

基于多准则妥协解排序法的安徽省矿业城市水土生态安全评价

何刚, 侯小宇, 王晓东, 赵疏航

(安徽理工大学 经济与管理学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: [目的] 探究矿业城市生态安全状况,厘清制约生态安全发展因素,为安徽省矿区可持续开采提供科学依据。[方法] 以安徽省9个矿业城市水土生态安全为例,构建基于经济—环境—社会的综合评价指标体系,通过乘法归一化法结合优化后的G1和CRITIC赋权法实现主客观赋权,再运用多准则妥协解排序法(VIKOR)模型,基于折中规划考虑了群体效应和个体妥协,兼顾不同权重指标实测值的差异性,利用障碍度模型对其进行障碍因子诊断。[结果] 多指标交互作用下的G1-CRITIC-VIKOR综合模型与实际数据匹配良好,安徽省矿业城市水土生态安全水平由高到低排序为池州、宣城、滁州、铜陵、马鞍山、宿州、亳州、淮北和淮南地区;其中工农就业人员比例、水土资源匹配系数、人均用水量、土地垦殖比例、城乡人均可支配收入是制约安徽省矿业城市水土生态安全水平的关键因素。[结论] 安徽省矿业城市应积极进行生态文明建设,努力把经济向集约型经济转变;实施植树造林,做好受损矿区生态修复、重建工作,保障其在水土生态安全的基础上科学合理地开展煤矿资源。

关键词: 矿业城市; 水土生态安全; 多准则妥协解排序法; 折中规划; 障碍诊断

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)04-0161-11

中图分类号: X826, X322

文献参数: 何刚, 侯小宇, 王晓东, 等. 基于多准则妥协解排序法的安徽省矿业城市水土生态安全评价[J]. 水土保持通报, 2022, 42(4): 161-171. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.04.021; He Gang, Hou Xiaoyu, Wang Xiaodong, et al. Evaluation of soil and water ecological security for mining cities in Anhui Province based on VIKOR model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(4): 161-171.

Evaluation of Soil and Water Ecological Security for Mining Cities in Anhui Province Based on VIKOR Model

He Gang, Hou Xiaoyu, Wang Xiaodong, Zhao Shuhang

(School of Economics and Management, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

Abstract: [Objective] The status of ecological security in mining cities was determined and the factors restricting the development of ecological security were clarified in order to provide a scientific basis for sustainable mining in Anhui Province. [Methods] A comprehensive evaluation index system based on economy-environment-society was constructed for soil and water ecological security of nine mining cities in Anhui Province. The multiplicative normalization method was used to combine the optimized G1 and CRITIC weighting methods to achieve subjective and objective weight assignment. Then, the VIKOR model was used to consider the group effect and individual compromise based on compromise programming, and the difference of measured values of different weight indexes was taken into account. Finally, an obstacle degree model was used to diagnose the obstacle factors. [Results] The G1-CRITIC-VIKOR model under the interaction of multiple indicators produced results that were well matched with the actual data. The nine mining cities in Anhui Province were ranked (from high to low) based on their soil and water ecological security levels as Chizhou, Xuancheng, Chuzhou, Tongling, Ma'anshan, Suzhou, Bozhou, Huaibei, and Huainan. The

收稿日期: 2022-01-11

修回日期: 2022-03-11

资助项目: 国家自然科学基金“淮河流域水生生态风险时空演化、预警及动态响应机制研究”(72271005); 安徽理工大学研究生创新项目“矿业城市水资源承载力多维测度与预测”(2021CX1013)

第一作者: 何刚(1966—), 男(汉族), 安徽省合肥市人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事安全管理与生态治理方面的研究。Email: hgang0111@163.com.

通讯作者: 侯小宇(1998—), 女(汉族), 安徽阜阳人, 硕士研究生, 研究方向为生态安全评价。Email: 17775219689@163.com.

proportion of workers and peasants employed, the matching coefficient of water and soil resources, the per capita water consumption, the proportion of land reclamation, and the per capita disposable income were the key factors restricting the level of water and soil ecological security of mining cities in Anhui Province. [Conclusion] The mining cities in Anhui Province should actively carry out ecological civilization construction and strive to transform their economies into intensive economies. At the same time, afforestation efforts should be implemented for ecological restoration and reconstruction of damaged mining areas so as to ensure the scientific and reasonable mining of coal resources on the basis of ecological security of water and soil.

Keywords: mining city; water and soil ecological security; VIKOR method; compromise planning; disorder diagnosis

随着经济的不断发展,生态环境问题日益突出,生态安全成为中国可持续发展的关键。2020年6月国家发改委和自然资源部共同编制的《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035年)》指出,以统筹山水林田湖草一体化保护和修复为主线,促进生态系统良性循环和永续利用。因此,很有必要将生态安全纳入国家安全体系之中,坚持绿色发展,有度有序利用自然,构建科学合理的生态安全格局。对于矿业城市来说,长期的矿产资源输出,采矿场、废渣堆、地面塌陷占用和破坏大面积土地,矿山开采造成一定程度的水资源污染,这些现象引起了矿业城市一系列生态环境问题,尤其是水土生态安全。

综合对矿业城市生态安全研究现状,主要集中在以下几个方面。首先研究内容以矿业城市的生态累积效应、生态安全格局、生态安全时空分异研究为主。如董霁红^[1]阐述了内蒙古矿业城市水、土、植被等关键生态要素的累积源和累计要素,分析了研究区植被覆盖度时空累积变化趋势;Safonova^[2]认为城市环境是由大气状态、地表水、土壤覆盖状态、噪声等子系统组成的复杂系统,基于此提出了城市环境安全逻辑—概率模型,该模型的实际实施有利于分析城市的生态安全时空演变过程;司绵绵^[3]以焦作矿业城市为研究对象,分析近10a其时间和空间变化特征,为研究区生态治理提供前提和依据。在指标体系构建上,李海波^[4]以茂名露天矿区生态修复潜力为目标层,选取地形地貌、土壤质地、气候、雨水和废弃地现状为准则层构建评价指标体系;Wan^[5]从生态安全建设目的、环境效益评价重点、数据获取难度等方面考虑,提出将矿山生态安全评价指标体系分为体系结构、资源利用和环境保护3类;除此之外,学者以压力—状态—响应(PSR)^[6-8]、经济—环境—社会(EES)^[9-10]、驱动力—压力—状态—影响—响应(DPSIR)^[11-12]模型从不同角度构建研究区生态安全评价指标体系。在矿业城市生态安全研究方法上,李恒凯^[13]利用景观生态安全格局理论(LSP)和最小累积阻力模型(MCR),对研究区的生态原地、生态廊道、生态节点

等进行判别和分析,构建矿区3个年份的景观生态安全格局;Ghosh^[14]利用决策实验室分析法(DEMATEL)和网络分析法(ANP)综合模型对印度城市加尔各答都市区的生态安全影响因素进行了筛选和评价,并结合元胞自动机(CA)与马尔科夫链(MC)模拟土地利用与土地覆被的变化,预测其地区未来的土地利用变化状况,为优化城市土地利用规划、提高城市生态安全水平提供有价值的科学指导;还有学者借助小波支持向量机模型(WSVM)^[15]、BP神经网络^[16]、遥感生态指数(RSEI)^[17-18]、正态云模型^[19-20]对研究区的生态安全指数进行测算、评级和分析。

