DOI: 10.5846/stxb202211163319

彭文斌,曹笑天,苏昌贵,邝嫦娥.长江中游城市群碳效率时空演化特征——基于三阶段 SBM-DEA 模型.生态学报,2023,43(9):3532-3545. Peng W B,Cao X T,Su C G,Kuang C E.Spatio-temporal evolutionary characteristics of carbon efficiency in the middle reaches of the Yangtze River urban agglomeration based on a three-stage SBM-DEA model.Acta Ecologica Sinica,2023,43(9):3532-3545.

长江中游城市群碳效率时空演化特征

——基于三阶段 SBM-DEA 模型

彭文斌^{1,2},曹笑天¹,苏昌贵^{2,*},邝嫦娥¹ 1 湖南科技大学商学院,湘潭 411201

2 湖南财政经济学院湖南省经济地理研究所,长沙 410205

摘要:长江中游城市群作为我国区域发展格局的中坚力量,其碳效率的提升对助力我国实现"双碳"目标意义重大。采用三阶段 SBM-DEA 模型测度 2006—2019 年长江中游城市群 28 市的碳效率并进行环境变量影响分析,以探究长江中游城市群碳效率 的影响路径;进而运用核密度估计、中心-标准差椭圆等方法分析碳效率的时空演化特征,以探明各区域碳效率差异并给出相应 提升策略。研究结果表明:①长江中游城市群整体碳效率水平不高,但呈现出逐年波动上升的趋势;②长江中游城市群碳效率 呈现出"武汉城市圈>环长株潭城市群>环鄱阳湖城市群"的空间分异格局,效率中心整体向东北方向移动,标准差椭圆长轴标 准差整体缩小,短轴标准差相对稳定;③长江中游城市群碳效率存在正向空间溢出效应,城镇化进程、产业结构和科技支撑强度 是影响碳效率的重要因素。

关键词:碳效率;时空演化特征;三阶段 SBM-DEA 模型;长江中游城市群

Spatio-temporal evolutionary characteristics of carbon efficiency in the middle reaches of the Yangtze River urban agglomeration based on a three-stage SBM-DEA model

PENG Wenbin^{1,2}, CAO Xiaotian¹, SU Changgui^{2,*}, KUANG Change¹

1 School of Business, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China

2 Hunan Institute of Economic Geography, Hunan University of Finance and Economics, Changsha 410205, China

Abstract: As the backbone of China's regional development pattern, increasing carbon efficiency in the middle reaches of the Yangtze River urban agglomeration is of great significance to help China achieve the "double carbon" goal. In order to explore the carbon efficiency differences and influence paths of each region in the middle reaches of the Yangtze River urban agglomeration and propose corresponding improvement strategies, we applied a three-stage SBM-DEA model to measure the carbon efficiency of 28 cities in the middle reaches of the Yangtze River urban agglomeration from 2006 to 2019 and analyze the impact of environmental variables, which excluded the influence of external environment and random factors. Then, we also used kernel density estimation and center-standard deviation ellipses to analyze the spatial and temporal evolution of carbon efficiency, which aimed to find a site-specific approach to make targeted suggestions for carbon efficiency improvement. The results show that: ① the overall carbon efficiency of the middle reaches of the Yangtze River urban agglomeration is not high but shows a trend of the fluctuating upward year by year. There is no GDP output redundancy

基金项目:国家自然科学基金面上项目(42071161);湖南省自然科学基金面上项目(2021JJ30282);湖南省教育厅科学研究项目(22A0666);湖 南省研究生科研创新重点项目(CX20221046)资助

收稿日期:2022-11-16; 网络出版日期:2023-04-02

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: sucgui@ 126.com

http://www.ecologica.cn

among cities, and the main reasons affecting carbon efficiency in the middle reaches of the Yangtze River urban agglomeration are focused on capital, labor, energy inputs, and CO2 emissions. (2) The carbon efficiency of the middle reaches of the Yangtze River urban agglomeration shows a spatial divergence pattern of Wuhan city circle > Changzhutan urban agglomeration > Poyang Lake urban agglomeration, while the center of efficiency moves to the northeast. The standard deviation of the long axis of the standard deviation ellipse decreases as a whole, and the standard deviation of the short axis is relatively stable. The overall area of the standard deviation ellipse has decreased, which means that the difference in carbon efficiency between regions is reducing year by year. (3) There is a positive spatial spillover effect of carbon efficiency in the middle reaches of the Yangtze River urban agglomeration, and the urbanization process, industrial structure, and technology support intensity are crucial factors affecting carbon efficiency. Within the middle reaches of the Yangtze River urban agglomeration, and energy input. Therefore, the better-developed areas siphon resources to the surrounding areas, which formed the negative spatial spillover effect within the middle reaches of the Yangtze River urban agglomeration.

Key Words: carbon efficiency; spatial and temporal evolutionary characteristics; three-stage SBM-DEA model; urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River

在经济高速增长的同时,传统粗放型经济模式也对环境造成了一系列损害,其中二氧化碳(CO₂)过量排 放造成的环境影响正逐步成为威胁人类可持续发展的世界性重大难题^[1]。可持续发展与一定的空间战略密 切相关^[2],发达国家为节约环境治理成本,将污染密集型产业或生产环节向发展中国家转移,在恶化当地环 境的同时也迫使发展中国家减少碳排放^[3]。2015年,我国作为碳排放大国在巴黎气候大会上做出了重要承 诺:力争于 2030年前达到二氧化碳排放峰值,2060年前实现温室气体中和。习总书记在二十大报告中再次 指出,要积极稳妥推进碳达峰碳中和。基于此,碳效率作为全球气候变暖背景下的重要议题引起了海内外学 者的关注。

碳效率是资本、劳动力等投入要素共同作用的结果,体现了经济活动过程中的投入产出效率[4],目前学 者们大多将研究的重点聚焦于空间或行业上的碳效率差异性分析。在空间尺度上, Herrala 等^[5]采用随机成 本边界函数分析法测度了 1997—1999 年间 170 个国家的二氧化碳排放效率,发现研究期间非洲和欧洲的效 率最高,中国的效率较低但有上升趋势。Dong 等^[6]对中国碳效率研究的实证结果指出 1997—2010 年中国的 二氧化碳排放效率呈上升趋势,并且东部地区的碳效率最高。Zhang 等^[7]发现实施排放交易政策的试点地区 碳排放显著减少。陈晓红等^[8]运用三阶段 SBM-DEA 模型对中国 30 个省市的碳效率进行测算,其结果表明 我国碳效率呈"东>中>西"的格局。王少剑等^[9]采用了超效率 SBM 模型对 1992—2013 中国城市碳效率进行 计算,并描述了其空间演变的规律。李健豹等^[10]将 SBM-DEA 模型与窗口分析进行结合,测度了长三角地区 43个城市的碳效率,研究发现1995—2017年长三角地区的碳效率整体发生了波动变化。在行业维度上, Wang 等[11]分析了中国工业部门的能源效率和碳效率,发现经济发达的沿海地区有着较高的效率。通常来 说,采用生产密集型战略且拥有更多第二产业的经济体碳效率较低^[12]。根据 Wang 等^[13]的研究,第三产业的 碳效率要高于第一、二产业。Gao等^[14]认为不同行业之间的碳效率存在着显著的异质性,且间接效率低于直 接效率。为了应对日益严峻的气候变化问题,中国政府也采取了一系列措施以降低 CO,排放量,碳效率随即 被广泛应用于我国各个行业的可持续发展评价^[15-17]。林秀群等^[18]采用 Malmquist 指数模型分析了长江经济 带物流业的碳效率,并进行了碳效率的空间自相关研究。李玲玲等^[19]运用 SBM 模型测算了 2004—2019 年 中国航空业的碳效率,结果表明研究期间各省域碳效率水平均有提高。

