

# 基于混合多维云模型的工业绿色发展水平测度<sup>①</sup>



何佳蔓, 刘小红, 张人龙

(贵州大学 管理学院, 贵阳 550025)

通信作者: 刘小红, E-mail: liuxiaohonggj@163.com

**摘要:** 如何测度各省工业绿色发展水平高低, 判断各省工业绿色创新能力差异, 本文从绿色投入要素和绿色产出效益视角构建集结综合属性值的工业绿色发展多指标评价体系; 并在云模型基础上提出了基于混合多维云模型的区间多属性测度方法. 该方法创新性地利用区间权重和云权重的相互转换, 在解决多指标权重不一的问题后, 再运用父云贴适度计算工业绿色发展水平, 云投影度测定工业绿色创新能力; 最后采用省际间的工业面板数据进行验证. 结果表明, 相较于一般的多指标综合评价法, 该测定方法的实证结果与实际情况更相符合, 说明了该方法既能对工业绿色发展水平的整体情况进行评价分析, 也能精确计算出各指标贡献度, 从而判断其是否具有工业绿色创新能力. 因此, 本研究可为各地区调整工业绿色发展水平测度指标、制定工业绿色发展规划提供实质性建议和理论决策依据.

**关键词:** 多维云模型; 工业绿色发展; 云投影法; 云贴适度; 区间权重

引用格式: 何佳蔓, 刘小红, 张人龙. 基于混合多维云模型的工业绿色发展水平测度. 计算机系统应用, 2023, 32(2): 34-44. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/8953.html>

## Measurement of Industrial Green Development Level Based on Hybrid Multi-dimensional Cloud Model

HE Jia-Man, LIU Xiao-Hong, ZHANG Ren-Long

(School of Management, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** This study is conducted to measure the level of industrial green development and judge the differences in industrial green innovation ability among provinces. The study constructs a multi-index evaluation system integrating comprehensive attribute values for industrial green development from the perspective of green input factors and green output benefits and proposes an interval multi-attribute measurement method based on the hybrid multi-dimensional cloud model. This method creatively uses the mutual transformation of the interval weight and cloud weight to solve the problem of different weights of multiple indexes. After that, the parent cloud closeness is employed to calculate the industrial green development level, and the cloud projection is applied to measure industrial green innovation ability. Finally, industrial panel data between provinces are used for verification. The results indicate that compared with the results of the general multi-index comprehensive evaluation method, the empirical results of this method are more consistent with the actual situation. This means that the method can not only evaluate and analyze the overall situation of the industrial green development level but also accurately calculate the contribution of each index to judge whether a province or region has the industrial green innovation ability. Therefore, this study can provide substantive suggestions and theoretical decision-making basis for regions to adjust the measurement indexes for the industrial green development level and formulate industrial green development plans.

① 基金项目: 贵州省哲学社会科学规划课题一般项目 (21GZYB10, 21GZYB09); 贵州省省级科技计划 (黔科合基础-ZK[2022] 一般 080); 贵州大学文科研究一般项目 (GDYB2021022)

收稿时间: 2022-06-05; 修改时间: 2022-07-01; 采用时间: 2022-08-25; csa 在线出版时间: 2022-11-14

CNKI 网络首发时间: 2022-11-16

**Key words:** multi-dimensional cloud model; industrial green development; cloud projection method; cloud closeness; interval weight

增强工业绿色发展水平是当今中国乃至今后较长时间实现经济可持续发展和生态文明建设的重要环节。目前,国内外对工业绿色发展水平的评价方法主要分为绿色 GDP 核算<sup>[1]</sup>、全要素生产率法<sup>[2]</sup>、基于多指标测度综合指数法<sup>[3]</sup>这3类。但这3类评价方法都是基于效率的核算,若要拓展工业绿色发展内涵,则需构建绿色发展综合指标体系<sup>[4]</sup>。然而,什么样的多指标测度方法既能反映工业绿色发展水平的总体情况,又能体现工业绿色创新能力呢?

为解决这类问题,何静等<sup>[5]</sup>构建了绿色经济评价指标体系并运用因子分析法对中国30个地区历年的绿色经济进行了比较和评价。田亚鹏等<sup>[6]</sup>采用超效率SBM-DEA模型测算陕西省地级市的绿色发展效率。李兰冰等<sup>[7]</sup>研究了技术创新、节能减排与城市绿色发展之间的影响效应和路径机制。Zou等<sup>[8]</sup>研究了环境监管体系是否推动了中国污染密集型产业的绿色发展。王韶华等<sup>[9]</sup>运用粗糙集和前沿函数模型对京津冀地区的工业绿色发展进行了研究。但以上研究并没有从多维视角来分析工业绿色发展水平整体中的绿色投入要素和绿色产出效益间的相互影响与制约关系。基于此,在中国当前环境和资源等约束条件下建立基于混合多维云模型的多指标综合测度方法,不仅可以反映工业绿色发展整体水平的高低,也能精确计算出各指标贡献度,从而判断其是否具有工业绿色创新能力;同时为协调推动各地区工业绿色发展进程提供实质性参考建议和理论决策依据。

## 1 集结综合属性值的工业绿色发展水平指标体系构建

当前工业绿色发展矛盾表现在资源能源消耗大、利用率低、环境污染严重、绿色发展能力和绿色创新能力不高。因此本文借鉴四部委发布的《绿色发展指标体系》及在以往学者们<sup>[10-19]</sup>相关研究的基础上,从绿色投入要素和绿色产出效益维度构建了集结综合属性值的工业绿色发展多指标评价体系如表1所示。

表1 集结综合属性值的工业绿色发展水平指标体系

目标层	一级指标	二级指标	单位
工业绿色发展水平	绿色投入要素	工业用水量 $C_{11}$	亿立方米
		规上工业企业研发机构人员 $C_{12}$	个
		能源工业投资增长率 $C_{13}$	%
		规上工业企业专利数 $C_{14}$	个
		综合能源消费总量 $C_{15}$	万吨标准煤
		电力消费量 $C_{16}$	亿千瓦时
		无害化处理能力 $C_{17}$	吨/日
		工业R&D经费 $C_{18}$	万元
	绿色产出效益	规上工业企业新产品开发利润率 $C_{21}$	%
		居民人均可支配收入 $C_{22}$	万元
		一般工业固体废物综合利用率 $C_{23}$	%
		规上工业增加值增长率 $C_{24}$	%
		规上工业企业营业收入利润率 $C_{25}$	%
		人均水资源量 $C_{26}$	立方米/人
		工业废水排放量 $C_{27}$	吨
		工业二氧化硫排放量 $C_{28}$	吨

## 2 基于混合多维云模型的区间多属性测度方法的构建

工业绿色发展水平指标阈值的衡量具有模糊性和不确定性,对各指标权重界定常采用的主/客观赋权法缺陷比较明显。因为对不同属性指标而言,依赖主观意识、依赖足够样本数据和实际问题域的赋权法会导致权重与属性的实际重要程度相差较大,进一步加剧指标数据量化评估权重的失真。相比之下,基于数据统计属性本身的云权重<sup>[20]</sup>在属性指标值不确定、属性权重完全未知时,能通过期望、熵、超熵数字特征有效解决系统过程中的随机性和模糊性,实现定性与定量间的双向认知转换,最大程度地减少属性权重失真问题。当权重值不精确时,可通过区间权重的标准化来确定属性的权值问题,提高指标评价的效率和准确性。因此,本文将构建基于混合多维云模型的区间多属性决策方法来测度工业绿色发展水平的高低,并判断各地区是否具有工业绿色创新能力。本研究针对工业绿色发展水平的测度模型具体流程见图1所示。