综上所述,国内外学者对矿业城市生态安全的研究主要以局部矿区城市为研究对象,而较少涉及省域范围内多个矿业城市水土生态安全问题的相互比较。在指标权重计算方面,主观赋权无法避免主观决策上的误差,客观赋权太依赖数据的科学性和可靠性。

本研究从经济—环境—社会(EES)3个角度构建安徽省矿业城市水土生态安全评价指标体系,采用改进的G1法结合CRITIC法,将主客权重进行组合优化,综合考虑指标的权重;采用VIKOR法多属性决策法对安徽省不同矿业城市水土生态安全进行对比,构建基于改进G1法、CRITIC法及VIKOR法的安徽省矿业城市水土生态安全评价耦合模型。

1 构建综合评价指标体系

1.1 研究区概况

安徽省位于长江中下游、淮河中游,共拥有9座矿业城市,分别是淮南、淮北、马鞍山、宿州、亳州、滁州、池州、铜陵和宣城,其中淮南、马鞍山、淮北和铜陵为安徽省主要的产矿城市。9个矿业城市产矿种类不尽相同,淮南、淮北、宿州多产煤矿,亳州、铜陵、池州、滁州多产不同种类金属矿。以淮河与长江为分界线,把安徽省分为了皖北、皖中、皖南城市,其中淮南、淮北、宿州、亳州为皖北城市,滁州为皖中城市,铜陵、马鞍山、宣城、池州为皖南城市。淮河以北的矿业城市属于暖温带半湿润季风气候,淮河以南的

矿业城市属于亚热湿润季风气候,季风明显,四季分明。安徽省9个矿业城市地资源丰富,但经济发展主要还是依靠自然资源的不断输出,单一的经济结构会阻碍其区域经济与水土生态环境的协调发展,开采沉陷、地裂缝、含水层结构被破坏等水土生态污染问题蔓延甚至呈扩大趋势,水土生态安全面临沉重压力。

1.2 数据来源

本研究数据来源于《安徽省统计年鉴(2011—2019年)》《安徽省环境状况公报(2011—2019年)》《安徽省环境质量报告书(2011—2019年)》以及9个地级市2011—2019年统计年鉴及国民经济和社会发展统计公报等。

1.3 评价指标体系

水土生态安全研究应从自然水土生态安全角度开展研究,同时映射到经济生态系统、社会生态系统^[21]。故水土生态安全评价指标体系是一个融合经济、环境、社会的复杂动态的系统,其指标的选择应综合考虑安徽省矿业城市水土生态安全特点,能够直接反映其水土生态安全实际状况,也能包括人类活动对矿业城市水土生态安全的潜在影响。EES概念模型可用于描述整个人类活动系统中各属性之间的协同关系,能够较好地反映出水土生态系统内部复合属性,适用于水土生态系统内部结构分析。本文结合前人对矿业城市水土生态安全研究成果^[22-24],考虑到安徽省矿业城市水土生态安全相关评价指标的可获取性,遵循科学性、可操作性的原则,从经济系统、环境系统和社会系统3个维度选取15个具有代表性的评价指标构建安徽省矿业城市水土生态安全综合评价指标体系,具体指标详见表1。

2 水土生态安全评价方法

2.1 改进G1赋权法

G1赋权法是一种利用序关系对指标进行主观赋权的一种方法,它是层次分析法的拓展,无需进行一致性检验,计算速度快、准确性高^[25]。传统的G1赋权法是邀请专家对相邻指标的重要性进行打分和排序,在排列重要性程度之后,专家需要对上下评价指标的重要程度比打分,两次打分结果可能存在相斥的现象。

故本研究以专家第一次对评价指标打分结果作为重要程度排序后的指标原始数据,从而进行重要性比值,优化G1赋权法,缩减专家打分的程序和消除多次打分出现的失误,使权重结果更加准确。

表1 安徽省矿业城市水土生态安全评价指标体系

目标层	准测层	指标层	指标代码	单位	指标属性
安徽省矿业城市水土生态安全	经济系统	人均GDP	X_1	元/人	+
		第三产业贡献率	X_2	%	+
		城乡人均可支配收入比	X_3	1	+
		环保投资额比例	X_4	%	+
		工业万元产值需水量	X_5	$\text{m}^3/\text{万元}$	-
	环境系统	单位面积废水排放量	X_6	t/m^2	-
		水土稳固面积	X_7	m^2	+
		人均水资源量	X_8	$\text{m}^3/\text{人}$	+
		水土资源匹配系数	X_9	m^4/km^2	-
		土地垦殖比例	X_{10}	%	-
		农业三废负荷指数	X_{11}	kg/hm^2	-
	社会系统	城镇化率	X_{12}	%	+
		人均用水量	X_{13}	t	-
		工农就业人员比例	X_{14}	%	-
		建成区绿地率	X_{15}	%	+
		人口自然增长率	X_{16}	%	-

注:①城乡人均可支配收入比 X_3 =城镇人均可支配收入/农村人均可支配收入。2013年以前农村人均可支配收入数据为农村常住人口人均纯收入。②农业三废负荷指数 $X_{11}=0.5\times$ 化肥负荷指数 $+0.3\times$ 农药负荷指数 $+0.2\times$ 负荷指数。③有部分指标数据缺失,用插值法作为补充。

(1) 获取专家打分结果。本研究以访谈形式邀请6位专家对水土生态指标体系中的相邻指标重要程度打分,被邀请专家来自高校地球与环境学院水土生态方向教授以及市生态环境局环境工程评估人员。打分标准(详见表2),数值越高代表指标的重要程度越大,允许非整数数字打分。

表2 专家打分标准

重要程度	分数
特别重要	9~10
比较重要	6~8
一般重要	3~5
不重要	1~2

(2) 对评价指标的重要性进行排序。依据专家打分结果,对评价指标进行排序,重要程度由大到小,排序后的指标按顺序记为 H_1, H_2, H_3, \dots 。

(3) 计算相邻指标的重要程度比值。根据第 i 位专家对评价指标的重要程度的打分,将相邻指标的重要程度分数比值作为权重比值,评价指标 H_{k-1} 与 H_k 的比值权重(R_k)记为:

$$R_k = \frac{H_{k-1}}{H_k} \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

(4) 计算指标权重。指标权重记作 W_k ,其中

R_k, H_k, W_k 三者之间的关系为:

$$R_k = \frac{H_{k-1}}{H_k} = \frac{W_{k-1}}{W_k} \quad (2)$$

最后一个指标 H_n 的权重为 W_j , 则

$$W_n = \frac{1}{1 + \sum_{k=2}^n (\prod_{l=k}^n R_l)} \quad (3)$$

根据公式(3)变形可得递推公式, 求出其他指标的权重为:

$$W_{k-1} = W_k \cdot R_k = \frac{H_{k-1}}{H_k} \quad (4)$$

2.2 CRITIC 赋权法

CRITIC 赋权法是基于指标相关性的指标权重确定方法, 是由 Diakolaki^[26] 提出的一种客观赋权方法。这个方法在进行多指标评价对象综合分析时, 考虑了各个评价指标之间的冲突性及指标实测值变化引起的指标权重的变化。

