

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2023.06.008

基于 TOPSIS 和灰色关联投影法的区域碳效率 动态综合评价——以泛珠三角为例

何燕子, 王 妍

(湖南工业大学 商学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 为弥补传统碳效率评价偏向绝对量指标或者少数几个指标的单点式评价的不足, 选取相对量指标, 从经济、人口、福利多个维度并兼顾地区发展实际与公平原则, 构建区域碳效率评价指标体系。将 TOPSIS 法与灰色关联投影分析相结合, 并利用时间序列平均算子二次加权以实现对泛珠三角 9 省(自治区) 2011—2020 年碳效率的动态综合评价。静态与动态评价研究结果显示: 该区域碳效率发展水平存在差异, 其中海南省碳效率总体水平较高, 为 0.530; 贵州省碳效率相对较低, 为 0.162; 海南省比贵州省高出 227%。福建省碳效率呈上升趋势, 由 2011 年的 0.327 上升至 2020 年的 0.498, 增长了 52.3%。研究认为, 应该制定差异化减排策略、加大技术经费投入、增强社会福利、引进人才以实现低碳经济发展。

关键词: 泛珠三角; 碳效率; TOPSIS; 灰色关联投影法

中图分类号: X321, F124.5

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2023)06-0061-09

引文格式: 何燕子, 王 妍. 基于 TOPSIS 和灰色关联投影法的区域碳效率动态综合评价: 以泛珠三角为例 [J]. 湖南工业大学学报, 2023, 37(6): 61-68.

Dynamic Comprehensive Evaluation of Regional Carbon Efficiency Based on TOPSIS and Grey Correlation Projection Method: A Case Study of the Pan Pearl River Delta

HE Yanzi, WANG Yan

(Business School, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In view of a compensation for the shortcomings of traditional carbon efficiency evaluation that tends to be based on absolute quantity indicators or a few single point evaluation indicators, relative quantity indicators are selected, with a regional carbon efficiency evaluation index system to be constructed from such multiple dimensions as economy, population, and welfare, taking into account regional development reality and fairness principles. Based on a combination of TOPSIS method with grey relational projection analysis, a dynamic comprehensive evaluation can be achieved of the carbon efficiency in 9 provinces (autonomous regions) of the Pan Pearl River Delta from 2011 to 2020 by utilizing time series average operator quadratic weighting. The results of static and dynamic evaluation research show that there are differences in the development level of carbon efficiency in the region. The overall level of carbon efficiency in Hainan Province is relatively high at 0.530, while the carbon efficiency in Guizhou Province is relatively low at 0.162. Hainan Province is 227% higher than Guizhou Province, with the carbon efficiency in Fujian Province on

收稿日期: 2022-11-25

基金项目: 国家社科基金资助项目(20BJY093); 湖南省教育厅科学研究基金资助重点项目(21A0348)

作者简介: 何燕子(1973-), 女, 湖南永顺人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要研究方向为区域产业经济,

E-mail: 248126415@qq.com

the rise, increasing by 52.3% from 0.327 in 2011 to 0.498 in 2020. It is therefore suggested that differentiated emission reduction strategies should be formulated, technology funding should be increased, social welfare should be enhanced, and talent introduction should be facilitated to achieve a low-carbon economic development..

Keywords: the Pearl River Delta; carbon efficiency; TOPSIS; grey relational projection method

2020 年 9 月, 习近平总书记在第七十五届联合国大会上提出“中国将提高国家自主贡献力度, 采取更加有力的政策和措施, 二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和”。中国作为发展中国家, 是能源排放大国, 为实现“双碳”目标, 必须走低碳经济发展道路。泛珠三角是中国经济最具活力和发展潜力的地区之一, 包含了 9 个省(自治区)和 2 个特别行政区, 分别是广东省、广西壮族自治区、海南省、云南省、贵州省、四川省、湖南省、江西省、福建省、香港特别行政区、澳门特别行政区。所拥有的人口占中国人口总数的 1/3, GDP 占全国的 33.3%, 因此, 泛珠三角具有非常关键的地位。2016 年 3 月国务院颁布的《关于深化泛珠三角区域合作的指导意见》中明确提出坚持“生态优先、绿色发展”, “加快推动形成绿色循环低碳的生产生活方式”。在此背景下, 如何科学有效地度量泛珠三角的碳效率, 分析其水平差异, 把握碳效率动态发展趋势和减排重点是关注的方向, 成为泛珠三角低碳发展亟待解决的问题之一。

