

基于 PSR-可拓云模型的井工煤矿区生态安全评价

邢斐¹, 李莎莎¹, 崔铁军^{1,2}

(1.辽宁工程技术大学 工商管理学院, 辽宁 葫芦岛 125105; 2.辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105)

摘要: [目的] 综合评价山西省大同市某井工煤矿区的生态安全状况, 为同类井工煤矿区生态保护提供科学依据。[方法] 以该井工煤矿区 2017—2021 年的各项指标为依据, 基于 PSR 模型从压力、状态以及响应 3 个方面构建煤矿区生态安全评价指标体系, 使用合作博弈法确定组合权重系数, 利用可拓云模型来分析该矿区生态安全状况。[结果] 压力指标下人口自然增长率(C_2)的评价等级为Ⅲ级, 表明人口出生率和死亡率分布不均衡, 其他指标评价等级均为Ⅱ级; 状态指标下, 植被覆盖率(C_8)的评价等级为Ⅰ级, 表明该煤矿区植被覆盖率高, 尾矿库排洪排渗措施(C_9)的评价等级为Ⅲ级, 已经达到了不安全的等级, 其他指标的评价等级均为Ⅱ级; 在响应指标下废弃物综合利用率(C_{15})以及科研投入增长率(C_{20})为Ⅱ级, 环保投资增长率(C_{19})为Ⅲ级, 其他指标评价等级均为Ⅰ级。[结论] 2017—2021 年该井工煤矿区生态安全响应力度明显增强, 但是生态压力以及目前的状态仍然严峻, 应采取针对性地保护措施, 从而维护当地的生态安全。

关键词: 生态安全; 组合权重; PSR-可拓云模型; 井工煤矿区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)02-0341-09

中图分类号: X826

文献参数: 邢斐, 李莎莎, 崔铁军. 基于 PSR-可拓云模型的井工煤矿区生态安全评价[J]. 水土保持通报, 2023, 43(2): 341-349. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2023.02.039; Xing Fei, Li Shasha, Cui Tiejun. Ecological security evaluation of an underground coal mining area based on PSR and extension cloud model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(2): 341-349.

Ecological Security Evaluation of an Underground Coal Mining Area Based on PSR and Extension Cloud Model

Xing Fei¹, Li Shasha¹, Cui Tiejun^{1,2}

(1.School of Business Administration, Liaoning Technical University, Huludao, Liaoning 125105, China;

2.School of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Huludao, Liaoning 125105, China)

Abstract: [Objective] The ecological security situation of a underground coal mining area in Datong City, Shanxi Province was comprehensively evaluated in order to provide a scientific basis for the ecological protection of the underground coal mining area. [Methods] Based on various indicators from the mining area from 2017 to 2021, an ecological security evaluation index system was constructed based on the three aspects of the PSR model (pressure, state, and response). The combined weight coefficient was determined by the cooperative game method, and the extension cloud model was used to analyze the ecological security situation of the mining area. [Results] Under the pressure index, the evaluation grade of natural population growth rate (C_2) was level III, indicating that the birth rate and death rate were not evenly distributed, and the evaluation grades of other indicators were all at level II. Under the state index, the evaluation grade of vegetation coverage rate (C_8) was at level I, indicating that the coal mine area had a high vegetation coverage rate. The evaluation grade of tailings pond drainage measures (C_9) was at level III, having reached the unsafe

收稿日期: 2022-05-11

修回日期: 2022-08-11

资助项目: 国家自然科学基金项目“故障数据和影响因素作用下的系统故障特征研究”(52004120); 国家重点研发计划项目“采矿扰动区环境地质灾害风险控制与消减综合对策”(2017YFC1503102); 辽宁省教育厅项目“基于故障数据和影响因素的系统可靠性分析理论研究”(LJ2020QNL018)。

第一作者: 邢斐(1995—), 女(汉族), 山西省忻州市人, 硕士研究生, 主要研究方向为安全管理。Email: 1362877895@qq.com。

通讯作者: 李莎莎(1988—), 女(汉族), 辽宁省盘锦市人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事安全管理及其智能分析方面的研究。Email: lsslntu@163.com。

level. The evaluation grades of other indicators were at level II. Under the response indicators, the comprehensive utilization rate of waste (C_{15}) and the growth rate of scientific research investment (C_{20}) were at level II. The growth rate of environmental protection investment (C_{19}) was at level III, and the evaluation grades of other indicators were at level I. [Conclusion] From 2017 to 2021, the response to ecological security of this underground coal mining area had significantly enhanced, but the ecological pressure and the current state were still severe. Targeted protection measures should be taken to maintain the local ecological security.

Keywords: ecological security; combination weight; PSR and extension cloud model; underground coal mine area

煤炭资源是中国生产量较大的矿产资源。众多研究表明,在未来 10~20 a 内,随着清洁煤技术的发展煤炭将超过石油,成为世界上最大的能源消耗^[1],但是因为煤炭大量开采使得生态环境产生了许多不可逆的变化。按照现有的土地损毁速度计算,中国的生态环境尤其是煤炭资源聚集地区的生态环境破坏程度会愈演愈烈^[2],造成的耕地以及其他土地利用类型的土地破坏面积也会逐渐增多^[3]。其中,又以井工开采的方式引发的土地破坏问题所占比例近 86%^[4],因此,亟需开展采煤引起相关的生态风险评价研究,建立一套合理的安全评价指标模型和体系以及使用适当的评价方法对于改善煤矿区生态环境有重要意义。近年来部分学者进行了煤矿区生态安全评价研究,如陈桥等^[5]使用 AHP 法通过计算出因子权重建立评价等级,综合定量构建矿山生态环境质量的评价模式并举例说明该模式的详细运用过程;赵文江等^[6]为了实现矿山生态安全的量化评价,依据 PSR 框架模型,建立基于 BP 神经网络的矿区安全评价体系,检验评价模型是否具备的准确性和实用性的特性;刘烈武等^[7]使用 ISM 法通过运用安全解释模型分析影响矿区生态环境安全的因素,针对关键性因素提出预控对策;杨瑞等^[8]利用生态风险因果链模型、模糊层次分析法研究井工开采活动造成的生态风险问题,最终得出该区域的生态风险分区结果;张佳宁等^[9]利用综合指数评价法、层次分析法来确定评价等级,使用 ArcGIS 10.3 对井工煤矿区生态环境系统的损坏程度进行了评价研究。从相关研究成果可以看出学者们对煤矿区生态安全评价均采用较为简单的 AHP 法、综合指数 PSR 模型等,这些评价方法在评价过程中对煤矿区生态安全等级边界的模糊性缺乏考虑,无法根据评价指标的转变状况了解矿区生态安全的变化情况。寻找综合分析矿区生态系统维持与演化的方法是一个紧迫而必要的问题^[10],建立一个可以考虑各指标之间不确定性以及相关性的生态安全评价模型是很有必要的。因此,需要对煤矿区生态安全评价结果进一步完善。PSR 框架模型以及可拓云模型在安全评价方面有一定的运用。以 PSR 模