### 2.1 多属性多维云模型

在工业绿色发展水平评价过程中,其发展水平的

高低由多个内在相互联系和共同影响的指标决定. 由此可将一维正态云模型推广至多维云模型, 通过多个维度来描述工业绿色发展水平指标属性的概念. 设  $U$  是一个  $n$  维论域,  $C$  为  $U$  上的定性概念,  $n$  维云模型  $x(x_1, x_2, \dots, x_n)$  是  $U$  中  $C$  的一次随机实现. 令  $(x_i, \mu_i)$  为云滴, 则  $x(x_1, x_2, \dots, x_n) \sim N(Ex(Ex_1, Ex_2, \dots, Ex_n), En'(En_1', En_2', \dots, En_n')^2)$ ; 其中  $En'$  服从正态分布  $En'(En_1', En_2', \dots, En_n') \sim N(En(En_1, En_2, \dots, En_n), He(He_1', He_2', \dots, He_n')^2)$ ;  $U$  中元素  $x$  对于  $C$  的隶属度  $\mu(x)$  为是一个具有稳定倾向的随机数, 且有  $i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$ ,

$$\mu_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = \exp \left[ - \sum_{j=1}^n \frac{(x_{ij} - Ex_{ij})^2}{2(En_{ij}')^2} \right]$$

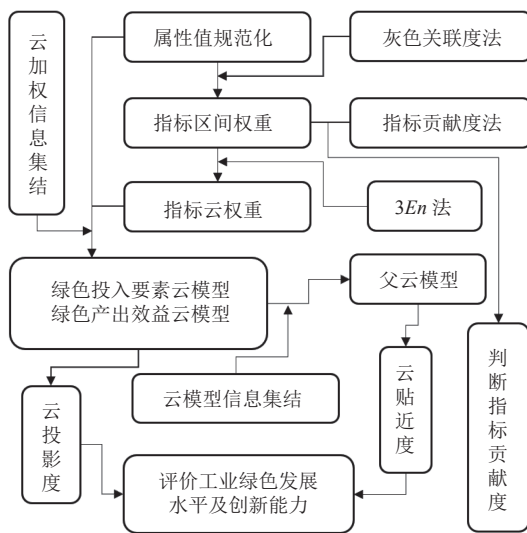


图1 工业绿色发展水平测度模型图

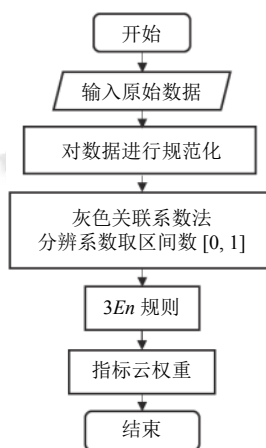


图2 云权重算法流程图

因此, 多维正态云模型可用期望  $Ex$ 、熵  $En$ 、超熵  $He$  三个数字特征表示  $n$  维论域中的某个定性概念,

且云滴分布服从期望为  $Ex$ , 方差为  $En^2 + He^2$  的随机变量. 其中,  $Ex$  是云滴在论域空间分布中的数学期望, 反映定性概念云滴群的云重心.  $En$  表示定性概念不确定性的度量, 反映了云滴的离散程度和论域范围内云滴的取值范围.  $He$  是对  $En$  的不确定性度量, 反映了云滴的厚度. 研究表明, 超熵越大, 云的离散程度越大, 隶属度的随机性也随之增大, 云的厚度也越厚.

### 2.2 多指标多属性规范化决策矩阵

由于工业绿色发展水平指标属性的单位并不完全一致, 不能直接对多指标体系进行相互比较和信息集成. 为此, 对指标多属性决策矩阵进行无量纲化处理. 假设有  $m$  个待评价方案, 每个待评价方案  $A_i (i = 1, 2, \dots, m)$  有  $n$  个评价属性  $C_j (j = 1, 2, \dots, n)$ , 则决策矩阵  $X = (x_{ij})_{m \times n}$ , 其中  $x_{ij}$  为第  $i$  个待评价方案的第  $j$  个评价指标值. 工业绿色发展水平指标多属性决策矩阵规范化处理方法如下:

$$\begin{cases} y_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} & (\text{效益型属性}) \\ y_{ij} = \frac{x_{\max} - x_{ij}}{x_{\max} - x_{\min}} & (\text{成本型属性}) \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $x_{\max}$  和  $x_{\min}$  是同一属性不同评价方案的最大值和最小值. 规范化矩阵为  $Y = (y_{ij})_{m \times n}$ .

### 2.3 区间权重与多维云权重的转化

区间权重不同于精确实数属性权重, 其更能表达决策评价过程中的模糊性, 贴近实际的决策问题.

已知区间数  $a = [a^-, a^+] = \{x | a^- \leq x \leq a^+\}$ . 设  $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ , 其中  $\omega_j = [\omega_j^-, \omega_j^+]$  满足  $0 \leq \omega_j^- \leq \omega_j^+ \leq 1, j = 1, 2, \dots, n$ . 若存在  $X = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ ,  $\omega_j^- \leq x_i \leq \omega_j^+$ , 使得  $\sum_{i=1}^m x_i = 1$ , 则称  $\omega$  为区间权重.

由于该区间权重不能直接映射属性权重的隶属度, 本文结合灰色关联系数法和  $3En$  规则将区间权重转化为含隶属度的云权重.

设规范化后母序列为  $y_0 = (y_{0j})_{1 \times n} = (\max_i y_{i1}, \max_i y_{i2}, \dots, \max_i y_{in})$ , 且  $\Delta_i(j) = |y_0(j) - y_i(j)|, M = \max_i \max_j \Delta_i(j), m = \min_i \min_j \Delta_i(j)$ , 关联系数  $\gamma_{0i}(j) = \frac{m + \varepsilon M}{\Delta_i(j) + \varepsilon M}, \lambda_{0j} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \gamma_{0i}(j)$ ; 分辨系数  $\varepsilon \in [0, 1]$ , 则含隶属度的云权重为:

$$\begin{cases} \omega_j = \lambda_{0j} / \sum_{i=1}^n \lambda_{0i}, \omega_j = [\omega_j^-, \omega_j^+] \\ i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (2)$$

若正态分布  $\xi_a \sim N(\mu, \sigma^2)$ , 根据  $3En$  规则有  $P(|a - \mu| < 3\sigma) \approx 0.9973$ . 令  $\mu - 3\sigma = a^-, \mu + 3\sigma = a^+$ , 则  $\mu_a = (a^- + a^+)/2, \sigma_a = (a^+ - a^-)/6, \mu_a \in [0, 1]$  反映区间数  $a$  的确定

度,  $\sigma_a \in [0, 1]$  反映区间数  $a$  的不确定度. 又  $Ex = (a^+ + a^-)/2$ , 由于区间数与云模型的边界值是模糊过渡值, 因此, 两个区间的隶属度相等, 则有  $\exp(-(a^+ - a^-)^2/8En^2) = 0.5$ . 解得  $En = (a^+ - a^-)/2.355$ ,  $He = En/10$ .  $He$  的值由逆向云发生器得到. 因此, 区间权重和含隶属度的多维云权重转换公式如下:

$$\begin{cases} N_j^\omega = (Ex_j^\omega, En_j^\omega, He_j^\omega) = \left( \frac{\omega_j^- + \omega_j^+}{2}, \frac{\omega_j^+ - \omega_j^-}{2.355}, \frac{\omega_j^+ - \omega_j^-}{2.355 \times 10} \right) \\ j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $\omega_j^-$ 、 $\omega_j^+$  分别为第  $j$  个指标区间权重中的两个参数, 通过上述灰色关联度求出各指标的区间权重, 再转化成含隶属度的云权重  $N_j^\omega$ , 则  $(Ex_j^\omega, En_j^\omega, He_j^\omega)$  为第  $j$  个指标云权重对应的多维云数字特征, 其指标云权重算法流程如图 2 所示. 通过该规则可以将区间权重转化为云权重, 使得各指标的区间权重赋有一定的隶属度.

