

数字化背景下国家中心城市碳排放效率的测度及其收敛性研究

——基于三阶段SBM-DEA模型的实证分析

王丽春, 任栩青

江苏大学管理学院, 江苏 镇江

收稿日期: 2024年12月2日; 录用日期: 2024年12月13日; 发布日期: 2025年1月23日

摘要

基于二十大“积极稳妥推进双碳工作”的战略方针, 我国国家中心城市作为城镇体系的顶层结构, 全面提升资源利用效率, 对实现区域协调绿色发展目标具有重要意义。论文以我国国家中心城市群为研究对象, 并结合三阶段超效率SBM-DEA模型和Malmquist-Luenberger指数, 对我国9个国家中心城市2005年到2019年碳排放效率进行测度。同时根据实证结果构建了面板数据模型, 从投入要素角度出发, 探究各因素对于国家中心城市碳减排绩效的影响程度。结果显示全国各国家中心城市碳排放效率整体水平偏低, 老一代国家中心城市处于碳排放效率领先地位; 从动态效果分析看, 国家中心城市碳排放效率ML指数总体平均值大于1, 说明各城市碳排放效率逐年增加。技术进步促进了碳排放效率ML指数的增长, 纯技术效率的相对较低, 总体上表现为“东中西”顺序递减的空间格局; 各城市之间存在显著的空间收敛关系, 禀赋结构对于收敛性有明显正向相关影响。鉴于此, 本文以国家中心城市为研究对象, 制定差异化碳减排政策, 推动区域高质量发展。以国家中心城市为代表, 积极参与国际气候合作, 协同推进减碳、减污、扩绿与增长, 优化城市布局, 构建区域协调发展新格局。

关键词

国家中心城市, 三阶段DEA模型, ML指数, 空间收敛

Study on Measurement and Convergence of Carbon Emission Efficiency of National Central Cities under the Digital Background —Empirical Analysis Based on Three-Stage SBM-DEA Model

Lichun Wang, Xuqing Ren

School of Management, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu

文章引用: 王丽春, 任栩青. 数字化背景下国家中心城市碳排放效率的测度及其收敛性研究[J]. 电子商务评论, 2025, 14(1): 2847-2858. DOI: 10.12677/ecl.2025.141358

Abstract

Based on the strategic guideline of “proactively and prudently advancing carbon neutrality” outlined in the 20th National Congress, China’s national central cities, as the top tier of the urban system, play a significant role in achieving coordinated and sustainable regional development by enhancing resource utilization efficiency. This study takes China’s national central cities as the research object and applies the three-stage super-efficiency SBM-DEA model and Malmquist-Luenberger index to measure the carbon emission efficiency of nine national central cities from 2005 to 2019. Based on the empirical results, a panel data model is constructed to analyze the impact of various input factors on carbon reduction performance in national central cities. The results indicate that the overall carbon emission efficiency of national central cities is relatively low, with older generations of national central cities leading in efficiency. From a dynamic perspective, the average ML index of carbon emission efficiency across the cities exceeds 1, indicating an annual improvement in efficiency. Technological progress is identified as the primary driver of the ML index growth, while pure technical efficiency remains relatively low. The spatial distribution of efficiency generally follows a decreasing trend from east to west. A significant spatial convergence relationship exists among cities, with resource endowment structure positively influencing convergence. In view of this, the study proposes differentiated carbon reduction policies for national central cities to promote high-quality regional development. Representing China, national central cities should actively participate in international climate cooperation, synergistically advance carbon reduction, pollution control, ecological restoration, and economic growth, optimize urban layouts, and foster a new pattern of coordinated regional development.

Keywords

National Central City, Three-Stage DEA Model, ML Index, Space Convergence

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

进入 21 世纪后, 能源过度消耗、环境资源流失和全球气候变暖成为全球各界环保人士关注的重点问题。而上述问题随着时间的发展越发严重, 各国着眼于全球恶劣气候问题, 陆续召开相应的全球性气候大会, 以此来促进全球气候合作进程并统一实现碳排放的减排工作。中华人民共和国住房和城乡建设部明确提出了中心城市的定义, 上者在全国城乡系统中代表着最高的地位。国家中心城市不仅承担着我国经济飞速发展的重要任务, 也担任着推动绿色经济发展的重要角色, 必须发挥自身技术优势的引领作用, 以先锋队的身份参加了这次战斗, 带动周边省市低碳行动。

碳排放效率是我国经济发展水平中的关键性指标, 它能正确地反映经济生产活动对能源投入和 CO₂ 的影响关系。中心城市作为城镇最高层级形式, 可最大化程度发挥吸引外资、获取先进绿色技术等优势, 因此作为经济主体的国家中心城市, 需全面地、系统地对各城市进行系统评价, 充分发挥中心城市的引领作用, 有利于在落实我国减排目标以及明确国际碳排放责任等方面发挥重要作用。目前国内外对于城

