为标准差的随机数 $E_n'$ (正态分布);

2) 随机生成以 $E_x$ 为期望, $E_n'$ 为标准差的数值 $x$ ;

3) 将 $x$ 作为定性概念的具体量化数值,即一个云滴;

4) 定义 $y$ 为 $x$ 隶属于该定性概念的确定度;

$$y = e^{\frac{-(x-E_x)^2}{2(E_n')^2}} \quad (2)$$

5) 通过 $(x, y)$ 则能够完整反映出定性定量之间转换的所有内容;

6) 重复步骤1)~5)来产生 $N$ 个云滴。

算法2:逆向云发生器算法

输入: $N$ 个云滴 $x_i$ ;

输出:这 $N$ 个云滴对应定性概念的期望 $E_x$ 、熵 $E_n$ 以及超熵 $H_e$ 。

通过 $x_i$ 计算得出数据的样本均值, $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$ ,

以及一阶样本绝对中心距 $B = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i - \bar{x}|$ ,以及

样本方差 $S^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2$ ;

$$E_x = \bar{x} \quad (3)$$

$$E_n = \left( \frac{\pi}{2} \right)^{\frac{1}{2}} B \quad (4)$$

$$H_e = (S^2 - E_n^2)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

## 2 评价指标的选取与模型构建

### 2.1 保水开采生态环境评价指标选取

#### 2.1.1 煤矿开采对生态环境影响

生态环境是一个关系到社会和经济持续发展的复杂复合生态系统<sup>[12]</sup>,主要包括水资源、土地资源、生物资源与气候资源。而生态环境问题则是指人类为了自身的生存和发展,在利用和改造自然过程中,对生态环境内的各种资源过度使用,致使生态环境遭到破坏的问题。煤矿的开采在给我们带来巨大经济利益的同时,也对矿区的生态环境造成了极大的破坏,传统的煤矿开采主要对矿区的土地、土壤、地质、岩层、植被等产生影响,以及对水资源、固体废物、废气、噪声等污染<sup>[13]</sup>。具体影响如图1所示。

从图1可以看出,煤矿开采对生态环境的影响十分严重,不仅对土地、植被、空气、水体等均产生影响,还会导致各类煤矿事故的发生。可以说,传统的煤矿开采已经不适应现阶段社会所倡导的“绿色发展”模式,未来的煤矿开采必须是在保护好生态环境的前提下开采,减少对矿区生态环境的破坏。

#### 2.1.2 保水开采技术

保水开采是绿色开采的主要技术之一,是指在采煤的过程中对地下水资源进行保护并对矿井排出的水资源进行资源化利用,主要通过含水层不破坏或破坏后能够恢复的采煤技术与井下排水净化循环技术来实现<sup>[14]</sup>。具体来讲包含3方面的内涵:①实现采煤的安全高效;②保护采煤工作面下的水资源;③最大化地实现“煤水共采”<sup>[15-16]</sup>。其最终目的就是保证煤矿的安全开采并且使得采煤时对水质环境的扰动程度小于它的抗干扰程度。而保水开采技术的实施受多种因素影响<sup>[17]</sup>,既有不可控的自然地质因素,也有可以人为控制的生产技术因素。下面从自