1 文献综述

低碳高质量发展已经成为中国的必然选择, 越来越多的学者针对二氧化碳的相关效率作出研究。从经济学的角度讲, M. J. Farrell^[1]提出效率是输出效益与输入成本或者产出与投入之间的比值, 而碳排放效率指的是排放单位二氧化碳消耗较少的资源投入并获取较多的经济产出。碳效率反映的是单位二氧化碳的经济效率, 只有将环境保护和经济发展综合考虑, 才能实现低碳经济发展。目前对于碳效率的研究主要有以下 4 种方法: 环境/经济单一比值法、指标体系法、DEA (data envelopment analysis) 模型法^[2]和因素分解法^[3], 其中 DEA 模型法应用最为普遍。针对低碳经济发展效率, 周新等^[4]运用 DEA - CCR 模型测算出中国 30 个省(区市) 2017 年的低碳经济发展效率, 并利用模糊集定性比较分析法研究影响中国低碳经济发展效率的因素。针对低碳效率的研究, K. Mehmood 等^[5]基于数据包络分析模型, 探讨了世界各大经济体近几年低碳效率的时空变化规律, 研究结

果表明中国在中等收入国家中效率值较优, 陈军华等^[6]运用 Super-SBM 模型测算了四川省各市州的低碳效率, 并利用 GIS 技术对四川省低碳效率的空间特征展开了分析。针对碳解锁效率, 张济建等^[7]采用 DEA 模型和 Malmquis 全要素生产率指数, 对长江经济带碳解锁效率绩效进行了静态和动态评价, 并利用 Tobit 模型分析了碳解锁效率的影响因素; 针对碳排放效率, Y. Iftikhar 等^[8]运用网络 DEA 模型分析了各大经济体的二氧化碳排放效率, 研究结果表明 89% 的二氧化碳排放都是源于经济和分配效率低下; 王兆峰^[9]、李健^[10]、徐英启^[11]、宁论辰^[12]等分别从省、区域和全国的角度测算了碳排放效率。由上可知, 利用数据包络分析法 DEA 模型测算碳效率的研究成果颇丰。

目前, 有关泛珠三角碳排放的研究较少。在二氧化碳的估算时, 邓洪中等^[13]主要估算了泛珠三角旅游行业的碳排放量并分析了其驱动因素, 研究表明旅游交通碳排放是旅游行业二氧化碳增长的重要来源, 消费水平和游客规模是促进该区域碳排放量增长的主要因素。基于空间视角, 曹广喜等^[14]研究认为泛珠三角经济圈碳排放脱钩的空间依赖性较显著, 但在空间异质性方面较小。宛睿^[15]研究泛珠三角经济区全要素碳生产率时发现, 其存在空间溢出效应, 能够有效地带动周边地区的增长。

TOPSIS 法 (technique for order preference by similarity to ideal solution) 能够求解待评价对象与正负理想解间的距离, 灰色关联投影法能够测算待评价对象与理想解的相似度。近年来, 将 TOPSIS 法和灰色关联投影法结合起来做研究的越来越多。袁桂丽等^[16]利用 TOPSIS 灰色关联投影法分析了火电厂节能问题; 范德成等^[17]基于 TOPSIS 灰色关联投影法对京津冀地区的高新技术产业创新能力进行了动态综合评价; 梁海平等^[18]应用改进的 TOPSIS 灰色关联投影法研究主网网架结构, 结果验证了此方法对评价主网网架客观有效。余鹏等^[19]利用最大化组合赋权的 TOPSIS 灰色关联投影动态评价模型对泛长三角区域碳效率进行了评价, 发现该区域碳效率存在明显差异, 产业发展不均衡。

综上所述,已有研究大多利用 DEA 模型测算碳效率,采用 Malmquist 指数法做动态评价。然而,由于 DEA 方法是一种基于投入产出关系的方法,要求投入产出具有比较明显的关系,而且要求指标维度不能过多。因此,现有的碳排放效率研究中,多数围绕着人力、资本、技术等方面选取绝对量指标,然而衡量碳效率不应仅从少数指标入手,张雪花等^[20]认为应基于“全碳效率”的理念来度量碳绩效,经济、人口、福利等也应考虑其中。基于此,本文从“全碳效率”角度,依据相关概念对碳效率作出界定,即排放单位二氧化碳能够消耗最少的资源达到经济、社会及环境三者间效率的最大化和均衡发展。同时兼顾省区的发展实际与地区公平原则,采用客观赋权的 TOPSIS 法结合灰色关联投影法对泛珠三角 9 省(自治区)的碳效率进行动态综合评价,以期为区域经济低碳发展提供理论参考。

2 区域碳效率评价指标体系选取

构建区域碳效率的评价指标体系时,选取的指标应该具有代表性、全面性、不相关性、科学性和兼顾地区公平性。余敦涌等^[21]指出因不同区域的面积和规模不同,所选指标的绝对量可比较性较差,很难客观地反映区域碳效率。为了体现区域间的差异性,张雪花^[20]等提出将不同地区放在统一平面上采用相对量指标构建“全碳效率”评价体系。本文根据以上研究,构建如表 1 所示的碳效率评价指标体系。

表 1 碳效率评价指标体系
Table 1 Carbon efficiency evaluation index system

指标符号	指标名称	指标选取角度
F_1	人均 GDP	低碳生产
F_2	每万人公共交通拥有量	低碳交通
F_3	城市污水处理率	低碳市政
F_4	建成区绿化覆盖率	低碳空间布局
F_5	R&D 经费投入强度	低碳技术
F_6	能源消费弹性系数	低碳消费
F_7	节能环保支出指数	低碳环境
F_8	单位碳排放的 GDP	低碳经济
F_9	单位碳排放的人口数	人口
F_{10}	单位碳排放人均可支配收入	低碳福利