市层面的研究大多基于宏观角度, 而针对城市微观层面的碳效率测算较少, 且主要以静态指标为主, 缺乏动态性和可比性。

2. 文献回顾

21 世纪以来, 碳排放效率一直是低碳经济学术界的关键词, 国内外知名学者相继研究并得出大量重要结论。碳排放效率是国家经济社会发展水平的重要衡量指标, 同时也是推进降碳目标的核心指标, 但学术界迄今没有一个统一而又清晰的概念。Kaya 和 Yokobori (1999)是从单要素视角开始研究, 将碳生产率规定为同期 GDP 与碳排放量的比率, 即同样的产出比过去排放更少的碳或者同样单位的碳排放比原来有更多的产出优化[1]。Sun (2005)报告也指出, 碳排放效率评估是评判一个国家绿色经济发展水平的关键要素。还有一部分学者并没有利用 GDP 要素为基础进行测算[2]。在早期, 当针对碳排放效果的问题时, Mielnik 与 Goldemberg (1999)共同提出了碳指标的定义, 并将经济指标与实际二氧化碳排放量之比, 作为衡量标准将对碳排放效果的衡量与经济评价模型结合, 并由此来对发达国家的节能减排方面的经济贡献加以评价[3]。马大来(2015)等人采用了至强有效前沿的最小距离模型, 评估碳排放量效率并构建了空间面板模型, 得出我国省际碳排放效率便显出较大的省际差异性, 东部沿海相较内陆城市更加平稳[4]。李慧(2019)等采用 Parzen 窗验证了我国碳排放效率动态收敛特征[5]。

通过梳理上述相关文献不难发现, 大多数文献都对碳排放效率测算、影响因素、收敛性检验等方面进行了诸多富有意义的探索, 并取得了一定的成果, 相较于已有文献, 本文的边际贡献在于: 1) 现有文献对于国家中心城市碳排放效率测度的研究较少, 国家中心城市作为经济[6] [7]、技术领航[8] [9]的重要城市, 对其进行碳排放效率的测度与收敛性分析具有现实意义[10] [11]。2) 通过对传统 DEA 方法研究, 并利用其对碳排放效率进行测度的同时[12] [13], 多数学者未考虑到干扰项对碳排放效率值的影响, 会对测度结果的准确度造成影响[14] [15]。目前关于我国国家中心城市碳排放效率测度方面还缺乏较为全面的研究成果, 因此本文利用三阶段 SBM-DEA 模型进行测度, 从而有效剔除干扰项的影响。

3. 模型建立、数据选取与信息获得

3.1. 碳排放效率测算: 三阶段 SBM-DEA 模型

本文为更加客观准确地衡量效率值, 本文选取 Tone (2001) [6]提出的超效率 SBM 模型, 形式为:

$$\min CE = \frac{1 + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{a_i^-}{x_i^2}}{1 - \frac{1}{u_1 + u_2} \left(\sum_{r=1}^{a_1} \frac{a_r^-}{y_n^2} + \sum_{r=1}^{a_1} \frac{a_n^{b-}}{y_{nnn}^2} \right)}$$

$$\text{B.t.} \begin{cases} \sum_{i=1}^T \sum_{n=1, nmaxk}^N \lambda x_n^i + s_n^a = x_n^i, & h = 1, \dots, m \\ \sum_{i=1}^T \sum_{n=1, nmaxk}^N \lambda_n^N y_{in} - s_w^a = y_{in}^i, & w = 1, \dots, u_1 \\ \sum_{i=1}^T \sum_{n=1, nmaxk}^N \lambda_n^N y_m^b - s_v^a = y_{inn}^i, & v = 1, \dots, u_2 \\ g_t^-, g_r^-, g_t^{b-1} \geq 0, \lambda_n \geq 0, n = 1, \dots, N \end{cases}$$

该模型中, CE 代表各城市的碳排放效率值, S_i^- 、 S_r^- 、 S_t^{b-} 分别表示投入、预期产出和非预期产出的松弛因子, 而 x_{ik}^t 、 y_{rk}^t 、 y_{wk}^t 分别代表了第 k 个省的第 i 个主要投入要素、第 r 个预期产出和第 w 个非预期产出, λ 代表了约束条件。

本论文将第二阶段和 Freid 研究相结合, 通过构建随机前沿 SFA 模型, 去除环境变量, 根据结果对投资和产出率加以调整[7]。方程为:

$$s_{ik} = f(w_k; \beta_i) + v_{ik} + u_{ik}$$

本文结合现有的文献首先得到外部环境因素 $\hat{\mu}_{ij}$ 的计算公式:

$$\hat{E}[\mu_{ij} | v_{ij} + \mu_{ij}] = \frac{\sigma\lambda}{1+\lambda^2} \left[\frac{\phi\left(\frac{\varepsilon_i\lambda}{\sigma}\right)}{\varphi\left(\frac{\varepsilon_i\lambda}{\sigma}\right)} + \frac{\varepsilon_i\lambda}{\sigma} \right]$$

