

李云燕,张 硕.中国城市碳排放强度时空演变与影响因素的时空异质性 [J]. 中国环境科学, 2023,43(6):3244~3254.

Li Y Y, Zhang S. Spatio-temporal evolution of urban carbon emission intensity and spatiotemporal heterogeneity of influencing factors in China [J]. China Environmental Science, 2023,43(6):3244~3254.

中国城市碳排放强度时空演变与影响因素的时空异质性

李云燕*,张 硕 (北京工业大学经济与管理学院,北京 100124)

摘要: 运用地图可视化、核密度估计、标准差椭圆等方法对中国 2005~2020 年城市碳排放强度的时空演变与路径迁移进行探究,并基于时空地理加权模型(GTWR),实证考察了城市碳排放强度影响因素的时空异质性.研究发现:(1)中国城市碳排放强度逐年降低,但仍远超同期发达国家水平,减排空间较大.碳排放强度呈“北高南低”的空间分布,南北分异趋势在研究后期愈发明显.(2)各区域内部城市碳排放强度差异逐渐收敛,分布越发均衡.东部城市碳排放强度的多级分化现象显著,西部高碳城市集聚分布.碳排放强度高值区域自山西省境内持续向西北方向转移,西北地区逐步成为中国碳排放的主要贡献区域.(3)总体上,高碳化能源消费对碳排放强度呈正向促进效应,产业升级、经济发展、人口集聚、科技研发与外资强度则主要表现为负向抑制.局部内,各因素作用效果存在较强的时空分异,不同区域与时期内,各影响因素的波动方向与作用强度不尽相同.

关键词: 城市; 碳排放强度; 影响因素; 时空演变; 时空地理加权模型

中图分类号: X22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2023)06-3244-11

Spatio-temporal evolution of urban carbon emission intensity and spatiotemporal heterogeneity of influencing factors in China. LI Yun-yan*, ZHANG Shuo(College of Economy and Management, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China). *China Environmental Science*, 2023,43(6): 3244~3254

Abstract: Investigating the Spatiotemporal Evolution and Pathway Migration of Urban Carbon Intensity in China from 2005 to 2020 using Map Visualization, Kernel Density Estimation, and Standard Deviation Ellipses. Empirical Examination of Spatiotemporal Heterogeneity of Factors Affecting Urban Carbon Intensity using a Geographically and Temporally Weighted Regression (GTWR) Model. The study finds that: (1) Carbon emission intensity in Chinese cities has decreased over the years but remains significantly higher than that of developed countries during the same period, with considerable room for emission reduction. Spatially, there is a "north-south" disparity in carbon emission intensity, which has become more prominent in the later period of the study. (2) The differences in carbon emission intensity of cities within each region gradually converged, and the distribution became more balanced. The multi-level differentiation of carbon emission intensity in the eastern region was remarkable, and there were still high carbon agglomerations in the west. The region with high carbon emission intensity gradually shifted to the northwest, and the northwest became the main contributor to China's carbon emissions. (3) In general, high-carbon energy consumption has a positive effect in promoting carbon intensity, while industrial upgrading, economic development, population agglomeration, technological research and development, and foreign investment intensity have mainly negative inhibitory effects. However, at the local level, the effects of these factors exhibit significant spatiotemporal heterogeneity. The direction and strength of the fluctuations of various influencing factors vary across different regions and periods.

Key words: city; carbon emission intensity; influencing factors; spatial and temporal evolution; GTWR model

化石能源消耗所产生的碳排放被公认是全球变暖的重要因素,如何降低经济发展对化石能源依赖程度,实现经济绿色低碳转型,已成为世界各国关注的焦点^[1].作为当今世界最大的碳排放国,中国面临巨大的减排压力,也将承担更多的减排责任.基于此,中国在联合国大会上做出 2030 年实现碳达峰,2060 年实现碳中和的承诺.然而随着工业化与城市化的推进,中国未来一段时期的能源消费和碳排放仍会持续增长,单纯强调碳排放总量的减少并不是衡量减排效果的合理标准.碳排放强度(以下简称碳