型构建框架,可以反映人类活动、环境与资源以及机构管理决策的相互制约与相互依存的关系^[11];以可拓云模型输出结果,可拓学中的物元理论具有定性、定量分析的优点以及云模型可以考虑各指标的不确定性^[12]。鉴于此,本文以大同市某井工煤矿区为研究区,利用多方面数据,建立 PSR-可拓云模型,对研究区 2017—2021 年的生态安全的 21 个指标进行了综合评价,从而完善煤矿区安全评价结果。本研究运用 PSR-可拓云模型对煤矿区进行生态安全评价,以为该地煤矿区生态环境治理和恢复提供理论依据,为政府和企业有效开展煤矿区生态环境综合管理提供数据支持^[13]。

1 研究区概况

1.1 自然地理概况

煤矿区隶属于中国山西省大同市,总面积为 737.81 km²。地处 112°53′—113°12′E,39°5′—40°8′N 之间,位于大同市西南部,属温带大陆性季风气候,历年平均气温为 6.6 °C,1 月最冷,7 月最热,四季分明,昼夜温差大;平均年降水量为 376.9 mm,主要是集中在 6—9 月之间,占总量的 75.5%;矿区内无较大的河流,主要河流有口泉河、十里河,均为季节性河流;土壤类型主要有栗钙土性土、淡栗钙土、暗栗钙土^[14];地貌构成主要为平川、山地、丘陵三大类型。其中,平川位于东南部,山地、丘陵主要位于西、北及东北部地区。这样就构成了西北高、东南低,地势由西北向东南倾斜特征。研究区的地势特征如图 1 所示。

1.2 煤矿区生态环境问题

矿山地质灾害问题,如矿床在开采过程中,大量采掘井矿,使得岩土体变形,毁坏煤矿区自然环境地质条件、破坏采矿工程设备、危害人类生命财产安全;研究区的矿区地质灾害问题,如地面塌陷、崩塌等,总面积为 101.45 km²,占全市总面积的 0.71%;地形地貌景观破坏问题,如采煤所造成的地表压占和沉陷对生态系统具有长期影响,不仅在可采区域的开采过程,甚至在矿井关闭后影响仍然可能存在^[9],研究区土地破坏类型主要为采矿区塌陷及排矸场对地表的

压占;水土环境破坏问题,据调查统计,在地下开采过程中排矸场对该研究区影响较为严重;土地损毁问题,如煤矿挖掘在对经济社会发展做出贡献的同时,也对

生态环境造成了巨大破坏,该煤矿区经过大规模、超强度的开采,形成了近 350 km² 的大面积采空区,沉陷面积达 423 km²,占到全区国土总面积的57.3%。

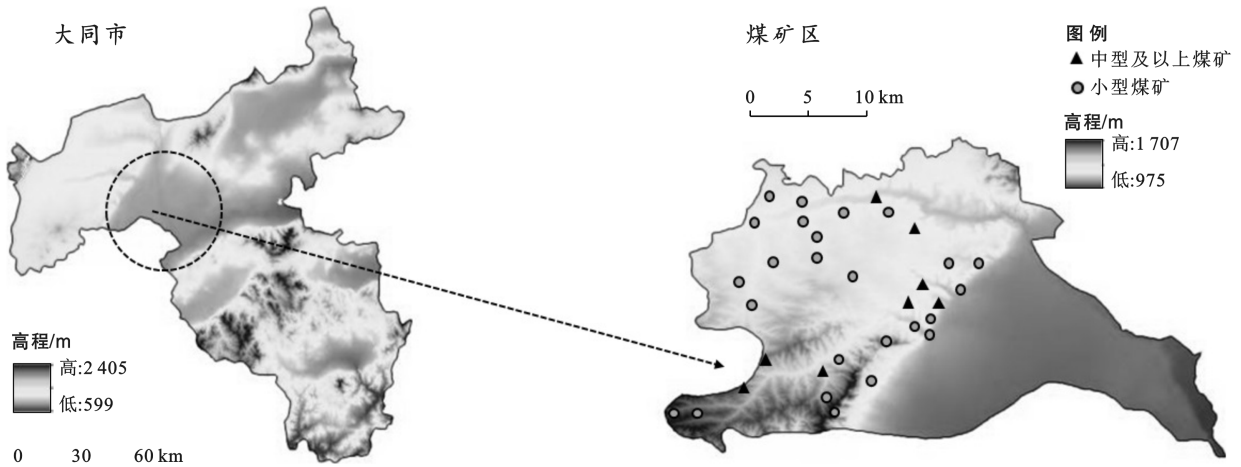


图 1 研究煤矿区地势特征图

Fig.1 Topographic map of the studied coal mine area

2 研究方法与数据来源

2.1 数据来源

本文各指标的原始数据均来源于 2017—2021 年《大同统计年鉴》、国家统计局 (<http://www.stats.gov.cn>),大同市人民政府网 (<http://www.dt.gov.cn>),大同市生态环境局 (<http://sthjj.dt.gov.cn>),中国科学院资源环境科学数据中心 (<https://www.resdc.cn>)和由同煤集团提供的相关数据资料,依据自然资源部发布的《煤炭行业绿色矿山建设规范》以及煤矿区生态安全评价相关研究成果^[5-9];对于一些不能直接获取的数据,参考山西省煤炭行业发展状况,结合国家关于绿色矿山建设要求对部分评价标准进行调整,从而得到 2017—2021 年的研究区安全评价指标体系数据。

