“双碳”目标下广西采掘业绿色低碳发展水平及影响因素分析*

王伟[1,2,3]，王国强[4]，刘翔[1,2,3]，李奇[5]

（1.广西科技大学 经济与管理学院， 广西 柳州市 545006；
2.广西新型工业化研究中心， 广西 柳州市 545006；
3.广西工业高质量发展研究中心， 广西 柳州市 545006；
4.山西师范大学 地理科学学院， 山西 太原 030031；
5.广西科技大学 土木建筑工程学院， 广西 柳州市 545006）

摘要：采掘业绿色低碳转型是实现高质量发展的关键环节。在“双碳”目标视域下，从经济发展、生产规模、环境压力和低碳水平等四方面构建绿色低碳发展水平评价指标体系，通过博弈论组合赋权法及改进云熵的云物元模型，对广西采掘业绿色低碳发展水平进行评价，并结合灰色关联度及障碍因子进一步剖析其影响因素。研究结果表明，2005—2022年广西采掘业绿色低碳发展水平评价等级经历了先缓慢上升后下降再上升并趋于稳定的过程，从落后阶段（Ⅳ）逐步提升至推进阶段（Ⅱ），整体波动明显。此外，灰色关联度结果表明，采掘业大型矿山企业占比、采掘业发展水平及采掘业发展潜力为关键影响因素，灰色关联度分别为0.862 3，0.808 7，0.793 8。障碍因子呈阶段性变化，2005—2018年低碳水平和环境压力对绿色低碳发展水平阻碍较大，而2018—2022年经济发展阻碍度更显著。研究结果可为采掘业绿色低碳转型提供参考。

关键词：采掘业；绿色低碳发展水平；评价指标体系；影响因素；障碍因子

中图分类号：X322；F426　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1005-2763(2026)01-0204-13

Analysis on Green and Low-Carbon Development Level and Influencing Factors of Guangxi Mining Industry Under the “Double Carbon” Goal

WANG Wei[1,2,3], *WANG Guoqiang*[4], *LIU Xiang*[1,2,3], *LI Qi*[5]

(1.School of Economic and Management, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou, Guangxi 545006, China;
2.Guangxi Research Center for New-Type Industrialization, Liuzhou, Guangxi 545006, China;
3.Research Center for High-Quality Industrial Development of Guangxi, Liuzhou, Guangxi 545006, China;
4.College of Geographical Sciences, Shanxi Normal University, Taiyuan, Shanxi 030031, China;
5.School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou, Guangxi 545006, China)

Abstract: Green and low-carbon transformation of the mining industry is a key link for achieving high-quality development. From the perspective of the “Double Carbon” goal, an evaluation index system for the green and low-carbon development level was constructed from four aspects: economic development, production scale, environmental pressure, and low-carbon level. Through the game theory combination weighting method and the cloud matter-element model with improved cloud entropy, the green and low-carbon development level of Guangxi mining industry was evaluated, and its influencing factors were further analyzed in combination with the grey correlation degree and obstacle factors. The research results show that, from 2005 to 2022, the evaluation grade of the green and low-carbon development level of Guangxi mining industry experiences a process of first rising slowly, then declining, then rising again and tending to stabilize, gradually improving from the backward stage (Ⅳ) to the advancing stage (Ⅱ), with obvious overall fluctuations. Besides, the grey correlation degree results show that the proportion of large-scale mining enterprises in the mining industry, the development level and development potential of the mining industry are key influencing factors, with grey correlation degrees of 0.862 3, 0.808 7 and 0.793 8 respectively. The obstacle factors show phased changes. From 2005 to 2018, low-carbon level and environmental pressure exert a greater hindrance to the green and low-carbon development level, while the hindrance degree of economic development is more significant from 2018 to 2022. The research results can provide a reference for the green and low-carbon transformation of the mining industry.

* **收稿日期**：2025-01-12

基金项目：广西科技计划项目（桂科 AD21220147，桂科 AD21220109）；广西哲学社会科学课题（24GLF002）；广西工业高质量发展研究中心开放基金项目（23GXGY33）；广西科技大学博士基金项目（校科博 20S10，校科博 21Z29）

作者简介：王伟（2000—），男，河北邯郸人，硕士研究生，研究方向为决策科学与技术。E-mail：ww15231858698@163.com

通信作者：刘翔（1991—），男，湖南湘潭人，博士，副教授，研究方向为矿业技术经济。E-mail：LiuX_600@163.com

Key words: Mining industry, Green and low-carbon development level, Evaluation index system, Influencing factor, Obstacle factor

0 引言

气候变化对全球生态环境构成严峻挑战，《巴黎协定》旨在减少温室气体排放，将全球变暖控制在 2 ℃以内。我国在 2020 年提出“双碳”目标，并在党的二十大进一步强调工业领域降污减排的重要性。采掘业作为高能耗、高排放的基础性工业产业，在实现“双碳”目标中具有重要战略意义[1]。2020 年，我国采掘业能源消耗总量占工业总量的 5.25%，碳排放量达 2.63 亿 t[2]，导致粗放开采、优矿贱用等问题日益突出[3]。因此，推动采掘业绿色低碳发展已成为矿业行业经济高质量发展的核心需求和发展新质生产力的有效保障。

广西成矿地质条件优越，矿产资源相对丰富。近年来，随着《广西壮族自治区矿产资源总体规划(2021—2025 年)》等一系列政策文件提出全面推进生态文明建设、推动采掘业绿色低碳发展的要求，对进一步厘清当前广西采掘业绿色低碳发展水平及影响因素具有重要意义。

当前研究认为，采掘业绿色低碳发展水平呈现波动上升趋势[4]，主要体现在碳排放核算[5]、绿色低碳水平评估[6-7]、时空演变分析[8]及识别关键影响因素等[9]方面。其中绿色低碳评价主要包括多指标综合测度[10]、典型要素绩效评价[11-12]及多维度指数评价[13]。例如，LUO 等[14]通过绿色发展指数对中国采掘业绿色发展水平进行测度，发现绿色发展水平存在非周期波动。XUE 等[15]采用三阶段动态网络评估中国采掘业绿色发展水平，得出整体效率呈现先下降后反弹的趋势。此外，一些研究认为影响采掘业绿色低碳发展的因素主要涉及创新技术[16]、能源强度[17]、政府调控[18]和经济发展[19]等方面。然而，这些研究往往局限于单一指标，难以全面衡量多维度因素的综合影响，同时缺乏对环境因素所产生影响的考量。例如，PANG 等[20]利用绿色增长指数，从经济投入分析绿色发展水平。CAI 等[21]采用带面板回归模型分析政策对绿色发展水平的影响。

以往学者们虽在采掘业绿色低碳发展方面取得了较好的研究结果，但传统评价方法仍然存在数据处理模糊、不确定性高等问题。同时，在绿色低碳循环发展的“总蓝图”下，生态环境和降污减排等因素对绿色发展的影响不可忽视。因此，本文构建了涵盖经济发展、生产规模、环境压力、低碳水平等四个维度的采掘业绿色低碳发展水平评价指标体系，从直接和间接两方面核算了碳排放指标数据；运用博弈论方法对指标进行组合赋权，结合改进云熵的云物元模型，对 2005—2022 年广西采掘业绿色低碳发展水平进行分级评价；以灰色关联度和障碍度为研判标准，识别影响和制约采掘业绿色低碳发展的关键因素，以期为采掘业绿色低碳发展提供科学依据。

1 研究方法与数据来源

1.1 评价指标体系构建

通过梳理相关政策、既往研究成果[22-23]，并结合广西采掘业实际，构建绿色低碳发展水平评价指标体系(见表 1)。该体系包括目标层、准则层和指标层，把绿色低碳发展水平归纳为经济发展(X_1)、生产规模(X_2)、环境压力(X_3)和低碳水平(X_4)四方面。

表 1 采掘业绿色低碳发展水平评价指标体系

Table 1 Evaluation index system for green and low-carbon development level of mining industry