强度)作为表征碳减排潜力与高质量发展的重要评价指标,被广泛用于评估碳减排有效性.为促进生态文明建设,中国政府亦提出 2030 年碳强度比 2005 年降低 60%~65%的减排目标.城市作为区域发展核心与碳排放主要来源地,在经济社会低碳转型过程中发挥着基础性作用^[2].据国际能源署估计,2006~2030

收稿日期: 2022-10-08

基金项目: 国家社会科学基金后期资助项目(21FJYB023);2022 年北京工业大学服务首都重大战略决策咨询重点项目(011000514122545);北京市社会科学基金重点项目(19YJA002)

* 责任作者, 教授, yunyanli@126.com

年,来自城市能源消费的碳排放将以每年 1.8%的速度增长.因此,开展中国城市层面碳强度的相关研究,对低碳城市建设与区域可持续发展具有重要意义.

近年来,碳强度的相关研究逐渐成为学界关注的热点.在碳强度时空演变方面,有些学者聚焦产业维度,研究发现各产业碳强度差异较大,并且这种差异会随着时间推移表现出动态变化^[3-4].还有学者聚焦行政区域,从省级或城市群视角开展研究,试图实现区域间碳治理目标的协调整合^[5].随着研究不断深入,部分学者将研究视角拓展到微观尺度^[6]与全球尺度^[7],旨在为科学应对全球气候变暖与实现局部地区精细化治理提供决策依据.研究方法包括探索性空间数据分析、基尼系数、核密度估计、空间马尔科夫链.如原嫒等^[8]运用探索性空间数据分析与空间马尔科夫链对省际碳强度的空间关联性及演变特征进行了探究.张卓群等^[9]利用 Dagum 基尼系数与核密度估计对 283 个城市的碳强度差异与动态演进进行了细致刻画.这些方法多局限于考察碳强度时空演变格局,鲜少关注其时空迁移过程.

碳强度影响因素识别方面,学界对于省级、城市群研究较多^[10-11],研究者通常基于 STIRPAT 理论,将人口、经济、技术等要素作为碳强度主要影响因素,如朱泳丽等^[12]聚焦长三角城市群,发现人口增长降低了碳强度,经济发展与技术水平分别与碳强度呈“倒U”与“U”型关系,但产业转移并没有改善区域碳强度.此外,赵桂梅等^[5]开展中国省级碳强度研究时,将能源消费结构、能源强度、对外开放等因素也考虑在内.对于全国整体城市层面,学界开展的研究较少,且受限于统计数据完整性,研究者普遍没有将能源类因素纳入分析^[13-14].常用研究方法包括指数分解、结构分解、对数平均迪氏指数与传统计量经济学方法,这些方法基于不同原理对各影响因素的贡献程度进行分解与刻画.如 Song 等^[15]运用时空分解模型探讨了中国省级碳强度影响因素的时空差异.Cao 等^[16]基于扩展乘数结构分解方法识别了中国整体和区域碳强度变化的驱动力,将碳强度变化分解为强度效应、投入结构效应和最终需求效应.宋鹏等^[17]借助 LMDI 分解方法探寻了重庆市碳达峰目标下的关键影响因素及减排路径.在运用计量分析方法开展的碳强度研究中,较多文献是基于传统计量模型考察影响因素的作用效果,侧重于全局效应的估计,未能考察模型参

数在局部空间的时空异质性^[18-19].在此背景下,部分学者尝试运用地理加权或其拓展模型来探究影响因素的空间或时空局部特征,并识别出影响因素对各局部区域不同发展阶段的影响效果,进而发掘出各区域减排潜力,但此类研究大多集中在省级层面^[20-21],缺乏对全国整体城市的探索.

综上,学界对于碳强度时空演变已开展了大量研究,但很少关注碳强度热点区域的时空迁移,聚焦全国整体城市层面的研究则更少.其次,在进行影响因素选取时,能源消费结构没有得到研究者的重视,能源消费结构对不同区域城市碳强度的影响效果还有待探索.再次,相比省级与城市群层面,全国整体城市层面的研究开展较少,研究方法多基于时空均质性假设来探讨各影响因素对碳强度的作用效果,未能有效识别模型参数随时间与空间演变而变化的时空异质性特征.鉴于此,本文运用地图可视化与核密度估计对 2005~2020 年中国城市碳强度的时空演变进行分析.在此基础上,运用椭圆标准差方法对城市碳强度热点区域的空间路径迁移进行细致刻画.随后选取 4 个时间节点(2005, 2010, 2015, 2020 年),使用时空地理加权方法(GTWR)来探究包括能源消费结构在内的各社会经济因素对不同城市在不同发展阶段的碳强度的作用效果.最终根据研究结果,针对不同区域的不同发展阶段,提出有差异的减排对策.