在该公式中, $\varepsilon = v_{ij} + \mu_{ij}$, $\lambda = \sigma_u / \sigma_v$ 为联合误差项, φ 和 ϕ 代表分布函数密度。误差计算公式为:

$$\hat{E}[v_{ij} | \mu_{ij} + v_{ij}] = S_{ij}^- - z_i \hat{\beta}_j - \hat{E}[\mu_{ij} | \mu_{ij} + v_{ik}]$$

第三阶段: 经过二阶段模型回归后, 将优化后的投入产出值代入至第一阶段 SBM 模型中重新核算效率值, 从而可以得到消除误差项后的整体效率值。

3.2. Malmquist-Luenberger 指数模型

Malmquist 指数被定义为两个距离函数值之比, 是一种理论上的指数(CCD, 1982)。直到 1978 年才发现了 DEA 模型, 利用线性规划理论评估技术效果之后转变为距离函数值。最终, Malmquist 指数才从理论指数变成了实证指数。

规模报酬不变(CRS)的情况下:

$$M_c^{t+1} = EC_c^* TC_c$$

$$M_c^{t+1}(x^t, y^t, x^{t+1}, y^{t+1}) = \left[\frac{E_c^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{E_c^t(x^t, y^t)} \cdot \frac{E_c^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{E_c^{t+1}(x^t, y^t)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$EC_c = \frac{E_c^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{E_c^t(x^t, y^t)}$$

$$TC_c = \left[\frac{E_c^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{E_c^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})} \cdot \frac{E_c^t(x^t, y^t)}{E_c^{t+1}(x^t, y^t)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Fare *et al.* (1994)在上述分解法的基础上, 将效率变化进一步分解, 得到纯技术效率变化(PEC)和规模报酬变化(SEC) [8]。

$$M_c^{t+1} = EC_c^* TC_c = PEC^* SEC^* TC_c$$

$$SEC = \frac{E_c^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}) / E_v^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{E_c^t(x^t, y^t) / E_v^t(x^t, y^t)}$$

3.3. 空间自相关分析与空间收敛模型

1) 空间自相关分析

国家中心城市之间由于经济发展层次、资源禀赋等原因的差异, 碳排放效率水平也会有一定程度的差异。通过空间计量模型, 来检验各中心城市效率收敛的合理程度, 利用莫兰指数(Moran's I)来进行表示,

如下:

$$\text{Moran's I} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij} (CE_i - \overline{CE})(CE_j - \overline{CE})}{s^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij}}$$

其中 $s^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (CE_j - \overline{CE})^2$ 代表碳排放效率水平的方差; ω_{ij} 代表权重矩阵。本文选取的中心城市间相对距离相差过大, 本文故选取了经济距离矩阵来测算。采用经济距离空间矩阵进行比较。具体为:

$$\omega_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{GDP_i - GDP_j}}, & i \neq j \\ 0, & i = j \end{cases}$$

该空间指数计算范畴为 $[-1, 1]$, 大于零则为正相关, 小于零为负相关, 等于零 = 则不相关。

2) σ 收敛模型

σ 收敛代表了中心城市碳排放效率分散程度随时间推移的变化情况。当指标呈现降低趋势时, 则表明了碳排放效率出现 σ 收敛的特点; 当指标趋于上升后, 表明碳排放效率具备 σ 分散特征。方法为:

$$CV = \frac{\sqrt{\frac{\sum (\chi_i - \bar{x})^2}{N}}}{\bar{x}}$$

式中, CV 值代表碳排放效率的收敛系数; χ_i 表示 i 城市的碳排放效率值; $\bar{x}$ 表示该城市碳排放效率的平均值; x 为城市数量。

3) 空间收敛模型

依据空间收敛模型可以判断中心城市碳排放效率的趋同与发散情况。空间绝对 β 收敛是指中心城市碳排放效率的增速与初始水平存在负相关, 如下:

$$\ln \frac{CE_{i,t+T}}{CE_{i,t}} = \alpha + \beta \ln CE_{i,t} + \rho \sum_{j=1}^n \omega_{ij} \ln \frac{CE_{j,t+T}}{CE_{j,t}} + \varepsilon_{i,t}$$

上式中, 当绝对 β 系数小于 0 时, 表示该城市存在绝对 β 收敛, 即碳排放效率较低的城市增长速率较快, 从而可以减少国家中心城市内部碳排放效率差距; 空间条件 β 收敛, 在绝对收敛模型的基础上, 添加外部环境变量, 形成新的空间条件 β 收敛模型, 方法如下:

$$\ln \frac{CE_{i,t+T}}{CE_{i,t}} = \alpha + \beta \ln CE_{i,t} + \rho \sum_{j=1}^n \omega_{ij} \ln \frac{CE_{j,t+T}}{CE_{j,t}} + \beta_1 TS_{i,t} + \beta_2 IS_{i,t} + \beta_3 UR_{i,t} + \varepsilon_{i,t}$$