通过梳理文献发现,由于城市碳排放数据难以获取,现有碳效率研究大多侧重于国家、省域及行业层面的 分析,难以把握碳效率的核心空间应对策略。因此,有针对性的以地级市为尺度进行碳效率测度对细化相关 研究很有必要。此外,受自身本底条件和发展水平的影响,不同城市碳效率的影响因素可能有所差别,已有城市层面碳效率研究通常仅对发展现状进行描述,缺乏碳效率提升路径的实证检验。基于此,本文首先根据 IPCC碳排放估算法测算得到长江中游城市群城市层面碳排放数据,其次运用三阶段 SBM-DEA 模型对 2006—2019年长江中游城市群地级市层面的碳效率进行测度,剔除了外部环境和随机因素的影响,进而采用 核密度估计、中心-标准差椭圆等方法分析碳效率的时空演化特征,最后对碳效率的提升路径进行讨论,为长 江中游城市群发挥低碳空间枢纽作用,实现可持续发展提供参考。

1 研究数据与方法

1.1 研究区概况

长江中游城市群地处长江流域中段,占地面积约为 32.61 万 km²,常住人口超过 1.3 亿人,地区生产总值 达 9.4 万亿元,整体历史渊源深厚,交通条件优越,且合作交流密切,具有良好的城镇化基础。从经济发展的 角度来看,长江中游城市群以全国不足 4%的土地面积创造了近 10%的经济总量,其碳效率的时空演化格局 及影响因素的研究对区域低碳发展和我国高质量发展意义重大。基于我国相关政策制度,参考《长江年鉴》 将研究区域划分为武汉城市圈(武汉、黄石、宜昌、襄阳、鄂州、荆门、孝感、荆州、黄冈、咸宁、仙桃、潜江、天 门)、环长株潭城市群(长沙、株洲、湘潭、衡阳、岳阳、常德、益阳、娄底)、环鄱阳湖城市群(南昌、景德镇、萍乡、 九江、新余、鹰潭、吉安、宜春、抚州、上饶)。鉴于仙桃市、潜江市以及天门市数据严重缺失,为保证数据的可 得性和完整性,选取长江中游城市群湘赣鄂三省 28 个城市作为主体进行研究分析。

1.2 数据来源

因长江中游城市群的雏形确立于 2006 年国务院出台《关于促进中部地区崛起的若干意见》,且相关数据 大部分更新至 2019 年。基于此,本文结合政策文件时间节点与数据的可得性确定 2006—2019 年为研究时 段,碳排放参数相关数据来源于《综合能耗计算通则》以及《2006 年 IPCC 国家温室气体清单编制指南》,其余 数据来源于 2007—2020 年的《中国城市统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国环境统计年鉴》,各城市统计年 鉴以及 2006—2019 年的国民经济和社会发展公报和环境状况公报,黄冈、常德、益阳、萍乡缺失 2017 年供气 总量数据,采用线性插值法进行补充。

1.3 研究方法

1.3.1 碳排放测算

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)明晰了碳排放评估的相关科学议题,提出全球广泛认可的碳 排放估算方式,具体公式如下:

$$C = \sum_{i=1}^{n} \left(E_i \times \text{NCV}_i \times \text{CEF}_i \times \text{COF}_i \right)$$
(1)

式中, *C* 表示能源消费碳排放量, *n* 表示能源种类, *E_i* 表示第*i* 种能源的消耗量, NCV_i 表示第*i* 种能源的平均 低位发热量, CEF_i 表示第*i* 中能源单位热值当量的碳排放因子, COF_i 表示第*i* 种能源的碳氧化因子。 **1.3.2** 碳效率测算

目前对碳效率的测算主要采取 SFA 和 DEA 两种方法。DEA 即数据包络分析,包含了线性规划及距离函数的应用^[20]。它利用数学规划模型来估计目标函数,并评估具有多个输入和输出的决策单元(DMU)的相对效率,这也是 DEA 的独特优势^[21]。然而,在传统的效率评估中,不可分割的低效率和错误估计成为了严重的缺陷^[22]。在实际测算中 DEA 要求尽可能减少投入,扩大产出,导致不良的产出问题很常见^[23],且结果在[0,1]区间也导致多个决策单元的效率值为1,有效决策单元难以排序^[24]。由于 DEA 模型存在较大的缺陷,主要在以下几个方面对其进行了改进:主要方法有 Russell^[25]测度模型(RMM)、slacks-based 模型(SBM)^[26]、距离调整模型(RAM)^[27]和方向距离函数(DDF)模型^[28]。Tone^[29]提出的 SBM 模型通过输入和输出变量的松弛来计算效率,是一种非径向、非角度的模型,产出的调整也是非比例的。Meng 等^[30]运用 SBM 模型研究了能

源效率和二氧化碳排放效率;Liu 等^[31]也采用 SBM 模型测量了中国各省的二氧化碳排放效率水平。SBM-DEA 模型具体表达式如下:

$$\min \rho = \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{m} \frac{S_{i}^{-}}{x_{i0}}}{1 + \frac{1}{S_{1} + S_{2}} \left(\sum_{r=1}^{S_{1}} \frac{S_{r}^{g}}{y_{r0}^{g}} + \sum_{r=1}^{S_{2}} \frac{S_{r}^{b}}{y_{r0}^{b}} \right)}$$

$$s.t.\begin{cases} x_{0} = X\lambda + S^{-} \\ y_{0}^{g} = Y^{g}\lambda - S^{g} \\ y_{0}^{b} = Y^{b}\lambda + S^{b} \\ S^{-}, S^{g}, S^{b}, \lambda \ge 0 \end{cases}$$

$$(2)$$

式中, ρ 表示决策单元效率值,取值范围为 $\rho \in [0,1]$,当 $\rho = 1$ 时,说明该评价单元为有效的且为强有效; $S^- \ S^{\varepsilon} \ S^{b} \ D$ 别为投入变量,期望、非期望产出的松弛量; $X \ Y^{\varepsilon} \ Y^{b} \ D$ 别为投入值,期望、非期望产出值; λ 表示强度向量。当 $\rho < 1$ 时,表示该评价单元存在效率损失,需要对投入、产出指标进行改进:

$$x_0 \leftarrow x_0 - S^- \tag{4}$$

$$y_0^g \leftarrow y_0^g + S^g \tag{5}$$

$$y_0^b \leftarrow y_0^b - S^b \tag{6}$$

基于此,本文采用三阶段 SBM-DEA 模型测度长江中游城市群碳效率,在避免环境变量和随机误差影响的同时,消除了量纲差异和角度选择不同所导致的偏误,具体步骤如下:

第一阶段:采用非期望产出 SBM 模型计算初始碳效率和各指标的松弛量;

第二阶段:通过随机前沿 SFA 模型对冗余值和环境变量进行测度并根据结果调整投入和产出量:

$$S_{ik}^{-} = f^{i}(z_{k}; \beta_{i}^{-}) + v_{ik}^{-} + \mu_{ik}^{-}$$
(7)

$$S_{ik}^{g} = f^{i}(z_{k}; \beta_{i}^{g}) + v_{ik}^{g} + \mu_{ik}^{g}$$
(8)

$$S_{ik}^{b} = f^{i}(z_{k}; \boldsymbol{\beta}_{i}^{b}) + v_{ik}^{b} + \mu_{ik}^{b}$$
(9)

式中, S_{ik}^{-} 、 S_{ik}^{g} 、 S_{ik}^{b} 分别表示第 k个城市在第 i 年投入指标、期望产出指标和非期望产出指标的松弛量; $f'(Z_{k}; \beta_{i})$ 表示环境变量对松弛量的影响, 假设碳效率受到 j个环境因素的影响, 则 $z_{k} = [z_{1k}, z_{2k}, \dots, z_{jk}], k = 1, 2, \dots, n$, β_{i} 为待估系数, $v_{ik} + \mu_{ik}$ 表示碳效率的综合误差项, $v_{ik} - \text{iidN}^{+}(0, \sigma_{v}^{2})$ 表示统计噪音, $\mu_{ik} \ge 0$ 表示管理无效率, 假定 $\mu_{ik} - \text{iidN}^{+}(\mu^{i}, \sigma_{\mu}^{2})$ 服从半正态分布 $\mu_{ik} - \text{iidN}^{+}(0, \sigma_{\mu}^{2})$, 且 v_{ik} 与 μ_{ik} 相互独立, 与j个环境变量也相互独立。定义 $\gamma = \sigma_{\mu}^{2}/\sigma_{\mu}^{2} + \sigma_{v}^{2}$, 当 γ 趋近于 1 时,管理无效率占主导地位, 当 γ 趋近于 0 时,随机因素占主导地位。采用极大似然估计未知参数,随即对投入产出数据进行调整,公式如下:

$$x_{ik}^{A} = x_{ik} + \left[\max_{k} \{z_{k} \hat{\beta_{i}}\} - z_{k} \hat{\beta_{i}}\right] + \left[\max_{k} \{v_{ik}\} - v_{ik}\right], i = 1, 2, \cdots, m; k = 1, 2, \cdots, n$$
(10)

$$y_{ik}^{gA} = y_{ik}^{g} + \left[\max_{k} \{z_{k} \hat{\beta}_{ik}^{g}\} - z_{k} \hat{\beta}_{ik}^{g}\right] + \left[\max_{k} \{v_{ik}^{g}\} - v_{ik}^{g}\right], i = 1, 2, \cdots, s_{1}; k = 1, 2, \cdots, n$$
(11)

$$y_{ik}^{bA} = y_{ik}^{b} + \left[\max_{k} \{z_{k} \, \hat{\beta}_{ik}^{b}\} - z_{k} \, \hat{\beta}_{ik}^{b}\right] + \left[\max_{k} \{\hat{v}_{ik}^{b}\} - \hat{v}_{ik}^{b}\right], i = 1, 2, \cdots, s_{2}; k = 1, 2, \cdots, n$$
(12)

式中, x_{ik}^{A} 、 y_{ik}^{gA} 、 y_{ik}^{bA} 分别表示调整后的投入指标、期望产出指标及非期望产出指标, $[\max_{k} \{z_{k} \hat{\beta}_{i}\} - z_{k} \hat{\beta}_{i}]$ 表明 把碳效率的所有决策单元调整到相同外部环境, $[\max_{k} \{v_{ik}\} - v_{ik}]$ 则表明剔除碳效率测度中的统计噪音影响。 参照 Kumbhakar 和 Lovell^[32]的研究, 外部环境因素的计算公式为:

$$\hat{E}(\mu_{ik}\mu_{ik} + v_{ik}) = \sigma^* \left[\frac{\varphi(\varepsilon_i \lambda/\sigma)}{\Phi(\varepsilon_i \lambda/\sigma)} + \frac{\varepsilon_i \lambda}{\sigma} \right]$$
(13)

式中, $\sigma^* = (\sigma_\mu \sigma_\nu) / \sigma$, $\varepsilon_i = \mu_{ik} + v_{ik}$, $\sigma = \sigma_\mu^2 + \sigma_\nu^2$; φ 和 Φ 分别表示标准正态分布的密度函数及分布函数。代

入公式得到随机误差 vik 的估计:

$$E[v_{ik} \mid \mu_{ik} + v_{ik}] = \bar{s_{ik}} - z_k \beta_k - E[\mu_{ik} \mid \mu_{ik} + v_{ik}]$$
(14)

第三阶段:使用调整后的投入量 x^A_{ik} 及产出量 y^{sA}_{ik} 替代原始投入量和产出量,再次采用非期望 SBM 模型进行效率测算。

1.3.3 核密度估计

核密度估计是一种由 Hoeffiding 等^[33]和 Parzen^[34]提出非参数检验方法,通常用于刻画随机变量的分布 形式,对数据分布的先验假设并不引入,而是从训练样本本身出发得到数据分布特征,可以用来估计任意形态 的密度函数,是当前最有效和应用最广泛的一种非参数密度估计算法,其表达式为:

$$f(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^{n} k(\frac{X_i - x}{h})$$
(15)

式中, X_i 表示样本观测值; x 表示样本观测值的平均值; $k(\cdot)$ 表示函数形式, Epanechnikov 函数具有钟形的形态, 相比于高斯核函数可以大大减少计算量, 提高算法的运算速度, 因此本文选取 Epanechnikov 函数进行核密度估计; n 表示样本观测值的个数; h 表示带宽。核密度估计的结果相当于新信息与历史信息的相似度或偏离程度, 其估计值越高说明数据变化程度越低, 估计值越低则说明数据发生了很大变化。

1.3.4 中心-标准差椭圆分析

标准差椭圆由 Lefever^[35]提出,用于度量一组数据的方向和分布,生成的结果会输出一个椭圆。该分析方 法有四个基本参数,重心坐标表示表示主要空间位置,旋转角表示要素的发展趋势,长轴和短轴标准差分别表 示要素在主要和次要方向上的离散程度,具体计算方式如下:

首先利用算数平均中心确定中心坐标,

$$SDE_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{X})^2}{n}}$$
 (16)

$$SDE_{y} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (y_{i} - \overline{Y})^{2}}{n}}$$
(17)

式中, x_i , y_i 表示研究区域的空间区位, SDE_x, SDE_y 是计算出来的椭圆中心, 表示碳效率的中心坐标; 然后, 以 X 轴为基点, 正北方向为 0 度顺时针旋转确定椭圆方向:

$$\tan\theta = \frac{A+B}{C} \tag{18}$$

$$A = \left(\sum_{i=1}^{n} \tilde{x}_{i}^{2} - \sum_{i=1}^{n} \tilde{y}_{i}^{2}\right)$$
(19)

$$B = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{n} \widetilde{x_{i}}^{2} - \sum_{i=1}^{n} \widetilde{y_{i}}^{2}\right)^{2} + 4\left(\sum_{i=1}^{n} \widetilde{x_{i}} \widetilde{y_{i}}\right)^{2}}$$
(20)

$$C = 2\sum_{i=1}^{n} \widetilde{x_i} \widetilde{y_i}$$
(21)