表 1 借鉴了余鹏等^[19]的研究成果,“全碳效率”评价体系中从低碳生产、低碳交通、低碳市政、低碳空间布局、低碳技术、低碳消费、低碳环境角度,分别选用人均 GDP、每万人公共交通拥有量、城市污水处理率、建成区绿化覆盖率、R&D 经费投入强度、能源消费弹性系数、节能环保支出指数等指标,

并考虑从低碳经济产出、人口承载和福利提升 3 个方面分别选取了单位碳排 GDP 产出、单位碳排人口承载和单位碳排人均可支配收入 3 个相对量指标。

3 区域碳效率模型构建

3.1 正、负理想决策矩阵

假设被评价的对象为 $i(i=1, 2, \dots, m)$, 评价指标为 $j(j=1, 2, \dots, n)$, 时间为 $t(t=1, 2, \dots, q)$, 那么 $Q_{ij}(t)$ 则为第 i 个被评价对象、第 j 个指标在 t 时刻的评价值, 可构建原始评价矩阵为 $Q(t)=\{q_{ij}(t)_{m \times n}\}$ 。

TOPSIS 法是一种基于距离的多准则决策方法,其基本原理是:将原始的评价矩阵规范化处理得到规范化的决策矩阵后,在规范化决策矩阵中得出多指标问题的正、负理想方案,通过计算可行方案与正理想方案的贴近程度和负理想方案的远离程度,以此作为判断可行方案优劣的依据。

由于原始数据往往存在不同量纲,难以将不同指标进行比较,故需对原始数据进行无量纲处理,以消除各指标量纲带来的影响,本文采用极值处理法。

对于效益型指标:

$$x_{ij}(t) = \frac{q_{ij}(t) - \min_i q_{ij}(t)}{\max_i q_{ij}(t) - \min_i q_{ij}(t)}; \quad (1)$$

对于成本型指标:

$$x_{ij}(t) = \frac{\max_i q_{ij}(t) - q_{ij}(t)}{\max_i q_{ij}(t) - \min_i q_{ij}(t)}。 \quad (2)$$

经极值化处理后的评价最大值为 1, 最小值为 0,

得标准化处理后的矩阵为 $X(t)=\{x_{ij}(t)_{m \times n}\}$ 。因为已将成本型指标正向化处理,所以 t 时刻第 j 个指标下各个被评价对象的最大值、最小值分别为正、负理想方案:

$$x_{0j}^+ = \max_i (x_{ij}(t)), \quad x_{0j}^- = \min_i (x_{ij}(t))。 \quad (3)$$

3.2 正、负理想灰色关联系数矩阵

灰色关联理论的基本原理是分析各个评价对象与参考对象间的关联度来判断各个评价对象的优劣程度。假设参考对象为 $X_{0j}^*(t)=\{x_{01}^*(t), x_{02}^*(t), \dots, x_{0n}^*(t)\}$, 依照灰色关联理论,在 t 时刻,第 i 个对象的第 j 个评价指标的灰色关联系数为

$$\delta_{ij}(t) = \frac{\min_i \min_j |\Delta| + \lambda \max_i \max_j |\Delta|}{|\Delta| + \lambda \max_i \max_j |\Delta|}, \quad (4)$$

式中: $\Delta = x_{0j}^*(t) - x_{ij}(t)$;

λ 为分辨系数, 且 $\lambda \in [0, 1]$, 一般取 0.5。

计算出灰色关联系数后, 可得如下正、负理想灰色关联系数矩阵:

$$E^{\pm}(t) = \left\{ \delta_{ij}^{\pm}(t) \right\}_{(m+1) \times n}, \quad (5)$$

式中 $\delta_{01}^+(t) = \delta_{02}^+(t) \cdots = \delta_{0n}^+(t) = 1$ 。

3.3 加权灰色关联系数矩阵

在对多个指标进行综合评价时, 需要考虑各个指标的相对重要程度, 因而需要测算各指标的权重。本文选取熵值法计算权重, 熵值法是一种客观测量权重的方法, 在多准则问题中较为理想。利用熵值法赋权的步骤如下:

第一步, 在 t 时刻, 第 j 个指标下, 第 i 个被评价对象所占比例, 为

$$p_{ij}(t) = x_{ij}(t) / \sum_{i=1}^m x_{ij}(t). \quad (6)$$

第二步, 计算在 t 时刻, 第 j 个指标的熵值, 为

$$e_j(t) = -k \sum_{i=1}^m p_{ij}(t) \ln[p_{ij}(t)]; \quad (7)$$

式中: $k > 0$;

$e_j(t) > 0$ 。

若式中 j 和 t 仅有一个取值, 那么 $p_{ij}(t) = 1/m$, 则可得 $e_j(t) = k \ln m$, 故 $k = 1/\ln m$ 。

