

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2022.04.003

中国东部沿海地区工业碳排放效率 时空演化特征及影响因素

米莹¹, 蔺雪芹¹, 王岱², 崔惟佳¹

(1. 首都师范大学 资源环境与旅游学院, 北京 100048; 2. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 中国东部沿海地区是我国重要的工业集聚地, 提高东部沿海地区工业碳排放效率, 对于推动东部沿海地区低碳可持续发展具有重要意义。本文将包含非期望产出的方向距离函数模型与DEA窗口分析法相结合, 构建工业碳排放效率测度体系, 并测度分析2003—2019年中国东部沿海地区工业碳排放效率时空演化特征及其影响因素。研究表明: ①2003—2019年中国东部沿海地区工业碳排放效率总体较高, 呈现波动上升态势; ②2003—2019年东部沿海地区工业碳排放低效率城市数量减少, 中效率、高效率城市数量增加, 高效率集聚区由长三角地区上海、苏南、浙北以及粤东、粤西转向两广交界、龙岩—丽水一线; ③2003年东部沿海地区工业碳排放效率类型以中效率低碳排放量、高效率低碳排放量、低效率低碳排放量为, 2019年以中效率低碳排放量、高效率低碳排放量、中效率中碳排放量为; ④与东部沿海地区工业碳排放效率呈显著正相关的因素由大到小依次为环境规制、对外开放水平、工业集聚水平; 呈显著负相关的指标由大到小依次为工业规模、工业所有制结构和工业结构。东部沿海各地区由于工业化发展阶段不同, 工业发展特征各异, 影响因素也存在差异。

关键词: 工业碳排放效率; 时空演化特征; 影响因素; Tobit模型; 中国东部沿海地区

中图分类号: K901

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2022)04-0476-11

Spatial-temporal evolution characteristics and influencing factors of industrial carbon emission efficiency in eastern coastal areas of China

MI Ying¹, LIN Xueqin¹, WANG Dai², CUI Weijia¹

(1. College of Resources Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: The eastern coastal region of China is an important industrial cluster in China. Improving the industrial carbon emission efficiency in the eastern coastal region is of great significance for promoting the realization of the dual carbon target in the eastern coastal area. This paper combines the direction distance function model containing unexpected output by the DEA window analysis method. this study constructs an industrial carbon emission efficiency measurement system, and measures and analyzes the spatiotemporal evolution characteristics and influencing factors of industrial carbon emission efficiency in eastern coastal region of China from 2003 to 2019. The research shows that: ①The industrial carbon emission efficiency in the eastern coastal region of China displayed an overall trend of fluctuation and increase from 2003 to 2019. ② From 2003 to 2019, the number of cities with low industrial carbon emissions in the eastern coastal region decreased, while the number of cities with medium and high efficiency increased. The highly effi-

收稿日期: 2022-05-08; 网络出版日期: 2022-12-28

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail//61.1294.N.20221227.1515.001.html>

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42071148)

第一作者: 米莹, 女, 硕士生, 研究方向为区域可持续发展。E-mail: 591596353@qq.com

通信作者: 蔺雪芹, 女, 博士, 副教授, 研究方向为区域可持续发展。E-mail: linxueqin@cnu.edu.cn

cient cluster area has shifted from Shanghai, southern Jiangsu, northern Zhejiang, eastern and western Guangdong in the Yangtze River Delta region to the border between Guangdong and Guangxi, and the Longyan-Lishui line. ③In 2003, the relationship between industrial carbon emissions and carbon emission efficiency in eastern coastal region was dominated by medium efficiency, high efficiency and low efficiency of low carbon emissions. In 2019, the relationship between industrial carbon emissions and carbon emission efficiency in eastern coastal region was dominated by medium efficiency of low carbon emissions, medium efficiency of medium carbon emissions, and high efficiency of low carbon emissions. ④The factors having a significant positive correlation with the industrial carbon emission efficiency in the eastern coastal region are the environmental regulation, the level of opening to the outside world, and the level of industrial agglomeration; the indicators for significant negative correlation from large to small are industrial scale, industrial ownership structure and industrial structure. Due to the different stages of industrialization and the different characteristics of industrial development in the eastern coastal region, the influencing factors are also of difference.

Key words: industrial carbon emission efficiency; spatial and temporal evolution characteristics; influencing factors; Tobit model; eastern coastal region of China

我国工业部门碳排放占碳排放总量的 80% 以上^[1], 解决工业部门节能减排问题是实现我国碳达峰、碳中和目标的关键。当前我国仍处于工业化深入发展的阶段, 传统工业行业所占比重依然很高, 推动绿色技术变革, 提高工业碳排放效率是控制工业碳排放增加的有效途径。东部沿海地区是我国工业发展的重要集聚地, 据统计东部沿海地区规模以上工业产值占全国规模以上工业总产值的 60% 以上, 庞大的工业生产规模伴随资源能源的大量消耗。东部沿海地区工业绿色转型和低碳发展是实现“双碳”目标的关键, 对推动全国工业绿色高质量发展具有重要的引领作用。

关于工业碳排放效率的研究主要包括以下几个方面。①工业碳排放效率评估方法。数据包络分析 (DEA) 是效率研究中常用的方法, 但传统 DEA 模型在含有非期望产出效率评价中体现出其局限性, 一些学者通过超效率 (SBM) 模型^[2]、信息熵改进的环境 DEA 交叉模型^[3]、非径向方向距离函数^[4]等解决包含非期望产出的问题。②不同尺度的工业碳排放效率测算分析。这类研究多从全国和省级尺度对工业碳排放效率进行分析^[5-8], 学者们对城市群内部的碳排放效率也较为关注^[9-11]。③工业行业的碳排放效率分析。学者们关注的焦点集中在污染密集型行业^[12], 如钢铁行业^[13]、有色金属行业^[14]、化工^[15]、煤炭生产^[16]等。④工业碳排放效率的影响因素研究。包括出口贸易^[17]、外商直接投资^[18]、产业集聚^[19]、国有化水平、技术进步^[20]、产业结构^[21]对工业碳排放效率的影响。

可以看出, 目前对于工业碳排放效率已有较为

全面系统的研究, 但是囿于数据可获性, 基于地理学视角对于工业碳排放效率的研究主要集中在全国、省(区)尺度, 城市尺度的研究相对较少; 影响因素的研究主要考虑人均 GDP、城镇化、对外开放等区域发展条件对工业碳排放效率的影响, 对于工业发展自身特征性因素考虑较少。本文采用包含非期望产出的方向距离函数模型结合 DEA 窗口分析, 构建城市工业碳排放效率测度模型, 测度分析了 2003—2019 年东部沿海地区工业碳排放效率的时空演化特征, 并基于面板 Tobit 模型分析了东部沿海地区及其北部、中部和南部工业碳排放效率的主要影响因素。研究可为推动东部沿海地区工业绿色转型升级和高质量、可持续发展提供理论参考。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 工业碳排放效率测度模型