式中, x_i , y_i 表示平均中心和研究对象区位的偏差;最后,确定 XY 轴的长度:

$$\sigma_x = \sqrt{2} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (\widetilde{x}_i \cos\theta - \widetilde{y}_i \sin\theta)^2}{n}}$$
(22)

$$\sigma_{y} = \sqrt{2} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (\widetilde{x_{i}} \sin\theta + \widetilde{y_{i}} \cos\theta)^{2}}{n}}$$
(23)

http://www.ecologica.cn

1.3.5 空间计量模型

长江中游城市群各地区碳效率存在一定程度上的地理空间依赖性,普通线性模型难以描述其空间特性, 而空间自相关能够对观测变量的空间依赖程度进行测度^[36]。因此,本文采取空间计量模型对碳效率的主要 影响因素进行分析。在构建模型前,采用"莫兰指数*1*"进行空间自相关检验,具体公式如下:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} w_{ij}(x_i - \bar{x}) (x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}$$
(24)

式中, x_i,x_j为研究第 i, j个城市数据的空间序列; w_{ij}为空间权重矩阵的元素值,本文选取邻接距离构建空间 权重矩阵。莫兰指数 I 的取值范围一般在[-1,1]之间,莫兰指数 I 的取值表现了不同的相关关系。 1.4 指标选取

1.4.1 碳效率投入-产出指标设定

本文依照碳效率数据包络分析评价要求,基于数据的可得性、完整性及客观性,参考相关文献研究,构建 碳效率评价指标体系(表1)。选取资本存量作为资本投入,采用 Goldsmith 等^[37]开创的永续盘存法计算。参 考何沙等^[38]的研究,选取城市就业人员数量作为劳动力投入,能源消费总量作为能源投入。其中能源消费总 量将城市全社会用电量、供气总量(人工、天然气)、液化石油气供气总量折算为标准煤进行核算。期望产出 与非期望产出则分别用地区生产总值和二氧化碳排放量表示。

	The Carbon enteries evaluation input-output notex system of urban aggioneration in the induct reaches of the Tangize Rive				
测度 Measure	类别 Type	—级指标 Primary index	二级指标 Secondary indicators		
碳效率	投入要素	资本投入	资本存量/万元		
Carbon efficiency		劳动投入	城市就业人员数量/人		
		能源投入	能源消费总量/t		
	产出要素	期望产出	地区生产总值 GDP/万元		
		非期望产出	CO ₂ 排放量/t		

表 1 长江中游城市群碳效率投入-产出指标体系 Table 1 Carbon efficiency evaluation input-output index system of urban agglomeration in the middle reaches of the Vangtze Rive

1.4.2 碳效率影响因素

城市碳排放效率受多主体、多因素影响,其影响因素不仅来自排放主体本身,还取决于排放主体所在的环境。参考现有研究成果^[8,39-42],本文选取城镇化进程、产业结构和科技支撑强度为环境变量。

(1)城镇化进程。城镇化地区通常是绿色低碳转型、绿色低碳技术创新与推广的先驱者,在促进碳减排、 提升碳效率过程中意义重大。城镇化并非通过单一线性关系影响碳排放,而是与其他因素联合对碳排放的过 程产生影响,碳排放与城镇化相关指标表现出长期均衡关系^[38]。本文用城镇化率表征城镇化进程。

(2)产业结构。工业通常有着较高的能耗和排放,而服务业则属于绿色行业,即第二产业占比高的地区 拥有较高的碳排放量。本文用第二产业总产值占地区 GDP 的比重来衡量产业结构。

(3)科技支撑强度。能源绿色低碳转型需要依靠低碳技术支撑,技术进步能够带来能源结构转变从而减 少碳排放^[43-45]。本文用 R&D 经费占地区 GDP 的比重表示科技支撑强度。

2 结果与分析

2.1 碳效率水平总体分析

采用 DEA-Solver 软件测算 2006—2019 年长江中游城市群 28 个地级市第一阶段碳效率,根据测算结果得 出碳效率的均值,如图 1 所示。2006—2019 年,长江中游城市群各地区调整前碳效率均值为 0.46,这表明仍

有 54%的进步空间。由图 1 可知,碳效率在时间趋势上 整体呈波动上升状,这与现有研究结果一致^[46]。从 2006年的 0.3 提升至 2019年的 0.54,提升幅度达 80%。 根据投入产出数据均值进行分析,长江中游城市群 2006—2019年平均 GDP 涨幅为 469%,平均能源消费 总量涨幅为 175%,期望产出和能源投入的大幅变动势 必会对碳效率产生影响。此外,2014年国务院颁布了 《节能减排行动方案》,进一步促进了碳效率的提升。 从地区层面来看,长江中游城市群三大城市圈碳效率存 在显著区域差异,效率均值分别为 0.53、0.46 和 0.39,整 体呈现为武汉城市圈>环长株潭城市群>环鄱阳湖城市 群的空间分异格局。研究期间内,长江中游城市群三大 城市圈碳效率均呈波动上升状,武汉城市圈和环长株潭

于环鄱阳湖城市群(39%)。2006—2010年间,三大城



图 1 2006—2019 调整前长江中游城市群碳效率 Fig.1 Carbon efficiency of urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River from 2006 to 2019

市圈碳效率变动幅度相似,武汉城市圈由 0.3 上升至 0.43,环长株潭城市群由 0.32 上升至 0.41,环鄱阳湖城市 群由 0.28 上升至 0.42;2011—2016 年间,武汉城市圈碳效率变动幅度增大,上升至 0.67,明显超越环长株潭城 市群及环鄱阳湖城市群;2016 年间,三地碳效率都出现了不同程度的下降,其中环长株潭城市群降幅最小,仅 下降 0.04;2017—2019 年间,三地碳效率均有所回升,最终呈现为武汉城市圈>环长株潭城市群>环鄱阳湖城 市群的空间分异格局。

进一步通过 SBM 模型的计算,发现各地级市不存在 GDP 产出冗余,但都存在一定的投入要素及非期望 产出冗余。说明 GDP 产出不足并不是长江中游城市群碳效率损失的原因,影响长江中游城市群碳效率的主 要原因集中在资本、劳动、能源投入和二氧化碳的排放。采用 Frontier 4.1 对投入指标及非期望产出指标产生 的冗余进行第二阶段回归分析,投入指标及非期望产出指标松弛值表示通过改善管理水平可能减少的资本、 劳动、能源投入量和二氧化碳排放量,如果环境变量与各松弛变量呈正相关关系则说明环境变量的投入将阻 碍碳效率的提高,反之则会促进碳效率的提高。