本文边际贡献在于:①聚焦全国整体城市层面,探讨了碳强度热点高值地区的时空迁移路径与离散趋势,拓展了碳强度时空演变的研究范式与视角.②将能源消费结构指标纳入全国整体城市层面碳强度影响因素的分析框架,并将其对碳强度的作用效果细化到不同微观城市主体,填补了全国整体城市层面碳强度影响因素选取中普遍遗漏能源消费结构的研究空白.③探究了各影响因素对四大区域不同城市碳强度作用效果的时空异质性,对其成因进行深入剖析并识别出四大区域减排潜力,为推动中国低碳城市建设及“双碳”目标达成提供参考和依据.

1 研究方法与数据来源

1.1 研究方法

1.1.1 时空演变模型 核密度估计(KDE)能够利用平滑连续的密度曲线对随机变量概率密度进行估计,由于其不过多依赖模型和参数设定且估计结果具备较好的

稳健性,被广泛应用于空间非平稳性估计的研究中.随机变量 A 的密度函数在点 a 的概率密度公式如下.

$$f(a) = (1/nh) \sum_{j=1}^n K[(A_j - a)/h] \quad (1)$$

$$K(a) = (1/\sqrt{2\pi}) \exp(-a^2/2) \quad (2)$$

式中: n 为城市个数, h 为窗宽, $K(\cdot)$ 为核函数.在核函数选择方面,本文选择最为常见的高斯核函数来探究中国及四大经济区域城市碳强度的动态演进,如式(2).

标准差椭圆模型是揭示经济地理要素空间分布方向性特征的经典统计方法.在本文中,旨在运用此方法,对样本期内中国城市碳强度重心的迁移轨迹与离散趋势进行刻画与探讨.所涉参数计算公式:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i}, \bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i y_i}{\sum_{i=1}^n w_i}; S = \pi \sigma_x \sigma_y \quad (3)$$

$$\tan \theta = \frac{(\sum_{i=1}^n w_i^2 \tilde{x}_i^2 - \sum_{i=1}^n w_i^2 \tilde{y}_i^2) + \sqrt{(\sum_{i=1}^n w_i^2 \tilde{x}_i^2 - \sum_{i=1}^n w_i^2 \tilde{y}_i^2)^2 + 4(\sum_{i=1}^n w_i^2 \tilde{x}_i \tilde{y}_i)^2}}{\sum_{i=1}^n 2w_i^2 \tilde{x}_i \tilde{y}_i} \quad (4)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{2 \sum_{i=1}^n (w_i \tilde{x}_i \cos \theta - w_i \tilde{y}_i \sin \theta)^2}{\sum_{i=1}^n w_i^2}}, \sigma_y = \sqrt{\frac{2 \sum_{i=1}^n (w_i \tilde{x}_i \sin \theta + w_i \tilde{y}_i \cos \theta)^2}{\sum_{i=1}^n w_i^2}} \quad (5)$$

式中: $(\bar{X}, \bar{Y})$ 为椭圆重心的地理坐标; w_i 为城市 i 的空间权重,在本文中代表不同城市的碳强度; (x_i, y_i) 代表城市 i 质心点的地理坐标; $(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)$ 代表

(x_i, y_i) 与重心坐标之差; σ_x, σ_y 表示椭圆 x 、 y 轴的标准差; $\tan \theta$ 为空间分布格局的方向角度(以长轴为基准,正北方向为 0° ,顺时针旋转); S 为椭圆面积.

1.1.2 时空影响因素模型 综合考虑中国城市碳强度的时空演变特征及影响因素多维复杂性,从以下几方面对碳强度影响因素进行选取(表 1).

