基于博弈论组合赋权-改进物元可拓模型的有色金属企业绿色发展能力评估*

王训洪[1,2],马聪[1,2],胥孝川[3],王海英[4]

(1.广西科技大学 经济与管理学院, 广西 柳州市 545006;
2.广西工业高质量发展研究中心, 广西 柳州市 545006;
3.东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819;
4.江西财经大学 金融学院, 江西 南昌 330013)

摘要:为解决有色金属企业绿色发展能力指标之间的不相容性及指标赋权过程中未能充分考虑主观性与客观性的问题,提出了一种基于博弈论组合赋权-改进物元可拓模型的有色金属企业绿色发展能力评估模型。首先,通过文献分析和咨询专家,构建了有色金属企业绿色发展能力评估指标体系;其次,分别采用遗传层次分析法和CRITIC法计算评估指标主观权重和客观权重,并依据博弈论理论计算综合权重;最后,运用非对称贴近度准则替换最大关联度准则,建立基于改进物元可拓模型的有色金属企业绿色发展能力评估模型,并进行实例研究。研究结果表明,评定等级与上一年的偏向程度均一致,验证了基于改进物元可拓模型的有色金属企业绿色发展能力评估具有一定可靠性和准确性。

关键词:博弈论;组合赋权;绿色发展能力;改进物元可拓模型;遗传层次分析法

中图分类号:F407.1 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)07-0273-08

Green Development Capability Assessment for Non-ferrous Metal Enterprises Based on the Game Theory Combined Weighting-Improved Matter-Element Extension Model

WANG Xunhong[1,2], *MA Cong*[1,2], *XU Xiaochuan*[3], *WANG Haiying*[4]

(1.School of Economic and Management, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou, Guangxi 545006, China;
2.Research Center for High-quality Industrial Development of Guangxi, Liuzhou, Guangxi 545006, China;
3. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China;
4. School of Finance, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang, Jiangxi 330013, China)

Abstract: In order to solve the incompatibility between the green development capability indicators of non-ferrous metal enterprises and the lack of full consideration of subjectivity and objectivity in the process of index weighting, an evaluation model of green development capability of non-ferrous metal enterprises based on game theory combined weighting-improved matter-element extension model was proposed. Firstly, through literature analysis and consulting experts, the evaluation index system of green development capability of non-ferrous metal enterprises was constructed. Secondly, the subjective weight and objective weight of the evaluation index were calculated by the genetic algorithm-analytic hierarchy process and the CRITIC method respectively, and the comprehensive weight was calculated according to the game theory. Finally, the asymmetric closeness degree criterion was used to replace the maximum correlation degree criterion, and the evaluation model of green development capability of non-ferrous metal enterprises based on the improved matter-element extension model was established, and the model was studied by an example. The research results show that the evaluation grade is consistent with the bias degree of the previous year, which verifies that the green development capability evaluation of non-ferrous metal enterprises based on the improved matter-element extension model has certain reliability and accuracy.

* **收稿日期**:2024-09-18

基金项目:国家自然科学基金项目(72401112);广西科技基地和人才专项项目(桂科 AD23026278);广西教育厅中青年教师科研基础能力提升项目(2024KY0347);广西科技大学博士基金项目(21S07,23S04)

作者简介:王训洪(1990—),男,江西上饶人,博士,副教授,研究方向为矿业技术经济及管理。E-mail:100002360@gxust.edu.cn

通信作者:马聪(1985—),男,吉林吉林人,博士,讲师,研究方向为能源经济研究。E-mail:100002351@gxust.edu.cn

Key words: Game theory, Combined weighting, Green development capability, Improved matter-element extension model, Genetic algorithm-analytic hierarchy process

0 引言

近年来,随着国家生态文明建设的不断推进,有色金属行业正面临着更为严格的环境保护要求。一方面,作为重要的经济支柱,有色金属行业承担着重要的社会责任,需要在可持续发展的道路上不断探索。另一方面,随着“十九大”关于绿色发展部署的推进,强调依靠良性发展推动生态环境质量改善。然而有色金属行业普遍存在着资源消耗高、污染排放大的问题,以及企业间的竞争不断加剧,迫使其需要向绿色发展方式转变[1-3]。有色金属行业绿色发展是促进其可持续发展的有效途径之一。因此,如何全面、客观地评估有色金属企业的绿色发展能力,对于引导行业绿色转型及促进可持续发展具有重要意义。

近年来,学者们通过不同视角对有色金属企业绿色发展能力进行了深入研究,大致归纳为以下三类:一是采用定性方法研究了有色金属行业的可持续发展,提出了相应的对策和建议,但并未对其进行综合评估[4-6];二是通过不同视角对绿色矿山进行了研究,主要包括绿色矿山评估指标体系[7]、评估指标解析[8]与评估[9-10],但较少涉及到有色金属企业绿色发展能力评估研究;三是黄洁、刘金平等[11-12]采用层次分析法分别研究了矿业和金属矿山企业绿色发展能力评估。但采用的层次分析法是单一的主观赋权法,并未考虑评估指标的数字特征和数据的客观性。上述研究虽然采用不同方法对有色金属企业等绿色发展能力进行了综合评估,并取得了较好效果,但大多数研究未充分考虑评估指标之间的潜在不相容性,以及在指标赋权过程中未能有效兼顾主观性与客观性。