设有 n 个评价指标, m 个实测数据, CRITIC 赋权法计算过程如下:

(1) 原始数据无量纲化处理。

为消除不同指标在单位、数量级上的差距, 需无量纲化处理指标原始数据。原始数据无量纲化处理方式有最大最小标准化、对数函数转换法、z-score 标准化法等。

(2) 计算评价对象的信息量 A_i 。评价指标的信息量反映了该评价指标对评价对象的影响程度, 其中求和算子反映了评价指标之间的冲突性。

$$A_i = \frac{S_i}{\sum_{j=1}^m (1 - |r_{ij}|)} \quad (5)$$

$$S_i = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}} \quad (6)$$

式中: S_i 为列数据的均方差; \bar{X} 为列数据的平均值; r_{ij} 为任意两个指标间的相关系数, 以皮尔逊相关系数为例, 计算公式为:

$$r_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (7)$$

式中: r_{ij} 为相关系数, 数值介于 -1 至 1 之间; x_i, y_i 为指标某一维度数值; \bar{x}, \bar{y} 为指标维度数值均值。

(3) 计算最终权重 W_i 。计算公式为:

$$W_i = \frac{A_i}{\sum A_i} \quad (8)$$

2.3 组合权重

为了弥补单一赋权法的缺陷, 将上述改进的 G1 法计算的指标权重记为 W_u , CRITIC 赋权法计算出

的指标权重记为 W_v , 利用乘法归一化法计算组合权重 (w), 对主客观权重进行重新分配。计算公式为:

$$w = \frac{w_u \cdot w_v}{\sum w_u \cdot w_v} \quad (9)$$

2.4 VIKOR 法

多准则妥协解排序法 (VIKOR) 是一种通过对群体效用值、个体遗憾值、折中评价价值计算, 对多属性方案进行排序和选择的决策方法^[27]。它的基本思想就是在数据全部解集中选择出最优解和最劣解, 根据不同数值之间最优解和最劣解距离, 即最优解最近、最劣解最远的标准, 确定综合排序结果。这一过程往往是各个属性之间进行折中让步, 以便得到的可行解既能保证群体的最大利益, 又能兼顾个体损失, 它是由折中规划中的 L_p -测度衍生而来, L_p -测度可表示为

$$L_{p_i} = \left\{ \sum_{j=1}^n \left[\frac{w_j (f_j^+ - f_{ij})}{f_j^+ - f_j^-} \right]^p \right\}^{\frac{1}{p}} \quad (10)$$

式中: f^+, f^- 为指标的正、负理想解; w_j 为指标权重; p 为折中系数。

其具体步骤为:

(1) 标准化原始数据。

$$X = [x_{ij}]_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (11)$$

(2) 确定各项指标的正理想解 x_j^+ 和负理想解 x_j^-

$$x_j^+ = \{\max x_{1j}, \max x_{2j}, \cdots, \max x_{nj}\} \quad (12)$$

($j=1, 2, \cdots, m$)

$x_j^- = \{\min x_{1j}, \min x_{2j}, \cdots, \min x_{nj}\} \quad (13)$

($j=1, 2, \cdots, n$)

(3) 确定各方案的群体效用值 S_i 和个体遗憾值 R_i , 当以正理想解为参照时, 各个方案群体效用值和个体遗憾值为:

$$S_i^+ = \sum_{i=1}^m w_i (x_i^+ - x_{ij}) / (x_i^+ - x_i^-) \quad (14)$$

$$R_j^+ = \max [w_i (x_{ij} - x_i^-) / (x_i^+ - x_i^-)] \quad (15)$$

当以负理想解为参照时, 各方案群体效用值和个体遗憾值:

$$S_j^- = \sum_{i=1}^m w_i (x_{ij} - x_i^-) / (x_i^+ - x_i^-) \quad (16)$$

$$R_j^- = \max [w_i (x_{ij} - x_i^-) / (x_i^+ - x_i^-)] \quad (17)$$

综上分析, 当 S_j^+ 和 R_j^+ 越小时, 方案越好; 当 S_j^- 和 R_j^- 越大时, 方案越好。

(4) 计算各方案的折中评价价值 Q_i 。

$$S^+ = \min_i \{S_i\}, \quad S^- = \max_i \{S_i\} \quad (18)$$

$$R^+ = \min_i \{R_i\}, \quad R^- = \max_i \{R_i\}$$

$$Q_i = \mu \frac{S_i - S^-}{S^+ - S^-} + (1 - \mu) \frac{R_i - R^-}{R^+ - R^-} \quad (19)$$

式中: μ 为折中系数,又称决策机制系数,代表群体效用的比重,取值范围为 $[0,1]$; $(1-\mu)$ 代表个体遗憾的比重。当 $\mu > 0.5$ 时,表示评价者相比个体遗憾,更偏重群体效用的比重;当 $\mu < 0.5$ 时,表示评价者更偏重个体遗憾的比重;当 $\mu = 0.5$ 时,表示评价者认为群体效用和个体遗憾同等重要^[28]。

(5) 比较各个方案的优劣。分别根据群体效用值(S_i)、个体遗憾值(R_i)和折中评价值(Q_i)的取值大小对方案进行排序,对应数值越小方案越优,得到 3 个方案的排序顺序。其中记 Q_i 排序的最优方案为 $X_{(1)}$,若 $X_{(1)}$ 同时满足以下 A_1, A_2 条件则为最优方案。

$$A_1: Q[X_{(1)}] - Q[X_{(2)}] \geq \frac{1}{M-1}$$

A_2 : 在 S_i, R_i 排序中, $X_{(1)}$ 至少有一个排在 $X_{(2)}$ 的前面。

如果 A_1 满足而 A_2 不满足,则为折中解 $\{X_{(1)}, X_{(2)}\}$; 若 A_1 不满足 A_2 满足,则折中解为 $\{X_{(1)}, X_{(2)}, \dots, X_{(n)}\}$, $X_{(n)}$ 满足 $Q[X_{(1)}] - Q[X_{(2)}] < \frac{1}{M-1}$ 。

2.5 障碍因素诊断模型

为了更具体分析指标对综合评价水平的作用效果,引入指标障碍度、指标偏度、指标贡献度来对主要指标进行诊断和分析,计算公式为:

$$Q_i = \frac{S_i M_i}{\sum_{i=1}^n S_i M_i} \quad (20)$$

式中: Q_i 为指标障碍度; S_i 为指标偏度,是指标准化后的指标数值与数值 1 之间的差距,即 $S_i = 1 - X_i$; M_i 为指标贡献率,而指标权重反映出指标对研究对象的影响程度即可用指标权重表示指标贡献率。