2.2 研究方法

2.2.1 PSR 模型 20 世纪 70 年代,来自加拿大统计学家 Tony F 以及 David J R 提出 PSR 模型,是评估资源利用和持续发展的模式之一,目前已应用于土地资源、生态可持续发展、水资源等领域^[15]。PSR 模型 (pressure-states-response),即“压力—状态—响应”,压力指标表示矿区开发给煤矿区带来的生态环境压力;状态指标表征由于矿山持续的开发使得原有的煤矿区生态环境改变;响应指标指为了对存在的生态环境压力进行治理所采取的措施。

2.2.2 可拓云模型 用正态云模型表示物元分析中特征值的数字特征 (Ex, En, He),即为可拓云模

型^[16]。因为煤矿区生态安全评价中其安全等级界限的划分具有模糊性和随机性的特征,则物元有序三组元用 $R = (\text{名称}, \text{特征}, \text{云量值})$ 来表示:

$$R = \begin{bmatrix} N & C_1 & (Ex_1, En_1, He_1) \\ & C_2 & (Ex_2, En_2, He_2) \\ & C_3 & (Ex_3, En_3, He_3) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_r & (Ex_r, En_r, He_r) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ \vdots \\ R_r \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: R 表示煤矿区安全综合评价结果; N 为待评价矿区安全程度; C_i 为煤矿区安全评价指标 ($i = 1, 2 \dots r$); (Ex_r, En_r, He_r) 为第 i 个评价指标自然语言的云量值。

确定安全评价等级界限云模型,把煤矿区等级评价区间转变成双约束区间 $[C_{\min}, C_{\max}]$,对空间界限可以根据现实状况进行延展,减少区间界限值不确定性。煤矿区生态安全边界云模型表示为:期望 Ex 、熵 En 、超熵 He ,将正态云模型和界限数值进行转化得出 3 个特征值,计算公式为:

$$Ex = \frac{C_{\min} + C_{\max}}{2} \quad (2)$$

$$En = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{6} \quad (3)$$

$$He = s \quad (4)$$

式中: s 为可变常数,根据评价指标所具有的模糊性和随机性特征还有根据相关文献进行取值^[11],本文取 0.001。

2.2.3 合作博弈法确定组合权重 使用熵权法、变异系数法来确定客观权重的应用较为广泛。熵权法确定客观权重是根据评价指标变异性的^[17]，确定指标权重的不合理之处是通过均衡化分配。而变异系数法可以克服分配均衡化这一缺陷，是因为它利用评价指标特征值的差异性确定权重。层次分析法可以使复杂问题层次化，用于计算评价指标体系的权重^[18]，因此，本文使用主客观结合的方式求出综合权重。根据变异系数法得到的权重向量 W_{vi} ；根据熵权法得到的权重向量 W_{Di} 。最后综合客观权重向量 W_{oi} 根据几何平均值的方法得到：

$$W'_{oi} = \sqrt{W_{Di} \cdot W_{vi}} \quad (5)$$

综合客观权重经过归一化处理得出：

$$W_o = \frac{W'_{oi}}{\sum_{i=1}^{21} W'_{oi}} \quad (6)$$

式中： α 为待定系数，是由主客观赋权法结合得到的，在文中使用差异系数法得到：

$$G_A = \frac{2}{n} (1p_1 + 2p_2 + \dots + np_n) - \frac{n-1}{n} \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{n}{n-1} G_A \quad (8)$$

式中： n 为评价指标数； P_n 是由主观权重向量各个分量按照顺序原则确定； G_A 是层次分析法每个分量的差异系数。

设 W_A 是根据层次分析法得到的主客观权重向量， W'_o 是综合客观权重 W_o 的分量。综合权重运用加法集成法表示为：

$$W = \alpha W_A + (1-\alpha) W_o \quad (9)$$

2.2.4 确定可拓云模型云关联度 确定云关联度，可拓云关联度计算方法为：

$$k = \exp\left[-\frac{(x - Ex)^2}{2(En')^2}\right] \quad (10)$$

式中： x 为煤矿区生态安全评价每个指标值； Ex 为生态安全等级对应指标的数学特征值； En' 期望值为 En ； He 为正态随机系数的标准差。

2.2.5 确定煤矿区生态安全评价等级 确定煤矿区生态安全评价等级，根据综合评价矩阵以及综合权重可以求出评价向量：

$$Z = W \cdot K \quad (11)$$

式中： Z 为评价向量； K 为综合评价矩阵； W 为综合权重。

然后，使用加权平均法得出评价分值为 r ：

$$r(x) = \sum_{j=1}^4 z_j f_j / \sum_{j=1}^4 z_j \quad (12)$$

式中： f_j 为各评价等分值； z_j 为评价向量 Z 的分量，

4,3,2,1 这 4 个数字分别表示评价等级中的 1—4 级。

期望值 Ex_r 和熵 En_r 经 t 次反复运算后得出，体现了在计算评价结果的过程中随机因素无法避免的特性：

$$Ex_r = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t r_i(x) \quad (13)$$

$$En_r = \sqrt{\frac{1}{t} \sum_{i=1}^t [r_i(x) - Ex_r]^2} \quad (14)$$

式中： t 表示运算的次数，参考相关文献^[19]在本文中取 1 000 次； $r_i(x)$ 为第 i 次运算得出的模糊等级特征值。

煤矿区生态安全评价等级分数值由期望值 En_r 表示，煤矿区生态安全评价结论的分散程度由熵 Ex_r 表示，所以把期望值 Ex_r 和熵 En_r 的比值表示为可信因子 θ (θ 值越小说明结果可信度越高越集中，值越大可信度越低也就越不集中) 表示评价结果的随机性：

$$\theta = \frac{En_r}{Ex_r} \quad (15)$$

2.2.6 基本流程 可拓学^[20]用来研究混合多种参数以及缺少包容性的矛盾系统问题^[21]，应用于很多工程领域。本文建立安全评价指标体系基于 PSR 模型框架，运用可拓云模型得到待评物元，计算所有指标的关联度，通过主观权重结合客观权重的方法确定各个指标的权重，最后得出评价结果，计算流程图如图 2 所示。