针对评估指标之间的潜在不相容性,物元可拓模型为可行的解决方法。物元可拓模型由蔡文教授创立,利用可拓性的基本理论兼顾定性与定量两个方面,采用可拓集合论的关联函数对定量指标进行计算,同时借助物元可拓性对定性指标进行计算,并通过构建物元可拓模型将不相容问题转化为相容问题,最后进行综合评估并得到合理可靠的结论[13]。现已广泛应用于重金属污染评价[14]、城市治理能力现代化水平评价[15]和磷矿山岩体质量评价[16]等方面。然而,物元可拓模型仍存在一定局限性,其采用模糊数学的最大关联度原则判定评估结果时,易缺失部分信息,导致评估结果不够准确[17]。非对称贴近度理论则能够有效提高评估结果的可靠性和有效性[18]。

指标赋权过程中未能有效兼顾主观性与客观性,博弈论组合赋权可提供合理可行的解决途径。博弈论组合赋权是依据博弈论均衡点的理论均衡多种权重计算方法的优势,合理化评估指标赋权的科学性和合理性。博弈论组合赋权方法已应用于岩爆等级评价[19]、雷达收发组件脆弱性评估[20]和山区施工便道方案优选[21]等方面。

基于此,为更合理地解决有色金属企业绿色发展能力指标之间的不相容性及指标赋权过程中未能有效兼顾主观性与客观性问题,基于物元可拓模型、非对称贴近度理论和博弈论组合赋权方法,运用遗传层次分析法[22]和 CRITIC 法[23]分别计算评估指标的主客观权重,使用博弈论组合赋权计算综合权重,并结合物元可拓模型和非对称贴近度理论构建有色金属企业绿色发展能力评估模型,最后将所建立的模型进行实例研究与分析。

1 评估指标体系

有色金属企业绿色发展能力评估指标体系旨在促进有色资源的高效开采和合理利用,同时注重生态环境的保护。此体系强调在长远规划与合理布局的基础上,实现科学有序的有色资源开采、最大化促进经济发展和社会效益以及生态向绿色发展。

在构建有色金属企业绿色发展能力评估指标体系时,遵循科学性、可操作性、系统性、以及定性与定量相结合的原则,以确保所构建的指标体系具有良好的代表性和实用性。构建过程中,主要采用了文献分析与专家咨询的方法,参考了有色金属上市企业的年报和 ESG 报告,并对影响有色金属企业绿色发展能力的因素进行了系统梳理。最终构建了有色金属企业绿色发展能力评估指标体系,如图 1 所示。本体系旨在为提升有色金属企业绿色发展能力,为促进有色金属行业的可持续发展提供有力支持。

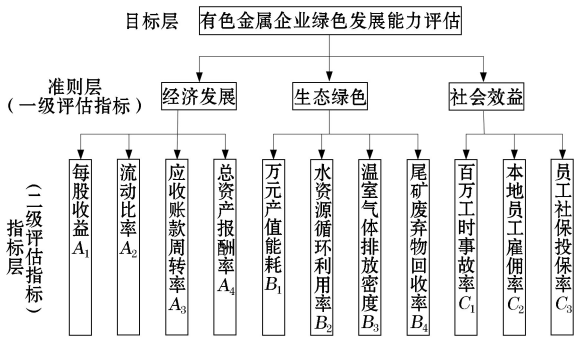


图 1 有色金属企业绿色发展能力评估指标体系和层次结构模型

Fig.1 Evaluation indicators system and hierarchical structure model for green development ability of non-ferrous metal enterprises

2 有色金属企业绿色发展能力评估模型

本文所建立的有色金属企业绿色发展能力评估流程如图 2 所示。

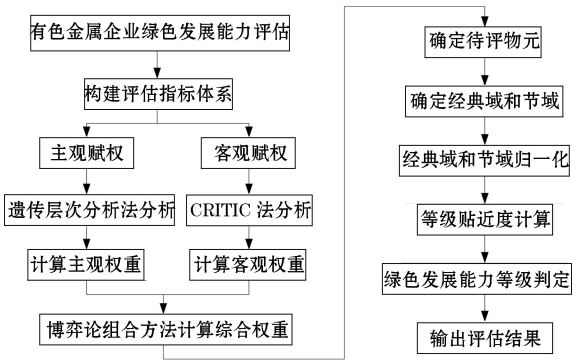


图 2 有色金属企业绿色发展能力评估流程

Fig.2 Evaluation flowchart for green development ability of non-ferrous metal enterprises