3 实例研究

3.1 数据标准化

由于 16 个经济、社会、环境系统指标的单位、含义不同,无法直接进行横向的对比,故在数据处理之前,需对原始数据进行无量纲化处理^[29]。考虑到不同指标对安徽省矿业城市水土生态安全作用效果有正反之分,故采用公式(21)~(22)对原始数据进行处理。

$$\text{正指标: } X^* = \frac{X_i - \max F_X}{\max F_X - \min F_X} \quad (21)$$

$$\text{负指标: } X^* = \frac{\max F_X - X_i}{\max F_X - \min F_X} \quad (22)$$

式中: X^* 为标准化后的数据; X_i 为指标实测数据; $\max F_X, \min F_X$ 为指标中所有实测数据的最大值和最小值。

3.2 确定组合权重

按照改进 G1 法和 CRITIC 法的步骤,获取 6 位专家对本研究选取的 16 个指标的打分数据和排序结果,由公式(1)~(4)得到主观权重,结果详见表 3。由公式(5)~(8)得到客观权重,最后利用公式(9)得到组合权重(详见表 4)。

表 3 利用改进 G1 法得到的 16 个指标主观权重

项目	指标代码	主观权重							平均值
		专家 1	专家 2	专家 3	专家 4	专家 5	专家 6		
经济	X_1	0.041 24	0.049 35	0.029 13	0.040 98	0.027 73	0.038 10	0.037 75	
	X_2	0.051 55	0.042 83	0.048 54	0.045 08	0.051 76	0.066 67	0.051 07	
	X_3	0.030 93	0.040 04	0.029 13	0.030 74	0.076 71	0.028 57	0.039 35	
	X_4	0.072 16	0.079 14	0.072 82	0.092 21	0.066 54	0.080 95	0.077 31	
	X_5	0.082 47	0.069 83	0.073 79	0.064 55	0.048 98	0.076 19	0.069 30	
环境	X_6	0.072 16	0.076 35	0.067 96	0.071 72	0.046 21	0.081 90	0.069 39	
	X_7	0.092 78	0.093 11	0.090 29	0.081 97	0.078 56	0.086 67	0.087 23	
	X_8	0.072 16	0.060 52	0.058 25	0.071 72	0.041 59	0.059 05	0.060 55	
	X_9	0.082 47	0.083 80	0.093 20	0.086 07	0.050 83	0.090 48	0.081 14	
	X_{10}	0.061 86	0.065 18	0.054 37	0.067 62	0.036 97	0.069 52	0.059 25	
	X_{11}	0.072 16	0.075 42	0.077 67	0.063 52	0.088 72	0.068 57	0.074 35	
社会	X_{12}	0.072 16	0.055 87	0.070 87	0.051 23	0.064 70	0.057 14	0.062 00	
	X_{13}	0.041 24	0.048 42	0.063 11	0.056 35	0.077 63	0.059 05	0.057 63	
	X_{14}	0.051 55	0.048 42	0.060 19	0.046 11	0.083 18	0.047 62	0.056 18	
	X_{15}	0.072 16	0.074 49	0.071 84	0.090 16	0.067 47	0.060 00	0.072 69	
	X_{16}	0.030 93	0.037 24	0.038 83	0.039 96	0.092 42	0.029 52	0.044 82	

注:表中各指标含意同表 1。

表 4 乘法归一化法指标组合权重

准则层	代码	G1 权重	CRITIC 权重	组合权重
经济 (0.256 74)	X_1	0.037 75	0.062 49	0.036 89
	X_2	0.051 07	0.051 92	0.041 47
	X_3	0.039 35	0.046 49	0.028 61
	X_4	0.077 31	0.085 56	0.103 45
	X_5	0.069 30	0.042 73	0.046 32
环境 (0.523 88)	X_6	0.069 39	0.044 99	0.048 82
	X_7	0.087 23	0.116 02	0.158 28
	X_8	0.060 55	0.176 24	0.166 90
	X_9	0.081 14	0.034 68	0.044 01
	X_{10}	0.059 25	0.058 25	0.053 98
	X_{11}	0.074 35	0.044 63	0.051 90
社会 (0.219 38)	X_{12}	0.062 00	0.045 43	0.044 05
	X_{13}	0.057 63	0.036 36	0.032 78
	X_{14}	0.056 18	0.054 17	0.047 59
	X_{15}	0.072 69	0.056 96	0.064 75
	X_{16}	0.044 82	0.043 10	0.030 21

从准则层角度来看,各个指标组合权重对应的经济、环境、社会系统权重不同。这反映着 3 个子系统对安徽省矿业城市的水土生态安全的作用程度不同,作用大小依据指标权重排序为:环境(0.523 88) > 经济(0.256 74) > 社会(0.219 38)。其中矿业城市环境系统相比于经济、社会系统多了一个指标,但是除去环境系统中的任一指标,其对安徽省矿业城市水土生态安全的影响程度也远远比其他两个系统的影响程度大。这是因为矿业城市开采矿产资源对水土生态的破坏首先明显地反映在水土生态的直接性指标上,表明对于矿业城市水土生态的治理首当其冲的还是对开采工艺的治理。因此,要提倡源头治理的矿业城市生态安全环保理念,在降低开采矿产资源对环境破坏的同时,加大生态环保投资额的比例,快速发展经济,改善当地的生态环境质量。

从单个指标组合权重来看,影响安徽省矿业城市水土生态安全状况的主要指标有:环保投资额比例(X_4)、水土稳固面积(X_7)、人均水资源总量(X_8),这些指标组合权重均大于 0.1。除此之外,土地垦殖比例(X_{10})、农业三废负荷指数(X_{11})和建成区绿地面积(X_{15})的权重大于 0.05。这表明这些指标对矿业城市水土生态安全影响较大,即政府拨款与政策支持、人类生产活动和资源基数与安徽省矿业城市的水土生态安全密切相关,当前应重点提取权重较大指标的水平,才能有效改善生态环境质量。

3.3 确定群体效用值(S_i)、个体遗憾值(R_i)和折中评价值(Q_i)值

在兼顾群体效用最大化和个体遗憾最小化的情

况下,VIKOR 模型中取折中系数 μ 取 0.5。根据公式(10)确定各个指标的正负理想解,得到每个指标的正负理想解为

$$x_j^+ = (0.527\ 0, 0.357\ 0, 0.357\ 4, 0.553\ 0, 0.620\ 3, 0.700\ 2, 0.552\ 5, 0.693\ 6, 0.481\ 8, 0.700\ 2, 0.427\ 7, 0.402\ 5, 0.587\ 6, 0.385\ 2, 0.366\ 9, 0.608\ 5)^T$$

$$x_j^- = (0.195\ 4, 0.298\ 4, 0.296\ 8, 0.142\ 1, 0.114\ 7, 0.069\ 3, 0.054\ 6, 0.040\ 3, 0.087\ 4, 0.088\ 1, 0.226\ 1, 0.245\ 8, 0.073\ 9, 0.305\ 9, 0.268\ 4, 0.133\ 0)^T$$

根据公式(16)~(17)和公式(19)计算群体效用值、个体遗憾值以及综合评价值。由于篇幅限制,以 2011—2019 年奇数年为代表,9 个安徽省矿业城市 2011—2019 年 S_i, R_i, Q_i 计算结果详见表 5。