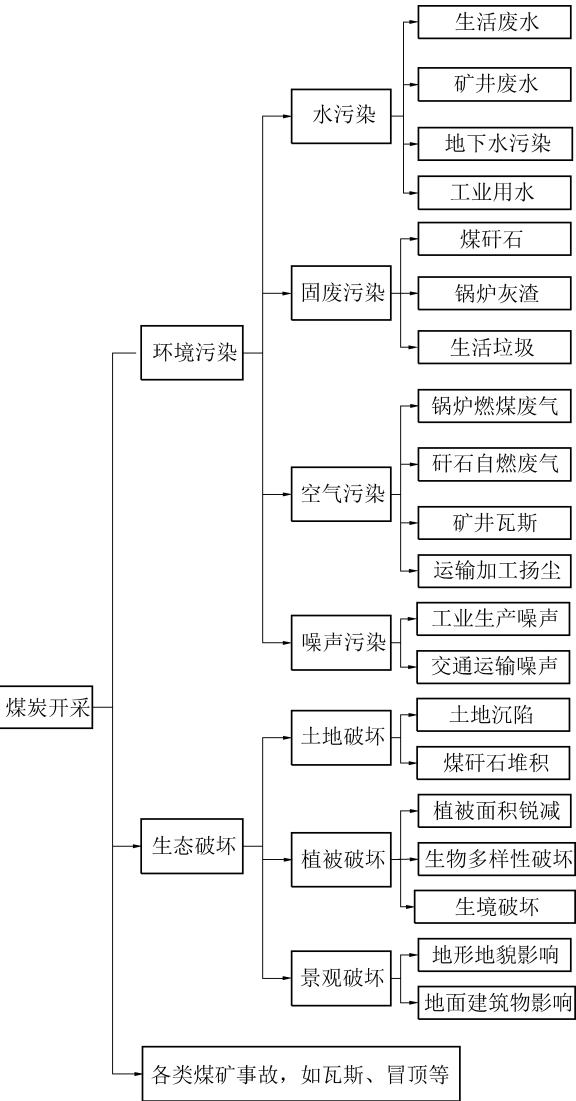


Fig.1 Impact of coal mining on ecological environment

然因素和可控因素 2 个角度来分析保水开采的影响因素,如图 2 所示。

自然因素主要是指煤矿所在地区的地质水文等自然条件,主要包括基岩厚度等 5 个因素,不同矿区的自然条件会使煤矿保水开采时的导水裂隙带发育情况不同<sup>[18]</sup>,因此一个矿区的自然环境是影响保水开采实施的关键因素。而可控因素是针对不同地质条件属性而采取不同的开采方法、开采工艺、开采布局等这类因素,其综合反映工作面超前支撑压力和相邻工作面侧向残余支撑力以及工作面巷道围岩应力三部分采动影响应力的变化情况,这也会影响一个矿区保水开采的实施情况<sup>[19-20]</sup>。因此以上因素是每个矿区实施保水开采前必须研究的,不同的自然因素采取不同的开采技术就会对生态环境产生不同程度的扰动。

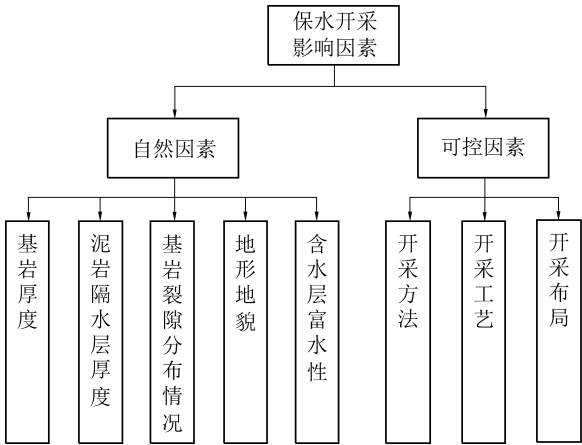


Fig.2 Influencing factors of water retaining mining

2.1.3 保水开采生态环境评价指标确定

参考煤矿开采对生态环境的影响表、保水开采影响因素,以及已有的井工煤矿生态环境评价类文献基础之上,提出了以总目标(*G*)、子目标(*C*)与指标(*I*)为结构的三层评价模型。评价体系见表 1。

表 1 保水开采生态环境评价指标体系

Table 1 Ecological environment evaluation index system of water conservation mining