2.1 遗传层次分析法确定主观权重

层次分析法通过构建判断矩阵来计算评估指标权重,并进行一致性检验。鉴于现实问题的复杂性,决策者在评估两项指标的重要性时往往难以做到精确判断,可能导致一致性检验不合格。这种情况下需要对判断矩阵进行反复调整,并重新计算指标权重,过程显得繁琐且低效。为了解决这一问题,采用遗传层次分析法(Genetic Algorithm-Analytic Hierarchy Process,GA-AHP)将权重计算和一致性检验难题转变为一个非线性优化问题,结合遗传算法来计算权重值和优化一致性检验值,其非线性优化问题的数学表达式[22]如下:

$$\begin{cases} \min CIF(m)=\sum_{t=1}^{m}\left|\sum_{k=1}^{m}(b_{tk}\alpha_k-m\alpha_t)\right|/m \\ \text{s.t.}\quad \alpha_k>0,\ k=1,2,\cdots,m,\ \sum_{k=1}^{m}\alpha_k=1 \end{cases} \tag{1}$$

式中:CIF 为一致性检验值;m 为判断矩阵的行数;b_{tk} 为判断矩阵的元素($t=1,2,\cdots,m$);α 为评估指标的主观权重。

遗传层次分析法不仅提高了最终结果的一致性,也有效简化了计算评估指标权重的过程,其具体计算过程如图 3 所示[24]。

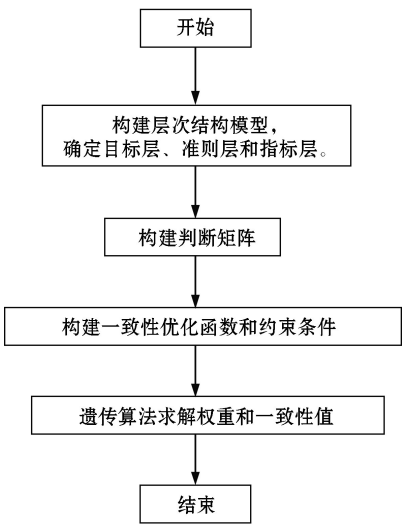


图 3 遗传层次分析法计算权重流程

Fig.3 GA-AHP calculation weight process

2.2 CRITIC 法确定客观权重

CRITIC 法通过对评估指标之间的差异性和冲突性进行综合分析,从而计算评估指标的客观权重。其中,差异性以标准差为衡量依据,标准差越大,表明数据波动性越强,其对应的权重也越大;冲突性则通过相关系数进行量化,相关系数值越高,表示指标间的冲突性越小,其对应的权重也越大。在权重计算过程中,将差异性与冲突性相结合,并对结果进行归一化处理,最终得出各评估指标的客观权重值,具体计算过程如下[25]。

(1) 指标数据归一化。为消除量纲对权重计算的影响,对所有指标数据进行归一化处理。正向指标和负向指标的归一化公式见公式(2)和公式(3)。

$$x'_{ij}=\frac{(x_{ij}-\min x_j)}{(\max x_j-\min x_j)} \tag{2}$$

$$x'_{ij}=\frac{(\max x_j-x_{ij})}{(\max x_j-\min x_j)} \tag{3}$$

式中:x_{ij} 为第 i 个案例第 j 个评估指标的原始值;x'_{ij} 为数据进行归一化之后的值;$\min x_j$ 和 $\max x_j$ 分别为第 j 个评估指标的最小值和最大值。

(2) 计算评估指标均值、标准差和变异系数。第 j 个评估指标均值 $\bar{x}_j$、标准差 σ_j 和变异系数 c_j 的计算公式如下:

$$\bar{x}_j=\sum_{i=1}^{n}x'_{ij} \tag{4}$$

$$\sigma_j=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x'_{ij}-\bar{x}_j)} \tag{5}$$

$$c_j=\frac{\sigma_j}{\bar{x}_j} \tag{6}$$

(3) 计算评估指标之间的相关系数。第 j 个评估指标与第 v 个评估指标的相关系数 λ_{jv} 的计算公式为:

$$\lambda_{jv}=\frac{\sum_{i=1}^{n}[(x'_{ij}-\bar{x}_j)\times(x'_{iv}-\bar{x}_v)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x'_{ij}-\bar{x}_j)^2\times\sum_{i=1}^{n}(x'_{iv}-\bar{x}_v)^2}} \tag{7}$$

(4) 计算客观权重。第 j 个评估指标的信息量 G_j 的计算公式为:

$$G_j=c_j\times\sum_{v=1}^{n}(1-\lambda_{jv}),j\neq v \tag{8}$$

第 j 个评估指标客观权重 β_j 为:

$$\beta_j=\frac{G_j}{\sum_{i=1}^{n}G_j} \tag{9}$$

2.3 博弈论组合权重的确定

为了避免单一赋权方法的不足,将上述计算的主观权重 $\boldsymbol{\alpha}$ 和客观权重 $\boldsymbol{\beta}$ 作为博弈的双方,通过博弈理论计算得到最优组合权重,其具体计算步骤如下[26]。

步骤 1:计算如下线性方程组:

$$\begin{pmatrix}\boldsymbol{\alpha}\times\boldsymbol{\alpha}^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{\alpha}\times\boldsymbol{\beta}^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{\beta}\times\boldsymbol{\alpha}^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{\beta}\times\boldsymbol{\beta}^{\mathrm{T}}\end{pmatrix}\times\begin{bmatrix}d_1\\ d_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{\alpha}\times\boldsymbol{\alpha}^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{\beta}\times\boldsymbol{\beta}^{\mathrm{T}}\end{bmatrix} \tag{10}$$