如表2所示,城镇化进程在5%的水平上与资本存量的松弛值显著正相关,在1%的水平上与就业人员松弛量负相关。说明长江中游城市群城镇化率高的地区存在资金使用分配效率问题,导致资本存量松弛值高。同时,城镇化率反映了地区经济发展及人口、产业聚集水平^[47],其与就业人员松弛值显著负相关说明城镇化率高的地区虽然需要投入大量资金,但可以减少就业人员消耗,符合长江中游城市群大力引进高精尖人才,打造具有全国竞争力的先进制造业集群的发展情况^[48]。产业结构与能源消费及二氧化碳排放量的松弛值都在1%的水平上显著正相关,说明第二产业比重越高的地区能源消费总量及二氧化碳的排放量也越高,不利于碳效率的提升。因此,对产业结构进行调整,降低第二产业所占比重是提升长江中游城市群碳效率的有效途径。科技支撑强度与资本存量松弛值在1%的水平上显著负相关,与二氧化碳排放量松弛值在5%的水平上显著负相关,说明长江中游城市群科技支撑强度大的地区在资金使用分配上的效率高,且科技支撑强度的提升有利于碳效率的改进。此外,科技支撑强度与能源消费松弛值在1%的显著性水平上显著正相关。结合长江中游城市群建设重要先进制造业基地的定位以及积极承接长三角、大湾区的汽车零部件、家电、石化、纺织、建材等产业转移的现实情况来看,科技支撑强度越大承接越迅速,在短期内会导致能源消耗增加。

此外,尽管并非所有环境变量与各松弛值的回归结果都显著,但 LR 单边误差检验均在 1% 的水平上显著,因此应在调整投入产出指标值时对所有环境变量进行考虑。将剔除环境和随机因素后的投入变量及二氧化碳排放量代入公式进行第三阶段效率测算,结果如图 2 所示。剔除环境和随机因素影响后,长江中游城市

群碳效率均值上升为 0.54, 且各地区差距显著缩小。即单纯从内部管理效率的角度来看, 碳效率低值地区与 高值地区的差距在不断缩小, 说明落后者对先进者存在"追赶效应"^[49]。武汉城市圈碳效率由 0.53 上升至 0.76, 环长株潭城市群碳效率由 0.46 上升至 0.72, 环鄱阳湖城市群碳效率由 0.39 上升至 0.52, 表明这些地区 此前的较低效率主要受相对不利的外部环境影响, 而非自身内部管理水平所致。研究期间长江中游城市群碳 效率呈波动上升趋势, 环长株潭城市群碳效率与长江中游城市群基本重合, 说明环长株潭城市群的碳效率内 部管理水平变化基本代表了长江中游城市群的碳效率内部管理水平的变动情况。

衣 4 天江中游观巾矸恢双竿随机削加刀机凹归结;	表 2	长江中游城市群碳效率随机前沿分析回归结果
--------------------------	-----	----------------------

Table 2Regression Results of Stochastic Frontier Analysis on Carbon Efficiency of Urban Agglomerations in the Middle Reaches of the
Yangtze River

	资本有	量松弛值	就业人	员松弛值	能源洋	有费松弛值	CO ₂ 排j	汝量松弛值
随机前沿分析	Slack of capital stock		Slack of employees		Slack of energy consumption		Slack of CO_2 emission	
Stochastic frontier analysis	系数值	T检验值	系数值	T检验值	系数值	T检验值	系数值	T检验值
常数值 Constant value	-1770.83	-9.12***	130.50	1.74*	857.50	3.44 ***	-97.05	-2.66 ***
城镇化进程 The process of urbanization	26.03	2.58 **	-4.05	-3.59***	0.17	0.53	0.16	0.27
产业结构 Industrial structure	11.01	1.30	1.30	1.21	18.26	3.79 ***	1.26	2.17 ***
科技支撑强度 Science and technology support	-134.07	-3.37 ***	5.51	1.20	21.82	3.73 ***	-191.88	-1.97 **
σ^2	24966664	23139096 ***	66111.26	2703.55 ***	8744.90	6590.80 ***	21617.61	5.70 ***
γ	0.93	210.34 ***	0.69	31.02 ***	0.89	107.46 ***	0.72	15.29 ***
Log 值 Log -value	-3475.02		-2537.41		-6506.44		-2290.04	
<i>LR</i> 单边误差检验 <i>LR</i> test of the one-sided error	598.99 ***		187.52 ***		483.52 ***		157.83 ***	

 σ^2 表示组合误差的协方差; γ 表示管理无效率; Log 值表示对数似然函数值; LR 单边误差检验表示单边似然比检验

2.2 碳效率的空间演化格局

2.2.1 碳效率空间自相关特征

根据邻接空间权重矩阵,对 2006—2019 年长江中 游城市群碳效率进行 Moran's *I* 指数计算,结果如表 3 所示,2012—2019 年 Moran's *I* 指数均表现出不同程度 的显著性,而 2006—2011 年并不显著,根据赵磊等^[50] 的研究结果可知,地理权重矩阵的空间联系认定标准取 决于空间单元之间是否邻接。然而,碳效率是多元作用 下的结果,单以空间是否邻接为标准判断并不全面。且 2012 年 2 月,湘鄂赣三省负责人签署《加快构建长江中 游城市集群战略合作框架协议》,标志着长江中游城市 群正式进入整体实践阶段。综合来看,基本可以说明长 江中游城市群碳效率整体存在一定的空间自相关性。

进一步对长江中有城市群碳效率的影响因素进行 面板模型估计,以验证此前环境变量选择的合理性。首





先,变量间空间关联存在形式采用 LM 检验和 RobustLM 检验进行判断, LM(lag)、LM(error) 以及 RobustLM(error) 均通过了 1%的显著性检验, RobustLM(lag) 并未通过显著性检验,检验结果表明空间滞后 模型(SAR) 比空间误差模型(SEM) 更合适;其次,空间效应和解释变量的相关性根据 Hausman 检验进行分析,在 1%的显著性水平下固定效应的结果比随机效应好;再者,在空间杜宾模型(SDM)中加入时间、空间固

定效应以及时空双固定效应,并采用极大似然估计分别对模型进行检验,结果表明加入时间固定效应模型的 拟合效果与变量的回归结果最好,基于此,后续检验均采用时间固定效应;最后,进行 LR 检验及 Wald 检验, 结果显示 LR(lag)、LR(error)、Wald(lag)、Wald(error)均通过了 1%的显著性检验, SDM 模型退化成 SEM 和 SLM 的原假设被拒绝。

Table 5 Worall ST	est results of carbon er	ficiency of urban aggior	ineration in the influer	reaches of the Tangize N	Iver 110111 2000 to 2019
年份 Year	Р	Ζ	年份 Year	Р	Ζ
2006	0.092 *	-1.329	2013	0.001 ***	3.192
2007	0.187	-0.887	2014	0.001 ***	3.005
2008	0.395	-0.266	2015	0.001 ***	3.164
2009	0.489	0.027	2016	0.000 ***	3.619
2010	0.370	-0.332	2017	0.000 ***	4.323
2011	0.365	0.345	2018	0.000 ***	5.331
2012	0.038 **	1.776	2019	0.000 ***	6.060

表 3 2006—2019 年长江中游城市群碳效率 Moran's I 检验结果

on efficiency of urban applomeration in the middle reaches of the Vangtze River from 2006 to 2019