目标层	准则层	指标层	属性	解释
采掘业绿色低碳发展水平评价指标	经济发展(X_1)	采掘业发展水平(X_{11})/%	正	广西采掘业生产总值与工业生产总值之比，反映采掘业发展水平。
		采掘业科技投入(X_{12})/%	正	科技投入总值与固定资产总值之比，反映采掘业科技创新水平。
		采掘业外商资本(X_{13})/%	正	外商投资与固定资产之比，反映采掘业开放水平。
		采掘业发展潜力(X_{14})/%	正	当年生产总值与上年生产总值之比，反映采掘业发展潜力。
	生产规模(X_2)	采掘业大型矿山企业占比(X_{21})/%	正	大型矿山企业与矿山企业之比，反映采掘业核心企业水平。
		采掘业就业人数(X_{22})/万人	负	广西采掘业就业人数，反映广西采掘业就业水平。
		采掘业矿石产量(X_{23})/亿 t	负	广西采掘业年矿石产量，反映采掘业生产水平。
	环境压力(X_3)	采掘业可持续水平(X_{31})/%	正	年新增土地恢复面积与累计损毁面积之比，反映采掘业土地复垦情况。
		采掘业矿山治理投入(X_{32})/%	正	矿山治理投资与固定资产总值之比，反映采掘业环境治理力度。
		采掘业 SO_2 排放(X_{33})/万 t	负	SO_2 排放总量，反映采掘业空气污染情况。
	低碳水平(X_4)	采掘业碳排放强度(X_{41})/(t/万元)	负	CO_2 排放总量与生产总值之比，反映采掘业单位产值碳排放情况。
		采掘业单位产值能耗(X_{42})/(t/万元)	负	能源消耗总量与生产总值之比，反映采掘业单位产值能源消耗情况。
		采掘业碳排放规模(X_{43})/(t/万元)	负	广西采掘业碳排放总量，反映采掘业碳排放水平。

根据广西绿色低碳发展要求,参考相关资料、文件要求[24-25],对评价指标进行分级,将其由高到低划分为4个等级:成熟阶段(Ⅰ)、推进阶段(Ⅱ)、起步阶段(Ⅲ)、落后阶段(Ⅳ),具体分级标准见表2。

表2 采掘业绿色低碳发展水平评价指标分级

Table 2 Evaluation index classifcation for green and low-carbon development level of mining industry

指标层	评价等级			
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
X_{11}	[3,5]	[2,3)	[1,2)	[0,1)
X_{12}	[0.9,1.5]	[0.6,0.9)	[0.3,0.6)	[0,0.3)
X_{13}	[3,6]	[1,3)	[0.4,1)	[0,0.4)
X_{14}	[50,100]	[25,50)	[0,25)	[−50,0)
X_{21}	[20,40]	[10,20)	[1,10)	[0,1)
X_{22}	[0,4]	(4,5]	(5,6]	(6,8]
X_{23}	[7,10]	[5,7)	[2,5)	[0,2)
X_{31}	[6,10]	[3,6)	[1,3)	[0,1)
X_{32}	[3,5]	[2,3)	[1,2)	[0,1)
X_{33}	[0,500]	(500,1 500]	(1 500,3 000]	(3 000,4 500]
X_{41}	[0,0.5]	(0.5,1]	(1,2]	(2,4]
X_{42}	[0,0.15]	(0.15,0.3]	(0.3,0.8]	(0.8,1.5]
X_{43}	[0,300]	(300,400]	(400,500]	(500,600]

1.2 碳排放核算

在采掘业绿色低碳发展水平评价指标体系中,由于缺乏已知的采掘业碳排放规模指标数据,为体现绿色低碳发展理念,从能源消耗和环境破坏两方面进行核算,旨在为低碳水平(X_4)的准则层提供准确数据支撑。

1.2.1 直接碳排放

根据联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)的碳排放核算体系[26],直接碳排放量由能源消耗量与相应的碳排放因子相乘计算,如公式(1)所示。

$$C_{\text{eng}}=\sum_{g=1}^{11}(E_g\times NCV_g\times\alpha_g\times\beta_g)\times\frac{44}{12} \quad (1)$$

式中:C_{eng} 表示采掘业碳排放总量,t;E_g 为采掘业第g类能源的消耗量,t;NCV_g 为第g类能源的平均低位净热值,kJ/kg;α_g 为第g类能源的单位热值含碳量,kg/kJ;β_g 为第g类能源的碳氧化率,%;44/12为二氧化碳与碳的分子量比;$(NCV_g\times\alpha_g\times\beta_g)\times44/12$ 为第g类化石燃料的碳排放因子,t/t。

1.2.2 间接碳排放

间接碳排放包括电能碳排放和环境破坏导致的碳汇损失。电能为二次能源,取南方区域电网电量边际排放因子为0.804 2 kg/(kW·h)[26]。而矿山开采会破坏原有地形和植被,使土地利用类型改变,如林地、耕地、草地等转变为采矿用地,造成大量碳吸收能力损失[27]。间接碳排放量计算公式如下:

$$C_{\text{ind}}=C_{\text{ele}}+C_{\text{soil}}=E_{\text{ele}}\times F_{\text{ele}}+M\times S \quad (2)$$

式中:C_{ind} 为间接碳排放量,t;C_{ele} 为电能碳排放量,t;E_{ele} 为电能能源消耗总量,kW·h;F_{ele} 为电能碳排放因子,kg/(kW·h);C_{soil} 为土地碳汇损失量,t;M 为采掘业土地损毁面积,m^2;S 为平均土壤有机物含碳量,kg/m^2,参考陈曦[28]的研究,广西的平均土壤有机物含碳量 $S=3.33\ kg/m^2$。

1.3 综合赋权法

针对采掘业绿色低碳发展水平评价的特点,权重的确定既要满足广西采掘业发展特点,融入主观判断,又应兼备客观性的需要。本文首先采用属性层次法(AHM)对指标进行主观赋权,其次通过变异系数法对指标进行客观赋权,最后运用博弈论方法进行组合赋权,既方便计算,又具备科学性。

AHM是在层次分析法(AHP)基础上建立的一种算法,在具备AHP优点的同时,还具有简单快捷、不需要计算特征向量和检验一致性的特点。一般情况下,需要借助AHP的判断矩阵转化得出AHM比较判断矩阵[29],从而计算出主观权重 $\boldsymbol{w}_{\text{G}}$。

变异系数法是利用评价指标包含的信息得到各指标的权重。变异系数越大表明指标的影响越大,即重要度越高。通过计算平均值、标准差,得出变异系数[30],最后进行归一化处理得到客观权重 $\boldsymbol{w}_{\text{B}}$。

为克服单一赋权方法的片面性,兼顾主、客观两方面因素,本文利用博弈论的思想对主、客观权重进行组合赋权,保证各指标权重在整体上协调、均衡,使得共同利益最大化[31],具体步骤如下。

假设广西采掘业绿色低碳发展水平评价的各指标权重采用L种方法进行计算,求得权重集为 $\boldsymbol{w}_k=[\boldsymbol{w}_{k1},\boldsymbol{w}_{k2},\cdots,\boldsymbol{w}_{kn}](k=1,2,\cdots,L)$,则线性组合系数为 $\boldsymbol{a}=[\boldsymbol{a}_1,\boldsymbol{a}_2,\boldsymbol{a}_3,\cdots,\boldsymbol{a}_L]$,$L$个向量的综合权重 $\boldsymbol{w}$ 见公式(3):

$$\boldsymbol{w}=\sum_{k=1}^{L}\boldsymbol{a}_k\boldsymbol{w}_k^{\text{T}},\ \boldsymbol{a}_k>0 \quad (3)$$

对公式(3)中系数 $\boldsymbol{a}_k$ 求解优化,使 $\boldsymbol{w}$ 与 $\boldsymbol{w}_k$ 的离差极小化,由此得到:

$$\min\left\|\sum_{k=1}^{L}\boldsymbol{a}_k\boldsymbol{w}_k^{\text{T}}-\boldsymbol{w}_k\right\|_2,(k=1,2,\cdots,L) \quad (4)$$

将公式(4)转化为线性方程组,见公式(5):

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{w}_1 \cdot \boldsymbol{w}_1^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{w}_1 \cdot \boldsymbol{w}_2^{\mathrm{T}} & \cdots & \boldsymbol{w}_1 \cdot \boldsymbol{w}_L^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{w}_2 \cdot \boldsymbol{w}_1^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{w}_2 \cdot \boldsymbol{w}_2^{\mathrm{T}} & \cdots & \boldsymbol{w}_2 \cdot \boldsymbol{w}_L^{\mathrm{T}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \boldsymbol{w}_L \cdot \boldsymbol{w}_1^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{w}_L \cdot \boldsymbol{w}_2^{\mathrm{T}} & \cdots & \boldsymbol{w}_L \cdot \boldsymbol{w}_L^{\mathrm{T}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{a}_1 \\ \boldsymbol{a}_2 \\ \vdots \\ \boldsymbol{a}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{w}_1 \cdot \boldsymbol{w}_1^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{w}_2 \cdot \boldsymbol{w}_2^{\mathrm{T}} \\ \vdots \\ \boldsymbol{w}_L \cdot \boldsymbol{w}_L^{\mathrm{T}} \end{bmatrix} \tag{5}$$