总目标 <i>G</i>	子目标 <i>C</i>	指标 <i>I</i>
生态环境度 <i>G</i>	生态治理 <i>C</i> <sub>1</sub>	植被覆盖率 <i>I</i> <sub>1</sub>
		塌陷面积比 <i>I</i> <sub>2</sub>
		塌陷深度比 <i>I</i> <sub>3</sub>
		土地复垦率 <i>I</i> <sub>4</sub>
	环境保护 <i>C</i> <sub>2</sub>	地下水补充径流排泄状况 <i>I</i> <sub>5</sub>
		矿井水综合利用率 <i>I</i> <sub>6</sub>
		水体污染程度 <i>I</i> <sub>7</sub>
		SO <sub>2</sub> 浓度均值 <i>I</i> <sub>8</sub>
	安全开采 <i>C</i> <sub>3</sub>	矿区噪声年平均值 <i>I</i> <sub>9</sub>
		矿井涌水量 <i>I</i> <sub>10</sub>
		导水裂隙带高度 <i>I</i> <sub>11</sub>
		安全事故发生率 <i>I</i> <sub>12</sub>
	资源保护与利用 <i>C</i> <sub>4</sub>	原煤产量 <i>I</i> <sub>13</sub>
		采区回采率 <i>I</i> <sub>14</sub>
		煤层气利用量 <i>I</i> <sub>15</sub>
		煤矸石综合利用率 <i>I</i> <sub>16</sub>
	社会经济效益 <i>C</i> <sub>5</sub>	吨煤成本 <i>I</i> <sub>17</sub>
		环保投入占比 <i>I</i> <sub>18</sub>
		搬迁人口比例 <i>I</i> <sub>19</sub>
		单位产品综合能耗 <i>I</i> <sub>20</sub>

该评价指标体系是以生态环境度总目标,生态治理等 5 个子目标,以及 20 个指标组成的。其中生

态环境度就是评价结果,其通过生态治理、环境保护、安全开采、资源保护与利用、社会经济效益等5个方面实现,其中各个方面又分别包含了具体的指标。在所选取的20个指标当中, $I_2$ 、 $I_3$ 、 $I_4$ 、 $I_5$ 、 $I_6$ 、 $I_7$ 、 $I_{10}$ 、 $I_{11}$ 是能够反映保水开采技术的实施效果的指标,因为保水开采技术实施的核心就是要保证含水层的正常形态,实现水循环的高效利用与安全开采,因此通过土地塌陷情况以及矿井水的相关指标可以直接反映保水开采实施对生态环境的改善效果。而指标 $I_{14}$ 、 $I_{15}$ 、 $I_{16}$ 、 $I_{17}$ 、 $I_{19}$ 、 $I_{20}$ 是通过资源利用情况与矿区经济效益方面来间接反映保水开采技术对生态环境的影响,因为保水开采技术的实施是一个复杂的动态系统,改善效果会通过多方面显现,因此就需要一些间接性的指标来描述保水开采技术对生态环境的影响情况;其余指标是通过空气、噪声等不同角度来反映矿区的生态环境水平。

在上述指标中,有些是可以量化评价的,如 $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ 、 $I_4$ 、 $I_6$ 、 $I_{12}$ 、 $I_{14}$ 、 $I_{16}$ 、 $I_{18}$ 、 $I_{20}$ 等指标,可以根据实际数据来对其评价,准确度较高。但也存在某些指标如 $I_5$ 、 $I_{11}$ 、 $I_{15}$ 等指标,属于定性指标,只能根据有经验的专家来对其评价,具有较大的随机性。

## 2.2 评价模型的构建

基于熵权法和云模型的理论,建立了一套熵权法-云模型的综合评价体系。评价体系具体步骤如下:

1)确定因素集和评价集。首先确定待评价系统的基本指标,并将其细分为要素指标,组成因素集,建立指标体系。列出因素集 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_i\}$ ,其中 $U_i$ 是基本指标,确定基本指标下的各个属性的评语,评语集合为 $V = \{V_1, V_2, \dots, V_j\}$ ,对每一个因素集中的因素分别依据评语集进行评价,假设有 $m$ 位专家利用评语集合 $V$ 对因素 $i$ 进行评价,可得 $U_i = \{U_{i1}, U_{i2}, \dots, U_{im}\}$ ,集合中的元素分别为对于因素 $i$ 的 $m$ 位专家的评语集。