传统线性回归模型估计结果无法反映回归参数的真实空间特征.为更合理考察碳强度影响因素的差异性,引入地理加权回归(GWR)模型对影响因素的空间异质性进行量化.该模型将样本空间位置作为回归参数,所有统计量均是关于地理位置的函数,能够反映因变量与自变量之间回归关系的局部特征.然而地理加权模型缺乏对时间因素的考量,无法对长时间序列的截面数据进行准确分析,这一问题在 GTWR 模型中得到了解决^[26].GTWR 模型在 GWR 模型的基础上引入时间效应,将截面数据扩展到面板数据,解决了时空非平稳与参数无法估计的问题,结果更为稳健.公式如下:

$$w_i = \beta_0(u_i, v_i, t_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u_i, v_i, t_i) m_{ik} + \varepsilon_i, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (6)$$

式中: w_i 为被解释变量,这里指代各城市的碳强度值, m_{ik} 为第 i 个城市的第 k 个解释变量(影响因素); u_i 、 v_i 分别为城市 i 几何重心的经纬坐标, (u_i, v_i, t_i) 表示第 i 个城市的时空坐标; p 为影响因素个数; $\beta_0(u_i, v_i, t_i)$ 为截距项; $\beta_k(u_i, v_i, t_i)$ 为第 k 个解释变量在城市 i 处的估计系数.利用时空地理加权回归模型的局部线性估计可求得各回归系数在样本点 i 处的估计值,公式如下.

$$\hat{\beta}(u_i, v_i, t_i) = [M^T L(u_i, v_i, t_i) M]^{-1} M^T L(u_i, v_i, t_i) W \quad (7)$$

式中: $\hat{\beta}(u_i, v_i, t_i)$ 为 $\beta_0(u_i, v_i, t_i)$ 的估计值, M^T 为解释变量 M 的转置矩阵, W 为被解释变量构成的矩阵, $L(u_i, v_i, t_i)$ 为城市 i 到其他城市的高斯距离函数,当城市 i 与其他城市距离越近时,权重越高.

表 1 变量选取

Table 1 Variable selection

变量名称	变量缩写	变量含义	选取依据
能源消费结构	ECS	煤炭消费量/能源消耗总量	煤炭仍是中国能源消费结构中的主导能源,能源结构低碳化是实现碳达峰碳中和目标的重要因素 ^[5]
产业升级	IND	第三产业增加值/第二产业增加值	产业升级通过改进生产工艺,提升生产效率减少碳排放,减低碳强度 ^[22]
经济发展	PGDP	人均国内生产总值	经济水平的提升将引发生产与消费模式的变动,进而改变碳排放水平 ^[23]
人口集聚	POP	城市年末总人口/市域面积	人口密度主要通过改变居民的生活行为方式影响碳排放强度 ^[14]
科技研发	RES	绿色实用新型专利授权量	科技研发为区域实现产业升级与结构优化提供技术支持,有助于提升生产效率进而缓解区域碳排放压力 ^[9, 24]
外商投资强度	FDI	实际利用外资额/国内生产总值	外商投资对碳强度可能存在两种情况,即“污染光环”与“污染避难所”效应 ^[25]

1.2 数据处理与数据来源

碳强度数据来源于中国城市温室气体工作组,考虑到影响碳强度的所有社会经济指标数据的可获得性及统计口径一致性,在进行碳强度影响因素的时空异质性分析时,将研究样本选定为 260 个城市(不包括西藏、港澳台地区)。目前,我国官方统计机构尚未给出地市层面的能源(含煤炭)消费数据,因此,本文将城市供电的燃煤消耗作为煤炭消费的替代变量进而估算能源消费中的煤炭占比^[27-28]。一直以来,发电用煤仍都是煤炭消费的主要形式,且中国各城市目前的发电结构仍然以煤炭为主,虽然各城市燃煤发电占比不同,但差异并不显著^[27-28],因此在计算城市层面发电用煤时,根据《中国电力年鉴》^[29]中历年燃煤发电量的统一占比进行核算。公式如下:

$$C = E \times \eta \times K \quad (8)$$

式中: C 为煤炭消耗量(标煤); E 为全社会用电(kWh); η 为历年煤电占总发电量比值; K 为燃煤发电的等当量折标系数(0.1229kg 标煤/kWh)。同时,本文借鉴相关学者的研究思路^[27-28],基于各城市天然气、液化石油气、城市供电此 3 部分能源的消耗量,通过标准煤折算系数计算得到城市能源消耗总量(标煤),继而采用煤炭消耗量与能源消耗总量的比值近似表征各城市的能源消费结构。