#### 2.4 三维云模型和父云的综合属性值计算

本文从工业绿色发展的绿色投入要素和绿色产出效益这两个维度构建评价指标体系, 对属性间的信息集结也将从这两个维度构建工业绿色发展水平的多维云模型.

已知代表第  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) 个待评价方案  $A_i$  的工业绿色发展水平的多维云模型为  $N_i = (N_{i1}, N_{i2}) = ((Ex_{i1}, En_{i1}, He_{i1}), (Ex_{i2}, En_{i2}, He_{i2}))$ . 属性云权重和规范化数据的信息集结方法即综合属性值为  $N_{ik}$ , 即:

$$\begin{cases} N_{ik} = y_{ij} N_j^\omega = (Ex_{ik}, En_{ik}, He_{ik}), k = 1, 2 \\ Ex_{ik} = \sum_{j=1}^n y_{ij} Ex_j^\omega \\ En_{ik} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ij} En_j^{\omega 2}} \\ He_{ik} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ij} He_j^{\omega 2}} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} Sim_{si}^{+/-}(N_i, N_{\max/\min}) = \frac{\min\left(\sqrt{En_i^2 + He_i^2}, \sqrt{En_{\max/\min}^2 + He_{\max/\min}^2}\right)}{\max\left(\sqrt{En_i^2 + He_i^2}, \sqrt{En_{\max/\min}^2 + He_{\max/\min}^2}\right)} \\ Sim_{di}^{+/-}(N_i, N_{\max/\min}) = \frac{1}{\sqrt{(Ex_i - Ex_{\max/\min})^2 + (En_i - En_{\max/\min})^2 + (He_i - He_{\max/\min})^2}} \\ Sim_i^{+/-} = Sim_{si}^{+/-} \times Sim_{di}^{+/-}, i = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (7)$$

则第  $i$  个待评价方案的工业绿色发展水平整体情况即贴近度  $\gamma_i$  为:

$$\gamma_i = \frac{Sim_i^+}{Sim_i^+ + Sim_i^-}, i = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

对于第  $i$  个待评价方案的绿色投入要素云模型  $N_{i1}(Ex_{i1}, En_{i1}, He_{i1})$  和绿色产出效益云模型  $N_{i2}(Ex_{i2}, En_{i2}, He_{i2})$ , 可以将其凝聚为更高一级的父云  $N_i$  来整体描述工业绿色发展水平, 其公式如下:

$$\begin{aligned} N_i &= N_{i1} + N_{i2} = (Ex_i, En_i, He_i) \\ &= \left( Ex_{i1} + Ex_{i2}, \sqrt{\frac{En_{i1}^2 + En_{i2}^2}{2}}, \sqrt{\frac{He_{i1}^2 + He_{i2}^2}{2}} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

各待评价方案的多维云模型用于判断自身是否具有工业绿色创新能力, 父云即用来比较工业绿色发展整体水平.

#### 2.5 基于混合多维云模型的贴近度和云投影度测定

在多维云模型中, 如何判断各云模型与父云之间的相似程度或接近程度, 可用贴近度进行度量. 本研究通过计算各待评价方案的父云模型, 找出正理想云模型和负理想云模型, 并计算各待评价方案与正理想云模型和负理想云模型的云相似度, 从而得到各待评价方案与正、负理想云模型的接近程度即贴近度. 具体计算过程如下.

将各地区的工业绿色发展水平的多维云模型凝聚为更高一级的父云  $N_i = (Ex_i, En_i, He_i)$  后, 通过  $N_{\max}$  和  $N_{\min}$  可确定工业绿色发展水平的正/负理想云模型如式 (6) 所示. 通过求解各地区的工业绿色发展水平的父云与正/负理想云模型的综合云相似度, 由此得到各地区的工业绿色发展水平的贴近度.

$$\begin{cases} N_{\max/\min} = (Ex_{\max/\min}, En_{\max/\min}, He_{\max/\min}) \\ N_{\max} = (\max Ex_i, \min En_i, \min He_i) \\ N_{\min} = (\min Ex_i, \max En_i, \max He_i) \end{cases} \quad (6)$$

其中, 基于云模型方差的形状相似度  $Sim_{si}^{+/-}$ 、云模型的距离相似度  $Sim_{di}^{+/-}$  以及各父云与正理想和负理想云模型的综合相似度  $Sim_i^{+/-}$  公式如下:

贴近度只能反映区域工业绿色发展水平的整体情况,工业绿色发展水平是否具有绿色创新能力可通过云投影法来测度,即将各待评价方案的绿色产出效益云模型投影到绿色投入要素云模型上来反映待评价方案内部的相互制约和影响关系。

云投影法是一种解决多维度、非线性问题的新统计方法,通过计算反映将多维云模型数据投影到低维云模型子空间的投影度,从而达到分析混合多维云模型数据的目的。本研究中将各待评价方案的绿色产出效益云模型投影到绿色投入要素云模型上来反映待评价方案内部的相互制约和影响关系。即将绿色产出效益云模型和绿色投入要素云模型的数字特征看作是两个向量,运用向量投影法将绿色产出效益云模型投影到绿色投入要素云模型上,则可以得到云模型间的云投影度  $Pr_{jN_{i1}}(N_{i2})$ 。绿色产出效益  $N_{i2}$  在绿色投入要素  $N_{i1}$  上的云投影度  $Pr_{jN_{i1}}(N_{i2})$  计算公式为:

$$Pr_{jN_{i1}}(N_{i2}) = \frac{\sqrt{(Ex_{i2})^2 + (En_{i2})^2 + (He_{i2})^2}}{\sqrt{(Ex_{i1})^2 + (En_{i1})^2 + (He_{i1})^2}} \quad (9)$$

一般地,  $Pr_{jN_{i1}}(N_{i2})$  值越大,表示向量  $N_{i1}$  和  $N_{i2}$  之间越接近;若  $Pr_{jN_{i1}}(N_{i2}) > 1$ ,则表明第  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) 个待评价方案  $A_i$  的工业绿色发展水平具有工业绿色创新能力,即该绿色产出效益超出了该区域的工业绿色投入要素。