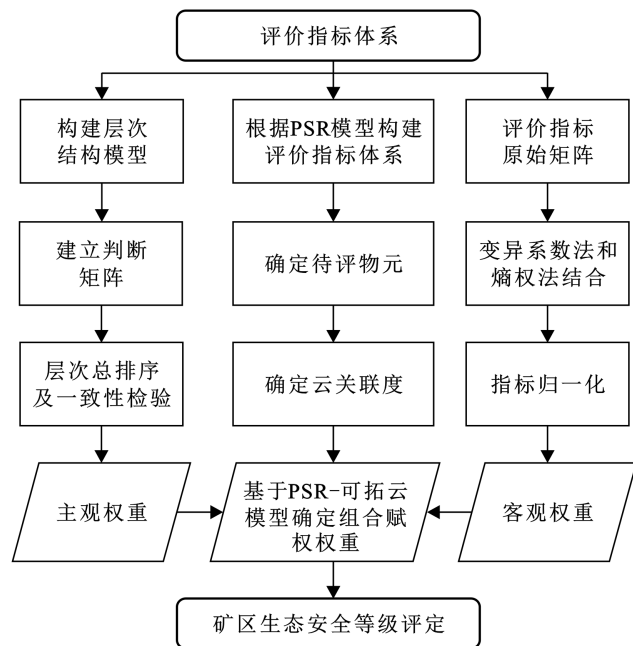


图 2 研究煤矿区生态安全评价流程图

Fig.2 Flow chart of ecological security evaluation in the studied coal mine area

3 评价过程与结果与分析

3.1 煤矿区生态安全评价指标体系构建

结合实地调研以及对煤矿区生态安全的理解,建立了以煤矿区生态安全综合指数为评价体系的目标层;使用 PSR 框架模型,从压力、状态、响应 3 个方面

来构建评价体系的准则层。

通过查阅煤矿区生态安全研究相关文献^[5-9],基于 PSR 模型框架,选取有代表性的 21 个指标来构造大同市某井工煤矿区生态安全评价指标体系,如(表 1)所示。其中指标属性中的“+”代表正指标,“-”代表负指标。

表 1 研究煤矿区生态安全评价指标体系及近 5 a 数据

Table 1 Evaluation index system of ecological security in the studied coal mine area and data of recent 5 years

目标层	准则层	指标层	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	指标代码	指标属性
煤矿区生态安全	矿区生态环境压力(P)	矿山开采力度/(10 ⁴ t · d ⁻¹)	26.74	29.75	30.60	33.56	36.19	C ₁	-
		人口自然增长比值/%	4.54	5.96	3.96	2.03	3.96	C ₂	-
		职工平均收入/元	4 499.00	4 890.00	5 194.00	5 238.00	5 334.00	C ₃	+
		矿产年产量/10 ⁸ t	0.976	1.086	1.117	1.225	1.321	C ₄	-
		废弃物排放量/10 ⁴ t	896.37	900.56	930.56	968.47	990.32	C ₅	-
		开发利用程度	7.0	7.5	7.5	8.0	8.5	C ₆	+
		废水排放量/10 ⁴ m ²	459.62	467.33	475.34	492.25	498.97	C ₇	-
	矿区生态环境状态(S)	植被覆盖率/%	88.36	90.25	91.65	91.79	92.55	C ₈	+
		尾矿库排洪排渗措施	71.00	73.00	76.00	80.00	82.00	C ₉	+
		空气质量达标情况	55.00	57.00	63.00	68.00	75.00	C ₁₀	+
		地表水环境质量	61.00	63.00	62.00	65.00	62.00	C ₁₁	+
		人均耕地面积/hm ²	1.10	1.10	1.10	1.10	1.17	C ₁₂	+
		采空区综合风险指数	0.36	0.34	0.39	0.41	0.38	C ₁₃	-
		土地利用结构指数	0.70	0.73	0.80	0.84	0.88	C ₁₄	+
	矿区生态环境响应(R)	废弃物综合利用率/%	76.88	79.32	82.67	88.92	92.33	C ₁₅	+
		植被修复程度/%	89.36	92.57	94.45	97.23	99.86	C ₁₆	+
		塌陷土地治理程度/%	89.23	90.65	92.78	96.62	98.97	C ₁₇	+
		废水过滤排放率/%	90.11	92.32	96.58	97.65	98.59	C ₁₈	+
		环保投资增长率/%	42.45	50.32	55.55	67.65	75.98	C ₁₉	+
		科研投入增长率/%	47.26	58.78	64.85	70.93	78.29	C ₂₀	+
		政府支持力度	87.00	92.00	95.00	96.00	98.00	C ₂₁	+

3.2 确定评价等级

中国目前没有一致的生态安全等级标准^[22]。因此,本文参考了国内现行标准《煤炭行业绿色矿山建设规范(DZT0315-2018)》以及已有生态安全研究的

相关成果^[3-11],并结合大同市矿业发展情况,将煤矿区生态安全等级划分为 I—IV 级,分别为安全、较安全、不安全、危险 4 个等级,级别越高表明生态系统结构愈不完善,划分标准具体详见表 2。

表 2 研究煤矿区生态安全等级划分

Table 2 Classification of ecological security in the studied coal mine area

安全等级	等级状态	具体标准内容描述
I	安全	矿区生态系统功能和结构较为完整,外界压力不会使得系统有较大的影响,煤矿的质量与产量都可以达到要求。
II	较安全	在一定程度上矿区生态系统受到了破坏,整个系统结构比较完整,但是要注意保护不然会有恶化的可能。
III	不安全	矿区生态系统功能不全,受到较大破坏。要想使矿山生态恢复需要大量的投入,对于社会经济发展有较大的影响。
IV	危险	矿区生态系统结构不完善,恢复与开发均十分困难,产出煤矿的质量和数量都不能达到要求,给人类生活和经济发展带来了很大的危害。