对公式(5)进行计算，得到系数 $\boldsymbol{a}_k$，则评价指标综合权重 $\boldsymbol{\omega}^*$ 的计算公式见式(6)：

$$\begin{cases} \boldsymbol{\omega}^* = \sum_{k=1}^{L} \boldsymbol{a}_k^* \boldsymbol{w}_k^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{a}_k^* = \dfrac{\boldsymbol{a}_k}{\sum_{k=1}^{L} \boldsymbol{a}_k} \end{cases} \tag{6}$$

式中：$\boldsymbol{\omega}^*$ 为综合权重；$\boldsymbol{a}_k^*$ 为归一化处理结果。

1.4　改进云熵的云物元模型

1.4.1　云物元基本形式

使用物元分析方法对事物 $\boldsymbol{R}$ 进行分析时，通常将事物表示为 $\boldsymbol{R}=(N, c, v)$，其中 $\boldsymbol{R}$ 为基本元，N、c、v 为物元要素，分别代表事物、事物特征、事物关于特征的量值[32]。采用云模型中的(E_{x}, E_{n}, H_{e})代替关系元 v，构建云物元模型，见公式(7)：

$$\boldsymbol{R} = \begin{pmatrix} R_1 \\ \vdots \\ R_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N & c_1 & (E_{\mathrm{x}1}, E_{\mathrm{n}1}, H_{\mathrm{e}1}) \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & (E_{\mathrm{x}n}, E_{\mathrm{n}n}, H_{\mathrm{e}n}) \end{pmatrix} \tag{7}$$

以最大值和最小值的中值作为期望 E_{x}，即通过 $(c_{\min}+c_{\max})/2$ 来计算。超熵 H_{e} 用于度量熵的不确定性，体现云层的厚度，本研究取 $H_{\mathrm{e}}=E_{\mathrm{n}}/10$[33]。

1.4.2　云熵优化算法

在绿色低碳发展水平评价中，计算云模型的特征值非常重要。在传统的云物元模型中，将评价指标的经典域区间[$c_{\min}$, $c_{\max}$]转换为云模型描述时，E_{n} 则通常利用“$3E_{\mathrm{n}}$”规则或者基于“50% 相关性”规则计算，但运用此公式生成隶属云后，等级边界处的分隔较为清晰，适用于严格区分的概念。故为了兼顾等级划分的分明性和云边界的模糊性，采用云熵优化算法来解决熵的取值问题，该算法具有自适应评估目标的特点。

从云关联度来看，函数 $u(x)$ 可以看做一个单调递增函数，则该函数的自变量满足 $E_{\mathrm{n}'}^{(j)} < E_{\mathrm{n}''}^{(j)}$。基于上述研究，定义 $u(x)'^{(j)}_{\min}$ 为根据“$3E_{\mathrm{n}}$”规则计算得到的相应等级 j 的最小关联度，$u(x)''^{(j)}_{\max}$ 为根据“50% 相关性”规则生成的相应等级 j 的最大关联度。采用云熵优化算法计算得出等级 j 的关联度为 $u(x)^{(j)}$，并且 $\Delta u(x)^{(j)}_{\max}$ 表示等级 j 关联度的最大偏差。构造的函数见公式(8)：

$$\Delta u(x)^{(j)}_{\max} = (\Delta u(x)''^{(j)}_{\max} - \Delta u(x)^{(j)})^2 + (\Delta u(x)^{(j)} - \Delta u(x)'^{(j)}_{\min}) \tag{8}$$

根据最小化最大化极差原则，针对标准的 m 组分层云模型，使指标观测值 x_i 的最大相关偏差之和最小化。据此，构建关于 $\Delta u(x)$ 的非线性决策模型，见公式(9)：

$$\begin{cases} \min \Delta u(x)_{\max}(E_{\mathrm{n}}) = \sum_{j=1}^{J} \Delta u(x)^{(j)}_{\max} \\ \text{s.t. } E_{\mathrm{n}'}^{(j)} \leqslant E_{\mathrm{n}}^{(j)} \leqslant E_{\mathrm{n}''}^{(j)} \end{cases} \tag{9}$$

根据上述计算过程，求得最优云熵集 $E_{\mathrm{n}} = (E_{\mathrm{n}}^{(j)}{}_{1\times m})$。

1.4.3　云关联度计算

绿色低碳发展水平评价指标的每个样本数据 x 为一个云滴，生成期望为 E_{x}、标准差为 H_{e} 的正态随机数 E'_{n}。经过多次生成计算，得到云滴的关联度 $\mu(x)$，见公式(10)。

$$\mu(x) = \exp\left[\frac{-(x-E_{\mathrm{x}})^2}{2(E'_{\mathrm{n}})^2}\right] \tag{10}$$

针对综合关联度和评估等级判定，j 等级的综合关联度的计算公式见式(11)：

$$\mu_j(R_i) = \sum_{s=1}^{n} \boldsymbol{\omega}_{i,s}^* \mu_j(I_{i,s}) \tag{11}$$

式中：$\mu_j(R_i)$ 为第 i 个准则层对第 j 个等级的综合关联度；$\boldsymbol{\omega}_{i,s}^*$ 为第 s 个指标的综合权重；$\mu_j(I_{i,s})$ 为第 s 个指标对第 j 个等级的关联度。

评估等级的最终判定依据基于最大隶属度原则，当综合评价等级为 $t=\max\mu_j(\boldsymbol{R})$ 时，评估对象的等级为 t。

1.5　灰色关联度模型

在广西采掘业绿色低碳发展水平评价体系中，厘清对绿色低碳发展水平具有较大影响的因素是本研究的重点。采用灰色关联度模型测算目标层的灰色关联度，得出影响绿色低碳发展水平的关键因素。

$$P_{i,j} = \frac{\min_i \min_s |X_i(s)-Y_0(s)| + \rho \max_i \max_s |X_i(s)-Y_0(s)|}{|X_i(s)-Y_0(s)| + \rho \max_i \max_s |X_i(s)-Y_0(s)|} \tag{12}$$

式中：$P_{i,j}$ 为灰色关联系数；X_i 和 Y_0 分别表示比较数列和参考数列；$\min_i \min_s |X_i(s)-Y_0(s)|$ 和 $\max_i \max_s |X_i(s)-Y_0(s)|$ 分别表示比较数列和参考数列的最小绝对值差和最大绝对值差；ρ 为分辨系数，参考张梦瑶等[34]的研究，取 0.8。

将综合权重乘以灰色关联系数，计算得出灰色

关联度 P_i,见公式(13):

$$P_i=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\omega_{i,s}^{*}\cdot P_{i,j} \tag{13}$$

1.6 障碍度模型

相较于关联度模型侧重识别关键影响因素,障碍度模型则强调制约发展的主要障碍,二者共同为理解广西采掘业绿色低碳发展水平提供更全面的视角。为深入探讨广西采掘业绿色低碳发展水平的主要障碍因子,通过障碍度模型计算指标层和准则层的障碍度,以评估其对绿色低碳发展水平的制约程度。指标障碍度越高,表明该指标对绿色低碳发展水平的负面影响越大[35]。主要计算公式如下:

$$F_s=W_i\cdot P_{i,s} \tag{14}$$

$$I_s=1-R'_s \tag{15}$$

$$O_s=\frac{F_s\times I_s}{\sum_{s=1}^{n}(F_s\times I_s)}\times 100\% \tag{16}$$

$$U_i=\sum_{s=1}^{n}O_s \tag{17}$$

式中:F_s 为指标贡献度;W_i 为准则层权重;$P_{i,s}$ 为指标层权重;I_s 为指标偏离度;R'_s 为指标标准化值;O_s 为指标层障碍度;U_i 为准则层障碍度。

1.7 数据来源

本研究选取 2005—2022 年广西采掘业数据作为样本。数据主要来源于《广西统计年鉴》《中国工业统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国自然资源统计年鉴》以及《广西壮族自治区生态环境状况公报》等。其中,采用插补法补全 2018 年广西采掘业数据中的部分缺失值。

2 结果与分析

2.1 碳排放量变化趋势

通过公式(1)和公式(2)对广西采掘业直接碳排放与间接碳排放进行核算后,得出碳排放核算结果,具体见表 3。可以发现,广西采掘业碳排放总量整体呈现波动上升的趋势。具体而言,碳排放总量由 2005 年的 239.90 万 t 增长至 2022 年的 506.67 万 t,年均增速约为 4.3%。从碳排放构成来看,电能消耗是间接碳排放的主要来源,在 2005—2022 年期间,电能碳排放量占碳排放总量的年均比例为 42.21%。随着广西持续优化能源消耗结构,电能消耗比例呈现逐步提升的趋势。此外,土地碳汇损失导致的间接碳排放量占碳排放总量的年均比例为 32.05%,表明矿山开采活动对地质环境的破坏对碳排放的长期影响不容忽视。相比之下,直接碳排放量占碳排放总量的年均比例为 25.74%,总体较为稳定,表明传统能源的利用在短期内仍难以被全面替代。