2)标准云的确定。在此基于黄金分割的模型驱动法,设定评价的标准云模型<sup>[21]</sup>。黄金分割思想的核心在于如何利用0.618这一数值,其计算云评价标度是根据相邻云对应的熵和超熵值,使比较后数值更高者乘以0.618即可等于数值更低者,通过这种方式实现云评价标度的制定<sup>[22]</sup>。根据评价体系将评价将区间划分为 $[0, 10]$ ,其对应为论域 $[X_{\min}, X_{\max}]$ ,结合评价对象特点,将超熵值定为0.05,根据表2的运算规则来制定评价的标度。

3)熵权法对因素集权重赋值。依据上文提出

的熵权法计算权重的步骤,结合保水开采生态环境评价指标体系表,即可计算出指标权重值: $W = (w_1, w_2, \dots, w_i)$ 。

表2 黄金分割法计算云评价标度

Table 2 Cloud evaluation scale calculated by golden section method

云模型参数	期望值 $E_x$	熵 $E_n$	超熵 $H_e$
$E_2$	$X_{\max}$	$E_{n1}/0.618$	$H_{e1}/0.618$
$E_1$	$E_{x0} + 0.382(X_{\min} + X_{\max})/2$	$0.382(X_{\max} - X_{\min})/6$	$H_{e0}/0.618$
$E_0$	$(X_{\min} + X_{\max})/2$	$0.618E_{n1}$	$H_{e0}$
$E_{-1}$	$E_{x0} - 0.382(X_{\min} + X_{\max})/2$	$0.382(X_{\max} - X_{\min})/6$	$H_{e0}/0.618$
$E_{-2}$	$X_{\min}$	$E_{n1}/0.618$	$H_{e1}/0.618$

4)实际云模型构建。利用逆行云发生器,根据专家的评价数据,生成对应的云参数矩阵: $Z = E_r(E_{xr}, E_{nr}, H_{er}) (r = 1, 2, \dots, i)$ 。根据权重矩阵 $W$ 与云参数矩阵 $Z$ ,可得综合评价结果为: $Y = Z \cdot W$ ,其中, $\cdot$ 为模糊算子,考虑到指标权重对结果影响以及评价的综合性,在这里模糊算子选择加权平均型,即可得到综合评价结果的云参数: $Y(E_x, E_n, H_e) = \sum_{r=1}^i z_r w_r$ 。再根据综合结果云参数,运用正向云发生器即可得到每个属性的实际云模型。

5)相似性比较。进行相似性比较。把根据实际数据得到的综合云模型和评价标准云模型中的每个评语的云模型进行比较,得到一个与之最为相似的标准评估云,这个评估云所对应的定性评语就是对这个指标因素的评价结果。

## 3 实例验证

### 3.1 案例背景

以哈拉沟煤矿为例,哈拉沟煤矿位于神东矿区中部,核定生产能力1 600万t/a,为神东煤炭集团千万吨矿井群中的骨干矿井之一。地处干旱半干旱的毛乌苏沙漠东南部与黄土高原北部接壤地带,水资源匮乏,植被稀少,生态脆弱,传统方法的开采已经对生态环境造成了极大破坏。为改善煤矿开采对生态环境的破坏情况,哈拉沟煤矿通过实施保水开采方法进行绿色矿山建设,现已被评为国家水土保持生态文明工程之一。

经过技术改造后的哈拉沟煤矿,根据2016年数据显示,在资源利用方面,矿井采区回采率81.71%、原煤入洗率100%、矿井水综合利用率81.6%、煤矸石综合利用率100%,各项指标均在国内处于领先

水平。在矿区环境方面,并没有因大规模开发造成环境破坏,反而使原有脆弱生态环境实现正向演替,在荒漠化地区建成一片绿洲。在生态文明建设方面,规划在哈拉沟沉陷区范围内建设一个集水土保持、土地复垦、地质环境恢复治理、造林为一体的综合性生态治理示范区,即哈拉沟山地公园,规划面积  $17 \text{ km}^2$ 。山地公园建成后,将使哈拉沟煤矿所在地大柳塔镇达到绿地率为  $36\%$  的全国园林城镇标准,人均公共绿地面积达  $12 \text{ m}^2$ ,提升矿区绿化水平。综上分析可知,经技术改造后的哈拉沟煤矿开采并没有对矿区的生态环境造成较大破坏,相反,由于该矿区重视生态环境的保护,通过多种手段来促进生态的恢复,还对生态环境的演替起到了积极的作用。