1.1.1 包含非期望产出的方向距离函数

假设有 N 个城市, 把每个城市看作工业生产单元 $DMU_n (n=1, 2, \dots, N)$, 每个城市利用资本 (K)、劳动力 (L)、能源 (E) 作为投入进行工业生产, 即产生期望产出工业总产值 (GIO), 同时产生工业二氧化碳 (IC)。 $T = \{(K, E, L, GIO, IC); (K, E, L) \text{ product } (GIO, IC)\}$ 。

$$D(K, E, L, IO, IC; g) = \sup \{ (W^T \beta; (K, E, L, IO, IC) + g \cdot dia(\beta)) \} \in T \quad (1)$$

其中 $\beta = (\beta_K, \beta_L, \beta_E, \beta_{IO}, \beta_{IC})^T$ 为松弛向量, 表示各要素可以增加或减小的比例, dia 表示对角矩阵, $W^T = (w_K, w_L, w_E, w_{IO}, w_{IC})$ 表示各输入和输出要素的权重向量, W^T 根据已有研究^[22]进行赋值,

$W^T = (1/9, 1/9, 1/9, 1/3, 1/3)$ 。

$$D(K, L, E, GIO, IC; g) = \text{Max}(\omega_K \beta_K + \omega_L \beta_L + \omega_E \beta_E + \omega_{IO} \beta_{IO} + \omega_{IC} \beta_{IC}) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{s. t. } & \sum_{n=1}^N z_n K_n \leq K + \beta_K g_k \\ & \sum_{n=1}^N z_n L_n \leq L + \beta_L g_L \\ & \sum_{n=1}^N z_n E_n \leq E + \beta_E g_E \\ & \sum_{n=1}^N z_n GIO_n \geq GIO - \beta_{GIO} g_{GIO} \\ & \sum_{n=1}^N z_n IC_n = IC - \beta_{IC} g_{IC} \\ & Z_n \geq 0, n = 1, 2, 3, \dots, N \\ & \beta_K, \beta_L, \beta_E, \beta_{IO}, \beta_{IC} \geq 0 \end{aligned}$$

式中 Z_n 表示前沿面构成的环境生产技术的强度,即

$\sum_{n=1}^N Z_n = 1$ 为 VRS(规模效益可变), $\sum_{n=1}^N Z_n \neq 1$ 为 CRS(规模效益不变)。根据上述公式,可以求出工业碳排放量的冗余量或产出不足,由此可知最优碳排放量。参考 Yao 等人做法^[7],将工业碳排放效率定义为:工业碳排放效率=期望工业碳排放产出/实际工业碳排放产出。

1.1.2 DEA 窗口分析

为避免由于时间跨度导致前沿面与决策单元相差较远产生的效率较小的可能,本文基于窗口分析和方向距离函数进行碳排放效率的测算。窗口分析是基于平均原则,进行一系列的叠加分析,是处理面板数据常用的方法。通过将不同时期的决策单元(DMU)视为单独的个体进行效率评价,既能对同一决策单元不同时间的效率进行比较,也能对不同决策单元相同时期的效率进行比较,较为准确地评估决策单元的动态效应。窗口 DEA 是将每个 DMU 在各个时期内的数据看做一个相对独立的“DMU”,假设共有 n 个 DMU, p 个时期,则“DMU”的总数为 $n \times p$ 。在窗口分析框架中,特定城市在特定时期的表现可以与同时期其他城市的表现以及该城市不同时期的表现进行横纵向对比,通过控制窗口的宽度来保持数据的稳定性,避免因时间跨度过长,数据差异性大造成的效率结果异常的问题。本文参考以往研究^[23]将窗口宽度设置为 3,即 3 年为一个窗口期,来探讨东部沿海地区工业碳排放效率。

1.1.3 工业碳排放效率测度指标体系

根据已有研究^[24-25],结合区域工业发展特征,本文从资本投入、劳动力投入、能源投入、期望产出、

非期望产出 5 个方面构建工业碳排放效率测度的投入产出指标体系。采用城市工业固定资产表征工业资本投入,工业从业人员数量表征劳动力投入,工业终端能源消耗量表征能源投入,工业总产值作为期望产出,工业 CO_2 排放量作为非期望产出。

碳排放核算方法主要有:排放因子法、质量平衡法和实测法,其中城市尺度碳排放估算方法以排放因子法为主^[26]。IPCC 理论方法在燃料分类上更为细致,得到研究学者的使用^[27-28],因此本文采用 IPCC 方法对工业终端能源产生的碳排放进行核算。城市工业碳排放主要来源于工业电力碳排放和工业化石燃料燃烧碳排放。

$$E_c = E_{c_j} + E_{ce} \quad (3)$$

式中, E_c 为城市 c 的总碳排放量。 E_{c_j} 为城市 c 工业化石燃料燃烧碳排放量, E_{ce} 为城市 c 工业电力碳排放量。

由于城市尺度化石燃料消耗数据缺失,本文借鉴以往研究者对我国城市尺度工业碳排放量核算处理方法,构建了城市所在省(市)的碳排放系数^[29],测度工业化石燃料燃烧碳排放。城市工业碳排放核算方法具体如下:

$$E_{ci} = F_{ci} \times TIO_c \quad (4)$$

$$F_{ci} = \frac{\sum X_j \times A_j \times CC_j \times CO_j \times \left(\frac{44}{12}\right)}{TIO_i} \quad (5)$$

式中 F_{ci} 为城市 c 所在 i 省(市)的化石燃料碳排放系数, TIO_c 为 c 城市的工业总产值。 j 为能源品类,选取的工业终端消耗包括原煤、洗精煤、其他洗煤、焦炭、原油、燃料油、汽油、煤油、柴油、液化石油气、天然气、焦炉煤气 12 种能源。 X_j 为 j 类能源消耗量, A_j 为第 j 种能源的低位发电值, CC_j 代表能源品种 j 的缺省碳含量, CO_j 代表能源品种 j 的碳氧化率, TIO_i 为 i 省的工业总产值。

城市工业电力碳排放测算公式如下:

$$E_{ce} = W_c \times EF_{\text{grid},h} \quad (6)$$

式中 W_c 为城市 c 工业终端电力消耗量, $EF_{\text{grid},h}$ 为城市 c 所在区域电网 h 的平均 CO_2 排放因子。

1.2 工业碳排放效率影响因素分析模型

1.2.1 理论框架构建

20 世纪 90 年代初期,美国环境经济学家 Grossman 和 Krueger 在大量实证检验的基础上,发现环境质量与经济增长之间存在着随着人均收入提高环境先恶化后改善的变化规律,同时认为工业污染具有规模、结构和技术三种区域效应^[30]。工业规