表 3 碳排放核算结果

Table 3 Carbon emissions accounting results

年份	直接碳排放量/万 t	间接碳排放量		碳排放总量/万 t	碳排放强度/(t/万元)
		电能碳排放量/万 t	土地碳汇损失量/万 t		
2005	37.670 8	133.175 5	69.050 9	239.897 2	3.654 2
2006	49.530 9	126.339 8	68.404 9	244.275 6	2.813 9
2007	114.338 4	147.972 8	65.118 2	327.429 3	2.053 1
2008	150.416 9	145.077 7	66.933 0	362.427 6	1.707 4
2009	95.836 9	132.049 6	45.023 0	272.909 6	1.255 7
2010	101.756 8	152.074 2	189.459 7	443.290 7	1.288 8
2011	114.769 0	184.966 0	185.772 3	485.507 4	0.943 9
2012	107.720 5	154.245 6	199.748 9	461.714 9	0.757 3
2013	105.668 5	162.046 3	208.806 3	476.521 0	0.638 2
2014	105.140 2	162.046 3	211.703 4	478.889 8	0.585 9
2015	102.205 5	165.504 4	212.374 9	480.084 8	0.570 3
2016	116.930 4	115.081 0	214.309 2	446.320 6	0.537 3
2017	140.020 1	178.773 7	216.618 7	535.412 5	0.610 5
2018	116.570 6	233.459 3	118.351 5	468.381 4	0.779 6
2019	125.571 8	270.452 5	118.352 1	514.376 4	0.953 0
2020	132.198 0	238.445 3	123.552 6	494.196 0	0.903 4
2021	126.627 5	245.441 8	116.848 6	488.918 0	0.818 0
2022	132.200 7	257.344 0	117.122 8	506.667 5	0.874 3

碳排放强度反映单位产值的碳排放量,更能体现行业的低碳发展水平。广西采掘业碳排放强度整体呈现波动下降的趋势,由 2005 年的 3.65 t/万元下降至 2022 年的 0.87 t/万元。这表明在碳排放持续增长的同时,采掘业的经济发展效率显著提升,碳排放与经济产出的脱钩程度逐步提高。值得注意的是,2016 年碳排放强度降至最低值(0.54 t/万元)后开始缓慢回升,反映出广西采掘业发展面临瓶颈。传统的开采方式已难以满足实际需求,应改变过去“大矿小开、一矿多开”的局面,推动矿产资源规模化开采水平的提升[36]。同时,应优化资源开采流程,从工艺上减少能源消耗,以实现广西采掘业的绿色低碳转型。

2.2 博弈论综合赋权结果分析

根据表 1 的评价指标体系,结合广西采掘业绿色低碳发展特性及相关研究[22],通过 AHM 计算确

定评价指标的主观权重 w_G（B 为准则层权重；B_1～B_4 分别为 X_1～X_4 下各指标层权重），具体见表 4。

表 4　AHM 指标主观权重

Table 4　Subjective weights of AHM index

判断矩阵	指标主观权重			
	w_{G1}	w_{G2}	w_{G3}	w_{G4}
B	0.200 5	0.139 5	0.285 5	0.374 6
B_1	0.355 9	0.219 8	0.153 1	0.267 2
B_2	0.455 4	0.215 2	0.329 4	—
B_3	0.428 4	0.230 7	0.341 0	—
B_4	0.401 7	0.263 3	0.335 0	—

通过变异系数法计算求得各指标的客观权重 w_B。将 w_G 和 w_B 通过博弈论综合赋权代入博弈论模型，计算得出各指标的综合权重 ω^*，具体见表 5。可以发现，通过博弈论综合赋权后，综合权重较大的 4 个指标依次是 X_{21}、X_{41}、X_{14}、X_{31}。

2.3　绿色低碳发展水平测度

依据公式(9)及云参数计算，得出广西采掘业绿色低碳发展水平评价的云参数矩阵 R（见式(18)），并绘制了部分指标的云滴图，如图 1 所示。云滴图可以直观地展示指标的等级隶属情况。

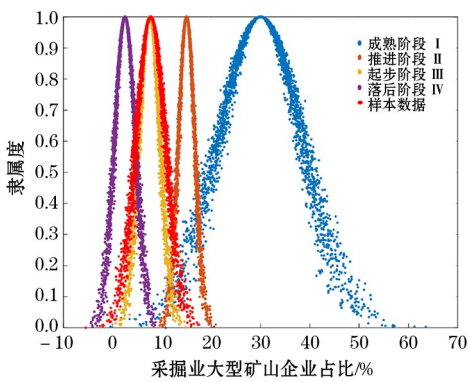
表 5　采掘业绿色低碳发展水平各指标的综合权重

Table 5　Comprehensive weights of each index for green and low-carbon development level of mining industry

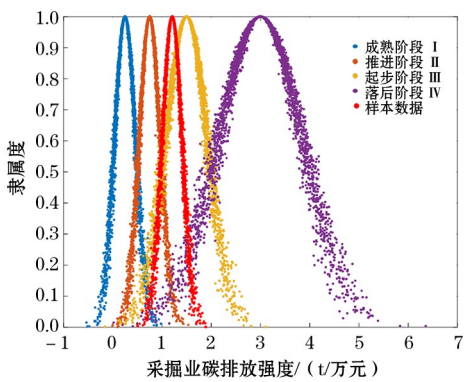
赋权方法	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{31}	X_{32}	X_{33}	X_{41}	X_{42}	X_{43}
变异系数法	0.016 6	0.048 6	0.107 5	0.142 6	0.167 4	0.024 5	0.067 4	0.084 0	0.077 9	0.079 8	0.066 1	0.096 8	0.020 9
博弈论	0.041 2	0.046 6	0.073 0	0.102 6	0.120 7	0.027 0	0.057 8	0.101 2	0.072 5	0.087 7	0.104 1	0.097 7	0.067 9

$$R=\begin{bmatrix} & \text{Ⅰ} & \text{Ⅱ} & \text{Ⅲ} & \text{Ⅳ} \\ X_{11} & (4,0.849\,3,0.084\,9) & (2.5,0.424\,6,0.042\,5) & (1.5,0.424\,6,0.042\,5) & (0.5,0.424\,6,0.042\,5) \\ X_{12} & (1.2,0.254\,8,0.025\,5) & (0.75,0.127\,4,0.012\,7) & (0.45,0.127\,4,0.012\,7) & (0.15,0.127\,4,0.012\,7) \\ X_{13} & (4.5,1.273\,9,0.127\,4) & (2,0.849\,3,0.084\,9) & (0.7,0.254\,8,0.025\,5) & (0.2,0.169\,9,0.017) \\ X_{14} & (75,21.231\,4,2.123\,1) & (37.5,10.615\,7,1.061\,6) & (12.5,10.615\,7,1.061\,6) & (-25,21.231\,4,2.123\,1) \\ X_{21} & (30,8.492\,6,0.849\,3) & (15,1.666\,7,0.166\,7) & (7.5,2.123\,1,0.212\,3) & (2.5,2.123\,1,0.212\,3) \\ X_{22} & (2,1.698\,5,0.169\,9) & (4.5,0.424\,6,0.042\,5) & (5.5,0.424\,6,0.042\,5) & (7,0.849\,3,0.084\,9) \\ X_{23} & (8.5,1.273\,9,0.127\,4) & (6,0.849\,3,0.084\,9) & (3.5,1.273\,9,0.127\,4) & (1,0.849\,3,0.084\,9) \\ X_{31} & (8,1.698\,5,0.169\,9) & (4.5,1.273\,9,0.127\,4) & (2,0.849\,3,0.084\,9) & (0.5,0.424\,6,0.042\,5) \\ X_{32} & (4,0.849\,3,0.084\,9) & (2.5,0.424\,6,0.042\,5) & (1.5,0.424\,6,0.042\,5) & (0.5,0.424\,6,0.042\,5) \\ X_{33} & (250,83.333\,3,8.333\,3) & (1\,000,166.666\,7,16.666\,7) & (2\,250,250,25) & (3\,750,250,25) \\ X_{41} & (0.25,0.212\,3,0.021\,2) & (0.75,0.212\,3,0.021\,2) & (1.5,0.424\,6,0.042\,5) & (3,0.849\,3,0.849\,3) \\ X_{42} & (0.075,0.063\,7,0.006\,4) & (0.225,0.063\,7,0.006\,4) & (0.55,0.212\,3,0.021\,2) & (1.15,0.297\,2,0.029\,7) \\ X_{43} & (150,50,5) & (350,16.666\,7,1.666\,7) & (450,42.462\,8,4.246\,3) & (550,16.666\,7,1.666\,7) \end{bmatrix} \tag{18}$$