式中,d_1 和 d_2 为线性相关系数。

步骤 2:将 d_1 和 d_2 进行归一化,计算最优组合系数,则最优组合权重 $\boldsymbol{w}$ 计算公式为:

$$\boldsymbol{w}=\frac{d_1}{d_1+d_2}\times\boldsymbol{\alpha}+\frac{d_2}{d_1+d_2}\times\boldsymbol{\beta} \tag{11}$$

2.4 改进物元可拓模型

在物元可拓模型评估过程中,最大隶属原则在某些情况下无法充分反映待评物元界限的模糊性,导致部分信息的损失,并可能引起评估结果的偏差。为了解决以上问题,实现对待评物元更加合理和准确的评估,运用非对称贴近度函数替换关联度函数,其具体过程如下[27]。

(1) 待评物元。假设事物名称、相应事物特征和事物特征的量值分别为 P、e 和 f,则 P、e 和 f 为物元 $\boldsymbol{R}$ 的三要素。将有色金属企业绿色发展能力定义为待评物元 $\boldsymbol{R}$,则 P 为色金属企业绿色发展能力的等级,e_j 为第 j 评估指标的名称,f_j 为第 j 评估指标的实测值,待评物元 $\boldsymbol{R}$ 表达式为:

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}P & e_1 & f_1\\ & e_2 & f_2\\ & \vdots & \vdots\\ & e_n & f_n\end{bmatrix} \tag{12}$$

(2) 经典域和节域。若将有色金属绿色发展能力分为 H 个等级,则经典域物元 $\boldsymbol{R}_h$ 为:

$$\boldsymbol{R}_h=\begin{bmatrix}P_h & e_1 & f_{1h}\\ & e_2 & f_{2h}\\ & \vdots & \vdots\\ & e_n & f_{nh}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}P_h & e_1 & (l_{1h},o_{1h})\\ & e_2 & (l_{2h},o_{2h})\\ & \vdots & \vdots\\ & e_n & (l_{nh},o_{nh})\end{bmatrix} \tag{13}$$

式中:P_h 为第 h 个发展能力等级;f_{jh} 为第 j 评估指标属于等级 P_h 的经典域;l_{jh} 和 o_{jh} 分别为 f_{jh} 的下限和上限。

节域物元由待评物元的全部发展能力等级、评估指标和对应指标的取值组成,则节域物元 $\boldsymbol{R}_s$ 表示为:

$$\boldsymbol{R}_s=\begin{bmatrix}P & e_1 & f_{1s}\\ & e_2 & f_{2s}\\ & \vdots & \vdots\\ & e_n & f_{ns}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}P & e_1 & (l_{1s},o_{1s})\\ & e_2 & (l_{2s},o_{2s})\\ & \vdots & \vdots\\ & e_n & (l_{ns},o_{ns})\end{bmatrix} \tag{14}$$

式中:f_{js} 表示为全体发展能力等级的取值范围;l_{js} 和 o_{js} 分别为 f_{js} 的下限和上限。

(3) 归一化处理。对有色金属企业绿色发展能

力指标的经典域$\boldsymbol{R}_h$和待评物元$\boldsymbol{R}$进行归一化处理，其具体计算公式分别为：

$$\boldsymbol{R}'_h=\begin{bmatrix}P_h & e_1 & f'_{1h}\\ & e_2 & f'_{2h}\\ & \vdots & \vdots\\ & e_n & f'_{nh}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}P_h & e_1 & \left(\dfrac{l_{1h}-l_{1s}}{o_{1s}-l_{1s}},\dfrac{o_{1h}-l_{1s}}{o_{1s}-l_{1s}}\right)\\ & e_2 & \left(\dfrac{l_{2h}-l_{2s}}{o_{2s}-l_{2s}},\dfrac{o_{2h}-l_{2s}}{o_{2s}-l_{2s}}\right)\\ & \vdots & \vdots\\ & e_n & \left(\dfrac{l_{nh}-l_{ns}}{o_{ns}-l_{ns}},\dfrac{o_{nh}-l_{ns}}{o_{ns}-l_{ns}}\right)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}P_h & e_1 & (l'_{1h},o'_{1h})\\ & e_2 & (l'_{2h},o'_{2h})\\ & \vdots & \vdots\\ & e_n & (l'_{nh},o'_{nh})\end{bmatrix} \tag{15}$$

$$\boldsymbol{R}'=\begin{bmatrix}P & e_1 & \dfrac{f_1-l_{1s}}{o_{1s}-l_{1s}}\\ & e_2 & \dfrac{f_2-l_{2s}}{o_{2s}-l_{2s}}\\ & \vdots & \vdots\\ & e_n & \dfrac{f_n-l_{ns}}{o_{ns}-l_{ns}}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}P & e_1 & f'_1\\ & e_2 & f'_2\\ & \vdots & \vdots\\ & e_n & f'_n\end{bmatrix} \tag{16}$$