模扩大会加剧资源能源消耗,进而增加污染物排放;产业结构决定了资源的再分配,因此污染差异也取决于不同的要素组合^[31]。技术进步会使生产技术得到改进,从而减少工业污染物排放。“污染晕轮假说”认为外资企业在技术和环境保护标准的制定、执行等方面起到良好的示范效应,同时其技术、环保标准的正向外溢对于东道主国家环境质量提升起到了正向影响作用。“波特假说”认为适当的环境规制可以促进企业进行更多的创新活动,而这些创新将提高企业的生产力,从而抵消由环境保护带来的成本增加并且提升企业在市场上的竞争力^[32-33]。

中国特色市场经济体制中国有经济占有重要的地位,国有企业因垄断特性、经营自主性不足、过度保护等问题,存在环境效率低下问题^[34-35]。一些学者从外部性视角探讨了产业集聚对环境效率的影响^[36-37],工业空间集聚可以促使企业间发生技术外溢,有利于环境效率的提升。综上所述,本文从经济发展水平、工业化水平、工业规模、工业结构、工业集聚水平、工业对外开放水平、工业所有制结构、环境规制、城市绿色创新水平构建工业碳排放效率影响因素的理论框架,并由此展开影响因素分析(图1)。

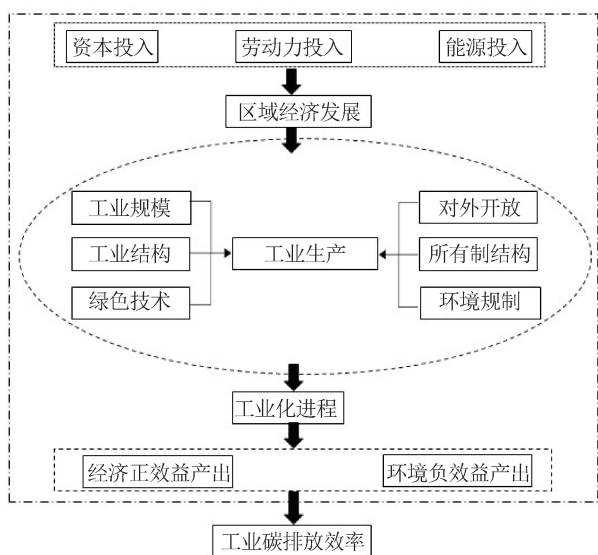


图1 工业碳排放效率影响因素分析理论框架
Fig.1 Theoretical framework for influencing factors of industrial carbon emission efficiency

1.2.2 模型的设定

工业碳排放效率值在 $(0, 1]$ 之间,存在数据被截断的问题,为解决普通最小二乘法回归分析存在的参数估计不一致和偏置的问题,本文选用面板Tobit模型评估假设的影响因素对工业碳排放效率的影响,模型设定如下:

$$Y_{it} = \alpha + \beta_1 GDP_{it} + \beta_2 CSI_{it} + \beta_3 SC_{it} + \beta_4 IS_{it} + \beta_5 CI_{it} + \beta_6 FT_{it} + \beta_7 IO_{it} + \beta_8 ER_{it} + \beta_9 CGI_{it} + \varepsilon_{it} \quad (7)$$

式中: Y 为工业碳排放效率, GDP 代表城市经济发展水平, CSI 代表工业化水平, SC 代表工业规模, IS 代表工业结构, CI 代表工业集聚水平, FT 代表工业对外开放水平, IO 代表工业所有制结构, ER 代表环境规制, CGI 代表城市绿色创新水平, β 为回归系数, i 表示城市, t 表示时间, α 和 ε_{it} 分别为截距项和随机扰动项。

采用人均GDP表征城市经济发展水平(GP),城市第二产业增加值占地区国民生产总值比重表征工业化水平(CSI),通过城市单位企业工业总产值表征工业规模(SC),资本技术密集型工业行业产值占工业总产值比重表征城市工业结构(IS),城市工业总产值占区域工业总产值比重表示工业集聚水平(CI),外商投资和港澳台投资工业产值占工业总产值比重表征城市工业对外开放水平(FT),国有工业企业产值占工业总产值比重代表工业所有制结构(IO),城市工业废水、工业 SO_2 、工业烟尘粉尘、工业固体废弃物综合处理率表征城市环境规制水平(ER),城市绿色专利数代表城市绿色创新水平(CGI)。为了减弱异方差的影响,对经济发展水平、工业规模、城市绿色创新水平数据进行取对数处理。

1.2.3 马尔科夫转移矩阵

马尔科夫矩阵主要应用于地理现象不同时期的连续属性值的离散化处理,通常根据区域现象将数据划分为 K 种等级,从而计算各种等级的变化及其概率^[38]。通过测算各类型的概率分布和变化,将地理现象演化发展的过程近似视为马尔可夫过程。将 t 时刻的某等级分布用 $1 \times K$ 的矩阵 $E_t = [E_{t,1}, E_{t,2}, \dots, E_{t,K}]$ 表示,而不同时期的工业碳排放效率用 $K \times K$ 的矩阵表示。 M_{ij} 表示 t 时刻类型 i 的空间单元在 $t+1$ 时刻转变为 j 类型的概率值,公式为:

$$M_{ij} = n_{ij} / n_i \quad (8)$$

式中, n_{ij} 表示 t 时刻 i 类型转变为 $t+1$ 时刻 j 类型的空间单元数量总和; n_i 表示研究期内所有时刻 i 类型空间单元数量总和。

1.3 数据来源及研究区域

1.3.1 研究区域

中国东部沿海地区包括北京、辽宁、河北、天津、山东、江苏、上海、浙江、福建、台湾、广东、香港、澳门、海南、广西等,其中沿海北部包括辽宁、河北、北

京、天津、山东,沿海中部包括江苏、上海、浙江,沿海南部包括福建、广东、广西、海南。香港、澳门、台湾暂不纳入本研究范围内。东部沿海地区共计115个城市,其中沿海北部44个城市,沿海中部25个城市,沿海南部46个城市。

1.3.2 数据来源

研究数据主要来源于2004—2020年《中国城市统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》。本文影响因素中的工业结构、工业所有制结构、工业对外开放水平三个指标根据中国工业企业数据库计算得出,参考聂辉华等人^[39-41]对工业企业数据库的处理,剔除对未能匹配地理信息的企业、主营业务收入、从业人员数等指标不符合规模以上要求的企业,整理后将企业数据累加到城市尺度。各类能源的低位发热值利用《中国能源统计年鉴》相关数据进行测算。电力碳排放因子选取中华人民共和国国家发展和改革委员会应对气候变化司发布的区域电网平均CO₂排放因子数据。城市绿色专利数据来源于中国研究数据服务平台(CNRDS)数据库,参考徐佳等人^[42]的做法对数据进行处理。对于个别年份缺失的数据采用插值法进行处理。