3.3 等级界限云模型

根据煤矿区生态安全评价等级界限值进行分级区间转换,再通过公式(2)—(4)求出煤矿区生态安全边界云模型的数字特征。 s 为可变常数,评价指标具有模糊性和随机性的特性,可以根据这些特征以及相

关文献进行取值^[11],本文取 0.001。经过区间值转换后得到以期望 Ex 、熵 En 、超熵 He 表示的云物元,兼顾煤矿区生态安全评价等级界限值所具有的特性,最后得到煤矿区生态安全评价指标的等级界限云模型详见表 3。

表 3 研究煤矿区生态安全评价云模型

Table 3 Cloud model of ecological security evaluation in the studied coal mine area

指标	等级界限标准云模型							
	I	II	III	IV	I	II	III	IV
C_1	[0,20)	[20,30)	[30,40)	[40,50)	(10,3.33,0.001)	(25,1.67,0.001)	(35,1.67,0.001)	(20,1.67,0.001)
C_2	[0,1.5)	[1.5,3)	[3,4.5)	[4.5,6)	(0.75,0.25,0.001)	(2.25,0.25,0.001)	(3.75,0.25,0.001)	(5.25,0.25,0.001)
C_3	[6 000,8 000)	[4 000,6 000)	[2 000,4 000)	(0,2 000)	(7 000,333.3,0.001)	(5 000,333.3,0.001)	(3 000,333.3,0.001)	(1 000,333.3,0.001)
C_4	(0,0.5)	[0.5,1)	[1,1.5)	[1.5,2)	(0.25,0.08,0.001)	(0.75,0.08,0.001)	(1.25,0.08,0.001)	(1.75,0.08,0.001)
C_5	(0,500)	[500,1 000)	[1 000,1 500)	[1 500,2 000)	(250,83.33,0.001)	(750,83.33,0.001)	(1 250,83.33,0.001)	(1 750,83.33,0.001)
C_6	[9,10)	[8,9)	[7,8)	(0,7)	(9.5,0.17,0.001)	(8.5,0.17,0.001)	(7.5,0.17,0.001)	(3.5,1.17,0.001)
C_7	(0,250)	[250,500)	[500,750)	[750,1 000)	(125,41.67,0.001)	(375,41.67,0.001)	(625,41.67,0.001)	(875,41.67,0.001)
CC_8	[90,100)	[80,90)	[70,80)	(0,70)	(95,1.67,0.001)	(85,1.67,0.001)	(75,1.67,0.001)	(35,1.67,0.001)
C_9	[90,100)	[80,90)	[70,80)	(0,70)	(95,1.67,0.001)	(85,1.67,0.001)	(75,1.67,0.001)	(35,1.67,0.001)
C_{10}	[80,100)	[60,80)	[40,60)	(0,40)	(90,3.33,0.001)	(70,3.33,0.001)	(50,3.33,0.001)	(20,3.33,0.001)
C_{11}	[80,100)	[60,80)	[40,60)	(0,40)	(90,3.33,0.001)	(70,3.33,0.001)	(50,3.33,0.001)	(20,3.33,0.001)
C_{12}	[1.5,2)	[1,1.5)	[0.5,1)	(0,0.5)	(1.75,0.08,0.001)	(1.25,0.08,0.001)	(0.75,0.08,0.001)	(0.25,0.08,0.001)
C_{13}	(0,0.2)	[0.2,0.4)	[0.4,0.6)	[0.6,1)	(0.1,0.03,0.001)	(0.3,0.03,0.001)	(0.5,0.03,0.001)	(0.8,0.07,0.001)
C_{14}	[1,0.8)	[0.8,0.6)	[0.6,0.4)	(0,0.4)	(0.9,0.03,0.001)	(0.7,0.03,0.001)	(0.5,0.03,0.001)	(0.2,0.07,0.001)
C_{15}	[90,100)	[80,90)	[70,80)	(0,70)	(95,1.67,0.001)	(85,1.67,0.001)	(75,1.67,0.001)	(35,1.67,0.001)
C_{16}	[90,100)	[80,90)	[70,80)	(0,70)	(95,1.67,0.001)	(85,1.67,0.001)	(75,1.67,0.001)	(35,1.67,0.001)
C_{17}	[90,100)	[80,90)	[70,80)	(0,70)	(95,1.67,0.001)	(85,1.67,0.001)	(75,1.67,0.001)	(35,1.67,0.001)
C_{18}	[90,100)	[80,90)	[70,80)	(0,70)	(95,1.67,0.001)	(85,1.67,0.001)	(75,1.67,0.001)	(35,1.67,0.001)
C_{19}	[80,100)	[60,80)	[40,60)	(0,40)	(90,3.33,0.001)	(70,3.33,0.001)	(50,3.33,0.001)	(20,6.67,0.001)
C_{20}	[80,100)	[60,80)	[40,60)	(0,40)	(90,3.33,0.001)	(70,3.33,0.001)	(50,3.33,0.001)	(20,6.67,0.001)
C_{21}	[90,100)	[80,90)	[70,80)	(0,70)	(95,1.67,0.001)	(85,1.67,0.001)	(75,1.67,0.001)	(35,1.67,0.001)

3.4 煤矿区生态安全评价指标值及权重体系

各项指标对于评价集的重要性可以由指标权重来表示,对于生态环境评价结果的准确性有一定程度的影响。使用变异系数法及熵权法得到客观权重表示为 W_v 和 W_D ,利用层次分析法得到主观权重表示为 W_A ,最后根据公式(5)—(6)求得综合客观权重表示为 W_o ,通过公式(7)—(8)求得待定系数 α ,根据公式(9)求得综合权重 W 。以 2017—2021 年各评价指标的数值为基础,最终通过取其平均值得到各指标的评价指标值。根据各个指标的指标值及其权重确定煤矿区生态安全的评价等级(表 4)。