P 值表示伴随概率;Z 值表示标准化统计量

运用 Stata14 软件对长江中游城市群整体、武汉城市圈、环长株潭城市群及环鄱阳湖城市群碳效率的影响 因素进行空间面板回归分析,结果如表4所示。各环境变量与长江中游城市群碳效率显著相关,证明本文变 量选择合理。整体空间回归系数ρ显著为正,表明长江中游城市群碳效率存在实质性的空间溢出效应,即长 江中游城市群可以对邻近地区的碳效率产生积极影响,与此同时武汉城市圈、环长株潭城市群和环鄱阳湖城 市群会对邻近地区碳排放效率产生负向影响。原因是长江中游城市群各地区既可通过内部协同提升整体碳 效率,又存在对资本、劳动力、能源等有限资源的竞争。长江中游城市群相较周边其他城市有着相对完善的碳 排放控制体系,本底资源条件和经济条件也相对有优势,所以容易对周边地区间形成正向影响。而在长江中 游城市群内部,三地资源有限且处于高质量协同发展的进程中,发展较好地区对周边地区资源进行虹吸,长江 中游城市群内部的负向空间溢出效应也随之产生。

Table 4 Spatial panel regression results of influencing factors of carbon efficiency							
解释变量 Independent variable	长江中游城市群 Total	武汉城市圈 Wuhan City Circle	环长株潭城市群 Changsha Zhuzhou Xiangtan Urban Agglomeration	环鄱阳湖城市群 Urban agglomeration around Poyang Lake			
城镇化进程 The process of urbanization	1.34 * (0.080)	1.66*(0.097)	0.11(0.914)	-1.85(0.065)			
产业结构 Industrial structure	-2.37** (0.018)	-3.35 *** (0.000)	-2.19** (0.028)	-3.70 *** (0.000)			
科技支撑强度 Science and technology support	3.43 *** (0.001)	-0.71(0.476)	2.22**(0.026)	1.76*(0.079)			
ρ	$3.14^{***}(0.002)$	-3.66****(0.000)	$-4.40^{***}(0.00)$	-2.79 ** (0.005)			
Sigma 2e	$13.95^{***}(0.000)$	$8.07^{***}(0.000)$	7.74 **** (0.000)	8.13****(0.000)			
R^2	0.080	0.078	0.38	0.032			

2.2.2 碳效率空间非均衡特征

运用 Epanechnikov 核密度估计法得到 2006—2019 年长江中游城市群各地区碳效率值的核密度分布(图 3)。核密度分布曲线随时间整体向右偏移,表示长江中游城市群碳效率整体呈上升趋势,同时碳效率核密度 曲线右拖尾先拉长后变短,说明长江中游城市群碳效率存在一定的空间非均衡性,整体差异先扩大后缩小。 从峰度方面进行分析,核密度曲线主峰高度波动降低,且峰值差距缩小,说明效率变化区间递减,长江中游城 市群碳效率地区差异存在减小现象。

2.2.3 碳效率空间非均衡特征分析

运用 ArcGIS 10.8 软件对长江中游城市群各地区 2006年、2010年、2014年、2019年进行碳效率空间差异 性分析(图4),为保证碳效率数值结果的可比性,将研 究地区划分为碳效率高值区(0.80—1.00)、碳效率中值 区(0.40—0.80)和碳效率低值区(0.01—0.40)。

从城市层面来看,2006—2019 年长江中游城市群 各地区碳效率在[0.14,1.00]的区间范围内波动,武汉、 鄂州、黄冈、孝感、咸宁、长沙、益阳、常德八市效率均值 大于 0.6,萍乡市历年碳效率均值最低,仅为 0.35。整体 来看,有效地区数量逐年增多,长江中游城市群碳效率





成聚集化发展,低、中、高效率由"间隔状"像"连片状"发生转变。碳效率高值区数量较少,这些城市大多具有 较强产业结构优势、区位优势和政策优势,通过技术进步和节能减排实现高效发展。以武汉为例,其作为我国



图 4 2006 年、2010 年、2014 年和 2019 年长江中游城市群碳效率空间分布

Fig.4 Spatial distribution of carbon efficiency of urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River in 2006, 2010, 2014 and 2019

该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2019)1822 的标准地图制作,底图无修改

传统的工业重镇是中部地区最重要的工业中心,在早期的城镇化进程中存在区域能源过度开发,二氧化碳排放量居高不下等情况,这也导致了2006年武汉碳效率水平较低。但随着工业技术水平的提高和经济结构的转变,武汉的碳效率水平也持续提高,最终成为碳效率高值区且对片区碳效率的发展起到一定带动作用。

从省域层面来看,2006—2019年长江中游城市群碳效率的高、中、低值地区存在明显的省域分布特点,碳 效率高值地区随着时间的推移由湖南、江西两省逐渐向湖北省转移。截止至2019年,长江中游城市群绝大部 分碳效率高值地区集中在湖北,其中鄂州碳效率值上升幅度最大,高达332%。湖南省平均碳效率为0.46,且 拥有较多[0.60,0.80]区间范围的碳效率中值地区。长株潭城市群2006年被列为促进中部崛起发展的重点 对象后,在资源节约和环境友好方面稳步前进,节能、节水、节地以及公共绿地建设方面都取得了一定成果,带 动了湖南省碳效率的提升。碳效率低值地区主要位于江西,虽然其碳效率均值仅为0.39相对其他两省较低, 但仍然在逐年提升。

2.2.4 碳效率空间格局演化特征分析

运用中心-标准差椭圆对长江中游城市群碳效率的空间格局演进特征进行分析,采用 ArcGIS 10.8 软件根据公式计算碳效率的空间标准差椭圆相关参数(表5),并绘制 2006—2019 年长江中游城市群碳效率的空间 演进格局图(图5)。

表 5 长江中游城市群碳效率分布格局中心及标准差椭圆参数 Table 5 Center and standard deviation ellipse parameters of carbon efficiency distribution pattern of urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River

年份 Year	X 轴标准差/km X-axis standard deviation	Y 轴标准差/km Y-axis standard deviation	方向角/(°) Direction angle	中心坐标 X Center coordinates X	中心坐标 Y Center coordinates Y	中心移动距离/km Distance of movement
2006	12.89	10.42	110.17	114.00°E	29.06°N	7.85
2010	12.46	10.36	109.60	114.08°E	29.05°N	8.05
2014	12.43	10.32	97.54	114.14°E	29.10°N	13.05
2019	11.37	10.58	110.32	114.01°E	29.13°N	7.83



图 5 长江中游城市群碳效率中心轨迹与标准差椭圆

Fig.5 Center and standard deviation ellipse of carbon efficiency of urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River

(1)空间中心变化分析,2006—2019 年碳效率中心在 114.00°E—114.14°E,29.05°N—29.13°N 之间分布。 根据中心的移动轨迹可知,2006—2010 年中心向东北方向移动,移动距离为 7.85km,表明环鄱阳湖城市群碳 效率有所提升。2010—2014 年中心继续向东北方向移动,移动距离 8.05km,表明武汉城市圈碳效率稍有回 升。2014—2019 年中心向西北方向移动,移动距离为 13.05km,表明武汉城市圈碳效率持续提升。整体而言, 长江中游城市群碳效率中心整体向东北方向移动,移动距离为 7.83km,表明武汉城市圈碳效率的提升高于其 余两地,与前人研究预测结果—致^[9]。