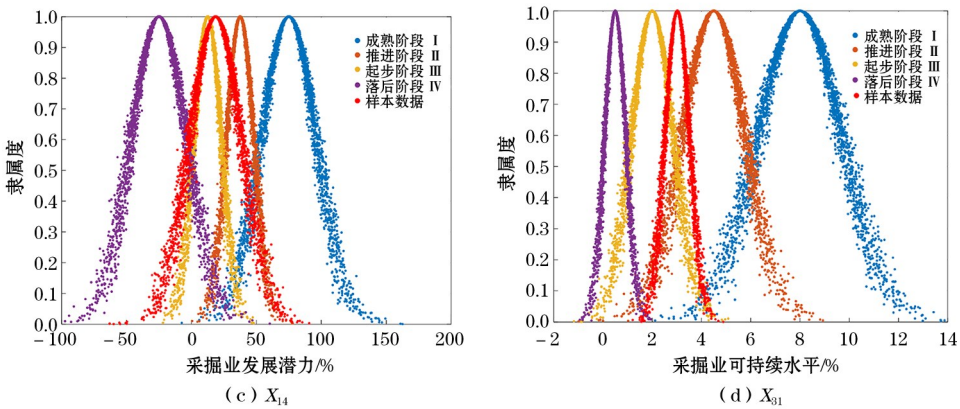
通过图 1 可以发现，广西采掘业大型矿山企业占比 X_{21} 的云滴绝大多数落入等级Ⅲ的标准云区域，通过优化云熵算法计算样本数据云滴落入不同等级的贡献度，可以得到广西采掘业大型矿山企业占比等级为Ⅲ。同理可得，采掘业碳排放强度 X_{41}、采掘业发展潜力 X_{14}、采掘业可持续水平 X_{31} 等级均为Ⅲ，均处于起步阶段。这反映出该行业仍以中小型企业为主，开采强度高、能源效率低，导致可持续发展水平和经济发展水平较低，碳排放强度较高。



(a) X_{21}



(b) X_{41}



(c) X_{14} (d) X_{31}

图 1 采掘业绿色低碳发展水平部分指标云滴图

Fig.1 Part of the index cloud-drop diagrams for green and low-carbon development level of mining industry

根据矩阵 $\boldsymbol{R}$ 及公式(10)计算得出指标层关联度,见表 6,可以清楚地看出各指标在不同等级中的关联度表现。这些关联度的高低直接反映了各指标对绿色低碳发展水平的贡献程度,揭示了广西采掘业在不同发展水平上的特征和差异。

表 6 指标层关联度

Table 6 Correlation degree of index layer

指标	评价等级			
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
X_{11}	1.000 0	0.001 8	2.67E-08	1.44E-15
X_{12}	0.287 4	0.933 8	0.023 8	2.69E-06
X_{13}	0.150 2	1.000 0	1.30E-06	1.34E-25
X_{14}	0.010 1	0.524 1	0.002 3	0.002 2
X_{21}	2.63E-17	0.004 1	0.006 8	0.738 1
X_{22}	0.007 0	2.06E-10	0.000 1	0.927 0
X_{23}	4.22E-06	4.47E-05	0.580 0	0.377 5
X_{31}	0.001 8	0.127 3	0.996 0	0.003 6
X_{32}	0.013 5	0.061 8	0.100 0	0.064 8
X_{33}	1.48E-08	0.314 4	1.21E-08	3.32E-32
X_{41}	0.004 8	0.657 6	0.424 1	0.051 6
X_{42}	0.343 7	0.673 0	0.193 1	0.004 1
X_{43}	1.61E-10	4.54E-15	0.705 5	0.000 6

依据矩阵 $\boldsymbol{R}$ 及公式(11),计算出准则层关联度,见表 7。

表 7 准则层关联度

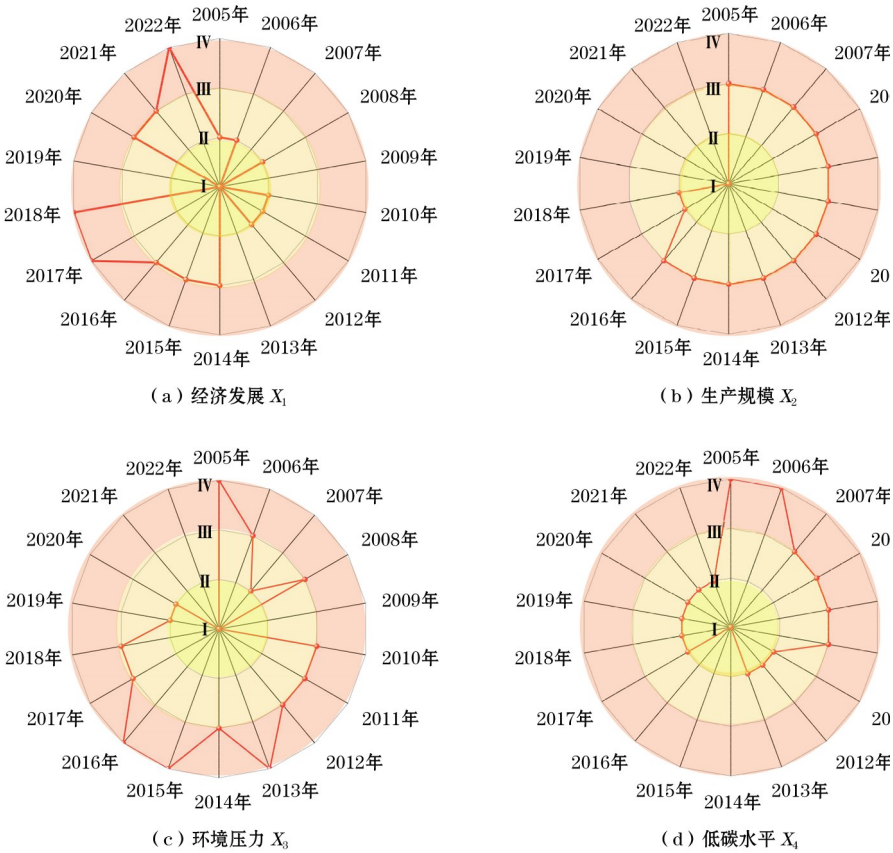
Table 7 Correlation degree of criterion layer

准则层	评价等级			
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
X_1	0.019 376	0.009 072	0.100 392	0.009 647
X_2	0.021 812	0.000 317	0.014 084	1.38E-18
X_3	0.001 146	0.000 365	0.133 128	8.26E-51
X_4	0.002 651	0.094 386	0.088 330	2.97E-100

结合评价指标体系数据及公式(7)至公式(11),将 2005—2022 年广西采掘业绿色低碳发展水平准则层评价等级进行对比,准则层评价等级雷达图如图 2 所示。由图 2 可知,4 个准则层等级在不同年份间存在显著差异。这表明广西采掘业在经济发展 X_1、生产规模 X_2、环境压力 X_3 和低碳水平 X_4 方面的表现并不一致。其中,X_1 和 X_3 的评价等级波动明显;而 X_2 和 X_4 的评价等级则不断改善。具体而言,X_1 在 2005—2013 年评价等级为Ⅰ和Ⅱ,自 2014 年起普遍下降至Ⅲ和Ⅳ。X_2 在 2005—2016 年评价等级以Ⅲ为主,自 2017 年起提升至Ⅰ和Ⅱ。X_3 在 2005—2018 年等级波动显著,自 2019 年起稳定至Ⅰ和Ⅱ。X_4 在 2005—2010 年评价等级为Ⅲ和Ⅳ,而在 2011—2022 年评价等级改善至Ⅰ和Ⅱ。由此可见,广西采掘业的绿色低碳发展不应再单纯依赖以经济增速为主导的传统经济增长模式,必须探索更加综合的可持续发展路径。在合理调控企业生产规模的同时,确保经济稳定增长,注重生态环境保护和碳排放控制,促进经济、环境与低碳的协调发展,以实现采掘业真正的绿色转型。

根据公式(11)及最大隶属度原则,得出广西采掘业绿色低碳发展水平评价等级,见表 8,在 2005—2022 年经历了显著变化,大致分为三个阶段。2005—2010 年,采掘业绿色低碳发展水平普遍处于落后阶段(Ⅳ)和起步阶段(Ⅲ)。2011—2017 年,绿色低碳发展水平有所波动,这与《2010 年中国可持续发展战略报告》中明确了要以绿色发展为统领的重点目标有关。尽管在政策支持下发展水平有所增加,但由于广西经济相对欠发达,技术水平和政策落实效果受到一定限制,发展未能稳步提升。2018—2022 年,绿色低碳发展水平由起步阶段(Ⅲ)逐步进入推进阶段(Ⅱ),表现为以较少的经济代价实现更好的环境水平和更低的碳排放,也反映出政府对“双碳”目标的更高重视。这一进展也是广西采掘业在