3.4. 数据来源

为确保调研数据的可信真实度, 按照本文的主要范围研究对象选取了 9 个国家中心城市, 由住房和城乡建设部明确提出了五大国家中心城市: 北京、天津、上海、广州、重庆; 随后几年住房和城乡建设部分别在成都、武汉、郑州、西安设立新一代国家中心城市。本文所用投入数据、产出数据、环境变量数据, 主要来自于 2005~2019 年《中华人民共和国统计资料年鉴》《中华人民共和国科技统计年鉴》《中华人民共和国固定资产投资统计分析年鉴》《中华人民共和国劳动统计分析年鉴》《中华人民共和国能源统计分析年鉴》《中华人民共和国城市统计分析年鉴》。

4. 实证结果分析

4.1. 第一阶段碳排放效率值测算结果

通过上述模型描述与分析，将各个中心城市选定投入产出变量利用 Matlab 软件导入超效率 SBM-DEA 模型，测得各国家中心城市碳排放效率如表 1 所示。综合分析，国家中心城市碳排放效率数值存在着显著的差距，比较效率值最高与最低的两个城市，两者效率差距 0.7，幅度较大。由此可见，目前全国减排压力依然很大，而各效率较低的中心城市多数为中西部的国家中心城市，具有较大的节能减排空间。

Table 1. Carbon emission efficiency of national central cities in the first phase

表 1. 第一阶段国家中心城市碳排放效率

城市	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	排名
北京	1.3	1.3	1.22	1.27	1.22	1.17	0.5	1.01	2
天津	0.51	0.5	0.49	0.46	0.51	0.5	0.47	0.5	7
重庆	0.52	0.49	0.49	0.44	0.48	0.47	0.44	0.48	8
上海	0.72	0.67	1.05	1.03	1.02	1.02	1.01	0.62	3
成都	0.51	0.53	0.5	0.46	0.52	0.54	0.5	0.6	6
郑州	1.11	1.08	1.05	0.49	0.52	0.51	0.46	0.48	5
西安	0.48	0.44	0.43	0.37	0.41	0.42	0.37	0.41	9
武汉	1.03	1	0.56	0.51	0.55	0.56	0.48	0.56	4
广州	1.15	1.17	1.16	1.25	1.17	1.18	1.28	1.22	1
均值	0.82	0.77	0.77	0.7	0.71	0.71	0.61	0.65	
城市	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	均值	排名
北京	0.59	1.04	1.25	1.26	1.27	1.05	1.18	1.11	2
天津	0.47	0.47	0.49	0.5	0.48	0.48	1.03	0.52	7
重庆	0.42	0.42	0.42	0.43	0.41	0.41	0.47	0.45	8
上海	0.71	0.57	0.57	0.58	0.7	1	1.01	0.82	3
成都	0.49	1.05	1.02	0.42	0.38	0.37	0.38	0.55	6
郑州	0.44	0.43	0.43	0.43	0.42	0.44	0.66	0.6	5
西安	0.38	0.36	0.37	0.55	0.42	0.41	0.34	0.41	9
武汉	0.54	0.56	0.55	0.51	0.49	0.49	1.15	0.64	4
广州	1.19	1.25	1.26	1.29	1.19	1.15	1.21	1.21	1
均值	0.64	0.74	0.76	0.77	0.77	0.74	0.82	0.70	

4.2. 第二阶段 SFA 回归结果

因为国家中心城市之间存在环境条件上的差异，发展水平不尽相同。所以第一阶段碳排放效率的计算有所偏差。因此在第二阶段中，利用 Frontier4.1 把各投入的松弛变量和环境变量导入，建立随机前沿模型，发挥除外部环境与随机干扰的影响的作用，回归结果见表 2。松弛变量的 LR 单边误差，均通过了 1% 的显著性检验，说明了该模型合理。

Table 2. Second-stage stochastic frontier model regression**表 2.** 第二阶段随即前沿模型回归

变量	资本投入松弛变量	劳动投入松弛变量	能源投入松弛变量
常数项	-1907.6401** (-2.15)	113.67*** (4.97)	256.62** (2.35)
研发投入	-89028.954*** (-575.0129)	-556.64*** (-2.81)	-1822.64* (-1.85)
环境规制	39.08 (0.18)	-5.5* (1.65)	-26.85** (-2.18)
禀赋结构	122.39*** (7.69)	-0.17 (1.04)	1.76*** (13.21)
sigma-squared	$4.36 \times 107^{***}$ (3.67×107)	16012.80*** (4.27)	54283.19*** (531.58)
gamma	0.58*** (10.78)	0.83*** (16.58)	0.45*** (6.77)
LR 单边误差	30.90***	54.70***	21.36***