### 2.6 基于混合多维云模型的区间多属性指标优化贡献度研究

考虑各项指标对工业绿色发展水平和工业绿色创新能力的影 响存在差异,可从区域视角找出长板指标和短板指标,因地制宜地重点增强短板指标和持续稳定地发展长板指标,最后实现各个指标的贡献度基本一致,实现指标间的均衡协调发展。其中,对第  $i$  个待评价方案的各指标初始贡献度进行分析时,可由式 (10) 求出该待评价方案的各个区间属性值  $a_{ij} = [a_{ij}^-, a_{ij}^+]$ 。

$$\begin{cases} a_{ij} = [a_{ij}^-, a_{ij}^+]_{1 \times n} = y_{ij} \times [\omega_j^-, \omega_j^+] \\ p(a_{ij} \geq a_{i(j+1)}) = \frac{\min\{l_{a_{ij}} + l_{a_{i(j+1)}}, \max(a_{ij}^+ - a_{i(j+1)}^-, 0)\}}{l_{a_{ij}} + l_{a_{i(j+1)}}} \\ v_j = \frac{1}{n(n-1)} \left( \sum_{j=1}^n p_{ij} + \frac{n}{2} - 1 \right) \\ \alpha_j = \frac{\gamma_j}{\sum_{j=1}^n \gamma_j}, j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (10)$$

由  $n$  个代表各属性值的混合多维云模型区间数  $a_{ij} = [a_{ij}^-, a_{ij}^+]$  进行互相比 较,得到指标可能度矩阵为

$(p_{ij})_{n \times n}$ , 即排序向量为  $v_j = (v_1, v_2, \dots, v_n)$ 。

根据排序向量可以确定各指标对工业绿色发展水平的初始贡献度  $\alpha_j$ 。为最大限度地使各指标的贡献度大小趋于一致,在优化指标贡献度约束条件下,确保群体贡献度最大原则和极大熵准则,建立如式 (11) 的基于二次优化贡献度的  $\beta_j$  模型。考虑群体贡献度最大原则和极大熵准则在目标函数中所占地位是平等的,通常取  $\mu = 0.5$ 。  $\beta_j \geq \eta$  可保证各个指标均参与到决策中,  $\eta$  作为临界值,一般为  $\eta = 1/2m$ , 由此可以得到每个指标的优化贡献度  $\beta_j$ 。

$$\begin{cases} \max [\mu \sum_{j=1}^n (\beta_j \gamma_j)^2 - (1 - \mu) \sum_{j=1}^n \beta_j \ln \beta_j] \\ \text{s.t.} \begin{cases} \sum_{j=1}^n \beta_j = 1 \\ \beta_j \geq \eta, 0 < \mu < 1, j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \end{cases} \quad (11)$$

比较优化贡献度  $\beta_j$  和初始贡献度  $\alpha_j$  的差值可以得知:若  $\alpha_j \leq \beta_j$ , 则代表该指标的初始贡献度还不够大,并且没有达到理想状态,还有较大的发展空间,视其为短板指标;若  $\alpha_j > \beta_j$ , 则为长板指标。从而可以分析各指标对工业绿色发展水平的贡献度并对其进行研究,为未来制定工业绿色发展规划提供实质性建议和理论根据。

### 3 实证

在工业绿色发展水平评价指标体系及方法研究基础上,本文拟对中国 30 个地区的工业绿色发展水平进行测度研究。指标数据主要通过各政府官方网站公布的统计数据及历年中国各地区的《统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《国民经济和社会发展统计公报》等获取。

工业绿色发展水平指标体系原始数据先由式 (1) 进行规范化处理,再由式 (2), 式 (3) 对属性进行赋权得到各个属性的区间权重,再将区间权重转化为含隶属度的多维云权重,如表 2 所示,其处理模糊性和随机性的能力较强,可减少信息缺失。

通过 Matlab 编制云正向发生器可直观展示各属性的云权重。集结综合属性值的工业绿色发展水平指标体系的多维云权重如图 3 所示。

按照信息集结式 (4) 将云权重和规范化数据进行集结得到各地区的综合属性值,即从绿色投入要素和绿色产出效益两个维度集结为工业绿色发展水平的多维云模型  $N_i' = (N_{i1}, N_{i2}) = ((Ex_{i1}, En_{i1}, He_{i1}), (Ex_{i2}, En_{i2}, He_{i2}))$ , 具体值见表 3。

通过式 (5) 将代表各地区工业绿色发展水平的多维云模型凝聚为更高层次的父云  $N_i$ , 式 (6) 确定正/负

理想云模型, 式 (7) 计算出各地区的父云分别与正/负理想云模型的距离、形状相似度以及综合相似度, 再由式 (8) 算出各地区工业绿色发展水平的贴近度, 具体结果见表 4. 由表 4 可知: 天津和北京分别位列第一、第二, 广东位列最后. 说明天津的工业绿色发展整体水平最高, 北京次之, 广东最低.

天津父云和北京父云与正理想云模型如图 4 所示; 广东父云与负理想云模型如图 5 所示. 由图可知, 天津作为工业绿色发展水平最高的省, 其父云与正理想云模型的贴近度非常高, 其次是北京; 广东的发展水平整体差距很大, 表现在父云与负理想云模型的贴近度高, 究其原因, 广东作为科技创新沿海地区, 在绿色投入要素  $C_{12}$ 、 $C_{14}$ 、 $C_{16}$ 、 $C_{17}$  和  $C_{18}$  指标上投入了大量的人力、资源和科技; 从原始数据来看, 原始属性值大多比其他省份高出一个数量级, 进行规范化后的属性值为 0, 这导致了其工业绿色发展水平整体情况位列全国最低.

表 2 区间权重和多维云权重

指标	区间权重 $\omega_j$		多维云权重 $N_j^\omega$		
	$\omega^-$	$\omega^+$	期望 $Ex_j^\omega$	熵 $En_j^\omega$	超熵 $He_j^\omega$
$C_{11}$	0.1323	0.1366	0.1345	0.0018	0.0002
$C_{12}$	0.1380	0.1474	0.1427	0.0040	0.0004
$C_{13}$	0.1066	0.0952	0.1009	0.0048	0.0005
$C_{14}$	0.1378	0.1466	0.1422	0.0037	0.0004
$C_{15}$	0.1132	0.1056	0.1094	0.0033	0.0003
$C_{16}$	0.1166	0.1109	0.1138	0.0024	0.0002
$C_{17}$	0.1266	0.1262	0.1264	0.0002	0.0000
$C_{18}$	0.1289	0.1315	0.1302	0.0011	0.0001
$C_{21}$	0.1042	0.0921	0.0981	0.0052	0.0005
$C_{22}$	0.0872	0.0716	0.0794	0.0066	0.0007
$C_{23}$	0.1004	0.0879	0.0941	0.0053	0.0005
$C_{24}$	0.1093	0.0998	0.1046	0.0040	0.0004
$C_{25}$	0.1322	0.1352	0.1337	0.0012	0.0001
$C_{26}$	0.0818	0.0648	0.0733	0.0072	0.0007
$C_{27}$	0.1251	0.1241	0.1246	0.0004	0.0000
$C_{28}$	0.1081	0.0990	0.1036	0.0039	0.0004