计算能源消费结构的相关数据来自《中国城市统计年鉴》,由于社会用电量数据只统计到 2019 年,因此 2020 年数据通过省级统计年鉴、市统计局、能源局以及国民经济与社会发展统计公报进行补充。绿色实用新型专利授权数据来源于中国研究数据服务平台下的绿色专利研究数据库(GPRD)。为剔除通货膨胀因素影响,将人均 GDP 平减为 2005 年基准水平,实际利用外资金额已按当年平均汇率折算为人民币。个别缺失数据运用插值法填补。

2 碳强度时空动态演变与空间路径迁移

2.1 碳强度的时空演变

依据自然间断点法将碳强度划分为 8 个等级,以探讨中国城市碳强度的时空分布特征(图 1)。总体上,2005~2020 年,中国城市碳强度逐年降低,截至 2020 年,大约一半数量城市碳强度降低至 1.26t/万元以内,但这一数值仍远超同期发达国家。碳强度大致呈“北高南低”的格局分布,尤其 2015 年后,南北分

异趋势更加明显,南部城市碳强度普遍低于 3.22t/万元,北部城市则相反。

具体来看,2005 年北方碳强度高值区域分布在内蒙古、山西、宁夏、陕西、新疆东部、黑龙江东部与辽宁北部,形成了以石嘴山市、阿拉善盟、吴忠市为中心,逐步向外扩散的高值聚集区。相比北方,南方碳强度高值城市数量与所涉土地面积更少,在云南、贵州、四川 3 省交界处形成了碳强度副高值聚集区,最高值分布在六盘水市、攀枝花市。可以发现,无论是北方或南方,碳强度较高的城市多为煤、铁资源较为丰富、石油开采与加工工业较为稠密的区域,经济发展对能源资源的依赖程度较高。彼时碳强度的南北分异趋势并不显著。

2010 年全国碳强度逐渐改善,尤其内蒙古与东北地区,辖内城市碳强度下降约 1~2 个等级,这可能得益于“十一五”规划的实施。规划期间,内蒙古加大了煤炭工业调整力度,提高产业集中度,增强了煤炭深加工能力,提升了煤炭综合利用率,单位产值能耗大幅降低;同时大力开发利用风能、太阳能与生物质能等可再生能源,尤其是在锡林郭勒、乌兰察布等地建设大中型风电场,降低了以上地区的能源消费需求,碳强度明显下降。东北地区在“十一五”期间加快了资源枯竭型城市的经济转型,积极发展接续替代产业与循环经济,减缓了碳排放。云贵交界处的高碳区逐渐缩小,区域间差异整体收敛。反映出该区域城市在产业与能源结构、生产技术等方面愈发均衡。

2015 年北方地区碳强度没有明显变化,只有少数城市有轻微改善,例如玉树、乌海、吴忠,而新疆-内蒙古-东北沿线城市的碳强度基本保持稳定,尤其是内蒙境内的多数城市。这可能是因为内蒙古作为典型化石能源大省,钢铁、建材、化工等高耗能产业体量较大,产业和能源结构短期内难有较大转变,高碳化发展路径依赖性较强,控温降碳面临较大的结构性压力。相比北方,南方碳强度下降明显,多数城市降至 1.26t/万元以内,南北分异的空间格局初步显现。“十二五”中期,随着我国经济进入新常态以及“一带一路”倡议的提出,经济总量和制造业生产力逐步向南方集聚,带动了南方经济的快速发展,单位产值的碳消耗明显减少。

2020 年北方碳强度稳中有降,但昌吉、哈密、阿拉善、乌海、通辽以及东北部分城市的碳强度不降反

增,在局部形成以内蒙古为中心、东西为走向的碳强度高值聚集区.为保障国家能源供应,2015 年后,内蒙古承接了一批现代煤化工项目,致使存量能耗的集中反弹,导致碳强度不降反升.南方城市碳强度空间格局趋于稳定,碳强度低值区域进一步向北扩散,以“秦岭—

淮河”线为分界,中国碳强度北高南低的地理格局愈发清晰.这是因为,中国冬季集中供暖一般以“秦岭—淮河”为界,以北为集中采暖区,以南不采取集中供暖,长此以往,以煤炭为主要供暖原料的北方地区碳排放居高不下,形成碳强度“北高南低”的分布格局.