3.4 综合评价结果与分析

根据 2011—2019 年安徽省矿业城市 S_i, R_i, Q_i 的计算,各个城市水土生态安全排序如表 5 所示。由 A_1 条件公式可知池州、宣城、滁州、宿州、淮北、淮南为最优解,铜陵、马鞍山、亳州为折中解。通过群体效用、个体遗憾、折中评价综合对比,得到 9 个矿业城市的水土生态安全水平,即:池州 > 宣城 > 滁州 > 铜陵 > 马鞍山 > 宿州 > 亳州 > 淮北 > 淮南,与折中评价值 Q_i 排序结果相同,故以 Q_i 值为例分析 9 个矿业城市水土生态安全水平(图 1)。

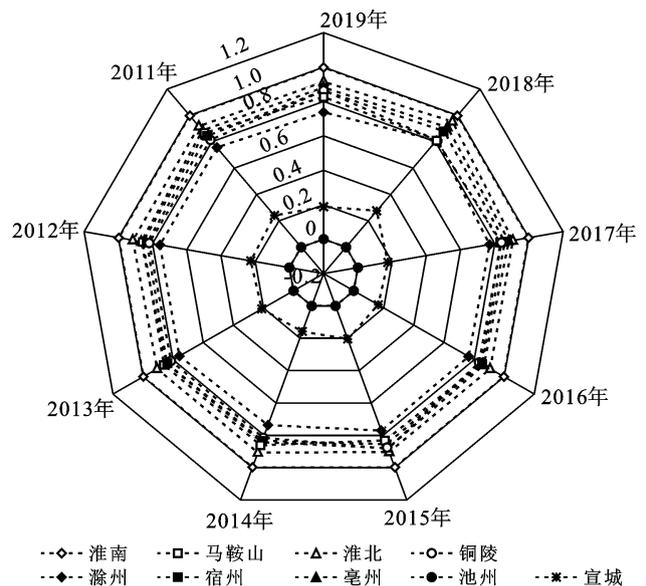


图 1 安徽省矿业城市水土生态安全评价雷达图

从水土生态水平时间变化趋势来看,淮南市 2018 年水土生态安全水平最高,2013 年水土生态水平最低,2011—2019 年 9 a 间水土生态综合水平起伏较大。马鞍山市水土生态安全水平整体呈下降趋势,在 2015—2016 年水土生态安全 Q_i 值由 0.839 17 轻微

增长到了 0.849 12,2016—2018 年连续两年呈下降趋势。淮北市在 2011—2017 年 7 a 间,水土生态安全 Q_i 值水平基本保持不变,有轻微下降趋势,在 2017—2018 年,水土生态安全水平呈大幅度增长,由 Q_i 值原来的 0.906 71 增长到了 0.953 70,而 2018—2019 年又呈下降趋势,但 2019 年的水土生态安全 Q_i 值大于 2017 年的水土生态安全 Q_i 值。铜陵市水土生态安全 Q_i 值在 2015 年与 2018 年呈现最高与最低水平,滁州市水土生态安全 Q_i 值于 2014 年与 2018 年

呈现最高与最低水平,铜陵市和滁州市水土生态安全水平都呈现高高低低走势,而铜陵市整体综合水平低于滁州市。与淮北市相反,宿州市整体水土生态安全水平呈上升趋势,在 2018—2019 年 Q_i 值下降了 0.02。亳州市在 2018 年水土生态安全 Q_i 值呈最高水平,自 2011 年起水土生态水平经历了两次上升和两次下降,2019 年水平仍低于 2011 年水平。池州市 9 a 间水土生态安全水平保持不变,而宣城水土生态安全 Q_i 值在 2018 年呈最高水平,2014 年呈最低水平。

表 5 安徽省矿业城市水土生态安全的群体效用值(S_i)、个体遗憾值(R_i)、折中评价值(Q_i)

年份	值	淮南	马鞍山	淮北	铜陵	滁州	宿州	亳州	池州	宣城
2019	S_i	0.752 01	0.633 19	0.673 03	0.671 18	0.545 67	0.643 94	0.655 41	0.289 46	0.375 88
	R_i	0.166 36	0.155 63	0.166 90	0.154 84	0.157 03	0.161 97	0.163 60	0.043 43	0.066 93
	Q_i	0.997 85	0.825 95	0.914 63	0.863 79	0.737 00	0.863 21	0.882 24	0.000 00	0.188 59
2017	S_i	0.743 86	0.632 68	0.658 10	0.641 41	0.569 13	0.632 75	0.647 99	0.284 23	0.358 02
	R_i	0.166 36	0.155 63	0.166 90	0.154 84	0.157 03	0.161 97	0.163 60	0.043 45	0.066 93
	Q_i	0.997 84	0.833 43	0.906 71	0.839 71	0.769 97	0.859 15	0.882 37	0.000 00	0.175 39
2015	S_i	0.748 68	0.624 99	0.652 03	0.678 89	0.558 91	0.624 00	0.641 61	0.249 58	0.345 68
	R_i	0.166 36	0.155 63	0.166 90	0.154 84	0.157 03	0.161 97	0.163 60	0.039 24	0.066 93
	Q_i	0.997 92	0.831 97	0.903 17	0.882 85	0.771 25	0.855 78	0.879 84	0.000 00	0.204 73
2013	S_i	0.738 77	0.658 79	0.659 02	0.621 53	0.566 14	0.620 00	0.616 92	0.309 03	0.409 89
	R_i	0.166 36	0.155 63	0.166 90	0.154 84	0.157 03	0.161 97	0.163 60	0.043 68	0.066 93
	Q_i	0.997 84	0.861 24	0.907 21	0.814 65	0.759 11	0.841 80	0.844 87	0.000 00	0.211 70
2011	S_i	0.748 36	0.668 74	0.673 76	0.623 97	0.564 27	0.626 28	0.656 98	0.297 98	0.427 18
	R_i	0.166 36	0.155 63	0.166 90	0.154 84	0.157 03	0.161 97	0.163 60	0.042 83	0.066 93
	Q_i	0.997 86	0.866 21	0.917 18	0.813 30	0.755 87	0.844 59	0.885 28	0.000 00	0.240 56
均值	S_i	0.746 32	0.643 66	0.667 90	0.637 12	0.564 30	0.628 14	0.642 04	0.285 55	0.381 83
	R_i	0.166 36	0.155 63	0.166 90	0.154 84	0.157 03	0.161 97	0.163 60	0.041 63	0.066 93
	Q_i	0.997 88	0.844 40	0.914 58	0.832 77	0.762 42	0.851 53	0.872 94	0.000 00	0.204 96
排序	S_i	池州>宣城>滁州>宿州>铜陵>亳州>马鞍山>淮北>淮南								
	R_i	池州>宣城>铜陵>马鞍山>滁州>宿州>亳州>淮南>淮北								
	Q_i	池州>宣城>滁州>铜陵>马鞍山>宿州>亳州>淮北>淮南								