(4) 等级贴近度计算。在实际评估过程中，存在最大关联度原则有时低效或无效的情况，为了克服最大关联度的缺陷，张晓平[28]分析了用贴近度原则替代最大关联度原则的可行性，并指出需采用非对称贴近度。待评物元与发展能力等级间的等级贴近度$U_h(\boldsymbol{R}')$的计算公式为：

$$D_h(f')=\left|f'-\frac{o'_{jh}+l'_{jh}}{2}\right|-\frac{o'_{jh}-l'_{jh}}{2} \tag{17}$$

$$U_h(\boldsymbol{R}')=1-\sum_{j=1}^{n}D_h(f')w(j) \tag{18}$$

(5) 绿色发展能力等级判定。若$U_h(\boldsymbol{R}')=\max\limits_{h=\{1,2,\cdots,H\}}\{U_h(\boldsymbol{R}')\}$，则有色金属企业绿色发展能力属于$h'$等级。

等级中的偏向程度h^*计算公式如下：

$$\overline{U}_h(\boldsymbol{R}')=\frac{U_h(\boldsymbol{R}')-\min U_h(\boldsymbol{R}')}{\max U_h(\boldsymbol{R}')-\min U_h(\boldsymbol{R}')} \tag{19}$$

$$h^*=\frac{\sum\limits_{h=1}^{H}h\overline{U}_h(\boldsymbol{R}')}{\sum\limits_{h=1}^{H}\overline{U}_h(\boldsymbol{R}')} \tag{20}$$

3 实例研究

以国内两个有色金属企业(JT和ZJ公司)为例进行实证研究，收集了这两个企业近3年的6组数据进行研究。

3.1 博弈论赋权

(1) 遗传层次分析法计算主观权重。构建判断矩阵，一级评估指标的判断矩阵为：

$$\boldsymbol{Y}=\begin{bmatrix}1 & 4/5 & 5/4\\ 5/4 & 1 & 3/2\\ 4/5 & 2/3 & 1\end{bmatrix}$$

二级评估指标的判断矩阵分别为：

$$\boldsymbol{Y}_1=\begin{bmatrix}1 & 1 & 7/8 & 3/5\\ 1 & 1 & 5/6 & 3/5\\ 8/7 & 6/5 & 1 & 4/5\\ 5/3 & 5/3 & 5/4 & 1\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{Y}_2=\begin{bmatrix}1 & 5/4 & 10/9 & 9/10\\ 4/5 & 1 & 4/5 & 3/4\\ 9/10 & 5/4 & 1 & 9/10\\ 10/9 & 4/3 & 10/9 & 1\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{Y}_3=\begin{bmatrix}1 & 2/3 & 5/4\\ 3/2 & 1 & 2\\ 4/5 & 1/2 & 1\end{bmatrix}$$

依据上述判断矩阵，采用遗传层次分析法计算主观权重，结果见表1。

表1 主观权重

Table 1 Subjective weighting

判断矩阵	权重				一致性检验值
	w_1	w_2	w_3	w_4	
$\boldsymbol{Y}$	0.325 6	0.405 0	0.269 4	—	0.007 6
$\boldsymbol{Y}_1$	0.207 7	0.206 6	0.251 3	0.334 4	0.004 0
$\boldsymbol{Y}_2$	0.263 6	0.206 8	0.249 1	0.280 5	0.003 8
$\boldsymbol{Y}_3$	0.302 8	0.462 1	0.235 1	—	0.003 3

注：二级指标权重值为局部权重。

由表1可知，一致性检验值均小于0.1，都通过了一致性检验。

(2) CRITIC法计算客观权重和博弈论计算组合权重。根据收集的数据及公式(2)至公式(9)计算客观权重，再依据计算的主观权重和客观权重，并通

过公式(10)至公式(11)计算综合权重,计算结果见表2。

3.2 经典域和节域及归一化

根据有色金属企业的可拓性,并结合相关上市企业的年报和企业可持续发展报告(ESG报告),将各指标分为5个发展等级,用Ⅰ至Ⅴ来表示,Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ和Ⅴ分别表示差、一般、中等、良好和优秀。通过参考相关文献及咨询相关专家确定经典域和节域,其量化范围及归一化结果见表3。

3.3 等级贴近度计算及判定

根据收集JT和ZJ公司近3年的数据,结合表2和表3的计算结果,并通过公式(17)至公式(20)计算其等级贴近度、绿色发展等级判定及等级偏向程度,结果见表4。

表2 客观权重和综合权重

Table 2 Objective weighting and comprehensive weighting

一级指标	客观权重	综合权重	二级指标	客观权重	综合权重
经济发展	0.370 8	0.361 7	每股收益	0.074 2	0.072 9
			流动比率	0.072 2	0.071 2
			应收账款周转率	0.090 4	0.088 7
			总资产报酬率	0.134 0	0.128 9
生态绿色	0.307 7	0.327 3	万元产值能耗	0.081 5	0.086 6
			水资源循环利用率	0.063 1	0.067 3
			温室气体排放密度	0.079 8	0.084 0
			尾矿废弃物回收率	0.083 2	0.089 4
社会效益	0.321 5	0.311 0	百万工时事故率	0.098 3	0.095 0
			本地员工雇佣率	0.146 7	0.142 3
			员工社保投保率	0.076 4	0.073 8