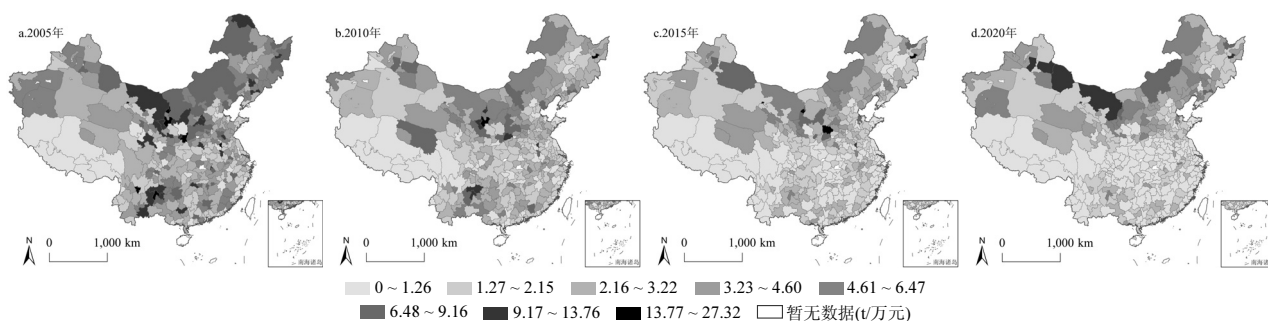


图1 中国城市碳排放强度的时空格局演变

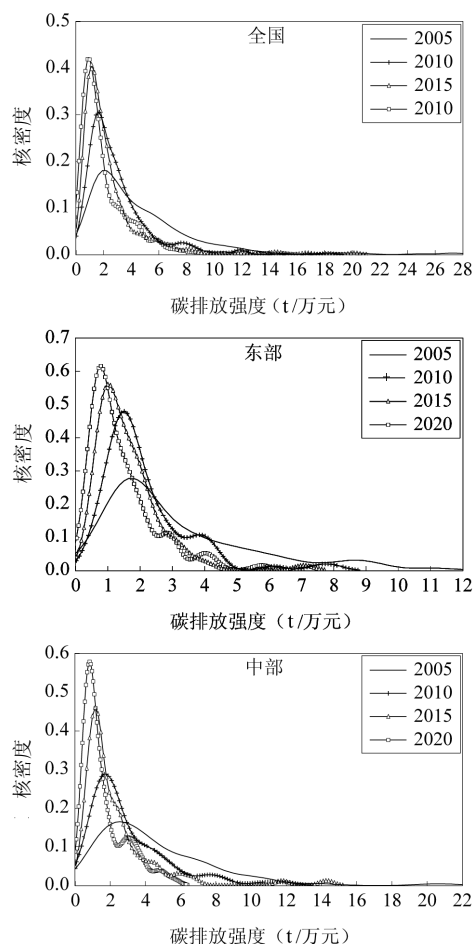
Fig.1 The evolution of spatial and temporal patterns of CEI in Chinese cities

审图号:GS(2020)4632 号

2.2 碳强度的分布动态

前文基于地图可视化描绘了中国城市碳强度的空间分布,但无法刻画城市碳强度绝对差异的动态变化.因此,进一步利用核密度估计分析中国以及四大区域内部城市碳强度的分布动态特征(图 2).就全国而言,碳强度核密度曲线主峰位置持续向左移动,峰值高度持续提升,主峰宽度略有缩小,右侧出现侧峰但并不明显,说明全国范围城市碳强度不断降低,空间差异有所减小并存在轻微两极分化现象.与全国城市核密度曲线形态相类似,东部城市核密度曲线主峰位置在样本期内持续左移,坡度变陡,主峰宽度持续缩小,说明东部城市碳强度持续改善,区域差异逐渐缩小,呈收敛态势;与全国层面不同的是,东部城市核密度曲线右侧出现 2 个侧峰,说明东部城市碳强度在局部存在明显的多级分化.在中部地区,城市碳强度核密度曲线波峰持续左移并逐渐升高,波峰宽度持续收窄,说明中部城市整体碳强度持续下降,城市间差异趋于缩小;核密度曲线无明显右拖尾,说明区域内城市碳强度不存在明显的两极分化.在西部地区,城市碳强度核密度曲线波峰持续上升,主峰在样本期内先右移再左移,波峰宽度先扩大后缩小,总体表现为曲线左移、波峰宽度收窄,说明西部城市整体碳强度有所降低,绝对差异有所减小,曲线存在右拖尾,说明个别城市的碳强度较高.在东北地区,核密度曲线波峰先左移,后轻微右移,波峰高度先升高