第三步, 计算指标效用值 $g_j(t) = 1 - e_j(t)$, $e_j(t)$ 越大, $g_j(t)$ 越小, 反之越大。

第四步, 计算第 j 个指标的权重, 计算式为

$$w_j(t) = g_j / \sum_{j=1}^n g_j(t). \quad (8)$$

第五步, 得出正、负理想灰色关联加权系数矩阵, 为

$$F^{\pm}(t) = w_i(t) \times E^{\pm}(t). \quad (9)$$

3.4 灰色关联投影值

运用灰色关联投影法计算被评价对象在理想对象上的正、负理想灰色关联投影值, 为

$$D_i^{\pm}(t) = \|a_i(t)\| \cdot \cos \theta_i(t) = \sum_{j=1}^n \delta_{ij}(t) \frac{w_j^2(t)}{\sqrt{\sum_{j=1}^n w_j^2(t)}} = \sum_{j=1}^n \delta_{ij}^{\pm}(t) \bar{w}_j(t). \quad (10)$$

式中: $a_i(t) = \{w_1(t)\delta_{i1}(t), w_2(t)\delta_{i2}(t), \dots, w_n(t)\delta_{in}(t)\}$;

$$\bar{w}(t) = \{\bar{w}_1(t), \bar{w}_2(t), \dots, \bar{w}_n(t)\};$$

$\cos \theta_i(t)$ 取值范围为 $[0, 1]$, $\theta_i(t)$ 越小, 余弦值越大,

被评价对象越接近理想对象;

$\theta_i(t)$ 越大, 余弦值越小, 被评价对象越远离理想对象。

从而可计算出灰色关联投影贴近度, 为

$$y_i(t) = D_i^{+2}(t) / D_i^{+2}(t) + D_i^{-2}(t), \quad (11)$$

式中: $y_i(t)$ 为灰色关联贴近度, 用于综合衡量 t 时刻被评价对象靠近正理想对象和远离负理想对象的程度, $y_i(t)$ 越大, 被评价对象离正理想对象越近; $y_i(t)$ 越小, 被评价对象离负理想对象越近。

3.5 动态评价值

动态评价方法是指在时间 $[1, k]$ 内, 对时间序列赋权确定时间序列上的权重, 然后利用时序算术平均算子二次加权, 将前后两次加权集成, 实现动态评价。步骤如下:

第一步, 通过第一次加权可得被评价对象 i 在 t 时刻的评价值为 $y_i(t)$ 。

第二步, 确定时间序列权重。在时间 $[1, k]$ 内, 可表示 $w_t = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$, 可以通过求解以下非线性规划问题得出。

$$\max \left(-\sum_{t=1}^k w_t \cdot \ln w_t \right), \text{ s.t. } \begin{cases} \sum_{t=1}^k \frac{k-t}{k-t} w_t = \lambda, \\ \sum_{t=1}^k w_t = 1. \end{cases} \quad (12)$$

式中 λ 为时间偏好度, 其取值参考表 2。

表 2 时间偏好度 λ 的取值参考表

Table 2 Time preference value reference table for λ

λ	w_t	解释说明
0.1	$0 \leq w_t < w_{t+1} \leq 1$	非常重视近期数据
0.3		重视近期数据
0.5	$0 \leq w_t = w_{t+1} \leq 1$	同等重视所用时期的数据
0.7	$0 \leq w_{t+1} < w_t \leq 1$	重视远期数据
0.9		非常重视远期数据
0.2, 0.4, 0.6, 0.8	—	对应以上两相邻判断的中间情况

第三步, 利用时序算术平均算子将前面根据 TOPSIS 求得的静态评价值进行二次加权, 得到动态综合评价值。

$$Z_i = \sum_{t=1}^k y_i(t) \cdot w_t. \quad (13)$$

根据式 (13) 求得的动态评价值 Z_i , 代表在时间 $[1, k]$ 内的整体综合评价值, 并根据整体综合评价值对被评价对象进行排序。

4 实证分析

4.1 研究区域概况

泛珠三角涵盖了我国东部、中部、西部的9省(自治区)和2个特别行政区,紧邻东南亚,与东盟联系紧密,具有良好的区位优势。其中,广东省经济发展迅速,在区域内起着龙头带动作用,可带动中西部欠发达地区的发展。因其独特的区位优势,泛珠三角在国民经济增长中占据着不可忽视的地位。因此,本文选取泛珠三角作为研究区域测算碳效率,但考虑其中两个特别行政区在部分研究指标的统计口径上与其它9省(自治区)不一致,故本文未将其纳入研究范畴。

4.2 样本选取与数据来源

为保证对泛珠三角9省(自治区)碳效率研究结果的科学性,本文根据《中国统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》、《中国环境统计年鉴》、《中国建设