表3 经典域和节域及归一化结果

Table 3 Classical domain and nodal domain and their normalization results

二级评估指标	经典域					节域	归一化经典域					归一化节域
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ		Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	
A_1	[0,0.5)	[0.5,1)	[1,1.5)	[1.5,2)	[2,2.5]	[0,2.5]	[0,0.2)	[0.2,0.4)	[0.4,0.6)	[0.6,0.8)	[0.8,1]	[0,1]
A_2	[0,0.4)	[0.4,0.8)	[0.8,1.2)	[1.2,1.6)	[1.6,2]	[0,2]	[0,0.2)	[0.2,0.4)	[0.4,0.6)	[0.6,0.8)	[0.8,1]	[0,1]
A_3	[0,40)	[40,80)	[80,120)	[120,160)	[160,200]	[0,200]	[0,0.2)	[0.2,0.4)	[0.4,0.6)	[0.6,0.8)	[0.8,1]	[0,1]
A_4	[−5,0)	[0,5)	[5,10)	[10,15)	[15,20]	[−5,20]	[0,0.2)	[0.2,0.4)	[0.4,0.6)	[0.6,0.8)	[0.8,1]	[0,1]
B_1	(0.6,1]	(0.5,0.6]	(0.4,0.5]	(0.3,0.4]	[0,0.3]	[0,1]	(0.6,1]	(0.5,0.6]	(0.4,0.5]	(0.3,0.4]	[0,0.3]	[0,1]
B_2	[0,30)	[30,60)	[60,75)	[75,90)	[90,100]	[0,100]	[0,0.3)	[0.3,0.6)	[0.6,0.75)	[0.75,0.9)	[0.9,1]	[0,1]
B_3	(5,10]	(3,5]	(1,3]	(0.5,1]	[0,0.5]	[0,10]	(1,2]	(0.6,1]	(0.2,0.6]	(0.1,0.2]	[0,0.1]	[0,2]
B_4	[0,15)	[15,30)	[30,45)	[45,60)	[60,100]	[0,100]	[0,0.15)	[0.15,0.3)	[0.3,0.45)	[0.45,0.6)	[0.6,1]	[0,1]
C_1	(2,10]	(1,2]	(0.8,1]	(0.5,0.8]	[0,0.5]	[0,10]	(0.2,1]	(0.1,0.2]	(0.08,0.1]	(0.05,0.08]	[0,0.05]	[0,1]
C_2	[0,30)	[30,60)	[60,75)	[75,90)	[90,100]	[0,100]	[0,0.3)	[0.3,0.6)	[0.6,0.75)	[0.75,0.9)	[0.9,1]	[0,1]
C_3	[0,30)	[30,60)	[60,75)	[75,90)	[90,100]	[0,100]	[0,0.3)	[0.3,0.6)	[0.6,0.75)	[0.75,0.9)	[0.9,1]	[0,1]

表4 等级贴近度、绿色发展等级及等级偏向程度

Table 4 Grade closeness, green development grade and grade bias degree

公司	年份	等级贴近度					绿色发展	
		Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	等级	偏向程度
JT	2023	0.545 2	0.767 7	0.914 2	0.920 9	0.872 3	Ⅳ	3.623 7(Ⅲ)
	2022	0.575 6	0.788 3	0.911 3	0.896 1	0.842 1	Ⅲ	3.564 3(Ⅳ)
	2021	0.571 5	0.781 0	0.874 0	0.900 6	0.862 3	Ⅳ	3.619 5(Ⅲ)
ZJ	2023	0.629 8	0.832 3	0.912 9	0.887 3	0.817 3	Ⅲ	3.462 1(Ⅳ)
	2022	0.606 8	0.822 4	0.905 0	0.906 4	0.839 1	Ⅳ	3.524 6(Ⅲ)
	2021	0.593 4	0.806 5	0.916 7	0.915 8	0.853 1	Ⅲ	3.5622(Ⅳ)

由表4可知,JT公司2021年的绿色发展能力判定为Ⅳ“良好”等级,有偏向Ⅲ“中等”等级,JT公司2022年的绿色发展能力等级评定为Ⅲ“中等”等级,与2021年的偏向程度一致,表明非对称贴近度的物元评估模型有效。JT公司2023年、ZJ公司2023年和2022年绿色发展能力等级判定与JT公司2022年、ZJ公司2022年和2021年的偏向程度一致,进一步验证了基于改进物元可拓模型的有色

金属企业绿色发展能力评估具有一定的可靠性和准确性。

4 结论

(1) 通过文献分析和专家咨询等方式筛选指标,构建了有色金属企业绿色发展能力评估指标体系,包括 3 个一级评估指标和 11 个二级评估指标。

(2) 分别采用遗传层次分析法和 CRITIC 方法计算评估指标主观权重和客观权重,并依据博弈论理论计算综合权重。所提出的博弈论组合赋权方法能够充分利用主观因素和客观因素,使评估指标赋权更加合理和严谨。