2 结果分析

2.1 中国东部沿海地区工业碳排放效率的时空演化特征

2.1.1 工业碳排放效率的时间变化特征

2003—2019年中国东部沿海地区工业碳排放效率总体呈现波动上升,由2003年0.674上升为2019年0.696。研究时期东部沿海工业碳排放效率变化可划分为5个阶段:2003—2008年工业碳排放效率为稳步提升阶段,中国加入WTO后,东部地区工业化进程快速推进,工业资源配置效率优化,工业碳排放效率不断提升;2008—2009年工业碳排放效率为短暂下降阶段,这一时期主要受2008年国际金融危机影响,国际市场需求乏力,沿海地区工业规模收缩,工业升级速度放慢,导致工业碳排放效率下降;2009—2014年工业碳排放效率为不断上升阶段;2014—2017年工业碳排放效率为逐渐下降阶段,这一时期我国工业受需求不振、产能过剩等国内外宏观经济影响,工业产值趋缓,传统高投入高消耗产业发展模式不能再推动工业碳排放效率提升^[43],导致这一阶段工业碳排放效率持续下降;2017—2019年工业碳排放效率为逐渐回升阶段,2017年以来我国经济发展由高速发展转向高质量发展,产业结构不断优化升级,推动这一阶段工业碳排放效率

回升。

整体上,东部沿海地区工业碳排放效率呈现出沿海中部地区>沿海南部地区>沿海北部地区的区域特征,其中沿海中部地区年平均工业碳排放效率为0.763,该地区工业一体化水平高,高端制造业实力强,工业技术保障了该地区的工业节能减排效益提升。沿海南部地区工业碳排放效率年平均值为0.755,该地区是我国经济转型发展的前沿地带,产业结构不断优化升级,节能减排取得良好效果。沿海北部地区工业碳排放效率年平均值为0.709,始终低于东部沿海地区平均工业碳排放效率水平,该地区是我国重化工业基地^[44],重化工产业占比大,“高投入、高能耗”的粗放型生产特点突出,导致工业碳排放效率较低。2016年之后,东部沿海碳排放效率特征出现变化:沿海北部地区与沿海中部地区工业碳排放效率水平逐渐相当,均低于沿海南部地区。

2.1.2 工业碳排放效率的空间演化特征

为了更直观地反映中国东部沿海工业碳排放效率的区域差异性,将工业碳排放效率划分为5个效率类型:低效率(0.000~0.400)、较低效率(0.401~0.600)、中效率(0.601~0.700)、较高效率(0.701~0.900)、高效率(0.901~1.000)。

从空间维度看(图2),2003—2019年东部沿海地区工业碳排放效率空间分布格局变化明显。2003年,东部沿海地区整体工业碳排放效率以中效率和较高效率为主。其中威海、防城港、汕尾、三亚等城市工业碳排放效率最高;较高效率城市共计28个,占城市总量的24.348%,主要集聚在沿海中部的长三角地区上海、苏南(如苏州、常州),浙北(如杭州、湖州)以及沿海南部的粤东、粤西地区(揭阳、阳江、茂名)。中效率城市数量共计66个,占城市总量的57.391%,沿海北部、中部、南部均有分布,其中沿海北部中效率城市范围最大。较低效率城市总数共计18个,占城市总量的16.652%,零散分布于沿海北部张家口、朝阳、泰安,沿海中部徐州、淮安,沿海南部崇左、梧州等城市,这些城市工业以重工业为主,资源能源消耗大,能源利用效率低,因此工业碳排放效率较低。2019年,东部沿海地区高效率城市数量增加至6个,零星分布于沿海南部地区河池、防城港、来宾、梅州、韶关、云浮;较高效率城市数量增加至33个,占比提高4.348%,空间分布区转移至沿海南部两广交界处如贺州、贵港、茂名等城市和沿海南部福建龙岩—沿海中部浙江丽水,形成条带状较高效率集聚区,同时沿海北部较高效率城市数量明显增加,主要出现在河北东南部(如沧州、衡水)和山

东西北部(如德州、聊城);较低效率和低效率城市数量减少,空间范围收缩至沿海南部珠江三角洲核心区(佛山、江门、中山)以及粤北(河源),沿海南部工业碳排放低效率区域的形成主要受该区域工业集聚影响,如佛山和中山以家居、家电为代表的工业产业集群较多,并受广东省“双转移”战略高污高耗产业外迁影响。

研究期间,沿海中部地区先进制造业发展迅速,产业集聚水平高,研发投入强度大,科技创新和产业融合发展能力强,助推了工业碳排放效率的不断提升。沿海南部的广东充分利用工业基础和港口条件,以提高产业链配套能力、增加产品附加值、加大研发投入等为重点,加强对传统优势产业改造提升力度,积极推动产业高端化、绿色化发展,扎实推进

了节能减排和资源节约利用;福建围绕建设海峡西岸先进制造业基地的发展目标,围绕集约提升、跨越发展和优势制造业集聚区建设,积极推进传统产业改造升级和战略性新兴产业规模化发展;广西通过推进“1131工程”和“十大行动计划”,促进工业绿色、循环和低碳发展。沿海北部地区山东在培育发展战略性新兴产业的同时,围绕钢铁、有色、化工、建材等基础原材料产业,着力产业结构调整优化,加大节能降耗力度。辽宁重工业占据工业主体地位,在国际市场竞争压力增加、国内经济面临下行压力增大的背景下,工业发展缓慢,发展速度严重滞后,研究时段内 R&D 经费支出占 GDP 比重远低于沿海发达省份,工业研发投入低,技术进步慢,资源环境效率低。

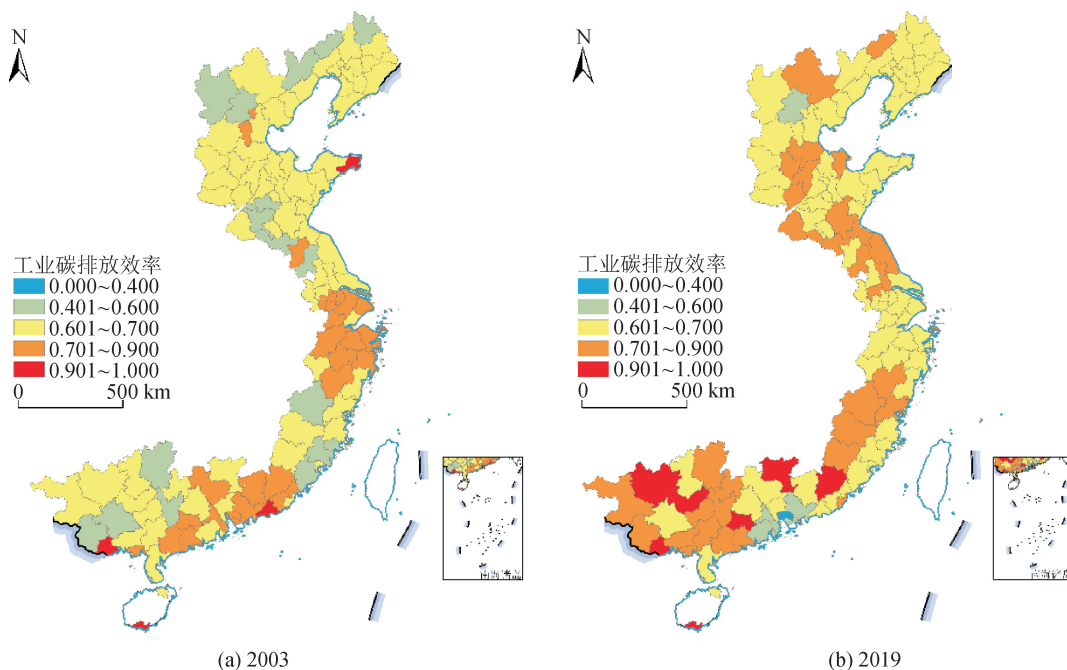


图2 2003—2019年中国东部沿海地区工业碳排放效率空间格局

Fig. 2 Spatial pattern of industrial carbon efficiency in eastern coastal region of China during 2003—2019