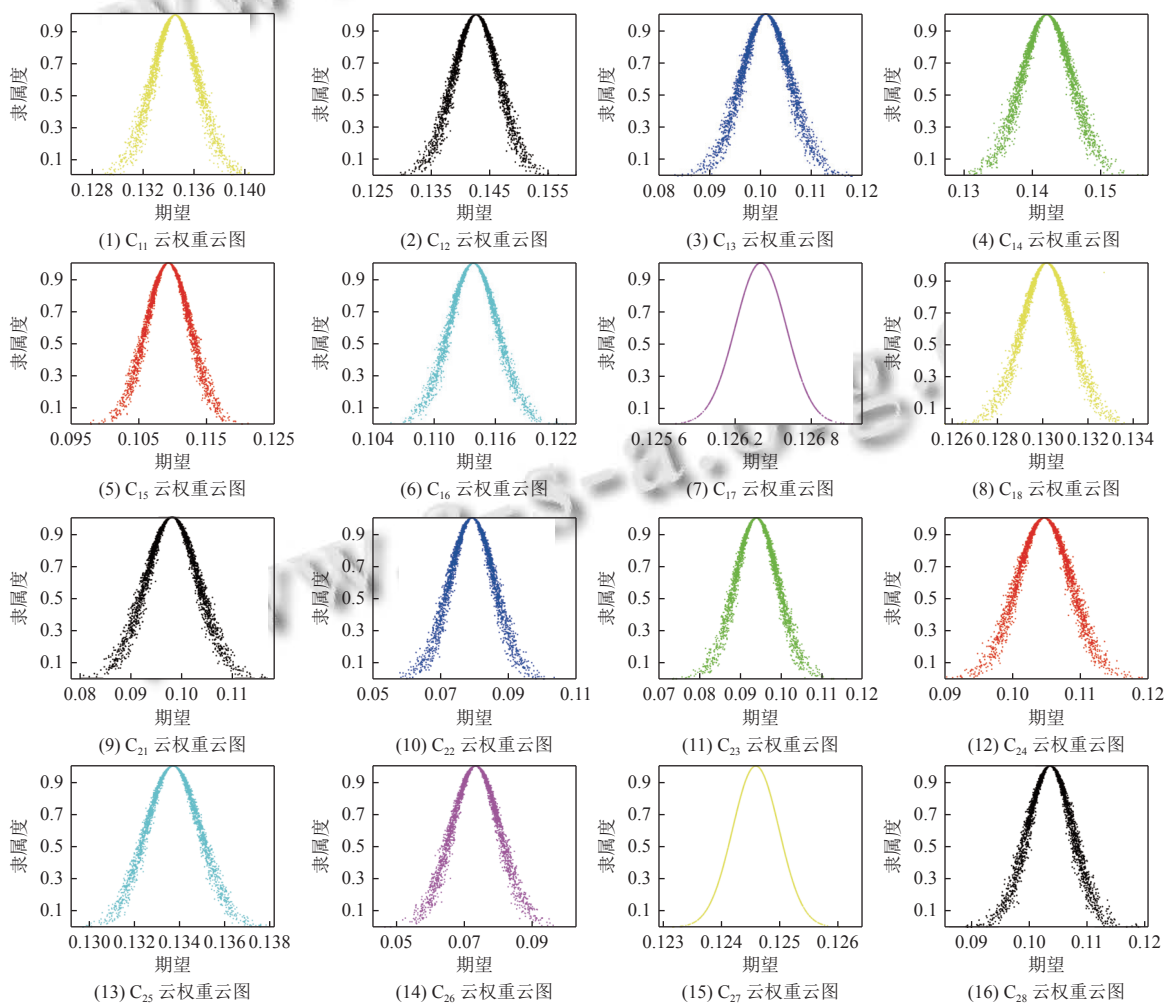


图 3 工业绿色发展水平指标云权重图

表3 各地区工业绿色发展水平的多维云模型

地区	$Ex_{i1}$	$En_{i1}$	$He_{i1}$	$Ex_{i2}$	$En_{i2}$	$He_{i2}$
北京	0.8845	0.0029	0.0003	0.6567	0.0034	0.0003
天津	0.8767	0.0027	0.0003	0.6938	0.0035	0.0003
河北	0.7459	0.0026	0.0003	0.4474	0.0024	0.0002
山西	0.8329	0.0026	0.0003	0.4502	0.0023	0.0002
内蒙古	0.8031	0.0026	0.0003	0.4117	0.0023	0.0002
辽宁	0.7778	0.0025	0.0003	0.4519	0.0025	0.0003
吉林	0.9512	0.0030	0.0003	0.5015	0.0027	0.0003
黑龙江	0.8782	0.0027	0.0003	0.4377	0.0025	0.0003
上海	0.8001	0.0028	0.0003	0.6478	0.0035	0.0004
江苏	0.3187	0.0021	0.0002	0.4043	0.0029	0.0003
浙江	0.5954	0.0025	0.0002	0.6838	0.0037	0.0004
安徽	0.7646	0.0027	0.0003	0.5732	0.0030	0.0003
福建	0.7745	0.0026	0.0003	0.5760	0.0031	0.0003
江西	0.8266	0.0027	0.0003	0.5067	0.0029	0.0003
山东	0.5684	0.0024	0.0002	0.3807	0.0026	0.0003
河南	0.7270	0.0025	0.0003	0.5390	0.0026	0.0003
湖北	0.7542	0.0027	0.0003	0.5979	0.0030	0.0003
湖南	0.7573	0.0026	0.0003	0.5603	0.0031	0.0003
广东	0.1575	0.0014	0.0001	0.5154	0.0030	0.0003
广西	0.8472	0.0027	0.0003	0.4996	0.0028	0.0003
海南	0.9420	0.0028	0.0003	0.5041	0.0026	0.0003
重庆	0.8576	0.0027	0.0003	0.5705	0.0029	0.0003
四川	0.7670	0.0026	0.0003	0.4637	0.0026	0.0003
贵州	0.8201	0.0024	0.0002	0.5321	0.0026	0.0003
云南	0.8608	0.0027	0.0003	0.4540	0.0024	0.0002
陕西	0.8434	0.0027	0.0003	0.4503	0.0022	0.0002
甘肃	0.8909	0.0027	0.0003	0.4576	0.0023	0.0002
青海	0.9182	0.0027	0.0003	0.5875	0.0037	0.0004
宁夏	0.9525	0.0029	0.0003	0.5200	0.0025	0.0003
新疆	0.8413	0.0027	0.0003	0.4746	0.0027	0.0003

多维云模型中将绿色产出效益云模型投影到绿色投入要素云模型上,通过式(9)计算云投影度(见表5)来判断各地区是否具有工业绿色创新能力。

从云投影度排名来看,广东是最具有工业绿色创新能力的地区,江苏、浙江和上海次之,都属东部沿海发达地区;黑龙江位列最后,说明其绿色创新能力不足。从代表黑龙江的工业绿色发展水平多维云模型数据((0.8782, 0.0027, 0.0003), (0.4377, 0.0025, 0.0003))可知,黑龙江的绿色投入要素云模型的期望要比绿色产出效益云模型的期望大得多,是典型的投入多产出少。反观广东工业绿色投入要素云模型(0.1575, 0.0014, 0.0001),绿色产出要素云模型(0.5154, 0.0030, 0.0003),其绿色产出效益云模型的期望比绿色投入要素的云模型的期望要大得多。其中广东、黑龙江、江苏和浙江的多维云模型图如图6所示。