后降低,总体表现为曲线左移,波峰升高,宽度收窄且无明显拖尾,说明东北城市碳强度整体呈下降趋势,城市间差异有所收敛,两极分化现象有所改善.



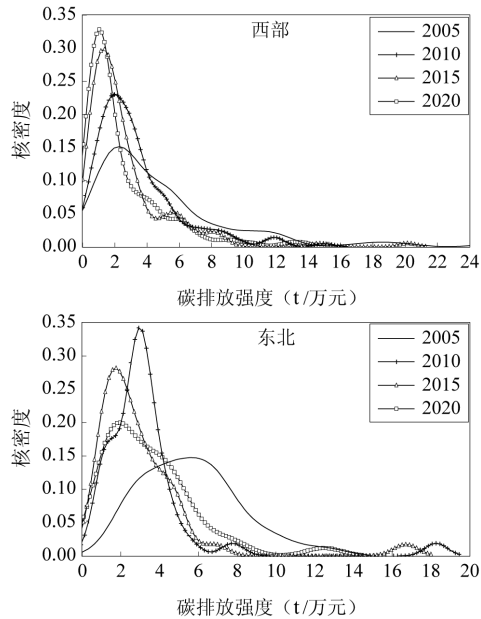


图 2 全国及四大区域城市碳排放强度的动态分布
Fig.2 Dynamic distribution of CEI in China and four regional cities

2.3 碳强度重心的时空迁移与离散趋势

基于 2005, 2010, 2015, 2020 年 4 个时间节点,对中国城市碳强度的重心转移轨迹与离散趋势展开分析(图 3).从重心分布来看,城市碳强度重心在 111.195°~111.700°E, 35.029°~37.035°N 范围变动,相比中国几何中心(103°E、36°N),重心向东北偏移,说明东北部城市的平均碳强度高于西南部城市.从重心迁移方向来看,碳强度分布重心最初自山西省运城城市境内向西南转移,随后向西北方向转移至临汾市中南部,此后继续向西北方向转移至吕梁市境内.究其原因,2010 年内蒙古境内多数城市碳强度明显下降,西南方向的宁夏地区成为新的高碳聚集区,导致重心向西南方向迁移.2010 年后,随着中西部省份持续承接东南地区的产业转移,工业发展进入加速期,导致碳排放的快速增长.此外,由于西北地区经济发展水平偏低且资源依赖性较强,加之“两高一剩”企业较多,粗放式的发展模式加剧了碳排放并提升了碳强度,导致重心持续向西北方向移动.从重心迁移距离来看,约向西北方向累计迁移了 216.6km,向北移动距离(211.8km)大于向西移动距离(45.5km),说明碳强度的重心迁移以南北方向为主,南北分异的地理格局得到印证.

2005~2020 年,碳强度标准差椭圆主要位于中国北部和中部地区,且持续向北移动,大致呈“东北-西南”空间分布格局.从椭圆面积看,2020 年椭圆面积

比 2005 年扩大 26%,说明中国城市碳强度存在空间分散趋势.从转角 θ 看,转角由 2005 年的 39.8°扩大至 2020 年的 74.9°,逐渐呈以东西方向为主导的空间分布.从半轴长度看,短半轴由 2005 年的 1226.4km 缩减至 2020 年的 1155.6km,长半轴由 1005.1km 扩大至 1350.7km,说明中国城市碳强度在南北方向上更加收敛,东西方向上更为扩散,呈南北向心集聚、东西空间发散的格局分布.