从水土生态水平综合排名结果来看,在 2011—2019 年池州市的水土生态安全平均水平较其他矿业城市一直位于前茅, Q_i 值均为 0。这得益于池州市率先启动水土保持区域评估改革,在“十二五”和“十三五”规划期间一直加大政府投资力度,建设水土保持综合治理处、治理水土流失面积,还推进实施生态清洁小流域治理工程。宣城位列第二, Q_i 均值为 0.205,2018 年水土生态水平达到峰值,较 2017 年增长了 36.45%。滁州市位列第三, Q_i 均值为 0.762。宣城市和滁州市排名相差不远,但 Q_i 均值相差 0.557,表明宣城的水土生态安全远高于滁州市的水土生态安全。近年来宣城市通过对水蚀坡林地整治、人居环境整治、河道修复等治理水土流失,其生态水平得到明

显的改善。铜陵市和马鞍山市排名第四、第五, Q_i 均值为 0.834,0.844,二者水土生态水平相近。对比各年 Q_i 值,马鞍山市在 2015,2017 和 2019 年比铜陵市综合评价值低,这恰恰说明了铜陵市相比于马鞍山市对于水土生态安全破坏率低、治理效率高。第六至第九名为宿州、亳州、淮北和淮南市,它们都为皖北城市, Q_i 均值分别为 0.852,0.873,0.915,0.998。 Q_i 均值较高且相差不多。淮北市在 2011—2019 年 Q_i 值呈平稳变化,但在 2018 年其水土生态安全水平最差, Q_i 值为 0.953 7,达到九年间峰值。淮南市 Q_i 均值与 1 相差 0.002,是 9 个矿业城市中水土生态安全水平排序中的最后一位。淮北市为衰退型煤炭城市,淮南市为成熟性煤炭城市,它们产煤量较高,对水土生态威胁较大。

3.5 障碍度因子诊断

障碍度分析可以帮助找出安徽省矿业城市水土生态安全状态提升产生的障碍因子,其水土生态安全指标的障碍度越大,说明该指标对水土生态安全的阻碍越大。以构建的评价指标为安徽省矿业城市水土

生态安全障碍因子,将公式(9)得到的改进 G1-CRIT-IC 组合权重代入到公式(20)中,得到安徽省 9 个矿业城市水土生态 2011—2019 年的障碍因子及障碍度,由于篇幅限制,只列举了其 2011 与 2019 年障碍因子和障碍度的对比结果(详见表 6)。

表 6 安徽省矿业城市水土生态安全障碍因子排序

矿业城市	年份	项目	前 5 位障碍因子及其障碍度				
			1	2	3	4	5
淮 南	2011	障碍因子 障碍度	I_{13} 0.268 53	I_6 0.199 55	I_5 0.166 57	I_2 0.153 93	I_{14} 0.153 60
	2019	障碍因子 障碍度	I_8 0.137 44	I_7 0.119 61	I_5 0.087 87	I_2 0.076 97	I_{15} 0.075 57
淮 北	2011	障碍因子 障碍度	I_5 0.241 03	I_{10} 0.237 11	I_{13} 0.233 78	I_9 0.233 41	I_{14} 0.201 55
	2019	障碍因子 障碍度	I_{10} 0.269 73	I_3 0.141 78	I_8 0.130 78	I_{16} 0.113 97	I_4 0.113 53
马 鞍 山	2011	障碍因子 障碍度	I_{11} 0.255 11	I_{10} 0.226 07	I_{14} 0.179 70	I_{12} 0.154 74	I_2 0.153 60
	2019	障碍因子 障碍度	I_6 0.243 87	I_{16} 0.204 75	I_3 0.135 03	I_8 0.131 89	I_7 0.124 24
铜 陵	2011	障碍因子 障碍度	I_{13} 0.203 52	I_{11} 0.169 10	I_5 0.157 30	I_7 0.146 78	I_2 0.131 95
	2019	障碍因子 障碍度	I_{10} 0.159 10	I_{16} 0.154 91	I_1 0.140 47	I_{12} 0.132 45	I_9 0.125 82
滁 州	2011	障碍因子 障碍度	I_5 0.201 97	I_{13} 0.181 19	I_9 0.168 51	I_{14} 0.163 00	I_2 0.155 68
	2019	障碍因子 障碍度	I_{10} 0.196 89	I_{16} 0.151 42	I_3 0.137 28	I_7 0.116 07	I_{15} 0.073 87
宿 州	2011	障碍因子 障碍度	I_6 0.294 16	I_{13} 0.218 81	I_{14} 0.214 66	I_9 0.214 12	I_{11} 0.166 91
	2019	障碍因子 障碍度	I_{10} 0.158 89	I_3 0.137 79	I_8 0.132 50	I_5 0.129 73	I_{15} 0.119 52
毫 州	2011	障碍因子 障碍度	I_{13} 0.249 43	I_6 0.227 77	I_{14} 0.191 05	I_5 0.182 77	I_7 0.156 29
	2019	障碍因子 障碍度	I_8 0.159 05	I_9 0.136 64	I_3 0.133 66	I_7 0.115 35	I_{12} 0.074 97
池 州	2011	障碍因子 障碍度	I_{13} 0.212 82	I_{14} 0.158 97	I_9 0.154 97	I_{12} 0.153 69	I_{10} 0.151 46
	2019	障碍因子 障碍度	I_{11} 0.205 41	I_8 0.137 12	I_3 0.130 79	I_9 0.116 96	I_5 0.092 03
宣 城	2011	障碍因子 障碍度	I_{14} 0.274 41	I_5 0.208 61	I_6 0.207 64	I_{13} 0.184 15	I_{15} 0.174 28
	2019	障碍因子 障碍度	I_{11} 0.144 61	I_3 0.118 44	I_8 0.117 30	I_7 0.107 04	I_{15} 0.087 14

注: I_1, I_2, \dots, I_{16} 分别为水土生态障碍因子。下同。

由表 6 可知,安徽省 9 个矿业城市 2011 与 2019 年水土生态安全排名前五的障碍因子中,人均用水量(I_{13})、水土资源匹配系数(I_9)、土地垦殖比例(I_{10})的障碍度最大,其次是工业万元产值需水量(I_5)、工农就业人员比例(I_{14})、人均水资源量(I_8)、水土稳固面积(I_7)。在众多矿业城市水土生态安全评价影响因子中,存在具有普遍影响作用的障碍因子。因此在表 6 的基础上,统计出了 2011—2019 年安徽省 9 个矿业城市水土生态安全排名前五的障碍因子的次数,更能直观地显示出不同障碍因子的作用效果(图 2)。在 9 个矿业城市共 405 个数据中,工农就业人员比例(I_{14})频数最大为 37 次,而水土资源匹配系数(I_9)、人均用水量(I_{13})、土地垦殖比例(I_{10})、城乡人均可支配收入(I_3)、工业万元产值需水量(I_5)、单位面积废水排放量(I_6)、农业三废负荷指数(I_{11})频数也都超过了 30 次;人均 GDP(I_1)出现频数最小,仅有 11 次,这说明了制约安徽省矿业城市水土生态安全发展的影响因素中人为因素影响效果大于自然条件因素,准则层影响效果由大到小排序为:环境系统>社会系统>经济系统。