注:基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2019)1823号标准地图制作,底图无修改。

2.1.3 工业碳排放效率类型的空间演化特征

利用 K-means 聚类法将 2003—2019 年东部沿海地区城市工业碳排放量分为低碳排、中碳排、高碳排 3 种类型。为了更好地进行工业碳排放效率与工业碳排放量关系的空间识别和对碳排放效率类型转移进行分析,下文将低效率和较低效率归并为低效率,高效率和较高效率归并为高效率。

2003 年,工业碳排放以低碳排放为主,其中低效率、中效率、高效率城市中低碳排放量占比分别为 13.913%、48.696%、21.739%,主要的工业碳排

放效率类型为中效率低碳排放量、高效率低碳排放量、低效率低碳排放量,此时低效率中碳排放量和高效率高碳排放量类型城市各有一个(分别为北京、上海)。2019 年东部沿海工业碳排放量增加,主要表现为低碳排放量比例减少,中碳排放量比例增加,其中中碳排放量类型城市比例由 14.783% 提升至 30.435%,增加的主要类型为中效率类型中碳排放量。2019 年主要的碳排放效率与碳排放量关系类型依次为中效率低碳排放量、高效率低碳排放量、中效率中碳排放量(图 3)。

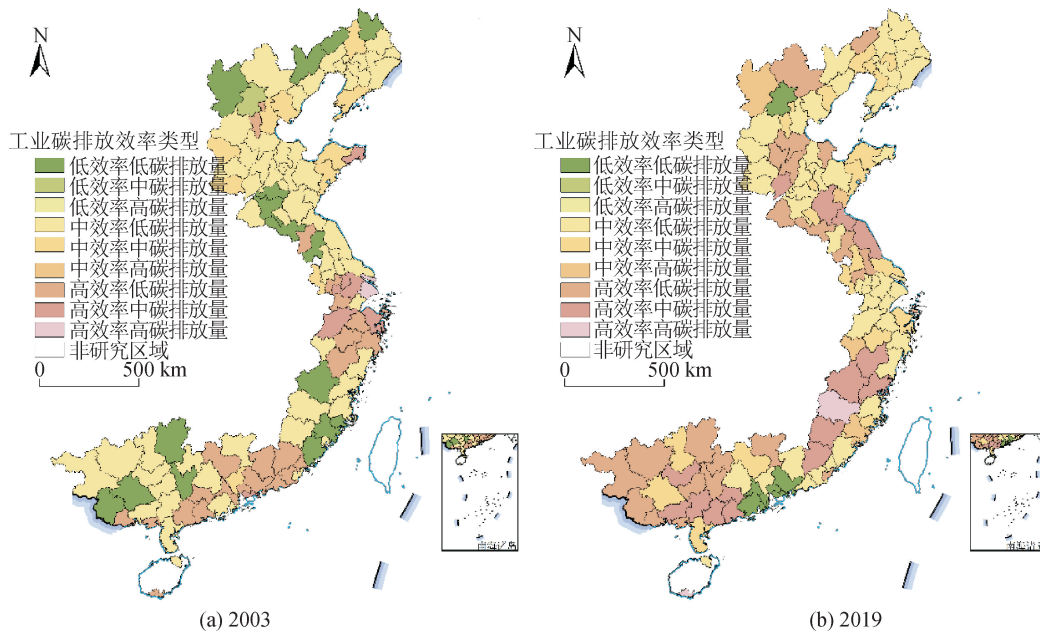


图 3 2003—2019 年中国东部沿海地区工业碳排放效率类型空间分布

Fig. 3 Spatial evolution of industrial carbon efficiency types in the eastern coastal region of China during 2003—2019
注:基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2019)1823 号标准地图制作,底图无修改。

2.1.4 工业碳排放效率的转移特征

为了探究不同时期中国东部沿海工业碳排放效率变化特征,采用马尔科夫概率矩阵进行测算。由于东部沿海碳排放效率第二阶段持续时间较短,因此将第二阶段与第一阶段合为一个时期,分别计算了 2003—2009 年、2009—2014 年、2014—2017 年、2017—2019 年 4 个时期东部沿海地区工业碳排放效率等级类型的马尔科夫概率矩阵(表 1)。可以看出,在时间序列上,对角线上的数值是工业碳排放效率等级类型城市不发生改变的概率,非对角线上的数值是其发生转移的概率。由表 1 可以看出四个时期由低效率类型向高效率类型转移的概率均大于由高效率类型向低效率类型转移的概率,东部沿海地

区工业碳排放效率逐步提升,跨级转移的概率小于 1%,表明中国东部沿海地区工业碳排放效率提升主要为渐续提升模式。通过不同类型转移概率可以得出不同时期转移的主要类型,2003—2009 年以低—中转移为主、2009—2014 年以中—高转移为主、2014—2017 年以高—中转移为主、2017—2019 年以中—高转移为主。四个时期工业碳排放效率从高效率向中效率转移的概率分别为 0.067、0.029、0.277、0.016,出现效率向下转移的情况,原因可能是随着东部沿海地区工业规模发展带来的碳效率提升边际效应下降,同时部分城市产业结构转型升级滞后,在大部分城市工业碳排放效率提升的背景下,碳排放效率相对下降。

表 1 2003—2019 年中国东部沿海地区工业碳排放效率类型马尔科夫转移概率矩阵

Tab.1 Markovtransfer probability matrix of industrial carbon emission efficiency types in the eastern coastal region of China during 2003—2019

$t/t+1$	n	2003—2009			n	2009—2014		
		低	中	高		低	中	高
低	33	0.455	0.515	0.030	0	0.000	0.000	0.000
中	313	0.030	0.808	0.188	157	0.000	0.732	0.268
高	313	0.000	0.067	0.933	418	0.000	0.029	0.971
$t/t+1$	n	2014—2017			n	2017—2019		
		低	中	高		低	中	高
低	0	0.000	0.000	0.000	20	0.900	0.100	0.000
中	81	0.074	0.914	0.012	148	0.000	0.892	0.108
高	264	0.015	0.277	0.708	62	0.000	0.016	0.984