### 3.2 评价模型的构建

#### 3.2.1 因素集与评语集确定

根据保水开采生态环境评价指标体系,确定因素集为  $U = \{I_1, I_2, \dots, I_{20}\}$ ,依据之前云评价标度中将区间划分为  $[0, 10]$ ,其对应为论域  $[X_{\min}, X_{\max}]$ ,可得评语集  $V = \{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5\}$ ,其中  $V_1 = [0, 2)$ 、差,  $V_2 = [2, 4)$ 、较差,  $V_3 = [4, 6)$ 、中,  $V_4 = [6, 8)$ 、良,  $V_5 = [8, 10]$ 、优。

#### 3.2.2 标准云与指标权重确定

根据表2的运算规则,可计算得到云评价的标度(表3)。

表3 标准云数字特征

Table 3 Digital characteristics of standard cloud

云模型参数	评价等级	期望 $E_x$	熵 $E_n$	超熵 $H_e$
$E_2$	优	10	1.03	0.13
$E_1$	良	6.91	0.64	0.08
$E_0$	中	5	0.39	0.05
$E_{-1}$	较差	3.09	0.64	0.08
$E_{-2}$	差	0	1.03	0.13

在云图的设计中,通常将该评价值的确定度设置为坐标轴系的纵坐标,将评价值设置为坐标系的横坐标,当云滴数为200时的云评价标度如图3所示。

根据因素集与评价集,选取5位哈拉沟煤矿的保水开采技术实施专家依据保水开采生态环境评价指标体系进行评价,以此获取初始评价数据。再按照熵权法的原理,根据初始评价数据,在Matlab中进行计算,即可得如表4所示的各个指标权重值。

#### 3.2.3 实际云模型构建

将初始评价数据带入到逆向云发生器,即可得到各个指标对应的云参数值,见表5。

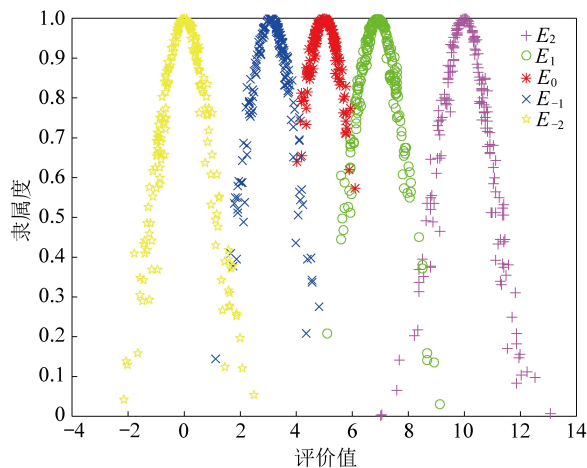


图3 云评价标度

Fig.3 Cloud evaluation scale chart

表4 评价指标权重

Table 4 Weight of evaluation indexes

子目标 $C$	权重	指标 $I$	权重
生态治理 $C_1$	0.133 3	植被覆盖率 $I_1$	0.015 8
		塌陷面积比 $I_2$	0.146 8
		塌陷深度比 $I_3$	0.046 6
		土地复垦率 $I_4$	0.010 2
环境保护 $C_2$	0.343 7	地下水补径排状况 $I_5$	0.131 4
		矿井水综合利用率 $I_6$	0.050 8
		水体污染程度 $I_7$	0.010 2
		$\text{SO}_2$ 浓度均值 $I_8$	0.059 5
		矿区噪声年平均均值 $I_9$	0.029 8
安全开采 $C_3$	0.206 3	矿井涌水量 $I_{10}$	0.182 1
		导水裂隙带高度 $I_{11}$	0.050 8
		安全事故发生率 $I_{12}$	0.015 8
资源保护与利用 $C_4$	0.194 6	原煤产量 $I_{13}$	0.015 8
		采区回采率 $I_{14}$	0.043 2
		煤层气利用量 $I_{15}$	0.043 2
		煤矸石综合利用率 $I_{16}$	0.010 2
社会经济效益 $C_5$	0.122 1	吨煤成本 $I_{17}$	0.043 2
		环保投入占比 $I_{18}$	0.011 1
		搬迁人口比例 $I_{19}$	0.043 2
		单位产品综合能耗 $I_{20}$	0.040 3