统计年鉴》和各省份统计年鉴,选取2011—2020年福建省、江西省、湖南省、广东省、广西壮族自治区、海南省、四川省、贵州省、云南省9个省(自治区)的相关数据进行碳效率研究。本文参照IPCC法(intergovernmental panel on climate change)计算碳排放,计算公式如下:

$$C_i = \sum_{j=1}^n \alpha_j \times A_{ij} \quad (14)$$

式中: i 为省份;

C_i 为第 i 个省份的碳排放总量;

A_{ij} 为第 i 省第 j 种能源消费总量;

α_j 为第 j 种能源碳排放系数。

因为数据的可得性,本文选取煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气、电力计算各省份的碳排放量。部分数据如表3所示。

表3 2020年泛珠三角9省(自治区)各指标原始数据

Table 3 Original data of various indicators in 9 provinces (autonomous regions) of the Pan Pearl River Delta in 2020

指标	单位	福建省	江西省	湖南省	广东省	广西壮族自治区	海南省	四川省	贵州省	云南省
F_1	万元/人	10.51	5.71	6.25	8.85	4.42	5.54	5.80	4.63	5.20
F_2	标台/万人	14.18	9.73	17.25	11.85	9.41	12.53	12.10	11.29	12.90
F_3	%	97.15	97.48	97.79	97.66	98.99	98.68	96.86	97.44	97.63
F_4	%	44.60	46.40	41.50	43.50	41.30	40.60	42.50	40.90	40.50
F_5	%	1.92	1.68	2.15	3.14	0.78	0.66	2.17	0.91	1.00
F_6		0.42	0.39	0.38	1.06	1.30	0.08	0.50	0.42	1.70
F_7		0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02
F_8	亿元/万t	0.89	0.81	1.02	1.05	0.59	0.59	1.03	0.50	0.66
F_9	人/t	0.09	0.14	0.16	0.12	0.13	0.11	0.18	0.11	0.13
F_{10}	元/t	0.76	0.88	0.72	0.39	0.65	2.98	0.56	0.61	0.63

4.3 截面静态评价结果

首先,借助stata16.0软件,利用熵值法中

式(6)~(8),求得 t 时刻的第 j 个指标下的权重,如表4所示。

表4 评价指标无量纲权重值

Table 4 Dimensionless weight value of evaluation indicators

指标	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
F_1	0.110	0.108	0.101	0.132	0.151	0.142	0.176	0.177	0.159	0.134
F_2	0.105	0.096	0.101	0.076	0.081	0.069	0.082	0.079	0.010	0.090
F_3	0.057	0.049	0.045	0.046	0.042	0.037	0.044	0.044	0.054	0.081
F_4	0.061	0.056	0.062	0.062	0.099	0.085	0.077	0.103	0.103	0.145
F_5	0.104	0.120	0.110	0.139	0.123	0.118	0.109	0.115	0.104	0.112
F_6	0.039	0.076	0.087	0.062	0.062	0.103	0.056	0.054	0.076	0.052
F_7	0.117	0.082	0.115	0.078	0.054	0.091	0.050	0.055	0.051	0.044
F_8	0.060	0.058	0.050	0.063	0.065	0.055	0.063	0.081	0.081	0.083
F_9	0.079	0.085	0.088	0.070	0.098	0.107	0.124	0.080	0.061	0.069
F_{10}	0.270	0.270	0.242	0.272	0.226	0.195	0.220	0.213	0.211	0.190

其次,通过极值处理法中式(1)~(2)对原始评价矩阵作无量纲处理,并根据式(4)求出各个评价指标的灰色关联系数,利用式(5)得出正负理想

灰色关联系数矩阵,最后根据式(11)求出泛珠三角9省(自治区)碳效率对应的灰色关联投影贴近度 $y_i(t)$,如表5所示。

表 5 2011—2020 年泛珠三角 9 省（自治区）碳效率灰色关联投影贴近度

Table 5 Grey correlation projection closeness of carbon efficiency in 9 provinces (autonomous regions) of the Pan Pearl River Delta from 2011 to 2020

省份	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
福建省	0.327	0.352	0.318	0.366	0.506	0.595	0.502	0.546	0.518	0.498
江西省	0.298	0.338	0.288	0.276	0.339	0.354	0.368	0.335	0.330	0.440
湖南省	0.254	0.278	0.328	0.339	0.380	0.428	0.377	0.371	0.426	0.400
广东省	0.421	0.412	0.458	0.404	0.471	0.424	0.470	0.447	0.445	0.434
广西壮族自治区	0.217	0.210	0.200	0.226	0.240	0.204	0.201	0.190	0.173	0.188
海南省	0.722	0.681	0.640	0.662	0.542	0.492	0.531	0.491	0.519	0.476
四川省	0.280	0.288	0.333	0.270	0.328	0.338	0.356	0.327	0.299	0.324
贵州省	0.155	0.131	0.133	0.156	0.152	0.197	0.155	0.159	0.165	0.166
云南省	0.256	0.196	0.207	0.216	0.290	0.329	0.285	0.217	0.209	0.184
均值	0.325	0.321	0.323	0.324	0.361	0.373	0.361	0.343	0.343	0.345