2.2 中国东部沿海地区工业碳排放效率的影响因素

2.2.1 模型回归结果

根据前述建立的公式(7),研究采用 Stata16 软件对东部沿海 115 个城市工业碳排放效率的影响因素进行面板 Tobit 回归分析,根据 LR 检验结果,选择使用随机效应的面板 Tobit 回归,结果见表 2。

表 2 东部沿海地区工业碳排放效率影响因素 Tobit 回归结果
Tab. 2 Tobit regression results of influencing factors of industrial carbon emission efficiency in the eastern coastal region of China

变量	东部沿海	沿海北部	沿海中部	沿海南部
GP	0.001 (0.43)	0.004 (1.13)	-0.003 (-0.36)	0.001 (0.18)
CSI	-0.025 (-1.26)	-0.009 (-0.40)	-0.065 (-1.48)	-0.014 (-0.39)
SC	-0.016*** (-5.27)	-0.044*** (-8.65)	0.000 (0.06)	-0.21*** (-4.13)
IS	-0.111*** (-6.01)	-0.063*** (-3.32)	-0.238*** (-4.70)	-0.077** (-2.19)
CI	0.042*** (7.07)	0.053 (7.24)	0.055*** (4.96)	-0.007 (-0.55)
FT	0.076*** (3.03)	-0.065* (-1.82)	0.152* (1.83)	0.118*** (3.07)
IO	-0.053** (-2.52)	-0.040*** (-2.16)	-0.212** (-2.06)	-0.029 (-0.68)
ER	0.100** (5.03)	0.064*** (2.69)	0.112* (-1.79)	0.099*** (3.18)
CGI	0.002 (1.330)	-0.001 (-0.32)	0.002 (4.96)	0.003 (1.43)
Constant	0.677*** (18.11)	0.655*** (15.29)	0.769*** (7.82)	0.692*** (10.79)
样本量	1955	748	425	782

注:***、**、* 分别代表 1%、5%、10% 显著性水平,括号内为 t 值。

2.2.2 东部沿海地区工业碳排放效率的影响因素

与东部沿海地区工业碳排放效率呈显著正相关的影响因素由大到小依次为环境规制、工业对外开放水平和工业集聚水平。环境规制趋紧,污染治理力度加大,促使城市加快淘汰落后产能和高污染产业,降低资源能源消耗造成的碳排放,进而提升碳排放效率。对外开放为本地工业生产带来先进的技术,进而有效提升资源能源利用效率。工业集聚有利于形成规模效应,有利于区域内技术共享、释放知识溢出效应^[45],从而促进工业碳排放效率的提升。

对东部沿海地区工业碳排放效率具有显著负向影响的指标由大到小依次为工业规模、工业所有制结构、工业结构。工业规模扩大会带来碳排放的增加。国有工业企业占比越高,工业碳排放效率越低。随着市场化程度提高,国有企业占比下降。国有企业普遍存在因市场适应性差、生产不灵活等带来的资源能源浪费和环境效率低的问题。资本技术密集型行业产值占比越高,工业碳排放效率越低,表明目前资本技术密集型产业的发展对传统工业行业绿色发展的示范和辐射带动作用的效果并不明显,应加快淘汰落后行业、构建绿色工业发展体系。

2.2.3 不同地区工业碳排放效率的影响因素

与沿海北部地区工业碳排放效率呈显著正相关的因素由大到小依次为环境规制、工业集聚水平,呈显著负相关的因素依次为工业所有制结构、工业规模、工业结构、工业对外开放水平。对外开放水平的作用效果与东部沿海整体作用效果不同,在沿海北部地区对外开放水平的提高带来了“污染避难所”效应,加剧污染企业向此集聚,阻碍了工业碳排放效率的提升。与沿海中部地区工业碳排放效率呈显著正相关的因素从大到小依次为工业对外开放水平、环境规制、工业集聚,呈现显著负相关的因素由大到小依次为工业所有制结构、工业结构。与沿海南部地区工业碳排放效率呈显著正相关的因素为工业对外开放水平和环境规制,呈现显著负相关的因素由大到小为工业规模和工业结构(图 4)。

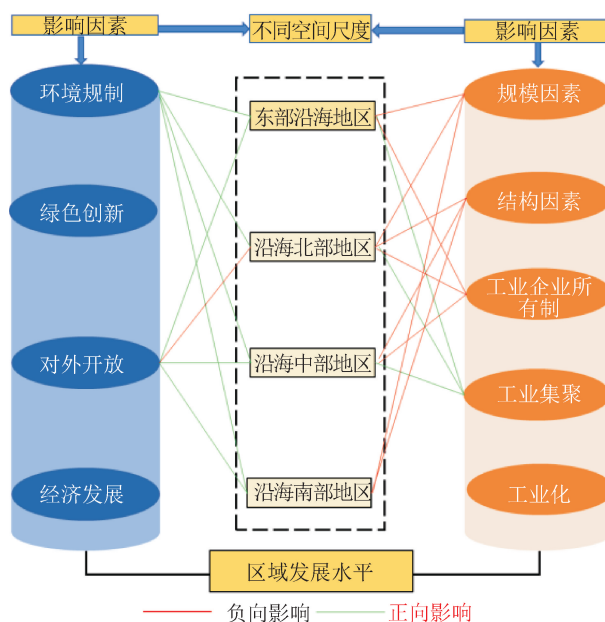


图 4 东部沿海地区工业碳排放效率的影响机制
Fig. 4 Mechanism for influencing the industrial carbon emission efficiency in the eastern coastal region of China

综上所述,环境规制水平在不同区域均表现出显著的正向作用;工业结构在不同地区均表现出对碳排放效率的负向作用。

3 结论与讨论

本文采用包含非期望产出的方向距离函数模型结合 DEA 窗口分析,构建城市工业碳排放效率测度体系,测度分析了 2003—2019 年中国东部沿海地区工业碳排放效率的时空演化特征,并基于面板 Tobit 模型分析了东部沿海地区及其北部、中部和南部工业碳排放效率的主要影响因素。主要得到如下结论。

1) 中国东部沿海地区工业碳排放效率 2003—2019 年总体表现为波动上升态势,可划分为 5 个阶段,2003—2008 年工业碳排放效率稳步提升阶段;2008—2009 年工业碳排放效率短暂下降阶段;2009—2014 年工业碳排放效率不断上升阶段;2014—2017 年工业碳排放效率持续下降阶段;2017—2019 年逐渐回升阶段。

2) 东部沿海地区工业碳排放效率以中、高效率为主。2003 年,沿海中部长三角地区上海、苏南、浙北以及沿海南部粤东、粤西工业碳排放效率较高,中效率主要分布在沿海北部。2019 年,沿海南部两广交界处、龙岩—丽水一线、沿海北部工业碳排放效率明显提升,同时低效率与较低效率城市空间范围收缩。