(3) 运用非对称贴近度准则替换最大关联度准则,建立了基于改进物元可拓模型的有色金属企业绿色发展能力评估模型。将所建立的模型进行实例研究,实例结果表明:评定等级与上一年的偏向程度均一致,验证了基于改进物元可拓模型的有色金属企业绿色发展能力评估具有一定可靠性和准确性。

参考文献(References):

[1] 孙永波,张悦.基于云模型的煤炭上市公司绿色发展评价研究[J].中国矿业,2020,29(10):79-85.
SUN Yongbo, ZHANG Yue. Research on green development evaluation of coal listed companies based on cloud model[J]. China Mining Magazine, 2020, 29(10): 79-85.

[2] 吴才伍,吴和平.有色金属绿色矿山建设的现状与思考[J].现代矿业,2020,36(6):6-10.
WU Caiwu, WU Heping. Present situation and thinking of non-ferrous metal green mine construction [J]. Modern Mining, 2020, 36(6): 6-10.

[3] 邵朱强,李丹,刘睿.我国有色金属工业绿色低碳发展问题与建议[J].环境保护,2023,51(9):8-11.
SHAO Zhuqiang, LI Dan, LIU Rui. Green and low-carbon development issues and suggestions of China's non-ferrous metal industry[J]. Environmental Protection, 2023, 51(9): 8-11.

[4] 林星杰,苗雨,楚敬龙,等.环保新常态下我国有色金属矿山的可持续发展[J].有色金属(冶炼部分),2021(3):28-30+50.
LIN Xingjie, MIAO Yu, CHU Jinglong, et al. Sustainable development of nonferrous metal mines in China under new normal of environmental protection[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2021(3): 28-30+50.

[5] 黄麟淇,陈江湛,周健,等.未来有色金属采矿可持续发展实践与思考[J].中国有色金属学报,2021,31(11):3436-3649.
HUANG Linqi, CHEN Jiangzhan, ZHOU Jian, et al. Practice and thought on sustainable development of nonferrous metal mining [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(11): 3436-3649.

[6] 易斌,左治兴,朱必勇.中国有色金属矿山可持续发展存在的问题与解难[J].中国矿业,2007(6):30-32.
YI Bin, ZUO Zhixing, ZHU Biyong. Problems affecting on sustainable development in non-ferrous mines and resolvation[J]. China Mining Magazine, 2007(6): 30-32.

[7] 钟琛,胡乃联,段绍甫,等.有色金属绿色矿山评价体系研究[J].矿业研究与开发,2019,39(7):146-151.
ZHONG Chen, HU Nailian, DUAN Shaofu, et al. Research on evaluation system of green minesin non-ferrous metal industry[J]. Mining Research and Development, 2019, 39(7): 146-151.

[8] 陈丽新,余海洋,杨繁,等.国家级绿色矿山建设评价指标解析[J].中国矿业,2024,33(5):72-79.
CHEN Lixin, YU Haiyang, YANG Fan, et al. Analysis of evaluation indicators for national green mine construction [J]. China Mining Magazine, 2024, 33(5): 72-79.

[9] 罗德江,吴昊,何苏,等.基于犹豫模糊 TOPSIS 的绿色矿山多属性评价方法[J].矿产综合利用,2021(4):41-49.
LUO Dejiang, WU Hao, HE Su, et al. Multiattribute evaluation method for green mines based on hesitant fuzzy TOPSIS[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(4): 41-49.

[10] 张振华.绿色矿山建设评价模型研究及应用[J].现代矿业,2024,40(5):152-156+160.
ZHANG Zhenhua. Research and application of green mine construction evaluation model [J]. Modern Mining, 2024, 40(5): 152-156+160.

[11] 黄洁,侯华丽.我国矿业绿色发展指数体系构建[J].中国矿业,2018,27(12):1-5.
HUANG Jie, HOU Huali. Construction of green mining development index system in China [J]. China Mining Magazine, 2018, 27(12): 1-5.

[12] 刘金平,严慧,杨贺,等.江苏省金属矿山绿色发展水平评价及模式研究[J].矿业研究与开发,2014,34(6):95-98.
LIU Jinping, YAN Hui, YANG He, et al. Evaluation and model research on green development level for metal mine in Jiangsu Province [J]. Mining Research and Development, 2014, 34(6): 95-98.

[13] 斗海峰,陈谊,武彩霞,等.基于改进物元可拓模型的肉制品中化学污染物风险评估方法[J].食品科学,2023,44(11):1-8.
DOU Haifeng, CHEN Yi, WU Caixia, et al. A risk assessment method of chemical contaminants in meat products based on improved matter-element extension model [J]. Food Science, 2023, 44(11): 1-8.

[14] 胡梦珺,李春艳,李娜娜,等.基于物元可拓模型的兰州市主城区公园表土重金属污染评价[J].环境科学,2021,42(5):2457-2468.
HU Mengjun, LI Chunyan, LI Nana, et al. Using the matter-element extension model to assess heavy metal pollution in topsoil in parks in the main district park of Lanzhou City [J]. Environmental Science, 2021, 42(5): 2457-2468.