政策引导下，积极实现低碳转型、资源高效利用和生态环境改善的结果。总体而言，广西采掘业在绿色低碳发展方面取得了阶段性进展，但距离成熟阶段仍有差距，亟需进一步提升与优化。



（a）经济发展 X_1　（b）生产规模 X_2

（c）环境压力 X_3　（d）低碳水平 X_4

图 2　准则层评价等级雷达图

Fig.2　Radar charts of evaluation levels in the criterion layer

表 8　广西采掘业绿色低碳发展水平评价等级

Table 8　Evaluation grade for green and low-carbon development level of mining industry in Guangxi

年份	不同评价等级的综合关联度				评价等级
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	
2005	0.008 5	0.024 9	0.036 7	0.110 9	Ⅳ
2006	0.029 8	0.034 0	0.066 5	0.105 7	Ⅳ
2007	0.032 8	0.051 1	0.078 6	0.072 1	Ⅲ
2008	0.049 5	0.057 2	0.109 2	0.053 1	Ⅲ
2009	0.051 6	0.039 5	0.068 3	0.022 1	Ⅲ
2010	0.041 4	0.063 3	0.101 3	0.034 3	Ⅲ
2011	0.036 4	0.086 4	0.080 7	0.022 5	Ⅱ
2012	0.042 1	0.077 1	0.097 8	0.034 5	Ⅲ
2013	0.073 6	0.050 6	0.035 6	0.065 6	Ⅰ
2014	0.052 4	0.040 9	0.094 7	0.059 7	Ⅲ
2015	0.053 4	0.043 4	0.069 1	0.084 3	Ⅳ
2016	0.052 5	0.047 9	0.071 1	0.072 5	Ⅳ
2017	0.040 4	0.055 1	0.069 1	0.078 8	Ⅳ
2018	0.018 6	0.092 6	0.105 4	0.039 7	Ⅲ
2019	0.008 0	0.109 9	0.062 1	0.052 9	Ⅱ
2020	0.008 3	0.109 8	0.062 1	0.037 6	Ⅱ
2021	0.069 6	0.083 6	0.064 9	0.033 3	Ⅱ
2022	0.047 8	0.109 6	0.039 9	0.027 5	Ⅱ

本研究中显示，广西采掘业绿色低碳发展水平仍处于起步阶段（Ⅲ）向推进阶段（Ⅱ）转变的过程，该评价结果与以往学者[37-38]研究结果较为一致，较好地反映了实际情况，且本文研究模型相比以往研究更全面地捕捉了广西采掘业绿色低碳发展水平的细微变化，更具时效性和动态性，使得评价结果更能展现出广西采掘业绿色低碳发展水平的波动与进步。

2.4　影响因素分析

在计算各准则层灰色关联度时，将采掘业绿色低碳发展水平评价等级作为参考数列 Y_0，各准则层作为比较数列 X_i，通过公式(12)及公式(13)计算得出 2005—2022 年各准则层的灰色关联度，具体见表 9。整体来看，4 个准则层的平均灰色关联度排序依次为 X_2(0.81)、X_4(0.75)、X_3(0.71)及 X_1(0.70)。可以明显发现，X_2 的平均灰色关联度最高，这表明其在绿色低碳发展中占据着重要地位。X_4 在 2005—2013 年和 2019—2022 年的灰色关联度较高，说明早期对低碳重视程度不足，影响了行业的绿

色低碳发展,而近年来的重视则又提升了其影响程度。X_3 在 2010—2013 年的灰色关联度较高,这与 2010 年提出的《绿色矿山建设指导意见》等相关政策有关,加大了对生态环境重视程度。2018—2022 年,X_1 对绿色低碳发展水平的灰色关联度提高,表明经济发展在影响绿色低碳发展方面愈发重要。

表 9 准则层灰色关联度

Table 9 Grey correlation degree of criterion layer

年份	X_1	X_2	X_3	X_4
2005	0.55	0.85	0.51	0.90
2006	0.58	0.87	0.58	0.81
2007	0.60	0.84	0.63	0.81
2008	0.77	0.85	0.55	0.78
2009	0.85	0.87	0.68	0.78
2010	0.68	0.81	0.82	0.71
2011	0.72	0.85	0.90	0.78
2012	0.72	0.84	0.77	0.68
2013	0.67	0.77	0.93	0.91
2014	0.69	0.86	0.66	0.67
2015	0.72	0.83	0.60	0.60
2016	0.69	0.85	0.63	0.61
2017	0.70	0.92	0.63	0.61
2018	0.66	0.94	0.90	0.68
2019	0.72	0.82	0.81	0.78
2020	0.78	0.64	0.80	0.78
2021	0.77	0.61	0.60	0.77
2022	0.81	0.59	0.78	0.77

各指标对广西采掘业绿色低碳发展水平的灰色关联度,具体见表 10。

表 10 指标层灰色关联度排序

Table 10 Grey correlation degree ranking of index layer

排序	指标层	灰色关联度
1	X_{21}	0.862 3
2	X_{11}	0.808 7
3	X_{14}	0.793 8
4	X_{22}	0.788 7
5	X_{43}	0.785 3
6	X_{23}	0.784 8
7	X_{33}	0.746 0
8	X_{41}	0.731 7
9	X_{42}	0.719 8
10	X_{31}	0.713 0
11	X_{32}	0.670 9
12	X_{13}	0.642 9
13	X_{12}	0.574 3

研究发现,X_{21}、X_{11}及 X_{14}的灰色关联度位列前三,是关键影响因素。大型矿山企业具备较强的资源整合能力和环境治理水平,在推动绿色低碳发展中发挥了重要作用,同时,行业整体经济发展水平和潜力也提供了重要支持。接着依次为 X_{22}、X_{43}及 X_{23},这些因素与生产活动直接相关,对绿色低碳发展水平也产生了显著影响。而 X_{31}、X_{32}、X_{13}和 X_{12}的灰色关联度较低,这表明当前阶段这些因素的作用仍未完全显现,尤其是技术创新和资本引导在绿色低碳发展中的作用尚需进一步加强。

2.5 障碍度分析

准则层障碍因子雷达图如图 3 所示。由图 3 可知,经济发展 X_1 将成为未来广西采掘业绿色低碳发展的主要障碍。

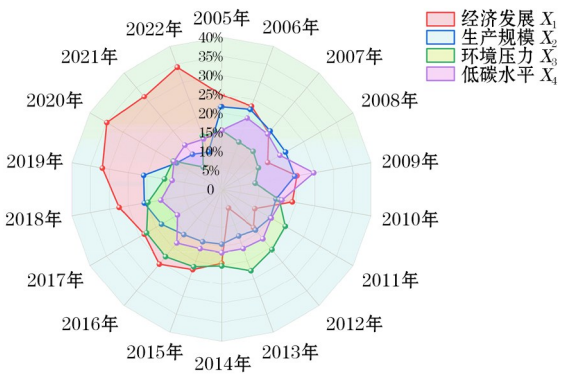


图 3 准则层障碍度雷达图

Fig.3 Radar chart of obstacle degree in the criterion layer

从整体上看,2005—2022 年,X_1 的障碍度呈现上升趋势,年均增长 1.90%,再次反映出推动经济增长的过程中,资源开发和环境保护之间的矛盾日益突出。环境压力 X_3 和低碳水平 X_4 的障碍度波动明显,年均波动分别为 28%和 15.75%。尽管国家和政府不断强化环保政策并推广绿色发展理念,但实际效果依赖于政策执行力度和企业环保意识[39]。相比之下,生产规模 X_2 的障碍度整体呈现下降趋势,年均下降 4.24%。这表明广西采掘业逐渐认识到合理控制生产规模的重要性,减少过度开发和资源浪费,从而推动采掘业绿色低碳发展水平提升。

根据公式(14)至公式(17),测算指标层障碍度,统计各障碍因子的年度障碍度占比情况,见表 11。可以发现,广西采掘业绿色低碳发展的主要障碍因子呈现阶段性变化。在 2005—2018 年,障碍因子主要集中在采掘业矿石产量 X_{23}、采掘业可持续水平 X_{31}、采掘业 SO_2 排放 X_{33}及采掘业碳排放规模 X_{43}。这一现象是由于早期采掘业以高强度、低效率为特征,过度依赖资源开采,虽然短期内推动了经