(2)空间分布范围分析。2006—2019 年碳效率主要覆盖长江中游城市群中部地区,包括武汉、长沙、南 昌、咸宁、岳阳、九江等地。碳效率空间分布以西北-东南方向为导向,始终保持长轴标准差大于短轴标准差。 长轴标准差逐年缩小,短轴标准差变化幅度不显著,说明长江中游城市群效率在东西方向逐渐聚集,而南北方 向保持相对稳定状态,因此椭圆面积整体下降,碳效率的地区差异逐年缩小。由表 5 可知,标准差椭圆转角呈 波动上升态势,其中 2006—2010 年转角由 110.17°下降至 109.60°,2010—2014 年转角继续下降至 97.54°, 2014—2019 年转角最终升至 110.32°,椭圆整体呈顺时针方向转动,长江中游城市群碳效率呈现出西北-东南 空间分布格局。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文基于 2006—2019 年的面板数据,运用三阶段 SBM-DEA 模型测算了长江中游城市群碳效率,同时对 环境变量进行了影响分析,最后采用核密度估计、中心-标准差椭圆分析等方法从时间、空间两个维度分析了 碳效率的演化规律,克服了城市层面碳排放数据难以获取的问题,探明了长江中游城市群碳效率的区域差异 及影响路径,填补了长江中游城市群碳效率研究的空白,得出以下结论:

(1) 剔除外部环境和随机因素的影响后,2006—2019 年长江中游城市群碳效率均值为 0.54,存在较大的 提升空间,整体效率呈波动上升趋势。各地级市不存在 GDP 产出冗余,影响长江中游城市群碳效率的主要原 因集中在资本、劳动、能源投入和二氧化碳的排放。

(2)长江中游城市群碳效率具有显著的空间非均衡性,大致呈现出武汉城市圈>环长株潭城市群>环鄱 阳湖城市群的空间分异格局。碳效率中心逐渐整体向东北方向移动,武汉城市圈效率提升较为显著;标准差 椭圆分布以西北-东南方向为导向,整体面积下降,各地区碳效率差异逐年缩小。

(3)长江中游城市群碳效率存在正向的空间溢出效应,加快城镇化进程,调整产业结构,提升科技支撑强 度有利于长江中游城市群整体的碳效率提升,与已有研究结果表现一致^[8,39-42]。在长江中游城市群内部,武 汉城市圈、环长株潭城市群和环鄱阳湖城市群在资本、劳动力、能源投入等方面存在一定的竞争关系,发展较 好地区对周边地区资源进行虹吸,从而形成长江中游城市群内部的负向空间溢出效应。因此,各地区碳效率 的影响因素显现出空间分异性,需要根据各地区的实际发展有针对性的开展效率提升措施。

3.2 讨论

长江中游城市群是长江经济带发展和中部地区崛起的重要支撑,提升长江中游城市群碳效率、优化长江 中游城市群碳效率空间协调水平,对实现长江经济带可持续发展、助力我国"双碳"战略目标具有重要意义。 结合实证研究成果,本文拟提出如下建议促进长江中游城市群碳效率的提升:①突出效率高值区辐射功能,制 定合理环境规制方案。强化武汉的核心带动功能,发挥其吸引资金及劳动力的优势,同时制定合理的环境规 制方案,避免粗放型投资导向。采用产业链整合、跨区投资等方式对宜昌、黄冈、荆州、岳阳、九江、鄂州、黄石 等沿江城市的绿色发展能力进行提升,进而辐射整个长江中游城市群,构建中国低碳经济新的增长极。②打 造绿色产业集群,促进地区产业低碳协同转型。依托武汉东湖、长株潭、鄱阳湖国家自主创新示范区,加快武 汉、襄阳、长沙、株洲、南昌、宜春新能源汽车研发和产业化,推进产学研结合。根据资源环境承载条件强化资 源集成,促进绿色产业集群发展,将提高产业发展水平和节能减排结合起来,推动长江中游城市群产业低碳协 同转型。③增加科技创新投入,挖掘城市低碳发展潜力。以武汉、长株潭、南昌三大都市圈为引领,增加科技 创新投入,提升科技成果转化率。优化城市群融合发展机制,牵引城市群集约发展,支持鄂州、新余、鹰潭、株 洲、益阳等城市开展全国统筹城乡一体化试点,加快城镇化进程,从而充分挖掘城市低碳发展潜力。④加强环 保宣传,推行绿色消费理念。在企业生产、居民生活等方面加强环保宣传,通过减税降费、公共交通补贴、城市 低碳基础设施建设等一系列措施培养企业和居民的绿色消费意识,增强低碳消费粘性,从而减少化石能源的 消耗。

尽管本文系统分析了长江中游城市群碳效率的空间分异特征和时空演化格局,综合城镇化进程、产业结构及科技支撑强度等因素对碳效率的影响,对现有碳效率研究进行了细化,但由于政策因素指标难以量化且相关数据难以获取,环境规制强度、税收优惠政策、政府低碳宣传等影响因素尚未全面考虑。随着碳权交易市场的持续覆盖与完善,未来研究数据的可得性也将不断增强;此外,随着居民环保意识逐渐提高,通过调查问卷等方式获得进一步数据成为可能,相关政策数据及问卷调查结果可用于政策模拟与仿真,能够真实直观地反映政策因素对碳效率的影响,这也将为未来的研究提供全新视角。

参考文献(References):