3.5 确定煤矿区生态安全评价等级

通过云模型(处理定性概念与定量描述的不确定转换模型),使用 Matlab 程序运算得到煤矿区生态安全评价等级的云图,如图 3—4 所示。以 C_5 , C_{13} 为例得到标准等级云图(从左往右 4 段曲线依次为

$Cloud_1$, $Cloud_2$, $Cloud_3$, $Cloud_4$),其余指标也可以依据此算法得出。

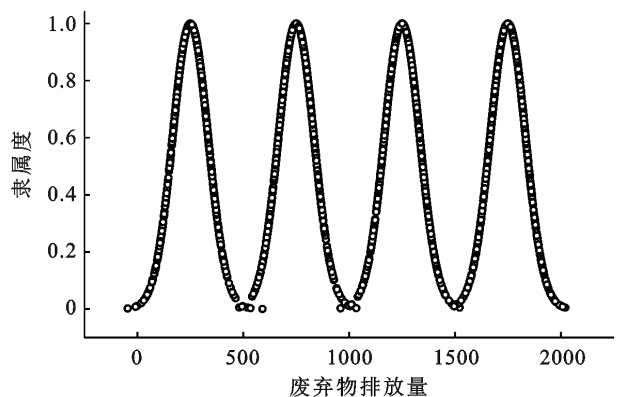


图 3 研究矿区 C_5 废弃物排放量标准等级云图

Fig.3 Cloud map of standard level of C_5 waste discharge in the studied coal mine area

表 4 研究煤矿区生态安全评价指标值及其权重

Table 4 Index value and weight of ecological security evaluation in the studied coal mine area

指标代码	主观权重 W_A	综合客观权重 W_o	综合权重 W	指标值 X
压力	0.234	0.247	0.229	—
C_1	0.085	0.083	0.081	31.37
C_2	0.239	0.229	0.235	4.09
C_3	0.259	0.238	0.254	5 031
C_4	0.090	0.092	0.088	1.145
C_5	0.114	0.121	0.117	937.26
C_6	0.099	0.114	0.108	7.70
C_7	0.114	0.123	0.117	478.70
状态	0.187	0.212	0.177	—
C_8	0.158	0.163	0.159	90.92
C_9	0.088	0.075	0.088	76.40
C_{10}	0.137	0.135	0.136	63.60
C_{11}	0.141	0.156	0.147	62.60
C_{12}	0.287	0.294	0.287	1.11
C_{13}	0.077	0.073	0.075	0.38
C_{14}	0.112	0.104	0.108	0.79
响应	0.579	0.541	0.594	—
C_{15}	0.134	0.138	0.136	84.02
C_{16}	0.192	0.187	0.190	94.69
C_{17}	0.131	0.136	0.133	93.65
C_{18}	0.101	0.116	0.106	95.05
C_{19}	0.198	0.188	0.197	58.39
C_{20}	0.182	0.177	0.180	64.02
C_{21}	0.062	0.058	0.058	93.60

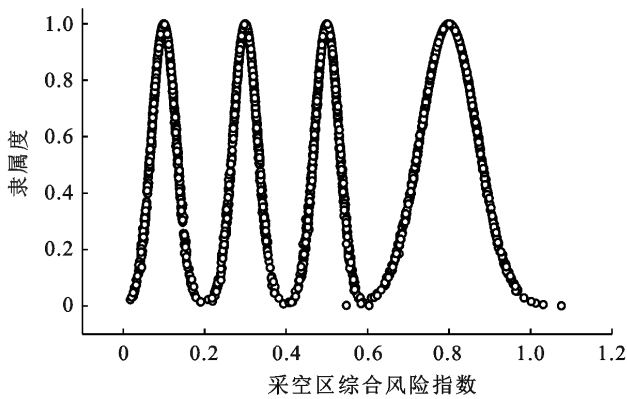


图 4 研究矿区 C_{13} 采空区综合风险指数标准等级云图

Fig.4 Standard grade cloud map of C_{13} goaf comprehensive risk index in the studied coal mine area

根据权重值和各指标值,使用 Matlab 程序算法对大同市某煤矿区生态安全等级进行评价。得出最终评价结果、模糊特征期望值(E_{x_r})、熵值(E_{n_r})及综合评价向量。依据最大隶属度原则列出各指标项的最大云关联度所属的安全等级和各指标的关联度矩阵(表 5)。

结果表明模糊等级特征期望值 $E_{x_r} = 1.92$ (0—1 为 I 级,1—2 为 II 级),评价等级对应的是 II 级,即大同市某煤矿区 2017—2021 年 21 个生态安全指标的综合评价结果,表明整体安全状况有待提升,可以对 21 个指标中评价等级是 II 级、III 级的指标状况进行改善。提高各指标的等级,从而提高综合评价等级。同时,可拓云评价模型中计算所得到的可信因子能够反映评价结果的可信度,本模型计算结果中可信因子 $\theta = 0.03$ 小于 0.06,表明此方法的计算结果可信度较高。为了可以更加直观地对每个准则层以及对应各个指标的安全评价等级进行比较分析(如图 5 所示)。

表 5 研究煤矿区各指标的生态安全综合评价等级

Table 5 Comprehensive evaluation grade of ecological security of each index in the studied coal mine area

指标	安全	比较安全	不安全	危险	安全等级
	Cloud ₁	Cloud ₂	Cloud ₃	Cloud ₄	
C_1	0	0.302 1	0.100 7	0.222 3	II 级
C_2	0	0.013 5	0.304 1	0.000 3	III 级
C_3	0	0.995 7	0	0	II 级
C_4	0.035	0.415 3	0.389 9	0.093	II 级
C_5	0	0.080 1	0.000 9	0	II 级
C_6	0.002 2	0.566	0.427 8	0.005 9	II 级
C_7	0	0.045 2	0.002 1	0	II 级
C_8	0.059 5	0.004 1	0	0	I 级
C_9	0	0	0.686 7	0.001 9	III 级
C_{10}	0	0.157	0.000 4	0	II 级
C_{11}	0	0.089	0.001 2	0	II 级
C_{12}	0.079 9	0.593 6	0.253 3	0.042 3	II 级
C_{13}	0.322 7	0.727 2	0.638 8	0.198 2	II 级
C_{14}	0.649 1	0.677 2	0.317 3	0.107 5	II 级
C_{15}	0	0.830 8	0	0.000 2	II 级
C_{16}	0.981 5	0	0	0	I 级
C_{17}	0.707 3	0	0	0	I 级
C_{18}	0.999 5	0	0	0	I 级
C_{19}	0	0.003 1	0.044	0	III 级
C_{20}	0	0.199 1	0.000 3	0	II 级
C_{21}	0.691 9	0	0	0	I 级
综合评价向量	0.556 6	0.776 2	0.413 6	0.098 1	II 级
E_{x_r}	1.925 363	0.063 901	—	—	