通过计算可以得到综合评价结果的云参数为  $(7.787\ 5, 0.928\ 3, 0.243\ 6)$ 。根据云模型理论,云滴数越多则误差越小,因此尽可能选取较多云滴数来进行模拟。在此将云滴数定为2 000,然后利用正向云发生器,生成综合评价结果的云图,再放置于标准云图中进行比较,即可得出综合评价云图,如图4所示。

表 5 各评价指标云参数

Table 5 Cloud parameters of each evaluation index

指标 $I$	$E_x$	$E_n$	$H_e$
$I_1$	9.600 0	0.601 6	0.248 8
$I_2$	6.600 0	1.102 9	0.289 1
$I_3$	5.600 0	0.601 6	0.248 8
$I_4$	9.800 0	0.401 1	0.197 9
$I_5$	6.800 0	0.902 4	0.621 0
$I_6$	8.600 0	0.902 4	0.119 6
$I_7$	9.800 0	0.401 1	0.197 9
$I_8$	9.000 0	1.002 7	0.072 9
$I_9$	9.000 0	0.501 3	0.498 7
$I_{10}$	6.800 0	1.303 4	0.032 0
$I_{11}$	8.600 0	0.902 4	0.119 6
$I_{12}$	9.600 0	0.601 6	0.248 8
$I_{13}$	9.600 0	0.601 6	0.248 8
$I_{14}$	8.800 0	0.802 1	0.237 9
$I_{15}$	8.800 0	0.802 1	0.237 9
$I_{16}$	9.800 0	0.401 1	0.197 9
$I_{17}$	8.800 0	0.802 1	0.237 9
$I_{18}$	9.200 0	0.401 1	0.197 9
$I_{19}$	8.800 0	0.802 1	0.237 9
$I_{20}$	9.200 0	0.802 1	0.237 9

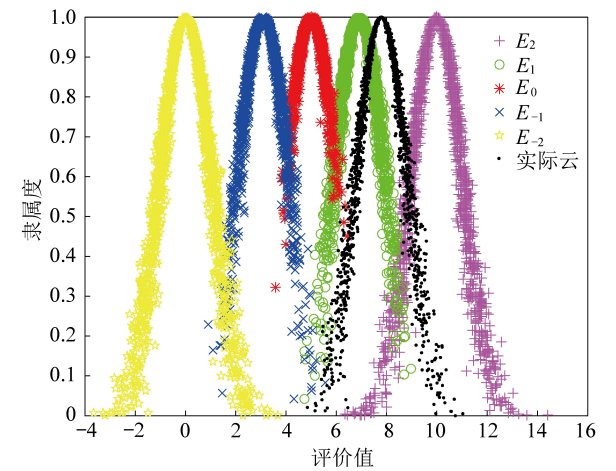


图 4 评价结果云图

Fig.4 Cloud chart of evaluation results

3.2.4 评价结果分析

从评价云图中可以看出,实际云模型的云图主要处于  $E_1$  良和  $E_2$  优的两个标准云图之间,说明实施保水开采技术后的哈拉沟煤矿的整体生态环境处于较好水平。仔细观察实际云模型的云滴位置可知,实际云模型的云滴只有约 10 粒散落在  $E_0$  的评语集内,没有一粒云滴处于  $E_{-2}$  的中,大部分云滴位于  $E_1$  或  $E_2$  内,说明实际云模型的一致度较高,从而反映出哈拉沟煤矿的生态环境处于较优的水准,应继续