注：括号内为各系数的 T 值，*、**、***分别表示在 10%、5%、1%的显著性水平上显著。

4.3. 第三阶段碳排放效率测算结果

由表 2 的回归结果不难发现，所有投入变量的 gamma 值均处于{0, 1}，说明了第一阶段效率值的计算中有外部环境因素和随机扰动项的干扰影响。利用 SBM-DEA 模型，排除外部环境变量和随机因素后的碳排放效率值(见表 3)。

1) 国家中心城市碳排放效率水平分析

通过表 3 可得到相较于第一阶段测得碳排放效率值，剔除了干扰项的影响之后，测得碳排放效率值较准确且符合预期。在对各城市碳排放效率的评测中，只能将指标设置在相同环境、标准水平下，并剔除外部环境和随机扰动的综合影响，所得数据才能客观事实反应出实际的目标碳排放效率，这也就更加表明了采用三阶段 SBM-DEA 的适当、准确与科学性。

Table 3. Carbon emission efficiency of national central cities in the third stage**表 3.** 第三阶段国家中心城市碳排放效率

城市	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	排名
北京	1.30	1.30	1.22	1.27	1.22	1.17	0.75	1.01	1
天津	0.49	0.52	0.61	0.62	0.67	0.68	0.69	0.71	4
重庆	0.48	0.49	0.56	0.59	0.59	0.63	0.62	0.58	5
上海	1.15	1.13	1.11	1.10	1.08	1.08	1.07	1.09	3
成都	0.40	0.47	0.53	0.53	0.54	0.57	0.57	0.55	7
郑州	0.30	0.31	0.37	0.40	0.41	0.42	0.41	0.41	8
西安	0.25	0.26	0.31	0.32	0.33	0.34	0.34	0.37	9
武汉	0.38	0.44	0.51	0.50	0.51	0.56	0.50	0.51	6
广州	1.08	1.09	1.06	1.10	1.07	1.09	1.23	1.15	2
均值	0.65	0.67	0.70	0.72	0.71	0.73	0.69	0.71	

续表

城市	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	均值	排名
北京	0.74	1.04	1.25	1.25	1.27	1.05	1.10	1.13	1
天津	0.64	1.01	1.03	1.04	1.04	1.04	1.14	0.80	4
重庆	0.55	0.57	0.57	0.58	0.59	0.58	0.60	0.57	5
上海	1.07	1.05	1.05	1.04	1.04	1.05	1.05	1.08	3
成都	0.45	0.47	0.47	0.40	0.46	0.46	0.42	0.49	7
郑州	0.40	0.42	0.43	0.43	0.47	0.49	0.48	0.41	8
西安	0.34	0.36	0.38	0.53	0.46	0.48	0.37	0.36	9
武汉	0.51	0.50	0.50	0.47	0.51	0.47	1.10	0.53	6
广州	1.06	1.19	1.19	1.20	1.13	1.08	1.08	1.12	2
均值	0.64	0.74	0.76	0.77	0.77	0.74	0.82	0.72	

2) 调整后碳排放效率的 ML 指数分析

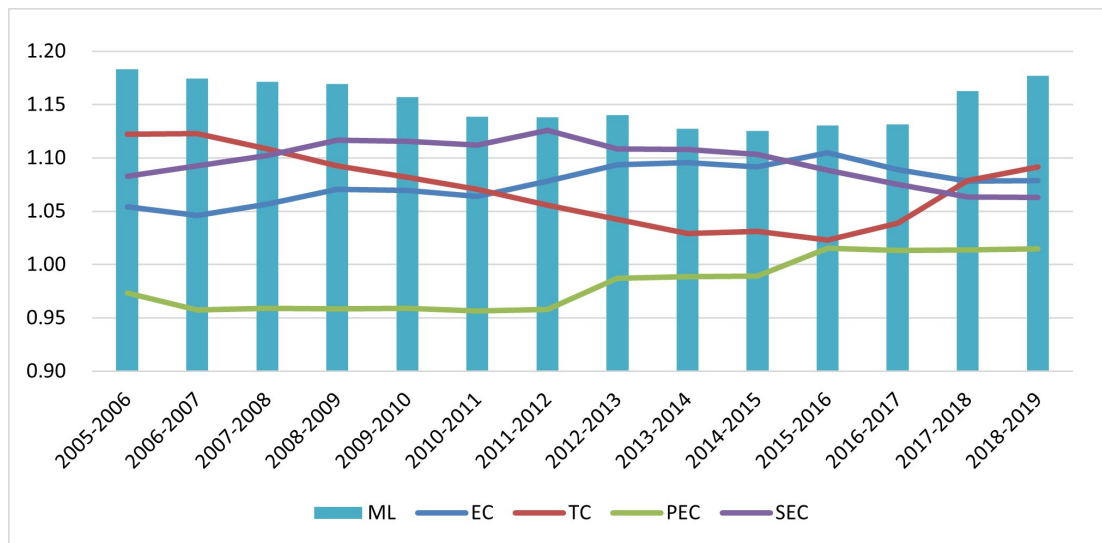
针对上文三阶段 SBM-DEA 测算对碳排放效率的静态研究结果，为探讨当前国家中心城市碳排放效率在动态层面的变化态势，本文将采用 Malmquist-Luenberger 指数，对 2005~2019 年期间各城市碳排放效率做动态发展研究，利用几何平均值进行动态计算，如表 4 所示，国家中心城市各年份碳排放效率如图 1 所示。