济增长,但是严重破坏了环境,阻碍了绿色低碳发展。从2018—2022年,障碍因子则主要集中在采掘业发展水平 X_{11}、采掘业科技投入 X_{12} 和采掘业就业人数 X_{22}。随着绿色矿山建设的推进及"双碳"目标的实施,广西正在不断整改不合规矿山并减少过度开采。然而,由于整改仍处于起步阶段,这些措施在一定程度上抑制经济发展,使其成为当前广西采掘业绿色低碳发展的重要障碍因子。

表 11 障碍因子的障碍度占比

Table 11 The proportion of obstacle degree of obstacle factors

年份	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{31}	X_{32}	X_{33}	X_{41}	X_{42}	X_{43}
2005	12.84	6.57	8.38	4.11	8.65	8.97	9.61	9.37	9.96	1.11	1.11	1.11	18.22
2006	12.59	2.59	8.64	5.87	8.53	9.69	9.41	8.14	7.91	1.66	3.18	4.01	17.77
2007	6.17	10.92	9.41	1.19	9.28	7.82	10.17	5.54	9.11	4.32	5.50	6.45	14.11
2008	6.00	5.16	5.71	7.03	10.32	8.54	10.90	1.32	10.91	6.61	7.17	7.04	13.30
2009	8.62	6.50	3.67	9.18	9.01	8.01	9.11	4.27	1.90	7.71	7.45	7.52	17.04
2010	5.83	12.94	6.54	4.04	9.96	2.30	10.23	10.06	4.83	8.72	8.15	8.94	7.45
2011	1.96	4.64	7.50	5.38	10.70	3.22	10.71	10.44	9.55	10.90	9.86	10.16	4.98
2012	2.87	3.12	7.59	8.43	9.96	2.14	9.71	10.75	8.89	10.81	9.75	9.73	6.25
2013	1.42	1.42	1.42	8.82	10.94	1.42	10.39	12.51	11.70	12.22	11.12	10.84	5.79
2014	2.10	7.61	9.48	8.78	9.03	3.02	8.82	9.53	10.96	7.16	9.54	9.22	4.74
2015	3.87	8.18	8.91	8.94	8.54	3.10	8.38	10.09	9.91	7.86	9.07	8.74	4.41
2016	6.05	8.92	7.37	8.65	7.86	3.96	7.58	9.47	9.45	8.31	8.46	8.01	5.93
2017	6.76	6.97	8.08	8.41	8.10	7.75	7.52	10.25	9.26	8.85	8.67	8.29	1.10
2018	5.17	7.93	8.02	11.17	7.39	10.66	6.37	6.84	7.01	9.57	7.75	7.47	4.64
2019	9.15	10.88	8.43	9.56	7.32	12.17	5.83	6.52	5.70	7.19	7.56	7.45	2.23
2020	12.26	13.12	8.54	8.83	2.05	13.38	2.98	5.55	6.51	7.47	7.97	7.85	3.47
2021	15.04	10.59	10.16	9.26	1.30	16.13	1.40	1.93	1.26	10.12	9.37	9.12	4.32
2022	16.91	8.43	9.12	9.73	1.16	13.12	1.16	6.32	4.45	9.94	8.46	8.31	2.90

3 建议

基于上述对广西采掘业绿色低碳发展水平评价及影响因素分析结果,发现当前广西采掘业绿色低碳发展水平整体偏低,在经济发展、生产规模、环境压力及低碳水平等方面存在诸多制约因素和发展挑战。为进一步推动广西采掘业向绿色低碳转型,政府应该积极采取行动。第一,充分发挥大型矿山企业的示范带动作用,优化产业结构,提升行业整体绿色低碳发展能力。政府可通过制定激励机制,支持大型矿山企业采用清洁能源、智能开采及绿色矿山技术,促进绿色低碳发展要素向采掘业集聚。同时,通过建立产业协同机制,加强企业间绿色技术合作,推动全行业绿色低碳发展水平的整体提升。第二,针对不同阶段的制约因素,完善政策调控,加强绿色低碳发展支撑体系建设。一方面,加强环境监管,优化碳减排政策,推动绿色矿山建设,提升采掘业整体低碳水平;另一方面,针对经济发展对低碳转型的制约问题,设立采掘业绿色低碳转型专项基金,利用政府补贴等手段降低企业绿色升级成本,平衡经济发展与低碳转型之间的关系。通过政府引导与市场调节相结合,推动广西采掘业实现经济增长与生态保护的协调统一。

4 结论

(1) 构建了广西采掘业绿色低碳发展水平评价指标体系,包括经济发展、生产规模、环境压力和低碳水平等4个准则层及13个指标。广西采掘业碳排放核算结果显示,在2005—2022年间,碳排放总量整体呈现波动上升的趋势,而碳排放强度呈现波动下降的趋势。

(2) 结合博弈论方法对评级指标体系中各个指标进行综合赋权,既体现了指标选取的全面性,又确保了权重的合理性。采用改进云熵的云物元模型对2005—2022年广西采掘业的绿色低碳发展水平进行评价,结果显示,其发展等级从落后阶段(Ⅳ)提升至推进阶段(Ⅱ)。其中,经济发展和环境压力评价等级波动明显,而低碳水平和生产规模评价等级持续改善。

(3) 分析了广西采掘业绿色低碳发展水平的影响因素,发现灰色关联度排名前三的3个指标是采掘业大型矿山企业占比、采掘业发展水平、采掘业发

展潜力,这3个指标对绿色低碳发展水平的影响最为显著。另外,2005—2018年低碳水平和环境压力对绿色低碳发展水平阻碍较大,而2018—2022年经济发展阻碍更显著。

参考文献(References):

[1] 柳晓娟,侯华丽,孙映祥,等.关于中国绿色矿业内涵与实现路径的思考[J].矿业研究与开发,2021,41(10):180-186.
LIU Xiaojuan, HUO Huali, SUN Yingxiang, et al. Thinking about the connotation and realization path for green mining in China [J]. Mining Research and Development,2021,41(10):180-186.

[2] 罗世兴.我国采矿业能源消费碳排放时空分异与驱动因素分析[J].中国矿业,2024,33(4):113-121.
LUO Shixing. Analysis on spatio-temporal differentiation and driving factors of carbon emission from energy consumption of mining industry in China[J]. China Mining Magazine,2024,33(4):113-121.

[3] 广西壮族自治区人民政府.广西壮族自治区碳达峰实施方案[EB/OL].(2023-01-30)[2024-12-20].http://gxt.gxzf.gov.cn/wzsy/zwdt/gxyw/t15698778.shtml.

[4] 史玉芳,兰欣颐.我国矿业绿色转型效率的空间网络结构及区域协同提升研究[J].生态经济,2023,39(1):101-108.
SHI Yufang, LAN Xinyi. Research on spatial network structure and regional collaborative promotion of green transformation efficiency of mining industry in China[J]. Ecological Economy,2023,39(1):101-108.

[5] 吕洁华,张泽野.中国省域碳排放核算准则与实证检验[J].统计与决策,2020,36(3):46-51.
LYU Jiehua, ZHANG Zeye. China's provincial carbon emission accounting standards and empirical test [J]. Statistics & Decision,2020,36(3):46-51.

[6] 张颖,黄碧华,成鹏飞.大湘西地区矿业绿色发展水平及其动力因素研究[J].矿业研究与开发,2020,40(4):147-152.
ZHANG Ying, HUANG Bihua, CHENG Pengfei. Study on the green development level of mining industry and its driving factors in Western Hunan[J]. Mining Research and Development,2020,40(4):147-152.

[7] 梁刚.中国绿色低碳循环发展经济体系建设水平测度[J].统计与决策,2021,37(15):47-51.
LIANG Gang. Measurement on the construction level of China's green, low-carbon and circular-development economic system[J]. Statistics & Decision,2021,37(15):47-51.

[8] 李建豹,陈红梅,张彩莉,等.长三角地区碳源碳汇时空演化特征及碳平衡分区[J].环境科学,2024,45(7):4090-4100.
LI Jianbao, CHEN Hongmei, ZHANG Caili, et al. Spatiotemporal evolution characteristics of carbon sources and carbon sinks and carbon balance zoning in the Yangtze River Delta Region[J]. Environmental Science,2024,45(7):4090-4100.

[9] 徐英启,程钰,王晶晶,等.中国低碳试点城市碳排放效率时空演变与影响因素[J].自然资源学报,2022,37(5):1261-1276.
XU Yingqi, CHENG Yu, WANG Jingjing, et al. Spatio-temporal evolution and influencing factors of carbon emission efficiency in low carbon city of China[J]. Journal of Natural Resources,2022,37(5):1261-1276.

[10] 王晋,吉光,马军.绿色低碳公路评价指标体系与评价方法研究[J].公路,2014,59(7):356-361.
WANG Jin, JI Guang, MA Jun. Research on evaluation index system and methods for highway with low carbon emission[J]. Highway,2014,59(7):356-361.