由图6可知黑龙江的工业绿色投入要素云模型的

期望要远大于工业绿色产出效益,云投影度仅为0.498,位列最后一名,但其工业绿色发展水平的贴进度排名15。

这就是典型的只由一个综合指数来评价工业绿色发展水平,而忽略了整体中的部分指标被弱化和忽视,特别是以资源环境大量被开发破坏而带来的工业绿色发展高水平的假象。广东作为最具有工业绿色创新能力的地区,云投影度为3.273,远远大于1,但贴进度位列最后一位。为解释这种差异,现以广东为例,深入研究各指标对其工业绿色发展水平的贡献度,以期在广东进一步实现工业绿色发展提供理论建议和参考。由式(10)计算得广东工业绿色发展水平各个指标的区间数表达,利用区间可能度得到排序向量,并计算出各指标对广东工业绿色发展水平的初始贡献度(见表6)。

再根据二次优化贡献度模型式(11)用LINGO软件求解贡献度差值,得到广东工业绿色发展水平的各个指标初始贡献度与优化后的贡献度的距离 $D$ (见表7)。若 $D > 0$ ,表明该指标在整个评价指标体系中贡献度较大,反之则小。因此,根据结果可以对各个指标的发展情况和整体均衡情况进行分析。

由表7可知,指标 $C_{25}$ 、 $C_{11}$ 和 $C_{24}$ 为广东工业绿色发展的整体水平提供了较大的贡献度,其初始贡献度就已经大于二次优化后的贡献度,属于长板指标;而指标 $C_{12}$ 、 $C_{14}$ 、 $C_{16}$ 、 $C_{17}$ 和 $C_{18}$ 的距离为负值,属于短板指标,并且这5个指标全都属于绿色投入要素这一维度,为此有关管理部门需要着重注意与思考。针对这一结果,广东有关部门可依据此评价方法和结果对工业绿色发展水平的各类指标进行继续优化长板指标并对短板指标进行重点监管和发展,使其短板也向长板指标发展,最后实现指标间的协调均衡发展,为工业发展由粗放式发展到高质量发展再到绿色发展提供有效贡献。

#### 4 结论与管理建议

基于工业绿色发展理念,本文从绿色投入要素和绿色产出效益两个维度构建了工业绿色发展水平指标体系。在传统多指标综合指数评价法的基础上引入多维云模型和区间数理论,探讨了一种新的基于混合多维云模型的工业绿色发展水平测度方法对工业绿色发展水平的总体情况及创新能力进行判断,避免了传统的多指标综合指数评价法只用一个综合指数来

评估工业绿色发展水平,而忽略了工业绿色创新能力的评估;并采集2020年的相关数据对中国30个地区

的工业绿色发展进行了验证,进一步说明了模型构建的有效性.

表4 各地区工业绿色发展水平贴近度

地区	$Ex_i$	$En_i$	$He_i$	$Sim_{di}^+$	$Sim_{si}^+$	$Sim_i^+$	$Sim_{di}^-$	$Sim_{si}^-$	$Sim_i^-$	$\gamma_i$	Rank
北京	0.7706	0.0022	0.0002	68.208	0.758	51.691	2.303	0.975	2.246	0.9584	2
天津	0.7852	0.0022	0.0002	1966.872	0.768	1511.434	2.228	0.961	2.142	0.9986	1
河北	0.5966	0.0018	0.0002	5.302	0.955	5.063	3.844	0.774	2.974	0.6300	26
山西	0.6415	0.0017	0.0002	6.958	0.964	6.708	3.278	0.766	2.512	0.7275	20
内蒙古	0.6074	0.0017	0.0002	5.622	0.976	5.484	3.692	0.757	2.796	0.6624	23
辽宁	0.6149	0.0018	0.0002	5.870	0.938	5.506	3.592	0.788	2.829	0.6606	24
吉林	0.7264	0.0020	0.0002	16.982	0.833	14.143	2.565	0.887	2.275	0.8614	6
黑龙江	0.6580	0.0018	0.0002	7.857	0.909	7.142	3.110	0.813	2.528	0.7386	15
上海	0.7240	0.0022	0.0002	16.317	0.752	12.265	2.581	0.983	2.537	0.8286	8
江苏	0.3615	0.0018	0.0002	2.360	0.938	2.215	39.900	0.787	31.415	0.0659	29
浙江	0.6396	0.0022	0.0002	6.868	0.759	5.210	3.299	0.974	3.212	0.6186	27
安徽	0.6689	0.0020	0.0002	8.597	0.831	7.144	3.008	0.889	2.674	0.7276	18
福建	0.6752	0.0020	0.0002	9.092	0.828	7.531	2.952	0.892	2.633	0.7410	14
江西	0.6666	0.0020	0.0002	8.430	0.842	7.098	3.029	0.878	2.658	0.7275	19
山东	0.4746	0.0018	0.0002	3.219	0.951	3.060	7.241	0.777	5.628	0.3522	28
河南	0.6330	0.0018	0.0002	6.570	0.926	6.083	3.372	0.798	2.691	0.6933	22
湖北	0.6761	0.0020	0.0002	9.159	0.834	7.637	2.945	0.886	2.609	0.7453	13
湖南	0.6588	0.0020	0.0002	7.910	0.835	6.607	3.102	0.885	2.744	0.7065	21
广东	0.3365	0.0017	0.0002	2.228	1.000	2.228	1676.613	0.739	1238.729	0.0018	30
广西	0.6734	0.0019	0.0002	8.942	0.867	7.757	2.968	0.852	2.528	0.7542	11
海南	0.7230	0.0019	0.0002	16.079	0.882	14.185	2.587	0.837	2.166	0.8675	5
重庆	0.7140	0.0020	0.0002	14.040	0.840	11.790	2.649	0.880	2.330	0.8350	7
四川	0.6154	0.0018	0.0002	5.887	0.922	5.430	3.586	0.801	2.872	0.6540	25
贵州	0.6761	0.0018	0.0002	9.163	0.943	8.637	2.944	0.784	2.308	0.7891	9
云南	0.6574	0.0018	0.0002	7.821	0.930	7.272	3.116	0.795	2.476	0.7460	12
陕西	0.6468	0.0017	0.0002	7.225	0.963	6.959	3.222	0.767	2.471	0.7379	16
甘肃	0.6743	0.0018	0.0002	9.012	0.947	8.536	2.960	0.780	2.309	0.7871	10
青海	0.7528	0.0023	0.0002	30.868	0.739	22.806	2.402	1.000	2.402	0.9047	3
宁夏	0.7363	0.0019	0.0002	20.418	0.863	17.621	2.501	0.856	2.141	0.8916	4
新疆	0.6580	0.0019	0.0002	7.857	0.886	6.958	3.110	0.834	2.595	0.7284	17
$N_{max}$	0.7852	0.0017	0.0002	1.000	—	—	—	—	—	—	—
$N_{min}$	0.3365	0.0023	0.0002	—	1.000	—	—	—	—	—	—