保持。但通过实际云参数还可以看出,虽然总体评价效果较好,但云参数中的熵值与超熵值均较大,从云图也可以看出,实际云图的云滴分布较广,云图较“宽”,说明了评价结果的不确定较高,从而说明哈拉沟煤矿的生态环境水平虽处于较高水准,但还存在不足,应重点放在均值较低的三级指标上,如塌陷面积和塌陷深度等方面,通过技术方法来降低整体的不确定性,提高哈拉沟煤矿的生态环境水平。

4 结 论

1)通过保水开采生态环境评价模型的构建,能够以量化的形式客观清晰地反映矿区生态环境的状况,解决了实际评价时无法对矿区生态环境量化评价的问题。

2)在对矿区保水开采生态环境量化评价研究的基础之上,表明保水开采等绿色开采技术确实有助于矿区生态环境的恢复,能够解决矿区经济效益与生态环境发展相矛盾的问题,推动保水开采等绿色开采技术的广泛应用。

3)本评价模型可以解决不同矿区生态环境状况横向比较的问题,给出不同矿区的量化评价结果,并可根据量化评价结果针对性地提出矿区后期生态环境的改善意见。

4)本评价模型还能够引起专家学者对绿色开采矿区生态环境评价方面的理论研究,保护矿区生态环境,实现煤矿开采的绿色发展。

参考文献 (References) :

[1] 钱鸣高,许家林,缪协兴.煤矿绿色开采技术[J].中国矿业大学学报,2003(4):5-10.  
QIAN Minggao, XU Jialin, MIAO Xiexing. Green mining technology of coal mine [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2003(4):5-10.

[2] 张兆威.基于绿色部分充填采煤的保水开采技术研究[J].煤炭工程,2018,50(1):105-107,112.  
ZHANG Zhaowei. Research on water retaining mining technology based on green partial filling mining [J]. Coal Engineering, 2018, 50(1):105-107, 112.

[3] 肖 民.榆神矿区榆树湾矿保水开采注浆离层参数研究[D].西安:西安科技大学,2006.  
XIAO Min. Study on grouting separation parameters of water retaining mining in Yushuwan mine, Yushen mining area [D]. Xi'an: Xi'an University of science and technology, 2006.

[4] 马立强,张东升,金志远,等.近距煤层高效保水开采理论与方法[J].煤炭学报,2019,44(3):727-738.  
MA Liqiang, ZHANG Dongsheng, JIN Zhiyuan, et al. Theory and method of efficient water conservation mining in close coal seams [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(3):727-738.