研究区压力系统(C_1 — C_7),人口自然增长率(C_2)的评价等级为 III 级,已经处于不安全的状态,表明该煤矿区人口出生率和死亡率分布不均衡,可以实施社会化抚养、奖励生育等措施,从而使得人口自然增长率逐渐均衡化。人口老龄化不可逆,只有人口结构逐步变化更替,才能使得出生率和死亡率逐渐趋于平衡;矿山开采力度(C_1)的评价等级为 II 级,表明采矿力度有待改善,要适当减小采矿力度,需要在生产以及生活中节约使用资源从而实现可持续发展;职工

平均收入(C_3)以及矿产年产量(C_4)的评价等级均为Ⅱ级,表明产煤效率以及职工收入有待提升,提高职工收入对于提高产煤效率有一定的作用;废弃物排放量(C_5)以及废水排放量(C_7)评价等级为Ⅱ级,表明目前煤矿区废弃物以及废水排放还较为严重,在开采过程中的废弃物(如煤矸石)会对生态环境造成很大的破坏,如侵占土地,而且自燃发火也会散发出很多有害气体,阻碍作物生长、造成水土流失。煤矿区生态环境污染中废水的波及范围最广,煤废水含有大量悬浮煤粒、有害金属离子等,经过大气降水以及雨水冲刷会污染矿区水系、改变水文条件,可以对废弃物、废水进行回收利用,从而可以保护环境,实现可持续发展;开发利用程度(C_6)评价等级为Ⅱ级,表明煤矿区开发利用程度有待提升,提高生产利用率可以提高开发利用程度。研究区状态系统(C_8 — C_{14}),尾矿库排洪排渗措施(C_9)的评价等级为Ⅲ级,已属于不安全等级,可以通过加强矿工的安全教育培训及制定应急预案等进行改善;空气质量达标情况(C_{10})及地表水环境质量(C_{11})为Ⅱ级,应采取针对性的措施对煤矿区的废弃物和废水进行回收利用,改善空气质量以及水环境质量;人均耕地面积(C_{12})以及土地利用结构指数(C_{14})的评价等级均为Ⅱ级,表明目前的土地利用结构还有待提升;采空区综合风险指数(C_{13})的安全评价等级为Ⅱ级,表明采空区还存在一定的危险,需要对采空区进行加固以及回填,否则会造成塌陷,形成积水,使得农田无法耕种;植被覆盖率(C_8)的安全等级为Ⅰ级,表明研究区目前植被覆盖状况较为良好,但还需进行实时监测,避免植被遭到毁坏。

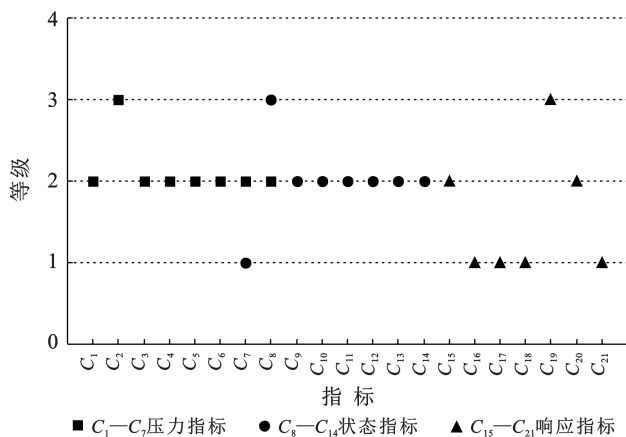


图5 煤矿区各指标生态安全综合评价等级散点图

Fig.5 Scatter diagram of ecological security comprehensive evaluation grade of each index in coal mine area

研究区响应系统(C_{15} — C_{21}),环保投资增长率(C_{19})的安全评价等级为Ⅲ级,表明投资增长率比较

小,环保投资方面政府和企业还有待给予更大力度的支持;废弃物综合利用率(C_{15})以及科研投入增长率(C_{20})的安全评价等级为Ⅱ级,需要继续加大科研投入,提高废弃物的综合利用率;植被修复程度(C_{16})、塌陷土地治理程度(C_{17})、废水过滤排放率(C_{18})、政府支持力度(C_{21})的安全评价等级均为Ⅰ级,表明相对于其他指标安全等级稳定性更高,具有更大的发展潜力。煤炭开采活动和城镇化建设严重影响了当地生态环境质量和生态恢复,政策、法规的实施措施是改善生态环境质量的主要原因^[23]。

4 讨论与结论

4.1 结论

(1) 根据煤矿区生态安全评价指标的近5 a数据可以看出,压力指标下的数字随着年份的增长而增长,状态以及响应指标数字也基本是逐年递增,表明煤矿区的压力比较大,虽然政府企业已经采取了很多措施来减轻压力,但是煤矿区生态安全的影响指标较多,极易受到干扰,因此,还需进一步提升安全等级。

(2) 本文通过构建基于PSR-可拓云模型的煤矿区生态安全评价模型,对煤矿区生态安全进行综合性的评价。发现该煤矿区生态系统整体上处于比较安全的状态而且在响应方面基本评价等级都是Ⅰ级,说明政府及企业的支持力度较大,但是压力和状态指标的评价等级基本都是Ⅱ级,说明还需要采取一系列措施来维护煤矿区的生态环境安全。