4.4 动态评价过程

为了体现近期时间的重要性，取 $\lambda=0.3$ ， k 取 1~10，分别表示 2011~2020 年，应用 LINGO 软件求解非线性规划问题（12），得到时间序列权重为 $w_t=$

(0.027, 0.035, 0.044, 0.056, 0.071, 0.090, 0.114, 0.145, 0.184, 0.234)。结合表 4 及公式（13）可得泛珠三角 9 省（自治区）碳效率的动态综合评价价值，如表 6 所示。

表 6 泛珠三角 9 省（自治区）碳效率动态评价价值及排名

Table 6 Dynamic evaluation value and ranking of carbon efficiency in 9 provinces (autonomous regions) of the Pan Pearl River Delta

省份	福建省	江西省	湖南省	广东省	广西壮族自治区	海南省	四川省	贵州省	云南省
动态评价价值	0.493	0.358	0.384	0.442	0.196	0.530	0.320	0.162	0.231
排名	2	5	4	3	8	1	6	9	7

4.5 评价结果分析

上文中，表 5 给出的是灰色关联投影贴近度，反映的是泛珠三角 9 省（自治区）2011—2020 年碳效率的截面静态评价结果；表 6 给出了动态评价价值及排名，结合静态分析与动态分析能更科学地反映泛珠三角 9 省（自治区）碳效率的动态变化趋势和整体综合发展水平，下面借助图 1 进行分析。

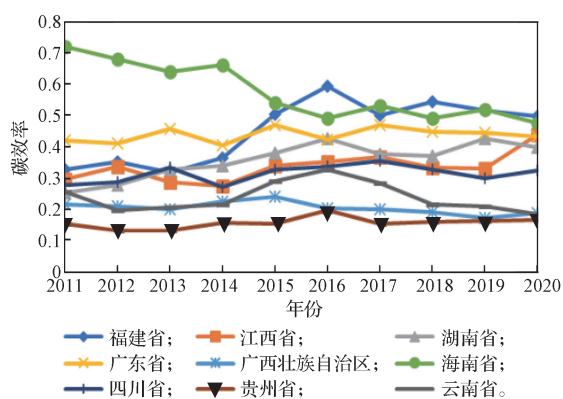


图 1 2011—2020 年 9 省（自治区）碳效率截面静态评价结果

Fig.1 Static evaluation results of carbon efficiency cross section in 9 provinces (autonomous regions) from 2011 to 2020

由表 5、6 和图 1 可得，2011—2020 年泛珠三角 9 省（自治区）的碳效率大体呈现波动上升趋势，2011、2015、2020 年该区域整体碳效率平均值分别

为 0.325, 0.361, 0.345，仍存在较大的不稳定性。研究期限内不同省域碳效率差异显著，呈现中部高于西部的特征。其中，海南、福建、广东 3 省一直都处于生产前沿面，2011—2020 年碳效率动态评价价值分别为 0.530, 0.493, 0.442，造成该现象的主要原因是：1）地理优势。福建省、广东省均属于中国沿海地区，对外开放较早，拥有中国超前的技术水平，人均 GDP 相对较高。2）产业结构。二氧化碳的排放主要来源于工业行业，而海南省工业占比极低，全省经济发展主要靠房地产和旅游业拖动，房地产和旅游业属于第三产业，第三产业附加值相较第二产业附加值更高，故而海南省的人均可支配收入相对较高。3）城市绿化水平。海南省碳效率一直居高不下，直到 2015 年下降幅度较大，这可能是因为，海南省建成区绿化覆盖率由 2014 年的 41.3% 下降到 2015 年的 37.7%，相较而言下降趋势明显，且该项指标的权重占比较高。

贵州省碳效率长期处于最末，2011 年、2015 年、2020 年分别为 0.155, 0.152, 0.166，造成该现象的原因在于：1）地势偏僻，交通不便。贵州省山地偏多，交通不便，直到 2020 年每万人拥有公共交通都只有 11.29 标台，低于泛珠三角 9 省（自治区）的平均拥有量。2）人口结构。贵州省人口较少，城镇化水平不高，2020 年城镇人口仅占 53.16%，而福建、广东

等地城镇化率分别为 68.76%, 74.15%, 农村人口偏多且分布分散, 而人口是带动地区经济发展的主要因素, 贵州省人才不足且流失较为严重, 故而难以推动技术创新, 带动经济发展。3) 能源消费结构不合理。化石能源消费是二氧化碳的主要来源, 而贵州省正处于经济发展的重要阶段, 对化石能源的依赖程度仍比较大, 其中 2020 年化石能源的消费比例为 82.4%, 故而该省份二氧化碳排放量相对较高。