- [5] 师本强. 陕北浅埋煤层矿区保水开采影响因素研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2012.  
SHI Benqiang. Study on Influencing Factors of water retaining mining in shallow coal seam mining area in Northern Shaanxi [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2012.
- [6] 李 猛, 张吉雄, 邓雪杰, 等. 含水层下固体充填保水开采方法与应用[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 127-133.  
LI Meng, ZHANG Jixiong, DENG Xuejie, *et al.* Solid filling water retaining mining method and its application under aquifer [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 127-133.
- [7] 马立强, 孙 海, 王 宇, 等. 浅埋煤层长壁工作面保水开采地表水位变化分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(2): 232-235.  
MA Liqiang, SUN Hai, WANG Fei, *et al.* Analysis of surface water level change in water retaining mining of shallow coal seam longwall working face [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2014, 31(2): 232-235.
- [8] 吕广罗, 田刚军, 张 勇, 等. 巨厚砂砾岩含水层下特厚煤层保水开采分区及实践[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 189-196.  
LYU Guangluo, TIAN Gangjun, ZHANG Yong, *et al.* Water retaining mining zoning and practice of extra thick coal seam under thick glutenite aquifer [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 189-196.
- [9] 曹现刚, 雷一楠, 宫钰蓉, 等. 基于组合赋权法的采煤机健康状态评估方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(6): 135-141.  
CAO Xiangang, LEI Yinan, GONG Yurong, *et al.* Research on Shearer health condition assessment method based on combination weighting method [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(6): 135-141.
- [10] 李英攀, 刘名强, 王 芳, 等. 装配式建筑项目安全绩效云模型评价方法[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(6): 115-120.  
LI Yingpan, LIU Mingqiang, WANG Fang, *et al.* Cloud model evaluation method for safety performance of prefabricated construction projects [J]. Chinese Journal of Safety Science, 2017, 27(6): 115-120.
- [11] 李琳琳, 路云飞, 张 壮, 等. 基于云模型的指挥控制系统效能评估[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(4): 815-822.  
LI Linlin, LU Yunfei, ZHANG Zhuang, *et al.* Effectiveness evaluation of command and control system based on cloud model [J]. Systems Engineering and Electronic Technology, 2018, 40(4): 815-822.
- [12] 李 峰, 刘小阳, 于雪涛, 等. 基于 AHP-PCA 模型的煤炭城市生态环境质量评价[J]. 矿业安全与环保, 2017, 44(5): 103-106, 110.  
LI Feng, LIU Xiaoyang, YU Xuetao, *et al.* Evaluation of ecological environment quality of coal cities based on AHP-PCA model [J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2017, 44(5): 103-106, 110.
- [13] 陶 涛. 井工煤矿开采生态环境影响评价指标体系研究及实例分析[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.  
TAO Tao. Study on index system of eco-environmental impact assessment of underground coal mining and case analysis [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012.
- [14] 范立民, 马雄德, 蒋泽泉, 等. 保水采煤研究 30 年回顾与展望[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(7): 1-30.  
FAN Limin, MA Xiongde, JIANG Zequan, *et al.* 30 years review and Prospect of water retaining coal mining research [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(7): 1-30.
- [15] 许家林. 煤矿绿色开采[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2011.
- [16] 姚强岭, 汤传金, 刘梓昌. 我国西部生态脆弱矿区煤-水共采问题分析[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(12): 225-232.  
YAO Qiangling, TANG Chuanjin, LIU Zichang. Analysis of coal and water co-mining in ecologically fragile mining areas in western China [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(12): 225-232.
- [17] 范立民. 保水采煤的科学内涵[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 27-35.  
FAN Limin. Scientific connotation of water retaining coal mining [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 27-35.
- [18] 曹志国, 鞠金峰, 许家林. 采动覆岩导水裂隙主通道分布模型及其水流动特性[J]. 煤炭学报, 2019, 44(12): 3719-3728.  
CAO Zhiguo, JU Jinfeng, XU Jialin. Distribution model of main channel of water flowing fracture in mining overburden and its hydrodynamic characteristics [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(12): 3719-3728.
- [19] 柳 晶, 李根威. 条带充填保水开采导水断裂带高度多因素影响分析[J]. 煤矿安全, 2018, 49(3): 194-197.  
LIU Jing, LI Genwei. Analysis of multiple factors influencing the height of water flowing fault zone in strip filling water retaining mining [J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(3): 194-197.
- [20] 郭文兵, 姜高中. 覆岩破坏充分采动程度定义及判别方法[J]. 煤炭学报, 2019, 44(3): 755-766.  
GUO Wenbing, LOU Gaozhong. Definition and discrimination method of full mining degree of overburden failure [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(3): 755-766.
- [21] 张 朋, 王作棠, 黄温钢, 等. 窄条带气化地质条件云模型的构建与应用[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(6): 1231-1238.  
ZHANG Peng, WANG Zuotang, HUANG Wengang, *et al.* Construction and application of cloud model for narrow strip gasification geological conditions [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2017, 46(6): 1231-1238.
- [22] 耿秀丽, 董雪琦. 基于云模型和信息公理的产品功能需求配置优化[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(1): 154-163.  
GENG Xiuli, DONG Xueqi. Product functional requirements configuration optimization based on cloud model and information axiom [J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2018, 24(1): 154-163.