3) 2003 年中国东部沿海地区工业碳排放效率主要类型为中效率低碳排放量、高效率低碳排放量、低效率低碳排放量。2019 年东部沿海地区工业碳排放效率主要类型为中效率低碳排放量、高效率低碳排放量、中效率中碳排放量。

4) 2003—2019 年中国东部沿海工业碳排放效率状态具有一定的稳定性,工业碳排放效率的提升主要为渐进提升模式。不同时期的主要转移类型有所差异,2003—2009 年以低—中转移为主、2009—2014 年以中—高转移为主、2014—2017 年以高—中转移为主、2017—2019 年以中—高转移为主。

5) 与东部沿海地区工业碳排放效率呈显著正相关的因素由大到小为环境规制、工业对外开放水平和工业集聚水平。与东部沿海地区工业碳排放效率呈显著负相关的因素由大到小为工业规模、工业所有制结构和工业结构。各地区由于所处工业化阶段不同,工业发展特征各异,影响因素也各有不同。

围绕“碳达峰、碳中和”目标,未来东部沿海地区要加快传统产业转型升级和落后产能淘汰,围绕重

点产业打造一批绿色工厂、绿色产品、绿色园区和绿色供应链,实现生产方式绿色转型,通过加强环境治理力度倒逼产业转型升级也是非常有必要的;加快实施绿色技术创新攻关行动,在绿色低碳领域培育建设一批技术创新中心,加大绿色先进适用技术的推广应用;优化外资投入结构,积极引导外资更多地投向绿色经济、节能环保、生态环境和绿色服务等产业;深化国有企业改革,完善市场化经营机制和现代化管理体制,增强企业活力,提高国有资本配置效率和资源环境保护能力。

参考文献:

- [1] 陈诗一. 能源消耗、二氧化碳排放与中国工业的可持续发展[J]. 经济研究, 2009, 44(4): 41-55.
CHEN Shiyi. Energy consumption, CO₂ emission and sustainable development in Chinese industry [J]. Economic Research Journal, 2009, 44(4): 41-55.
- [2] YANG G M, ZHANG F, ZHANG F T, et al. Spatio-temporal changes in efficiency and influencing factors of China's industrial carbon emissions[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(27): 36288-36302.
- [3] HAN Y M, CHANG L, GENG Z Q, et al. Carbon emission analysis and evaluation of industrial departments in China: an improved environmental DEA cross model based on information entropy[J]. Journal of Environmental Management, 2018, 205: 298-307.
- [4] ZHOU P, ANG B W, HAN J Y. Total factor carbon emission performance: a malmquist index analysis [J]. Energy Economics, 2010, 32(1): 194-201.
- [5] 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.
MA Dalai, CHEN Zhongchang, WANG Ling. Spatial econometrics research on inter-provincial carbon emissions efficiency in China [J]. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(1): 67-77.
- [6] SHI G M, BI J, WANG J N. Chinese regional industrial energy efficiency evaluation based on a DEA model of fixing non-energy inputs [J]. Energy Policy, 2010, 38(10): 6172-6179.
- [7] XIN Y, GUO C W, SHAO S, et al. Total-factor CO₂ emission performance of China's provincial industrial sector: a meta-frontier non-radial malmquist index approach [J]. Applied Energy, 2016, 184: 1142-1153.
- [8] WANG K, WEI Y M, ZHANG X. Energy and emissions efficiency patterns of Chinese regions: a multi-directional efficiency analysis [J]. Applied Energy, 2013, 104(2): 105-116.
- [9] 王少剑, 田莎莎, 蔡清楠, 等. 产业转移背景下广东省工

- 业碳排放的驱动因素及碳转移分析[J]. 地理研究, 2021,40(9):2606-2622.
- WANG Shaojian, TIAN Shasha, CAI Qingnan, et al. Driving factors and carbon transfer of industrial carbon emissions in Guangdong province under the background of industrial transfer[J]. Geographical Research, 2021, 40(9): 2606-2622.
- [10] 蔺雪芹,边宇,王岱. 京津冀地区工业碳排放效率时空演化特征及影响因素[J]. 经济地理, 2021, 41(6): 187-195.
- LIN Xueqin, BIAN Yu, WANG Dai. Spatiotemporal evolution characteristics and influence factors of industrial carbon emission efficiency in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Economic Geography, 2021, 41(6): 187-195.
- [11] 任宇飞,方创琳,蔺雪芹. 中国东部沿海地区四大城市群生态效率评价[J]. 地理学报, 2017, 72(11): 2047-2063.
- REN Yufei, FANG Chuanglin, LIN Xueqin. Evaluation of eco-efficiency of four major urban agglomerations in eastern coastal area of China[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(11): 2047-2063.
- [12] ZHU R M, ZHAO R Q, SUN J, et al. Temporospatial pattern of carbon emission efficiency of China's energy-intensive industries and its policy implications [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 286: 125507.
- [13] LIN B, CHEN X. Evaluating the CO₂ performance of China's non-ferrous metals industry: a total factor meta-frontier malmquist index perspective[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 209: 1061-1077.
- [14] CHEN X, LIN B Q. Energy and CO₂ emission performance: a regional comparison of China's non-ferrous metals industry [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 274: 123168.
- [15] HAN Yongming, GENG Zhiqing, ZHU Qunxing, et al. Energy efficiency analysis method based on fuzzy DEA cross-model for ethylene production systems in chemical industry[J]. Energy, 2015, 83: 685-695.
- [16] WU P, WANG Y, CHIU Y H, et al. Production efficiency and geographical location of Chinese coal enterprises-undesirable EBM DEA[J]. Resources Policy, 2019, 64: 101527.
- [17] 王惠,卞艺杰,王树乔. 出口贸易、工业碳排放效率动态演进与空间溢出[J]. 数量经济技术经济研究, 2016, 33(1): 3-19.
- WANG Hui, BIAN Yijie, WANG Shuqiao. Dynamic evolution, spatial spillover of exports and industrial carbon emission efficiency[J]. Journal of Quantitative & Technical Economics, 2016, 33(1): 3-19.
- [18] 周杰琦,韩颖,林洪. FDI对中国工业碳排放效率的影响机理及其效应—理论构建与经验分析[J]. 软科学, 2016, 30(1): 76-80.
- ZHOU Jieqi, HAN Ying, LIN Hong. The effects and mechanisms of FDI on industrial carbon efficiency of China—theory and empirical research [J]. Soft Science, 2016, 30(1): 76-80.
- [19] 曲晨瑶,李廉水,程中华. 产业聚集对中国制造业碳排放效率的影响及其区域差异[J]. 软科学, 2017, 31(1): 34-38.
- QU Chenyao, LI Lianshui, CHENG Zhonghua. Impact of industrial agglomeration on Chinese manufacturing industry carbon emission efficiency and its regional differences[J]. Soft Science, 2017, 31(1): 34-38.
- [20] WU F, FAN L W, ZHOU P, et al. Industrial energy efficiency with CO₂ emissions in China: a nonparametric analysis[J]. Energy Policy, 2012, 49: 164-172.
- [21] ZHAO Jun, JIANG Qingzhe, DONG Xiucheng, et al. How does industrial structure adjustment reduce CO₂ emissions? Spatial and mediation effects analysis for China[J]. Energy Economics, 2022, 105: 105704.
- [22] 林伯强,刘泓汛. 对外贸易是否有利于提高能源环境效率——以中国工业行业为例[J]. 经济研究, 2015, 50(9): 127-141.
- LIN Boqiang, LIU Hongxun. Do energy and environment efficiency benefit from foreign trade? —The case of China's industrial sectors[J]. Economic Research Journal, 2015, 50(9): 127-141.
- [23] WANG Ke, WEI Yiming, ZHANG Xian. A comparative analysis of China's regional energy and emission performance: Which is the better way to deal with undesirable outputs? [J]. Energy Policy, 2012, 46: 574-584.
- [24] 蔺雪芹,郭一鸣,王岱. 中国工业资源环境效率空间演化特征及影响因素[J]. 地理科学, 2019, 39(3): 377-386.
- LIN Xueqin, GUO Yiming, WANG Dai. Spatial evolution and influencing factors of industrial resource and environmental efficiency in China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2019, 39(3): 377-386.
- [25] 王少剑,高爽,黄永源,等. 基于超效率SBM模型的中国城市碳排放绩效时空演变格局及预测[J]. 地理学报, 2020, 75(6): 1316-1330.
- WANG Shaojian, GAO Shuang, HUANG Yongyuan, et al. Spatio-temporal evolution and trend prediction of urban carbon emission performance in China based on super-efficiency SBM model [J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(6): 1316-1330.
- [26] 刘明达,蒙吉军,刘碧寒. 国内外碳排放核算方法研究进展[J]. 热带地理, 2014, 34(2): 248-258.