5 结论与对策建议

本文采用基于 TOPSIS 灰色关联投影法的动态综合评价法对泛珠三角 9 省(自治区)的碳效率进行了分析。结果表明, 泛珠三角 9 省(自治区)的碳效率除海南省、福建省、广东省和贵州省外普遍差异不大, 整体碳效率的距离呈现先扩大后缩小再扩大的趋势。结合表 4 和原始数据可知, 单位碳排放的人均可支配收入、人均 GDP、R&D 经费投入强度权重高, 每万人公共交通拥有量、建成区绿化覆盖率、单位碳排放的人口数权重占比相对较高, 而造成泛珠三角 9 省(自治区)碳效率差异较大的主要因素正是如此。福建、广东占据地理优势, 对外开放较早, 碳效率较高; 海南省利用先天优良的自然条件大力发展旅游业和房地产业带动经济发展; 贵州省因地势偏僻、交通不便、人才缺失、能源消费结构不合理造成相对碳效率一直处于低谷。根据以上分析结果, 结合泛珠三角 9 省(自治区)的发展现状针对性地提出以下建议:

1) 泛珠三角 9 省(自治区)因经济发展不协调导致碳效率差异显著, 应定位各区域发展特点, 制定差异化减排策略。广东、福建等地应继续利用地理优势坚持海陆统筹发展, 加大开放力度, 提高社会福利; 海南省应继续结合当地特色大力发展旅游业, 同时带动房地产业的发展, 扩大海南省建成区绿化覆盖率; 贵州省应该利用好优渥的矿产资源大力发展经济, 同时加强科技创新, 促进能源的清洁利用。

2) 发挥政府协调作用, 加强产学研合作机制, 加快技术创新。先进的技术水平能够强有效地提高经济产出、降低二氧化碳排放。广东、福建属于沿海地区, 对外开放较早, 技术创新水平全国领先, 碳效率较高, 而贵州、云南等地技术水平相对落后, 碳效率较低。因此, 贵州等地可通过构建高校与科研院所的创新型人才、企业的资金支持和政府的协调作用三者的合作体系带动当地创新发展。

3) 劳动力是推动地区发展的引擎, 各地区政府

应加大财政投入, 注重人才培养。由结论可知, 贵州省人才流失严重, 而地区发展少不了各类人才的支持。政府部门应加大财政投入, 提高科研经费财政拨款, 注重人才培养的同时优化高级人才引进福利政策, 如提供适当购房补贴、就业补贴、创业补贴等。

参考文献:

- [1] FARRELL M J. The Measurement of Productive Efficiency[J]. Journal of the Royal Statistical Society Series A (General), 1957, 120(3): 253.
- [2] ZHOU P, ANG B W, POH K L. A Survey of Data Envelopment Analysis in Energy and Environmental Studies[J]. European Journal of Operational Research, 2008, 189(1): 1-18.
- [3] CRUZ L, DIAS J. Energy and CO₂ Intensity Changes in the EU-27: Decomposition into Explanatory Effects[J]. Sustainable Cities and Society, 2016, 26: 486-495.
- [4] 周新, 马丁. 我国低碳经济发展效率提升路径研究: 基于模糊集的定性比较分析[J]. 管理现代化, 2020, 40(5): 78-81.
ZHOU Xin, MA Ding. Research on the Path of Improving the Development Efficiency of China's Low-Carbon Economy-Qualitative Comparative Analysis Based on Fuzzy Set[J]. Modernization of Management, 2020, 40(5): 78-81.
- [5] MEHMOOD K, IFTIKHARY, CHEN S M, et al. Analysis of Inter-Temporal Change in the Energy and CO₂ Emissions Efficiency of Economies: A Two Divisional Network DEA Approach[J]. Energies, 2020, 13(13): 3300.
- [6] 陈军华, 李乔楚, 何京. 碳中和目标下四川省低碳效率区域差异性[J]. 天然气工业, 2021, 41(6): 162-170.
CHEN Junhua, LI Qiaochu, HE Jing. Regional Diversity of Low-Carbon Efficiency in Sichuan Province Under the Goal of Carbon Neutrality[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(6): 162-170.
- [7] 张济建, 刘清, 丁绪辉. 长江经济带碳解锁效率研究: 基于 SE-DEA-Malmquist 指数[J]. 华东经济管理, 2021, 35(6): 1-10.
ZHANG Jijian, LIU Qing, DING Xuhui. Research on Carbon Unlocking Efficiency of the Yangtze River Economic Belt: Based on SE-DEA-Malmquist Model[J]. East China Economic Management, 2021, 35(6): 1-10.
- [8] IFTIKHARY, WANG Z H, ZHANG B, et al. Energy and CO₂ Emissions Efficiency of Major Economies: a Network DEA Approach[J]. Energy, 2018, 147: 197-207.
- [9] 王兆峰, 杜瑶瑶. 基于 SBM-DEA 模型湖南省碳排放效率时空差异及影响因素分析[J]. 地理科学, 2019, 39(5): 797-806.
WANG Zhaofeng, DU Yaoyao. Spatial-Temporal