Table 4. Results of the carbon emission efficiency change index of national central cities

表 4. 国家中心城市碳排放效率变化指数结果

区域	城市	ML	EC	TC	PEC	SEC
东部地带	北京	1.160	0.988	1.174	0.989	0.999
	天津	1.196	1.062	1.127	1.011	1.050
	上海	1.060	0.994	1.066	0.992	1.002
	广州	1.106	1.000	1.106	0.985	1.015
东部均值		1.129	1.011	1.117	0.994	1.016
中部地带	郑州	1.087	1.034	1.051	1.001	1.033
	武汉	1.152	1.079	1.067	1.068	1.011
	中部均值	1.119	1.056	1.059	1.034	1.022
西部地带	西安	1.122	1.027	1.092	0.984	1.044
	成都	1.077	1.004	1.072	0.953	1.053
	重庆	1.099	1.016	1.081	0.966	1.052
	西部均值	1.099	1.016	1.082	0.968	1.050
	总体均值	1.117	1.022	1.092	0.994	1.029

数据来源：根据前述公式计算整理所得。



数据来源：根据前述公式计算整理所得。

Figure 1. Changes in carbon emission efficiency of national central cities in each year

图 1. 国家中心城市各年份碳排放效率变化

图 1 中, 在 2005~2014 年间, 碳排放效率变化指数呈现起伏变化, 存在一定的时空差异。2015~2019 年间碳排放效率变化指数仍为增长趋势, 并且这几年的变化指数均超过 1, 说明国家中心城市碳排放效率整体呈现上升趋势。

4.4. 国家中心城市碳排放效率空间收敛性分析

1) 空间自相关检验

通过对国家中心城市碳排放效率测算, 本文为进行空间收敛性检验, 应首先开展空间相关性检验, 以确定不同城市间是否具有空间相关性。本文使用 Stata 17.0 软件导入了经济距离空间矩阵, 对国家中心城市碳排放效率莫兰指数进行测度(见表 5)。

Table 5. Results of Moran index of carbon emission efficiency of China's national central cities

表 5. 中国国家中心城市碳排放效率莫兰指数结果

年份	Moran's I	Z 值	P 值	年份	Moran's I	Z 值	P 值
2005	0.399	2.832	0.005	2013	0.177	1.706	0.088
2006	0.401	2.852	0.004	2014	0.221	1.807	0.071
2007	0.406	2.869	0.004	2015	0.248	1.953	0.051
2008	0.379	2.735	0.006	2016	0.189	1.646	0.099
2009	0.382	2.739	0.006	2017	0.234	1.883	0.060
2010	0.378	2.704	0.007	2018	0.174	1.541	0.123
2011	0.125	1.448	0.148	2019	0.439	2.937	0.003
2012	0.316	2.369	0.018	—	—	—	—