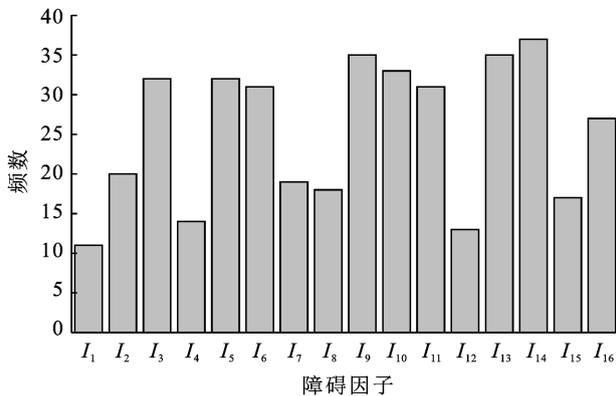


图 2 安徽省矿业城市水土生态安全障碍因子分布频数

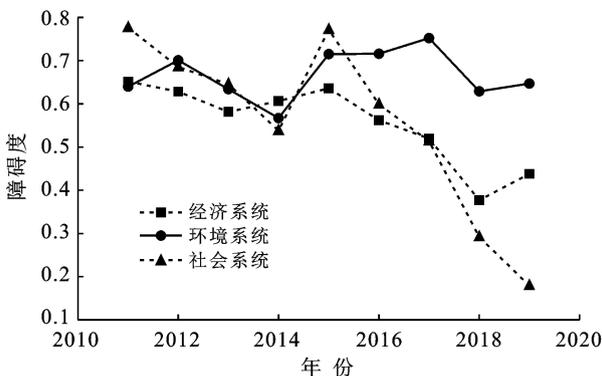


图 3 淮南市准则层指标障碍度

为进一步研究分析影响安徽省矿业城市水土生态安全状况的系统影响因素,将由公式(20)计算出的各年指标层障碍度相加,得到各个准则层的障碍度。利用 G1-CRITIC-VIKOR 综合模型测度的淮南市水土生态水平较低,故本文以淮南市为例,分析其在时间序列上准则层变化过程(图 3)。经济系统和社会系统增减不断变动之间呈下降趋势,尤其是社会系统障碍度 2015—2019 年由 0.772 下降至 0.179,降幅明显,表明淮南市的经济社会高质量发展带动水土生态安全水平增长。而恰恰相反的是环境系统在时间序列变化中呈上升趋势,故环境系统是影响淮南市水土生态安全水平最显著的障碍系统。

3.6 与 TOPSIS 结果对比

TOPSIS 是一种逼近理想解的排序方法^[30],在求解过程中计算数据标准化、权重向量、正负理想解等步骤与 VIKOR 方法相似,但 TOPSIS 法最终以各个数据样本到正负理想解的接近程度来对目标对象进行评价与排序。本研究采用 TOPSIS 方法对安徽省矿业城市 2011—2019 年的水土生态安全水平和排名进一步验证,计算公式为:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (Z_{ij}^+ - Z_{ij}^{\max})^2}, \quad (23)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (Z_{ij}^- - Z_{ij}^{\min})^2}$$

$$L_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (24)$$

式中: Z_{ij}^+ , Z_{ij}^- 为各个方案的最优和最劣解; D_i^+ , D_i^- 为各个特征值到最优解和最劣解的距离; L_i 为各个方案与最优方案的接近程度,取值范围在 0~1 之间,越接近 1 表明此方案越优。计算结果详见表 7。

表 7 安徽省矿业城市水土生态安全 TOPSIS 的分值

矿业城市	D^+	D^-	L_i
淮南	0.021 75	0.000 35	0.112 80
马鞍山	0.018 36	0.001 54	0.224 71
淮北	0.021 02	0.000 89	0.169 45
铜陵	0.016 77	0.001 61	0.232 35
滁州	0.013 28	0.007 08	0.422 05
宿州	0.015 25	0.003 97	0.337 96
亳州	0.016 20	0.002 38	0.276 78
池州	0.000 92	0.020 24	0.825 42
宣城	0.001 84	0.017 63	0.756 64
排序	池州>宣城>滁州>宿州>亳州>铜陵>马鞍山>淮北>淮南		

由 TOPSIS 计算得到的安徽省矿业城市水土生态安全的评价结果为:池州>宣城>滁州>宿州>亳

州>铜陵>马鞍山>淮北>淮南,与 VIKOR 得到的结果不尽相同,但仍然满足池州、宣城、滁州、宿州、淮北和淮南为最优解。而两种方法的主要差别在于宿州、亳州与铜陵、马鞍山两组城市的水土生态安全水平大小,即在 VIKOR 方法中宿州、亳州水平小于铜陵、马鞍山,而 TOPSIS 与之相反。这主要是因为宿州、亳州在权重较高的指标上隶属度较小,环保投资比例、水土稳固面积、人均水资源总量等无法被补偿。而铜陵、马鞍山地区的个体损失值 R_i 为 0.155 63 和 0.154 84,相比于宿州、亳州地区的 0.161 97 和 0.163 60 较小,可以均衡权重对较高的指标的影响。而 TOPSIS 法仅以各个数据样本到正负理想解的接近程度来对目标对象进行评价与排序,未考虑距离的权重对排序的影响,具有片面性。

4 结论

(1) G1-CRITIC-VIKOR 模型通过乘法归一化法结合优化后的 G1 和 CRITIC 实现主客观赋权,消除专家多次打分可能出现的失误和避免水土生态安全指标冲突性、实测值变化引起的权重变化,再结合 VIKOR 模型,基于折中规划引入了群体效用值、个体遗憾值和折中评价值,既考虑了群体效应还考虑了个体妥协,并兼顾不同权重指标实测值的差异性。最后通过与 TOPSIS 安徽省矿业城市水土生态安全评价结果对比,证明了 G1-CRITIC-VIKOR 综合模型的可行性和有效性。

(2) 在 EES 下的 16 个指标中,环保投资比例、水土稳固面积和人均水资源总量权重较大;准则层权重由小到大分别为环境系统、经济系统和社会系统。在经过综合模型测算的安徽省矿业城市水土生态安全水平由高到低排序为池州、宣城、滁州、铜陵、马鞍山、宿州、亳州、淮北和淮南。其中工农就业人员比例、水土资源匹配系数、人均用水量、土地垦殖比例、城乡人均可支配收入是制约安徽省矿业城市水土生态安全水平的关键因素。

(3) 安徽省矿业城市 2011—2019 年水土生态安全障碍因子主要为人均用水量、水土资源匹配系数、土地垦殖比例、工业万元产值需水量、水土稳固面积。其中工农就业人比例在 9 个矿业城市出现频次最多,总体来说,制约安徽省矿业城市水土生态安全发展的影响因素中人为因素影响效果大于自然条件因素,准则层影响效果由大到小排序为:环境系统>社会系统>经济系统。

(4) 根据测算结果,水土生态水平排名较低的安徽省矿业城市首先应该积极进行生态文明建设,努力

把经济向集约型经济转变,降低地区对矿业产业的依赖,大力推动和支持矿业产业建设,创建以矿业为首、其他各项产业齐头并进的发展局面;重视水土资源匹配、人均用水量等因素,加强实施植树造林建设,因地制宜,做好受损矿区生态修复、重建工作,保障矿业城市在水土生态安全的基础上科学合理地开采矿产资源。