- Differences and Influencing Factors of Carbon Emission Efficiency in Hunan Province Based on SBM-DEA Model[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2019, 39(5): 797-806.
- [10] 李 健, 马晓芳, 苑清敏. 区域碳排放效率评价及影响因素分析[J]. *环境科学学报*, 2019, 39(12): 4293-4300.
LI Jian, MA Xiaofang, YUAN Qingmin. Evaluation and Influencing Factors' Analysis of Regional Carbon Emission Efficiency[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(12): 4293-4300.
- [11] 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.
- [12] 宁论辰, 郑 雯, 曾良恩. 2007—2016 年中国省域碳排放效率评价及影响因素分析: 基于超效率 SBM-Tobit 模型的两阶段分析[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2021, 57(1): 181-188.
NING Lunchen, ZHENG Wen, ZENG Liang'en. Research on China's Carbon Dioxide Emissions Efficiency from 2007 to 2016: Based on Two Stage Super Efficiency SBM Model and Tobit Model[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2021, 57(1): 181-188.
- [13] 邓洪中, 刘 莎, 李志洪, 等. 泛珠三角区域旅游业碳排放量估算及驱动因素研究[J]. *怀化学院学报*, 2019, 38(1): 46-51.
DENG Qizhong, LIU Sha, LI Zhihong, et al. Carbon Emissions Estimation, Potential and Driving Factors of Emission Reduction of Tourism in the Pan-Pearl River Delta Region[J]. *Journal of Huaihua University*, 2019, 38(1): 46-51.
- [14] 曹广喜, 刘禹乔, 周 洋, 等. 中国制造业发展与碳排放脱钩的空间计量研究: 四大经济区分析[J]. *科技管理研究*, 2015, 35(21): 224-228.
CAO Guangxi, LIU Yuqiao, ZHOU Yang, et al. Study on Spatial Econometrics of Carbon Emission Decoupling in the Development of Chinese Manufacturing Industry: Analysis of Four Major Economic Zones[J]. *Science and Technology Management Research*, 2015, 35(21): 224-228.
- [15] 宛 睿. 泛珠三角经济区全要素碳生产率影响的空间面板模型分析[D]. 桂林: 广西师范大学, 2017.
WAN Rui. Spatial Panel Model Analysis on the Impact of Total Factor Carbon Productivity in Pan-Pearl River Delta Economic Zone[D]. Guilin: Guangxi Normal University, 2017.
- [16] 袁桂丽, 张健华, 王田宏, 等. 基于 TOPSIS 灰色关联投影法的火电厂节能综合评价与权重灵敏度分析[J]. *动力工程学报*, 2015, 35(5): 404-411.
YUAN Guili, ZHANG Jianhua, WANG Tianhong, et al. Comprehensive Energy-Saving Evaluation of Thermal Power Plants Based on TOPSIS Gray Relational Projection and the Weight Sensitivity Analysis[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2015, 35(5): 404-411.
- [17] 范德成, 杜明月. 基于 TOPSIS 灰色关联投影法的高新技术产业技术创新能力动态综合评价: 以京津冀一体化为视角[J]. *运筹与管理*, 2017, 26(7): 154-163.
FAN Decheng, DU Mingyue. Dynamic Comprehensive Evaluation of the High-Tech Industry Technology Innovation Ability Based on TOPSIS Grey Relation Projection Method: In the Perspective of Integration of Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. *Operations Research and Management Science*, 2017, 26(7): 154-163.
- [18] 梁海平, 田圣双, 李秋燕, 等. 基于改进 TOPSIS 灰色关联投影法的主网网架结构评价[J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(4): 63-69.
LIANG Haiping, TIAN Shengshuang, LI Qiuyan, et al. Main Grid Structure Evaluation Based on Improved TOPSIS Grey Relation Projection Method[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(4): 63-69.
- [19] 余 鹏, 马 珩, 周福礼. 基于级差最大化组合赋权 TOPSIS 灰关联投影法的区域碳效率动态评价[J]. *运筹与管理*, 2019, 28(12): 170-177.
YU Peng, MA Heng, ZHOU Fuli. Dynamic Evaluation of Regional Carbon Efficiency Based on Combined Weighting of Level Difference Maximization and TOPSIS Grey Incidence Projection Method[J]. *Operations Research and Management Science*, 2019, 28(12): 170-177.
- [20] 张雪花, 韩成吉, 刘文莹, 等. 基于 DEA-VRS 的区域“全碳效率”评价: 以我国其中 30 个省域为例[J]. *数学的实践与认识*, 2017, 47(20): 313-320.
ZHANG Xuehua, HAN Chengji, LIU Wenying, et al. Regional "Full Carbon Efficiency" Evaluation in DEA-VRS: A Case of 30 Province of China[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2017, 47(20): 313-320.
- [21] 余敦涌, 张雪花, 刘文莹. 基于随机前沿分析方法的碳排放效率分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2015, 25(增刊 2): 21-24.
YU Dunyong, ZHANG Xuehua, LIU Wenying. Analysis of Carbon Emission Efficiency Based on Stochastic Frontier[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2015, 25(S2): 21-24.

(责任编辑: 姜利民)