(3) 本文给出了评价结果的步骤和过程,采用主客观权重相结合的方式,根据定性定量对煤矿区生态安全的各个指标以及综合安全等级做了安全评价,同时给出定量的评估结果和它的可信因子,丰富了煤矿区生态安全的评价方法。本模型通过与研究区的实际情况进行比较分析,表明本模型具有科学性以及有效性,可以为井工煤矿区的生态安全研究提供一定的参考依据。

4.2 讨论

本研究基于“PSR框架模型”从压力、状态、响应3个方面,运用变异系数法、熵权法结合层次分析法得到指标权重系数,采用“可拓云模型”综合对研究区2017—2021年的生态安全的21个指标进行了综合评价。评价结果显示在响应方面的综合评价等级最高,因此可以说明针对存在的压力以及目前的状态已经采取了一定的措施。评价过程和结果对生态文明建设有一定的理论参考以及现实意义。

本文在进行分析过程中也存在以下不足:①在研究的评价指标体系方面,目前只有21个评价指标,选

取的评价指标体系可能并不完善,在之后的研究过程中可增加废气排放数据,煤矿区生态变化较为复杂,视角不同指标体系的选择也会存在一定的差异,可能有些因素会没有考虑周全或者很难纳入模型,下一步评价指标仍需进一步完善,煤矿区生态安全综合评价方能更加系统全面。②在评价模型方面,难以同其他生态安全评价模型进行比较分析,是因为不同的文章模型评价方法以及等级划分依据会不同。因此,对煤矿区生态安全进行全面科学的评价,找到一套完善的模式以及如何将模型用于对未来一段时间内安全评价的分析,值得进行深入研究。③在评价结果方面,由于目前本文研究在获取数据及其研究能力方面还存在一定不足,统计资料的不完整,对长周期指标数据考虑有限,结果的准确性可能会受到一些影响。因此后期应增加更多影响煤矿区生态安全的重要因素进行研究,对不同指标实地考察进行更加深入的了解,在模型运用过程中的数据更加准确,从而实现区域生态文明和社会发展相协调,经济发展向高质量发展迈进。

[参 考 文 献]

- [1] Li Zhenghu, Zhang Junhui, Chen Hui, et al. A safe and efficient mining method with reasonable stress release and surface ecological protection [J]. Sustainability, 2022,14(9):5348-5354.
- [2] 祝琳,黄显怀,陈冰宇,等.典型矸矿区土壤及优势植物重金属分布特征[J].工业用水与废水,2020,51(5):78-82.
- [3] 肖琳,田光进.天津市土地利用生态风险评价[J].生态学杂志,2014,33(2):469-476.
- [4] 王同伟.基于 RRM 模型的土地整治规划生态风险评价[D].甘肃 兰州:兰州大学,2018.
- [5] 陈桥,胡克,雒昆利,等.基于 AHP 法的矿山生态环境综合评价模式研究[J].中国矿业大学学报,2006,35(3):377-383.
- [6] 赵文江,徐明德,张君杰,等.BP 神经网络在矿山生态安全评价中的应用[J].煤炭技术,2019,38(1):172-175.
- [7] 刘烈武,宋焕斌.基于 ISM 的矿山生态环境安全影响因素分析[J].金属矿山,2012(8):133-137.
- [8] 杨瑞.晋北黄土区井工煤矿生态风险评价研究[D].北京:中国地质大学(北京),2021.
- [9] 张佳宁,王金满,张敏,等.井工煤矿区生态环境系统受损评价[J].生态学杂志,2020,39(12):4157-4164.
- [10] Wang Zhenyu, Luo Keyu, Zhao Yuhao, et al. Modeling regional ecological security pattern and restoration priorities after long-term intensive open-pit coal mining [J]. Science of the Total Environment, 2022, 835: 155491.
- [11] 周子英,刘伏英.基于 PSR-可拓云模型的湖南省怀化市农业生态安全评价[J].水土保持通报,2021,41(2):267-274.
- [12] 阮永芬,陈赵慧,吴龙,等.基于可拓云理论的泥炭质土地沉降风险评价[J].安全与环境学报,2020,20(1):59-67.
- [13] 郁文,丁国轩,樊小鹏,等.基于层次分析-模糊综合模型的矿山地质生态环境评价研究[J].三峡生态环境监测,2021,6(2):26-35.
- [14] 郭豫宾.大同地区矿山地质环境综合评价研究[D].四川 成都:成都理工大学,2010.
- [15] 孟清华,李斌,李海涛.基于 PSR 模型的煤矿本质安全评价新方法[J].煤炭技术,2014,33(9):42-44.
- [16] 项秋银.高品质住宅的品质需求识别及品质评价研究[D].辽宁 大连:大连理工大学,2020.
- [17] 和春兰,赵筱青,张洪.基于 GIS 的矿区流域生态安全诊断研究[J].安徽农业科学,2015,43(7):256-260.
- [18] Sun Haoyang, Wang Sufen, Hao Xinmei. An Improved Analytic Hierarchy Process Method for the evaluation of agricultural water management in irrigation districts of North China [J]. Agricultural Water Management, 2017,179:324-337.
- [19] 郑洋,于格,钟萍丽,等.基于土地利用变化和生态系统服务的海岸带生态安全综合评价:以胶州湾为例[J].应用生态学报,2018,29(12):4097-4105.
- [20] 蔡文,杨春燕.可拓学的基础理论与方法体系[J].科学通报,2013,58(13):1190-1199.
- [21] 乔建刚,程璨.基于可拓学理论的简支梁桥安全评价模型研究[J].安全与环境学报,2018,18(6):2096-2102.
- [22] Li Sucui, Zhao Yanling, Xiao Wu, et al. Optimizing ecological security pattern in the coal resource-based city: A case study in Shuozhou City, China [J]. Ecological Indicators, 2021,130:108026.
- [23] Nie Xinran, Hu Zhenqi, Zhu Qi, et al. Research on temporal and spatial resolution and the driving forces of ecological environment quality in coal mining areas considering topographic correction [J]. Remote Sensing, 2021,13(14):2815-2825.