- LIU Mingda, MENG Jijun, LIU Bihan. Progress in the studies of carbon emission estimation[J]. *Tropical Geography*, 2014, 34(2):248-258.
- [27] 王君华,李霞. 中国工业行业经济增长与 CO₂ 排放的脱钩效应[J]. *经济地理*, 2015, 35(5):105-110.
WANG Junhua, LI Xia. The effects of sector decoupling between China's industrial economic growth and carbon dioxide emissions [J]. *Economic Geography*, 2015, 35(5):105-110.
- [28] 田华征,马丽. 中国工业碳排放强度变化的结构因素解析[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(3):639-653.
TIAN Huazheng, MA Li. Study on the change of China's industrial carbon emission intensity from the perspective of sector structure[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(3):639-653.
- [29] YANG Jingyi, XIONG Guangqin, SHI Daqian. Innovation and sustainable: can innovative city improve energy efficiency? [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 80:103761.
- [30] KRUGMAN P. *Geography and trade*[M]. Massachusetts: The MIT Press, 1992.
- [31] STERN D I. The rise and fall of the environmental Kuznets curve [J]. *World Development*, 2004, 32(8): 1419-1439.
- [32] 沈坤荣,金刚,方嫒. 环境规制引起了污染就近转移吗? [J]. *经济研究*, 2017, 52(5):44-59.
SHEN Kunrong, JIN Gang, FANG Xian. Does environmental regulation cause pollution to transfer nearby? [J]. *Economic Research Journal*, 2017, 52(5): 44-59.
- [33] KRUGMAN P. Space: the final frontier[J]. *Journal of Economic Perspectives*, 1998, 12(2):161-174.
- [34] HE Canfei, MAO Xiyan, ZHU Xiangdong. Industrial dynamics and environmental performance in urban China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 195: 1512-1522.
- [35] 贺灿飞,周沂. *环境经济地理研究*[M]. 北京:科学出版社, 2016.
- [36] 王艳华,苗长虹,胡志强,等. 专业化、多样性与中国省域工业污染排放的关系[J]. *自然资源学报*, 2019, 34(3):586-599.
WANG Yanhua, MIAO Changhong, HU Zhiqiang, et al. Specialization, diversity and their impacts on China's provincial industrial pollution emissions[J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(3):586-599.
- [37] 蒋天颖,孙伟. 网络位置、技术学习与集群企业创新绩效——基于对绍兴纺织产业集群的实证考察[J]. *经济地理*, 2012, 32(7):87-92,106.
JIANG Tianying, SUN Wei. Network site technological learning and innovation performance of cluster enterprises—based on empirical study of Shaoxing textile industry cluster [J]. *Economic Geography*, 2012, 32(7):87-92,106.
- [38] 周笑,王岱,王鹏飞. 中国纺织业集聚格局演变与发展模式研究[J]. *技术经济与管理研究*, 2019(11):89-95.
ZHOU Xiao, WANG Dai, WANG Pengfei. Research on the agglomeration-patterns evolution and development model of textile industry in China[J]. *Journal of Technical Economics & Management*, 2019(11): 89-95.
- [39] 聂辉华,江艇,杨汝岱. 中国工业企业数据库的使用现状和潜在问题[J]. *世界经济*, 2012, 35(5):142-158.
- [40] 陈林. 中国工业企业数据库的使用问题再探[J]. *经济评论*, 2018(6):140-153.
CHEN Lin. Re-exploration the usage of China's industrial enterprise database [J]. *Economic Review*, 2018(6):140-153.
- [41] 耿凤娟,苗长虹,胡志强. 黄河流域工业结构转型及其对空间集聚方式的响应[J]. *经济地理*, 2020, 40(6): 30-36.
GENG Fengjuan, MIAO Changhong, HU Zhiqiang. Industrial structure transformation and its response to spatial agglomeration patterns in the Yellow River Basin[J]. *Economic Geography*, 2020, 40(6): 30-36.
- [42] 徐佳,崔静波. 低碳城市和企业绿色技术创新[J]. *中国工业经济*, 2020(12):178-196.
XU Jia, CUI Jingbo. Low-carbon cities and firms' green technological innovation[J]. *China Industrial Economics*, 2020(12): 178-196.
- [43] 金碚. 关于“高质量发展”的经济学研究[J]. *中国工业经济*, 2018(4):5-18.
JIN Bei. Study on the “high-quality development” economics [J]. *China Industrial Economics*, 2018(4): 5-18.
- [44] 李平,佟连军,邓丽君,等. 环渤海地区制造业地理集聚研究[J]. *人文地理*, 2010, 25(2):99-104.
LI Ping, TONG Lianjun, DENG Lijun, et al. Geographical concentration of manufacture industries in Bohai Rim [J]. *Human Geography*, 2010, 25(2): 99-104.
- [45] 王凯,刘依飞,甘畅. 旅游产业集聚对旅游业碳排放效率的空间溢出效应[J]. *生态学报*, 2022, 42(10): 3909-3918.
WANG Kai, LIU Yifei, GAN Chang. Spatial spillovers of tourism agglomeration on the carbon emission efficiency of tourism industry[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(10):3909-3918.

(责任编辑 王卫勋)