- [1] Mardani A, Streimikiene D, Cavallaro F, Loganathan N, Khoshnoudi M. Carbon dioxide (CO₂) emissions and economic growth: a systematic review of two decades of research from 1995 to 2017. Science of the Total Environment, 2019, 649; 31-49.
- [2] 格雷厄姆·霍顿,戴维·康塞尔.区域、空间战略与可持续性发展.南京:江苏凤凰教育出版社,2015:23-31.
- [3] Ann M. Fuzzy concepts, scanty evidence, policy distance: the case for rigour and policy relevance in critical regional studies. Regional Studies, 2003, 37(6/7): 701-717.
- [4] 查建平, 唐方方. 中国工业碳排放绩效: 静态水平及动态变化——基于中国省级面板数据的实证分析. 山西财经大学学报, 2012, 34 (3); 71-80.
- [5] Herrala R, Goel R K. Global CO₂ efficiency: country-wise estimates using a stochastic cost frontier. Energy Policy, 2012, 45: 762-770.
- [6] Dong F, Li X H, Long R Y, Liu X Y. Regional carbon emission performance in China according to a stochastic frontier model. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 28: 525-530.
- [7] Zhang Y F, Li S, Luo T Y, Gao J. The effect of emission trading policy on carbon emission reduction: evidence from an integrated study of pilot regions in China. Journal of Cleaner Production, 2020, 265: 121843.
- [8] 陈晓红,易国栋,刘翔.基于三阶段 SBM-DEA 模型的中国区域碳排放效率研究.运筹与管理,2017,26(3):115-122.
- [9] 王少剑, 刘艳艳, 方创琳. 能源消费 CO₂排放研究综述. 地理科学进展, 2015, 34(2): 151-164.
- [10] 李建豹,黄贤金, 揣小伟, 孙树臣. 长三角地区碳排放效率时空特征及影响因素分析. 长江流域资源与环境, 2020, 29(7): 1486-1496.
- [11] Wang K, Wei Y M. China's regional industrial energy efficiency and carbon emissions abatement costs. Applied Energy, 2014, 130: 617-631.
- [12] Iftikhar Y, Wang Z H, Zhang B, Wang B. Energy and CO₂ emissions efficiency of major economies: a network DEA approach. Energy, 2018, 147: 197-207.
- [13] Wang Y, Duan F M, Ma X J, He L C. Carbon emissions efficiency in China: key facts from regional and industrial sector. Journal of Cleaner Production, 2019, 206; 850-869.
- [14] Gao P, Yue S J, Chen H T. Carbon emission efficiency of China's industry sectors: from the perspective of embodied carbon emissions. Journal of Cleaner Production, 2021, 283: 124655.
- [15] 赵阳. 中国工业碳减排效率评价及影响因素研究. 煤炭经济研究, 2020, 40(12): 46-50.
- [16] 田云,王梦晨. 湖北省农业碳排放效率时空差异及影响因素. 中国农业科学, 2020, 53(24): 5063-5072.
- [17] 王帅,赵荣钦,杨青林,肖连刚,杨文娟,余娇,朱瑞明,揣小伟,焦土兴.碳排放约束下的农业生产效率及其空间格局——基于河南省 65个村庄的调查.自然资源学报,2020,35(9):2092-2104.
- [18] 林秀群,李嘉新,李阳, 唐向阳. 长江经济带物流业碳排放效率的测度及时空演化特征研究. 生态经济, 2022, 38(12): 31-38.
- [19] 李玲玲,韩瑞玲,张晓燕.中国航空碳排放及其效率时空演化特征分析.生态学报, 2022, 42(10): 3919-3932.
- [20] Charnes A, Cooper W W, Rhodes E. Measuring the efficiency of decision making units. European Journal of Operational Research, 1978, 2(6): 429-444.
- [21] Kao C A. Network data envelopment analysis: a review. European Journal of Operational Research, 2014, 239(1): 1-16.
- [22] Førsund F R. Good modelling of bad outputs: pollution and multiple-output production. International Review of Environmental and Resource

Economics, 2009, 3(1): 1-38.

- [23] Goto M, Otsuka A, Sueyoshi T. DEA (Data Envelopment Analysis) assessment of operational and environmental efficiencies on Japanese regional industries. Energy, 2014, 66: 535-549.
- [24] 韩燕, 邓美玲. 中原城市群生态效率时空演变及影响因素. 生态学报, 2020, 40(14): 4774-4784.
- [25] Robert Russell R. Measures of technical efficiency. Journal of Economic Theory, 1985, 35(1): 109-126.
- [26] Andersen P, Petersen N C. A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis. Management Science, 1993, 39(10): 1261-1264.
- [27] Cooper W W, Park K S, Pastor J T. RAM: a range adjusted measure of inefficiency for use with additive models, and relations to other models and measures in DEA. Journal of Productivity Analysis, 1999, 11(1): 5-42.
- [28] Iqbal Ali A, Seiford L M. Translation invariance in data envelopment analysis. Operations Research Letters, 1990, 9(6): 403-405.
- [29] Tone K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis. European Journal of Operational Research, 2001, 130(3): 498-509.
- [30] Meng F Y, Su B, Thomson E, Zhou D Q, Zhou P. Measuring China's regional energy and carbon emission efficiency with DEA models: a survey. Applied Energy, 2016, 183: 1-21.
- [31] Liu Y Q, Zhao G H, Zhao Y S. An analysis of Chinese provincial carbon dioxide emission efficiencies based on energy consumption structure. Energy Policy, 2016, 96: 524-533.
- [32] Kumbhakar S C, Knox Lovell C A. Stochastic Frontier Analysis. Cambridge: : Cambridge University Press, 2000.
- [33] Hoeffding W, Rosenblatt J R. The efficiency of tests. The Annals of Mathematical Statistics, 1955, 26(1): 52-63.
- [34] Parzen E. On estimation of a probability density function and mode. The Annals of Mathematical Statistics, 1962, 33(3): 1065-1076.
- [35] Lefever D W. Measuring geographic concentration by means of the standard deviational ellipse. American Journal of Sociology, 1926, 32(1): 88-94.
- [36] 沈威,鲁丰先,秦耀辰,谢志祥,李阳.长江中游城市群城市生态承载力时空格局及其影响因素.生态学报,2019,39(11):3937-3951.
- [37] Goldsmith R, Brill D, Mendershausen H, Yntema D, Manvel A, Klein L, Boulding K. Studies in income and wealth. New York: National Bureau of Economic Research, 1951: 47-53.
- [38] 何沙,李乔楚. 基于 Super-SBM 模型的区域低碳效率评估与空间分异——以四川省为例. 生态经济, 2021, 37(10): 40-45, 128.
- [39] 李竹, 王兆峰, 吴卫, 邵海琴. 碳中和目标下中国省域碳平衡能力与城镇化的关系. 自然资源学报, 2022, 37(12): 3136-3152.
- [40] 张明斗,席胜杰.资源型城市碳排放效率评价及其政策启示.自然资源学报,2023,38(1):220-237.
- [41] 刘林杰,杨树旺.中国城镇化进程影响全要素碳排放效率的区域异质性研究.云南社会科学,2022(2):101-110.
- [42] 宗鑫,杨浩.新型城镇化与城市低碳发展时空耦合关系及驱动力因素分析.生态经济,2021,37(4):80-87.
- [43] 李凯杰,曲如晓.技术进步对中国碳排放的影响——基于向量误差修正模型的实证研究.中国软科学,2012(6):51-58.
- [44] 朱丽霞, 贺容, 郑文升, 王嵩, 韩磊. 长江中游城市群城市创新效率的时空格局及其驱动因素. 长江流域资源与环境, 2019, 28(10): 2279-2288.
- [45] 许玉洁,刘曙光.黄河流域绿色创新效率空间格局演化及其影响因素.自然资源学报,2022,37(3):627-644.
- [46] 徐英启,程钰,王晶晶,刘娜.中国低碳试点城市碳排放效率时空演变与影响因素.自然资源学报,2022,37(5):1261-1276.
- [47] 陈丹玲, 卢新海, 匡兵. 长江中游城市群城市土地利用效率的动态演进及空间收敛. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(12): 106-114.
- [48] 朱媛媛, 张瑞, 顾江, 高喆. "双碳"目标下长江中游城市群生态福利绩效演变及驱动机制研究. 地理科学进展, 2022, 41(12): 2231-2243.
- [49] 王群伟,周鹏,周德群.我国二氧化碳排放绩效的动态变化、区域差异及影响因素.中国工业经济,2010(1):45-54.
- [50] 赵磊, 方成, 丁烨. 浙江省县域经济发展差异与空间极化研究. 经济地理, 2014, 34(7): 36-43.