[11] 雷辉,刘俏云.基于四阶段DEA模型的绿色低碳企业融资效率研究[J].财经理论与实践,2020,41(3):72-78.
LEI Hui, LIU Qiaoyun. Research on financing efficiency of the green low-carbon enterprises based on four-stage DEA model [J]. The Theory and Practice of Finance and Economics,2020,41(3):72-78.

[12] 高赢."一带一路"沿线国家低碳绿色发展绩效研究[J].软科学,2019,33(8):78-84.
GAO Ying. Study on low-carbon and green development performance for countries along The Belt and Road[J]. Soft Science,2019,33(8):78-84.

[13] 魏琦,张斌,金书秦.中国农业绿色发展指数构建及区域比较研究[J].农业经济问题,2018,11:11-20.
WEI Qi, ZHANG Bin, JIN Shuqin. A study on construction and regional comparison of agricultural green development index in China[J]. Issues in Agricultural Economy,2018,11:11-20.

[14] LUO Dejiang, HUANG Jie, WU Hao, et al. Measuring green development index and coupling coordination of mining industry:an empirical analysis based on panel data in China [J]. Journal of Cleaner Production,2023,401:136764.

[15] XUE Liming, LI Mingjun, ZHENG Zhixue, et al. Assessing the progress of the mining industry towards green growth in China:a three-stage dynamic network slacks-based measure approach[J]. Journal of Cleaner Production,2024,435:140478.

[16] FENG Chenyu, YANG Xiaodong, AFSHAN Sahar, et al. Can renewable energy technology innovation promote mineral resources' green utilization efficiency? Novel insights from regional development inequality[J]. Resources Policy,2023,82:103449.

[17] CHEN Weigong, YAN Shenghua. The decoupling relationship between CO_2 emissions and economic growth in the Chinese mining industry under the context of carbon neutrality [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 379:134692.

[18] 胡海川,殷羽奇,范文娟.不同类型环境规制对企业碳绩效的影响[J].统计与决策,2024,40(24):184-188.

HU Haichuan, YIN Yuqi, FAN Wenjuan. The impact of different types of environmental regulations on corporate carbon performance[J]. Statistic & Decision, 2024, 40(24): 184-188.

[19] 仲云云，闻友龙.我国重工业行业碳排放效率测度与影响因素分析[J].统计与决策，2024，40(19)：123-127.
ZHONG Yunyun, WEN Youlong. Measurement of carbon emission efficiency and analysis of influencing factors in China's heavy industry[J]. Statistic & Decision, 2024, 40(19): 123-127.

[20] PANG Dezhi, JIN Xin, ZHENG Kengcheng, et al. A road toward green growth: optimizing the role of mineral resources, fintech innovation and effective governance in G-20 economies[J]. Resources Policy, 2024, 92: 104983.

[21] CAI Huifen, KHAN Naqibc Ullah, TANG Shirley, et al. Development environmental sustainability policy: how financing and subsidies are influencing green innovation in mineral extraction industries in China [J]. Journal of Environmental Management, 2024, 368: 122218.

[22] 金向阳，李杨，于雷，等.煤矿区绿色低碳评价指标构建及应用[J].煤炭科学技术，2024，52(4)：131-142.
JIN Xiangyang, LI Yang, YU Lei, et al. Construction and application of green and low-carbon evaluation indicators for coal mining areas[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 131-142.

[23] 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 assessment of water conservation mining based on entropy weight method and cloud model[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(4): 291-298.

[24] CAO Yanqiu, BIAN Yijie. Improving the ecological environmental performance to achieve carbon neutrality: the application of DPSIR-Improved matter-element extension cloud model [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 293: 112887.

[25] 陈燕丽，杨语晨，杜栋.基于云模型的省域生态环境绩效评价研究[J].软科学，2018，32(1)：100-103+108.
CHEN Yanli, YANG Yuchen, DU Dong. Study on performance evaluation of provincial ecological environment based on cloud model[J]. Soft Science, 2018, 32(1): 100-103+108.

[26] 中华人民共和国生态环境部.2019年度减排项目中国区域电网基准线排放因子[EB/OL].(2020-12-29)[2024-12-20]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtkz/202012/t20201229_815386.shtml.

[27] 姜鑫，滕鸿伟，李向东，等.废弃矿山环境修复工作系统探讨[J].中国矿业，2024，33(1)：80-86.
JIANG Xin, TENG Hongwei, LI Xiangdong, et al. Discussion on environmental restoration work system of abandoned mines[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(1): 80-86.

[28] 陈曦.广西土壤有机碳储量估算及与全国部分省区的比较研究[J].地理科学，2014，34(10)：1247-1253.
CHEN Xi. Estimation of soil organic carbon reserves in Guangxi and comparion study with some provinces in China [J]. Geographical Science, 2014, 34(10): 1247-1253.

[29] 赵黎，粟登峰，谭宝会，等.基于CRITIC-GRA-AHP法的敏感性排序理论及其在边坡稳定性分析中的应用[J].矿业研究与开发，2024，44(9)：82-93.
ZHAO Li, SU Dengfeng, TAN Baohui, et al. Sensitivity ranking theory based on CRITIC-GRA-AHP method and its application in slope stability analysis[J]. Mining Research and Development, 2024, 44(9): 82-93.

[30] 姜启波，谭清美.新时期我国高质量发展水平测度及空间差异研究：基于熵值G2与灰色关联CRITIC的变异系数组合赋权法[J].管理现代化，2020，40(5)：24-30.
JIANG Qibo, TAN Qingmei. Research on the measurement and spatial difference of China's high-quality development level in the new era: a combination weighting method of variation coefficient based on entropy G2 and grey correlation CRITIC [J]. Modernization of Management, 2020, 40(5): 24-30.

[31] 唐晓灵，林敏，刘雷磊.基于博弈论组合赋权-TOPSIS法的采矿方案优选模型及应用[J].矿业研究与开发，2021，41(5)：5-10.
TANG Xiaoling, LIN Min, LIU Leilei. Mining method optimization model and application based on game theory combined with weighting-TOPSIS method [J]. Mining Research and Development, 2021, 41(5): 5-10.

[32] 李继清，邓世浪，张鹏.基于集对云模型和减法集对势的河南省水资源脆弱性评价[J].中国农村水利水电，2023(2)：1-8.
LI Jiqing, DENG Shilang, ZHANG Peng. Water resources vulnerability assessment in Henan province based on set pair cloud model and subtraction set pair potential[J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(2): 1-8.

[33] 禹洪波，袁婉玲，汪敏，等.基于非对称贴近度证据云物元模型的电力变压器综合状态评估方法[J].电网技术，2021，45(9)：3706-3713.
YU Hongbo, YUAN Wanling, WANG Min, et al. Comprehensive condition assessment of power transformer based on asymmetric nearness degree evidence cloud matter-element model[J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3706-3713.

[34] 张梦瑶，李磊，刘彦文，等.基于灰色物元的变压器多指标绝缘状态评估方法[J].电力科学与技术学报，2020，35(1)：137-143.
ZHANG Mengyao, LI Lei, LIU Yanwen, et al. Multi-indices insulation condition assessment method for transformer based on grey matter-element method [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(1): 137-143.

[35] 邹秀清,谢美辉,肖泽干,等.基于熵权-TOPSIS法的乡村发展评价及障碍因子诊断[J].中国农业资源与区划,2021,42(10):197-206.
ZOU Xiuqing, XIE Meihui, XIAO Zegan, et al. Evaluation of rural development and diagnosis of obstracle factors based on entropy weight TOPSIS method[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2021, 42(10):197-206.

[36] 李春友.基于资源利用视角的广西农业用地绩效评估及障碍分析[J].中国农业资源与区划,2021,42(3):42-50.
LI Chunyou. Performance evaluation and obstacle analysis of agricultural land use in Guangxi from the perspective of resource utilization [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning,2021,42(3):42-50.

[37] ZUO Zhili, GUO Haixiang, LI Yonglin, et al. A two-stage DEA evaluation of Chinese mining industry technological innovation efficiency and eco-efficiency[J]. Environmental Impact Assessment Review,2022,94:106762.

[38] MA Siqi, WANG Canghong, LIU Jiaze, et al. Towards green extraction:assessing the social and economic progress and challenges of green mining in China for policy formulation[J]. Resources Policy,2024,96:105233.

[39] 邹绍辉,崔雪源,吕俊峰,等.碳达峰异质情景下省域煤炭供需格局动态演变规律研究[J].矿业研究与开发,2024,44(9):263-274.
ZOU Shaohui, CUI Xueyuan, LYU Junfeng, et al. Study on the dynamic evolution law of provincial coal supply and demand patterns under the carbon peak heterogeneous scenario[J]. Mining Research and Development,2024,44(9):263-274.