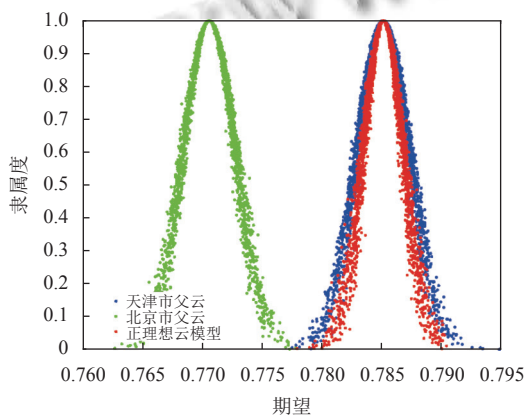


图4 天津和北京父云与正理想云模型

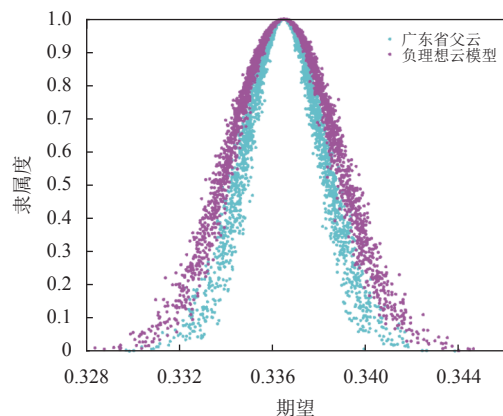


图5 广东父云与负理想云模型



表5 各地区云投影度

地区	$Prj_{N_{i1}}(N_{i2})$	Rank	地区	$Prj_{N_{i1}}(N_{i2})$	Rank	地区	$Prj_{N_{i1}}(N_{i2})$	Rank
北京	0.742	9	浙江	1.149	3	海南	0.535	24
天津	0.791	6	安徽	0.750	7	重庆	0.665	13
河北	0.600	18	福建	0.744	8	四川	0.605	17
山西	0.541	23	江西	0.613	16	贵州	0.649	14
内蒙古	0.513	29	山东	0.670	12	云南	0.527	26
辽宁	0.581	20	河南	0.741	10	陕西	0.534	25
吉林	0.527	27	湖北	0.793	5	甘肃	0.514	28
黑龙江	0.498	30	湖南	0.740	11	青海	0.640	15
上海	0.810	4	广东	3.273	1	宁夏	0.546	22
江苏	1.269	2	广西	0.590	19	新疆	0.564	21

表6 可能度矩阵 $p_{ij}$ 和初始贡献度 $\alpha_i$

指标	C <sub>11</sub>	C <sub>12</sub>	C <sub>13</sub>	C <sub>14</sub>	C <sub>15</sub>	C <sub>16</sub>	C <sub>17</sub>	C <sub>18</sub>	C <sub>21</sub>	C <sub>22</sub>	C <sub>23</sub>	C <sub>24</sub>	C <sub>25</sub>	C <sub>26</sub>	C <sub>27</sub>	C <sub>28</sub>	$V_i$	$\alpha_i$
C <sub>11</sub>	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.0703	0.0896
C <sub>12</sub>	0.00	0.50	0.00	0.50	0.00	0.50	0.50	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0310	0.0396
C <sub>13</sub>	0.00	1.00	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.39	0.00	0.0552	0.0704
C <sub>14</sub>	0.00	0.50	0.00	0.50	0.00	0.50	0.50	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0310	0.0396
C <sub>15</sub>	0.00	1.00	0.00	1.00	0.50	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.0441	0.0563
C <sub>16</sub>	0.00	0.50	0.00	0.50	0.00	0.50	0.50	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0310	0.0396
C <sub>17</sub>	0.00	0.50	0.00	0.50	0.00	0.50	0.50	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0310	0.0396
C <sub>18</sub>	0.00	0.50	0.00	0.50	0.00	0.50	0.50	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0310	0.0396
C <sub>21</sub>	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.50	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.0507	0.0646
C <sub>22</sub>	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.0474	0.0604
C <sub>23</sub>	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.50	0.00	0.00	1.00	1.00	0.13	0.0609	0.0776
C <sub>24</sub>	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.50	0.00	1.00	1.00	0.67	0.0659	0.0841
C <sub>25</sub>	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.50	1.00	1.00	1.00	0.0735	0.0938
C <sub>26</sub>	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.0408	0.0521
C <sub>27</sub>	0.00	1.00	0.61	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.50	0.00	0.0559	0.0713
C <sub>28</sub>	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.87	0.33	0.00	0.00	1.00	1.00	0.50	0.0644	0.0821

表7 广东省工业绿色发展水平指标贡献度距离

指标	$\alpha_i$	$\beta_j$	$D$	指标	$\alpha_i$	$\beta_j$	$D$
C <sub>11</sub>	0.0896	0.0625	0.0271	C <sub>21</sub>	0.0646	0.0625	0.0021
C <sub>12</sub>	0.0396	0.0625	-0.0229	C <sub>22</sub>	0.0604	0.0625	-0.0021
C <sub>13</sub>	0.0704	0.0625	0.0079	C <sub>23</sub>	0.0776	0.0625	0.0151
C <sub>14</sub>	0.0396	0.0625	-0.0229	C <sub>24</sub>	0.0841	0.0625	0.0216
C <sub>15</sub>	0.0563	0.0625	-0.0062	C <sub>25</sub>	0.0938	0.0625	0.0313
C <sub>16</sub>	0.0396	0.0625	-0.0229	C <sub>26</sub>	0.0521	0.0625	-0.0104
C <sub>17</sub>	0.0396	0.0625	-0.0229	C <sub>27</sub>	0.0713	0.0625	0.0088
C <sub>18</sub>	0.0396	0.0625	-0.0229	C <sub>28</sub>	0.0821	0.0625	0.0196