[参 考 文 献]

- [1] 董雾红,吉莉,房阿曼.典型干旱半干旱草原矿区生态累积效应[J].煤炭学报,2021,46(6):1945-1956.
- [2] Safonova A G, Plugotarenko N K. System analysis in assessing the ecological safety of the urban environment [J]. Iop Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021,720(1):012067.
- [3] 司锦锦,王世东.基于组合赋权法的焦作矿区生态安全评价与时空分异[J].水土保持研究,2021,28(3):348-354.
- [4] 李海波.工矿城市矿业废弃地生态修复潜力综合评价:以茂名某露天矿区为例[J].安全与环境学报,2022,22(1):505-511.
- [5] Wan Linwei, Du Chenlin. An approach to evaluation of environmental benefits for ecological mining areas based on ant Colony algorithm [J]. Earth Science Informatics, 2021,14(2):797-808.
- [6] Han Baolong, Liu Hongxiao, Wang Rusong. Urban ecological security assessment for cities in the Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan region based on fuzzy and entropy methods [J]. Ecological Modelling, 2015,318:217-225.
- [7] Gao Sheng, Sun Huihui, Cao Guangxi, et al. Dynamic assessment of island ecological security under urbanization: A case study of Pingtan Island in the Southeast Coast of China [J]. Environmental Earth Sciences, 2018,77(14):531.
- [8] 王锦洋,卢才武,李发本,等.基于 PSR 和 GA-Elman 模型的露天矿区生态安全评价研究[J].中国矿业,2020,29(2):65-71.
- [9] Shao Huaiyong, Sun Xiaofei, Lin Ying, et al. A method for spatio-temporal process assessment of eco-geological environmental security in mining areas using catastrophe theory and projection pursuit model [J]. Progress in Physical Geography (Earth and Environment), 2021,45(5):647-668.
- [10] 石丹,关婧文,刘吉平.基于 DPSIR-EES 模型的旅游型城镇生态安全评价研究[J].生态学报,2021,41(11):4330-4341.
- [11] 李强华,闫靖勇.基于 DPSIR 模型的三亚市海岸带生态安全评价[J].海洋湖沼通报,2021,43(4):147-154.
- [12] Zhang Jingshen, Gao Jingqing. Lake ecological security assessment based on SSWSSC framework from 2005 to

- 2013 in an interior lake basin, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(10):888.
- [13] 李恒凯,刘玉婷,李芹,等.基于MCR模型的南方稀土矿区生态安全格局分析[J].*地理科学*,2020,40(6):989-998.
- [14] Ghosh S, Das Chatterjee N, Dinda S. Urban ecological security assessment and forecasting using integrated DEMATEL-ANP and CA-Markov models: A case study on Kolkata Metropolitan Area, India [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 68:102773.
- [15] 谭吉玉,刘高常.基于小波支持向量机模型的矿区生态安全评价方法研究[J].*黄金科学技术*,2020,28(6):902-909.
- [16] 赵杨秋,何刚,王莹莹,等.基于BP神经网络的工业生态安全动态评价及障碍因子诊断[J].*水土保持通报*,2021,41(3):127-136.
- [17] 李蕊,陈国清,李玮贤,等.基于遥感生态指数的神东矿区1995—2020年生态环境质量的时空变化特征分析[J].*水土保持通报*,2021,41(3):143-151.
- [18] 张合兵,张克,刘培,等.基于RS和GIS的矿区生态指标提取与安全评价:以焦作矿区为例[J].*煤炭科学技术*,2020,48(4):80-88.
- [19] 陈勇,甘勇,苗作华,等.基于云模型的地下铁矿区生态风险模糊综合评价[J].*武汉科技大学学报*,2016,39(4):289-294.
- [20] 法子薇,李新春.基于云模型的煤矿资源型城市生态风险评价研究[J].*科技管理研究*,2021,41(9):190-194.
- [21] 徐钰德,刘子金,黄嵩,等.干旱区人工绿洲水土生态环境安全演变分析[J].*水利水电技术(中英文)*,2021,52(1):105-115.
- [22] 叶辉,王金亮,赵娟娟.基于DPSIR-EES模型的北回归线(云南段)生态安全评价[J].*水土保持研究*,2021,28(3):291-298.
- [23] 吕广斌,廖铁军,姚秋昇,等.基于DPSIR-EES-TOPSIS模型的重庆市土地生态安全评价及其时空分异[J].*水土保持研究*,2019,26(6):249-258.
- [24] 江孝君,杨青山,耿清格,等.长江经济带生态—经济—社会系统协调发展时空分异及驱动机制[J].*长江流域资源与环境*,2019,28(3):493-504.
- [25] 贡力,逯晔坤,靳春玲,等.基于改进G1-和谐度方程的兰州市水生态文明评价[J].*水资源与水工程学报*,2019,30(6):6-11.
- [26] 么泽恩,蔡海生,张学玲,等.基于CRITIC-TOPSIS模型的浮梁县土地生态安全时空分异及其障碍因素分析[J].*长江流域资源与环境*,2021,30(10):2452-2463.
- [27] 林文豪,陈梅倩,周礼刚,等.一种区间Pythagorean模糊VIKOR多属性群决策方法[J].*运筹与管理*,2021,30(3):57-64.
- [28] 杨海燕,孙晓博,程小文,等.基于VIKOR法的潍坊市水资源承载力综合评价[J].*环境科学学报*,2020,40(2):716-723.
- [29] 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.
- [30] 吕广斌,廖铁军,姚秋昇,等.基于DPSIR-EES-TOPSIS模型的重庆市土地生态安全评价及其时空分异[J].*水土保持研究*,2019,26(6):249-258.

(上接第160页)

- [14] 李志亮,仲跻文.生化需氧量、化学需氧量、高锰酸盐指数三者关系简析[J].*水利技术监督*,2015,23(1):5-6.
- [15] 王丹凤.新时期陕西省煤炭资源勘查开发布局研究[J].*中国煤炭*,2021,47(12):1-6.
- [16] 陕西省第二次全国污染源普查工作办公室.陕西省第二次全国污染源普查图集[M].陕西西安:三秦出版社,2020.
- [17] 白广禄.陕西省地方性氟中毒与地理因素的关系[J].*中国地方病学杂志*,1997,16(1):57-59.
- [18] 王德耀.陕西秦岭以北地区高氟地下水的成因与防治研究[J].*陕西师范大学学报(自然科学版)*,2004,32(3):112-115.
- [19] 韩东阳.变化环境下非一致性水文干旱不确定性分析[D].河南郑州:华北水利水电大学,2019.
- [20] 尹吉国,于福亮,李传哲.北洛河天然年径流特性分析[J].*人民黄河*,2008,30(4):25-27.
- [21] 王德慈.沮河水容量与总量控制研究[D].陕西西安:西北大学,2012.
- [22] 高莹,孙喜军,吕爽,等.陕西省化肥施用时空分异及面源污染环境风险评价[J].*西北农林科技大学学报(自然科学版)*,2021,49(2):76-83.