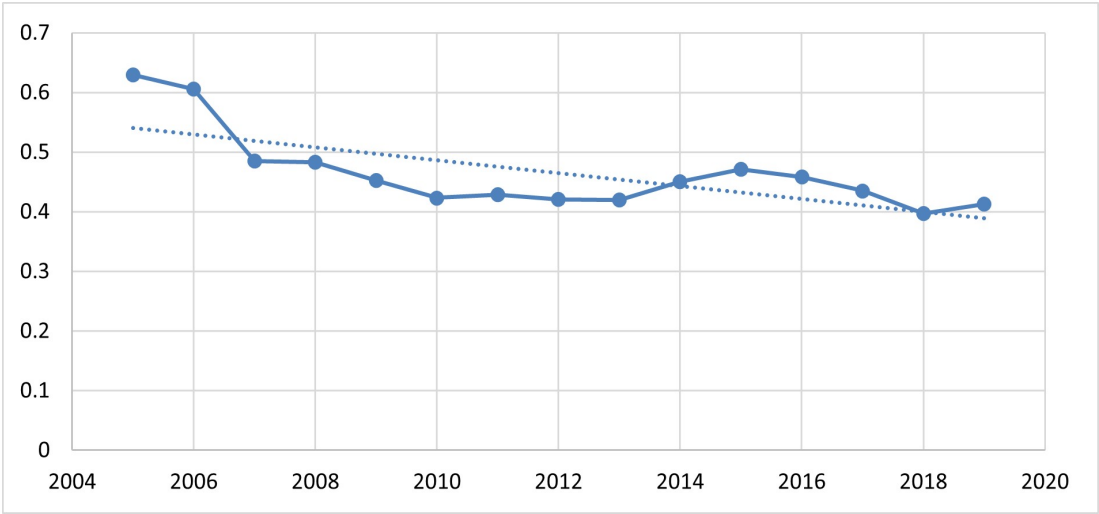
数据来源：根据前述公式计算整理所得。

通过分析发现，各城市莫兰指数均大于零，且大部分都通过了显著性检验，说明国家中心城市之间在碳排放效率指标上具有明显的正向相关性，会受到经济距离相邻地区的影响。

2) 空间收敛性分析

a) 碳排放效率 σ 收敛性分析

基于公式对国家中心城市碳排放效率变异系数 CV 进行测算，结果见图 2。从图 2 中可发现碳排放效率变异系数在 2005~2010 年间波动幅度较大，说明国家中心城市之间碳排放效率的差距逐渐缩减；随后 2010~2015 年间碳排放效率变异系数有所上涨，最后在 2015~2019 年间，碳排放效率变异系数逐渐减小。



数据来源：根据前述公式计算整理所得。

Figure 2. Coefficient of variation of carbon emission efficiency in China's national central cities

图 2. 中国国家中心城市碳排放效率变异系数

b) 碳排放效率绝对 β 收敛性分析

本文使用固定效应模型与随机效应模型进行 Hausman 检验，结果显示均选择固定效应模型最优。经过对上述空间相关性检验表明，尽管国家中心城市之间呈现明显正空间相关性，但在城市之间呈现一定差异，而这些差异势必也会影响国家中心城市碳排放效率的空间格局。检验结果见表 6。

Table 6. LM test results

表 6. LM 检验结果

Test	Statistic	p-value
Spatial error		
Lagrange multiplier	20.943***	0.000
Robust Lagrange multiplier	0.321	0.571
Spatial lag		
Lagrange multiplier	64.518***	0.000
Robust Lagrange multiplier	43.896***	0.000

数据来源：根据 Stata 17.0 计算整理所得。

根据上述理论,可推出 LM-lag 和 LM-error 检验均在 1%的水平下显著,因而需要同时通过稳健的 LM-lag 与 LM-error 检验,发现稳健的 LM-error 检验不显著而稳健的 LM-lag 检验在 1%水平下显著,说明本文 β 检验应当选用空间滞后(SAR)模型。

c) 碳排放效率条件 β 收敛性分析

本文为进一步证明 β 收敛性分析,对条件 β 收敛性进行验证分析,条件 β 收敛是指国家中心城市在研发投入、环境规制、禀赋结构等方面存在差异的情况下,各城市碳排放效率增长率会最终收敛于各自稳定数值。同样,本文继续采用上述方法对碳排放效率条件 β 收敛进行进一步检验,见表 7。

Table 7. Spatial convergence regression results of carbon emission efficiency of national central cities
表 7. 国家中心城市碳排放效率空间收敛回归结果

变量	空间绝对 β 收敛			空间条件 β 收敛		
	个体固定	时间固定	双固定	个体固定	时间固定	双固定
基期碳排放效率	-0.405***	-0.059***	-0.261***	-0.64***	-0.039*	-0.391***
(CE)	(-3.85)	(-2.21)	(-3.50)	(-5.32)	(-1.83)	(-4.26)
研发投入				-1.007	0.131	-0.138
(TS)				(-1.33)	(0.50)	(-0.18)
环境规制				-0.004	-0.002	-0.005
(ER)				(-0.45)	(-0.55)	(-0.83)
禀赋结构				0.002***	0.001*	0.001***
(ES)				(3.92)	(1.72)	(2.87)
Overall	0.040	0.047	0.047	0.051	0.061	0.059
Log likelihood	123.640	126.637	136.045	131.863	128.188	141.816
Sigma	0.008***	0.008***	0.007***	0.007***	0.008***	0.006***
	(7.93)	(7.84)	(7.84)	(7.93)	(7.84)	(7.87)
Obs	126	126	126	126	126	126
收敛速度	0.027	0.003	0.016	0.053	0.002	0.026

注:表中小括号内为 t 值。***、**、*分别代表 1%、5%、10%水平下显著。

5. 结论与政策建议

本文从碳排放效率切入出发,运用三阶段 SBM-DEA 模型与空间收敛模型进行分析,系统研究了国家中心城市碳排放效率的时空差异以及空间收敛性,进行实证分析并得出以下结论:

1) 国家中心城市碳排放效率保持在较低水平。第一阶段中,2005~2019 年国家中心城市碳排放效率不稳定,各年总体均值为 0.70,效率水平相对较低,国家中心城市作为中国城市群代表城市,碳排放效率之间有着较大的差异,说明我国城市面临着较大的减排压力。