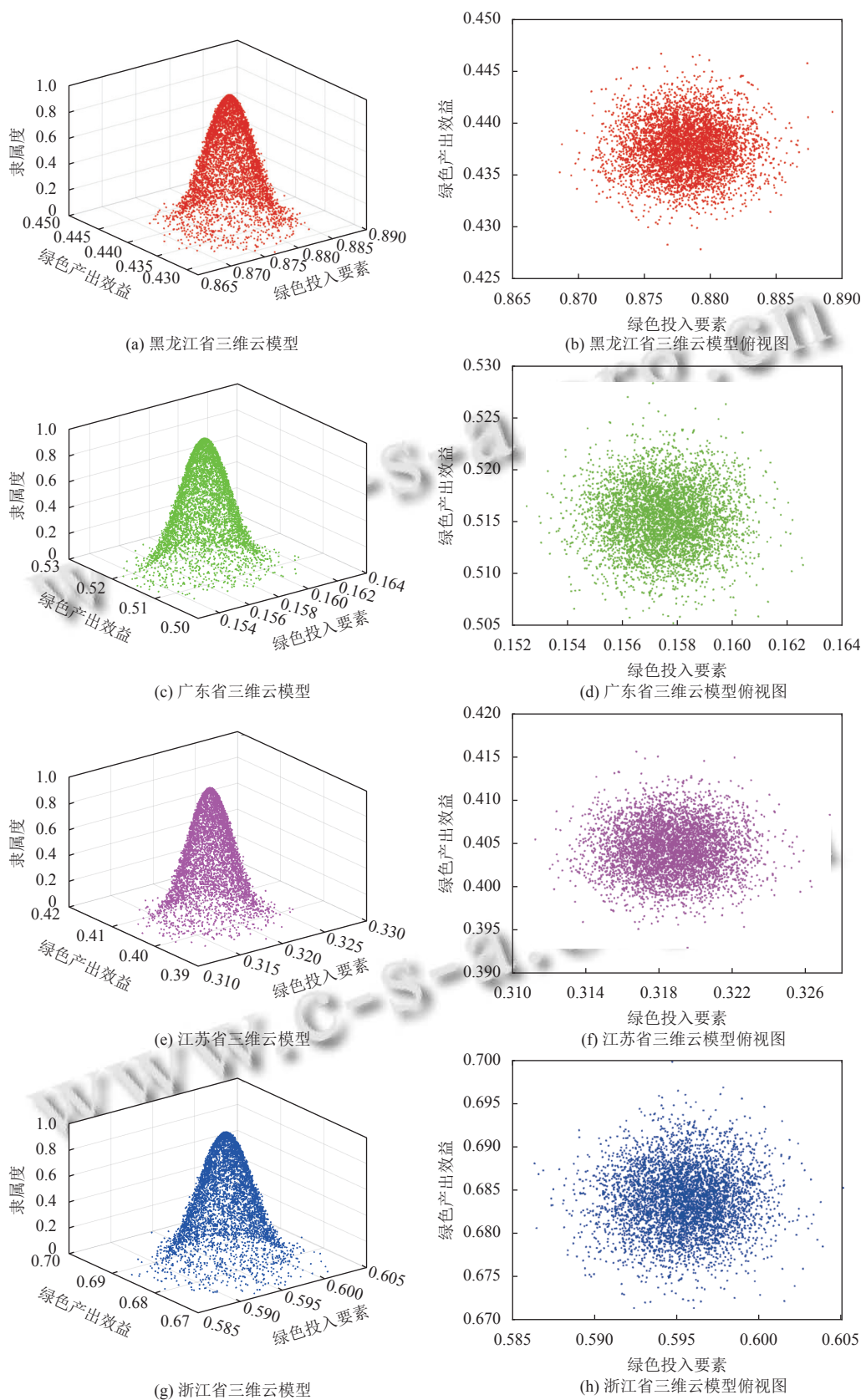


图6 4个地区多维云模型图

同时,本文的研究方法和研究结果对区域工业绿色发展有着重要的管理建议:(1)各地区应注重工业绿色创新能力的培养与发展.工业绿色发展水平的高低一般只能反映工业绿色发展的综合情况,并没有着重关注于工业绿色创新能力的培养与发展,容易造成以资源环境大量浪费破坏为代价带来的工业绿色发展水平的虚高,各地区应关注工业创新能力的提高,加大各类资源综合利用效率,促进工业企业向科技化绿色化方面发展,为工业绿色全生命周期过程提供有力的支持.(2)发挥长板指标优势,补齐短板指标劣势.参考指标的初始贡献度和优化贡献度,各管理部门应找出影响该区域工业绿色发展的长短板指标,取长补短.发挥独特的优势指标能力,对短板指标进行有针对性的监管和重点投入,实现各类指标协调综合发展,加大工业绿色发展的力度,培育独具优势的工业绿色创新能力,加大人才引进与科技发展,缩小各省份间工业绿色发展水平的差距.(3)促进区域工业协调发展.京津冀、长三角、珠三角和成渝等城市群协调发展策略为工业绿色发展提供了历史性的机遇,为此,各地区可以联动周围城市群实现产业结构调整和科技成果转化,进一步为工业发展绿色发展提供坚实基础.

### 参考文献

- 1 王燕, 刘邦凡, 郭立宏. 基于 SEEA-2012 我国绿色 GDP 核算体系构建及时空格局分析. 生态经济, 2021, 37(9): 136-145.
- 2 Brandt L, Tombe T, Zhu XD. Factor market distortions across time, space and sectors in China. *Review of Economic Dynamics*, 2013, 16(1): 39-58. [doi: 10.1016/j.red.2012.10.002]
- 3 栗欣如, 姜文来, 冯欣. 我国水利绿色发展水平测算分析. 中国农业资源与区划, 2021, 42(1): 7-17.
- 4 He LY, Sun YM, Xia YF, et al. Construction of a green development performance index of industrial enterprises: Based on the empirical study of 458 listed industrial enterprises in China. *Ecological Indicators*, 2021, 132: 108239. [doi: 10.1016/j.ecolind.2021.108239]
- 5 何静, 李战江, 苏金梅. 基于 R 聚类-灰关联优势分析的绿色经济评价指标体系构建. 科技管理研究, 2018, 38(10): 90-98. [doi: 10.3969/j.issn.1000-7695.2018.10.013]
- 6 田亚鹏, 柳晓艺. 基于超效率 SBM-DEA 和空间分析的区域绿色发展效率评价. 统计与信息论坛, 2021, 36(8): 56-65. [doi: 10.3969/j.issn.1007-3116.2021.08.006]
- 7 李兰冰, 李焕杰. 技术创新、节能减排与城市绿色发展. 软

- 科学, 2021, 35(11): 46-51. [doi: 10.13956/j.ss.1001-8409.2021.11.08]
- 8 Zou H, Zhang YJ. Does environmental regulatory system drive the green development of China's pollution-intensive industries? *Journal of Cleaner Production*, 2022, 330: 129832.
- 9 王韶华, 刘晔, 张伟, 等. 基于粗糙集与未确知模型的京津冀工业绿色发展的差异性分析与协调性分析. 运筹与管理, 2021, 30(5): 200-207.
- 10 李俊, 许家伟. 河南省工业用水效率的动态演变与分解效应——基于 LMDI 模型视角. 经济地理, 2018, 38(11): 183-190. [doi: 10.15957/j.cnki.jjdt.2018.11.021]
- 11 张治河, 焦贝贝, 李怡, 等. 科技资源匮乏地区创新驱动发展路径研究. 科研管理, 2018, 39(2): 46-59. [doi: 10.19571/j.cnki.1000-2995.2018.02.006]
- 12 Ghofrani A, Zaidan E, Abulibdeh A. Simulation and impact analysis of behavioral and socioeconomic dimensions of energy consumption. *Energy*, 2022, 240: 122502. [doi: 10.1016/j.energy.2021.122502]
- 13 徐严, 陈雨玮, 刘程军. 长三角城市群绿色化演化特征及其门槛效应研究. 管理现代化, 2021, 41(6): 28-32. [doi: 10.19634/j.cnki.11-1403/c.2021.06.008]
- 14 张丽君, 巩蓉蓉, 袁伟伦. 公共服务差距与区域间收入不平等的形成——基于 2000-2019 年省级面板数据的分析. 公共管理评论, 2020, 2(4): 50-81.
- 15 黄群慧. “新常态”、工业化后期与工业增长新动力. 中国工业经济, 2014, (10): 5-19.
- 16 傅志华, 赵福昌, 李成威, 等. “创新、平衡、联动、包容、协同”是东部地区实现财经稳定发展的重要支撑. 经济研究参考, 2017, (2): 49-63. [doi: 10.16110/j.cnki.issn2095-3151.2017.02.005]
- 17 左朝晖, 李绍康, 杨津津, 等. 基于 GA-BP 神经网络的页岩气开发区域水资源承载力研究. 环境工程技术学报, 2021, 11(1): 194-201. [doi: 10.12153/j.issn.1674-991X.20200081]
- 18 丁镭, 刁贝娣. 空间计量经济学视角下的浙江工业大气污染物排放及社会影响因素. 环境污染与防治, 2021, 43(1): 132-138. [doi: 10.15985/j.cnki.1001-3865.2021.01.024]
- 19 Wang HR, Cui HR, Zhao QZ. Effect of green technology innovation on green total factor productivity in China: Evidence from spatial durbin model analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 288: 125624. [doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125624]
- 20 龚艳冰, 徐绪堪, 刘高峰. 基于正态云期望和方差距离的语言型多属性决策方法研究. 统计与信息论坛, 2021, 36(10): 12-19. [doi: 10.3969/j.issn.1007-3116.2021.10.002]

(校对责编: 孙君艳)