[15] 刘润芳,郝东明,李馨兰.不同规模城市治理能力现代化水平测度[J].统计与决策,2024,40(6):89-93.
LIU Runfang, HAO Dongming, LI Xinlan. Measuring the modernization level of governance capacity in cities of different sizes[J]. Statistics and Decision, 2024, 40(6): 89-93.

[16] 凡奥奇,王万禄,李树建,等.基于优化组合赋权的可拓学磷矿山岩体质量评价[J].黄金科学技术,2024,32(1):132-143.
FAN Aoqi, WANG Wanlu, LI Shujian, et al. Evaluation of rock mass quality of phosphorite mines by topology based on optimal combination weight [J]. Gold Science and Technology, 2024, 32(1): 132-143.

[17] WANG Qiang, LI Siqi, HE Gang, et al. Evaluating sustainability of water-energy-food (WEF) nexus using an improved matter-element extension model: a case study of China [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 202: 1097-1106.

[18] 刘仁争,田康生,彭富强,等.基于非对称贴近度的预警雷达情报质量评估[J].电子与信息学报,2019,41(1):130-135.
LIU Renzheng, TIAN Kangsheng, PENG Fuqiang, et al. Quality analysis of early warning radar intelligence based on asymmetrical proximity [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2019, 41(1): 130-135.

[19] 肖亮,张千俊.基于组合赋权-蛛网灰靶模型的岩爆等级评价[J].矿业研究与开发,2024,44(7):149-155.
XIAO Liang, ZHANG Qianjun. Evaluation of rock burst level based on combination weighting-cobweb grey target model[J]. Mining Research and Development, 2024, 44(7): 149-155.

[20] 张倩,黄大荣,王晶,等.基于博弈组合赋权的有源相控阵雷达收发组件脆弱性评估[J].控制与决策,2024,39(6):1995-2004.
ZHANG Qian, HUANG Darong, WANG Jing, et al. Vulnerability assessment of active phased array radar transceiver based on game combination weighting [J]. Control and Decision, 2024, 39(6): 1995-2004.

[21] 林宇亮,左伟俊,邢浩,等.基于组合赋权-VIKOR法的山区施工便道方案优选模型[J].中南大学学报(自然科学版),2024,55(2):445-456.
LIN Yuliang, ZUO Weijun, XING Hao, et al. Optimization model on construction scheme of pioneer road in mountainous area based on combination weight and VIKOR method [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2024, 55(2): 445-456.

[22] 胥孝川,王训洪,叶鲁青,等.基于GA-AHP和云物元模型的露天矿边坡稳定性评估研究[J].金属矿山,2021(10):168-172.
XU Xiaochuan, WANG Xunhong, YE Luqing, et al. Study on slope stability of the open-pit mine based on GA-AHP and cloud matter-element model[J]. Metal Mine, 2021(10): 168-172.

[23] 向辐.基于DEMATEL法的充填管道磨损风险评估可拓云模型[J].矿业研究与开发,2024,44(6):172-180.
XIANG Yun. Extension cloud model for risk assessment of filling pipeline wear based on DEMATEL method [J]. Mining Research and Development, 2024, 44(6): 172-180.

[24] 黄骏,李永宾,温玉涛.基于GA-AHP算法的多目标威胁评估[J].空军工程大学学报(自然科学版),2019,20(5):90-96.
HUANG Jun, LI Yongbin, WEN Yutao. Multi-target threat assessment based on GA-AHP algorithm[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(5): 90-96.

[25] 梁硕,王艳松.基于改进云物元模型的工业园区综合能源系统规划方案评价[J].电力系统保护与控制,2023,51(9):165-176.
LIANG Shuo, WANG Yansong. Evaluation of an integrated energy system planning scheme for an industrial park based on an improved cloud matter-element model [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(9): 165-176.

[26] 陈娜,胡毅彤,袁英峰,等.基于博弈论组合赋权-云模型的消防员训练损伤风险评估[J].中国安全科学学报,2024,34(4):232-238.
CHEN Na, HU Yitong, YUAN Yingfeng, et al. Risk assessment of firefighter training injury based on game theory combinatorial weighting and cloud model[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(4): 232-238.

[27] 汤青慧,刘硕,刘文杰.基于改进变权物元可拓模型的地铁车站火灾安全韧性评价[J].安全与环境学报,2024,24(4):1346-1355.
TANG Qinghui, LIU Shuo, LIU Wenjie. Evaluation of fire safety resilience of metro station based on improved matter-element extension model with variable weight[J]. Journal of Safety and Environment, 2024, 24(4): 1346-1355.

[28] 张晓平.基于贴近度的模糊综合评判结果的集化[J].山东大学学报(理学版),2004(2):25-29.
ZHANG Xiaoping. The definition of product about fuzzy comprehensive evaluation methods based on closeness[J]. Journal of Shandong University (Natural Science), 2004(2): 25-29.