2) 国家中心城市碳排放效率 Malmquist-Luenberger 指数分解后,发现技术进步对于碳排放效率变化指数产生了正向促进作用,纯技术效率变化指数对碳排放效率变化指数产生了抑制作用。总体呈现出“东中西”效率变动指数依次递减的空间格局,其中北京、天津、武汉、西安的 ML 指数年均值超过总体平均值,对国家中心城市碳排放效率增长产生推动作用。

基于此,本文提出以下建议:

1) 完善国家中心城市布局, 构建区域协调发展新格局。建设国家中心城市是推动区域协调发展绿色战略的重要抓手, 以国家中心城市建设作为城市化绿色发展的重要引擎, 进一步推动资源使用效率、环保力度在各城市绩效考核中的权重。着力“问题区域”发展进程中的难点、焦点问题, 有效发挥国家中心城市辐射、示范效应, 实现区域协调绿色发展目标。

2) 针对国家中心城市群的空间异质性, 制定差异化的碳减排策略, 缩小“东中西”地区碳排放差距, 最大化绿色能效。具体而言, 应避免“一刀切”的政策, 推动低碳减排和绿色发展的战略目标。同时, 充分利用国家中心城市的技术溢出效应, 克服资源分化、要素禀赋不均、区域竞争过度等问题。东部中心城市应加大减排技术研发, 提升国际化水平和影响力。

3) 充分认知国家中心城市群发展阶段面临的问题, 应重点解决区域间产业协调能源优化等关键问题。从产业协调角度, 建议开展固定资产项目的节能评估和碳排放评估, 制定节能政策和能耗指标, 严格准入标准, 并大力发展循环经济, 推动中心城市群的快速发展。在能源优化方面, 低碳能源结构是城市群低碳发展的基础, 应从战略层面建立适合国家中心城市的低碳能源结构, 合理利用天然气, 积极开发非化石能源, 并有效利用区域资源禀赋, 推广生物质能源和可再生能源在工业、建筑等领域的应用。

参考文献

- [1] Kaya, Y. and Yokobori, K. (1997) *Environment, Energy and Economy: Strategies for Sustainability*. United Nations University Press.
- [2] Sun, J.W. (2005) The Decrease of CO₂ Emission Intensity Is Decarbonization at National and Global Levels. *Energy Policy*, **33**, 975-978. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2003.10.023>
- [3] Mielnik, O. and Goldemberg, J. (1999) Communication the Evolution of the “Carbonization Index” in Developing Countries. *Energy Policy*, **27**, 307-308. [https://doi.org/10.1016/s0301-4215\(99\)00018-x](https://doi.org/10.1016/s0301-4215(99)00018-x)
- [4] 马大来, 陈仲常, 王玲. 中国省际碳排放效率的空间计量[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(1): 67-77.
- [5] 李慧, 李玮, 姚西龙. 中国省域全要素碳排放效率空间特征与动态收敛性研究[J]. 科技管理研究, 2019, 39(19): 98-103.
- [6] Tone, K. (2001) A Slacks-Based Measure of Efficiency in Data Envelopment Analysis. *European Journal of Operational Research*, **130**, 498-509. [https://doi.org/10.1016/s0377-2217\(99\)00407-5](https://doi.org/10.1016/s0377-2217(99)00407-5)
- [7] Fried, H.O., Lovell, C.A.K., Schmidt, S.S. and Yaisawarng, S. (2002) Accounting for Environmental Effects and Statistical Noise in Data Envelopment Analysis. *Journal of Productivity Analysis*, **17**, 157-174. <https://doi.org/10.1023/a:1013548723393>
- [8] Fare, R., Grosskopf, S., Norris, M. and Zhang, Z.Y. (1994) Productivity Growth, Technical Progress, and Efficiency Change in Industrialized Countries. *American Economic Association*, **84**, 66-83.
- [9] 张雪花, 刘文莹. 基于 DEA 模型的中国四个直辖市碳效率评价[J]. 统计与决策, 2015(2): 71-74.
- [10] 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.
- [11] 成远, 乔观民, 等. 基于 SBM-DEA 浙江省碳排放效率时空演变研究[J]. 资源开发与市场, 2022, 38(3): 272-279.
- [12] 相天东. 我国区域碳排放效率与全要素生产率研究——基于三阶段 DEA 模型[J]. 经济经纬, 2017, 34(1): 20-25.
- [13] 袁长伟, 赵潇, 孙璐. 中国交通运输碳排放效率测度及收敛性研究[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(12): 222-229.
- [14] 李根忠, 朱洪亮. 基于三阶段 SM-DEA-Malmquist 指数的长江经济带碳排放效率研究[J]. 运筹与管理, 2022, 31(6): 161-167.
- [15] 黄羿, 常向阳. 低碳经济与交通运输业发展——基于国家中心城市数据的实证研究[J]. 社会科学家, 2019(11): 67-73.