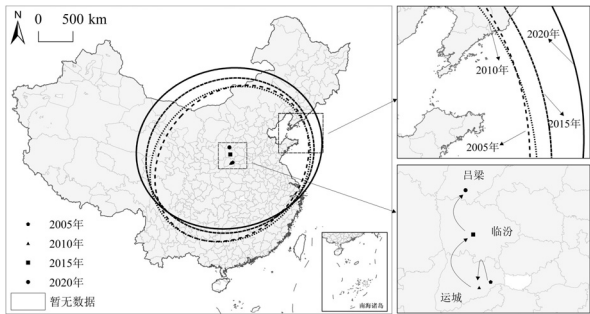


图 3 2005~2020 年中国城市碳排放强度的分布方向与路径转移
Fig.3 Distribution Direction and Path Shift of CEI in China from 2005 to 2020

审图号:GS(2020)4632 号

3 碳强度影响因素的时空异质性分析

3.1 GTWR 模型实证结果

为避免多重共线性对结果的干扰,在模型拟合之前对各解释变量进行相关性检验,发现方差膨胀因子均小于 10,表明不存在明显的共线性问题,可进行回归分析.以 AICc 准则确定最优带宽,对影响因素进行回归测算.为验证 GTWR 模型拟合效果,同时列出了全局普通最小二乘(GOLS)、地理加权回归(GWR)与时间加权回归(TWR)的估计结果进行比较(表 2).

表 2 模型评价指标

Table 2 Model evaluation indexes

参数/模型	GTWR	GOLS	GWR	TWR
AICc	1225.574	2089.825	1570.833	2012.606
R^2	0.687	0.304	0.476	0.346
校正后 R^2	0.685	—	0.473	0.342

注: R^2 和校正后 R^2 均表示回归方程的拟合优度,结果越大说明拟合度越高;AICc指修正的赤池信息准则,AICc值越低值,表明模型拟合效果越好.

根据 R^2 、校正后 R^2 与 AICc 值判断,GTWR、

GWR、TWR 三种模型的解释力均优于 GOLS 模型. 在所有模型中,GTWR 模型的 R^2 与校正后 R^2 最大,且 AICc 值最小,拟合效果最好.表明各影响因素对中国城市碳强度的作用效果存在时空差异,兼顾时间与空间非平稳性的 GTWR 模型更适合本文的研究.

表 3 各变量回归系数的描述性统计结果
Table 3 Descriptive statistical results of regression coefficients of each variable

项目	经济发展	产业升级	人口集聚	能源消费结构	外商投资强度	科技研发
上四分位数	0.409	-0.547	0.154	1.276	0.267	-0.629
中位数	-0.262	-1.242	-0.278	0.302	-0.058	-1.164
平均数	-0.311	-1.154	-0.331	0.618	-0.189	-1.083
下四分位数	-0.962	-1.813	-0.805	-0.455	-0.456	-1.485
四分位距	1.371	1.266	0.959	1.731	0.723	0.856
均值 SE	0.040	0.030	0.022	0.049	0.019	0.026
95%置信区间上限	-0.232	-1.095	-0.287	0.715	-0.151	-1.031
95%置信区间下限	-0.390	-1.213	-0.375	0.522	-0.227	-1.134

由表 3 可知,能源消费结构中位数与平均数均大于零,说明能源消费结构对碳强度的作用以促进为主.下四分位数为负,说明负值也占据一定比例,可能因为在某些年份的某些城市,经济增长速率总体上高于碳排放增长速率,因此碳强度呈现下降趋势^[14].产业升级、科技研发系数以负值为主,表明产业升级与科技研发对碳强度有负向抑制作用.经济发展、人口集聚、外商投资强度系数有正有负,但中位数、平均数均小于零,说明经济发展、人口集聚与外商投资强度对碳强度主要表现为负向抑制作用.

3.2 影响因素的时空演化

选择 2005、2010、2015、2020 年 4 个节点,运用 GTWR 模型对中国城市碳强度影响因素进行实证分析,得到各影响因素在不同时空位置上对碳强度的贡献系数,将各城市按四大经济区域划分进行逐个匹配,进而绘制四大经济区域内部城市各影响因素回归系数随时间变化的箱线图(图 4),以观测其时空演变趋势.

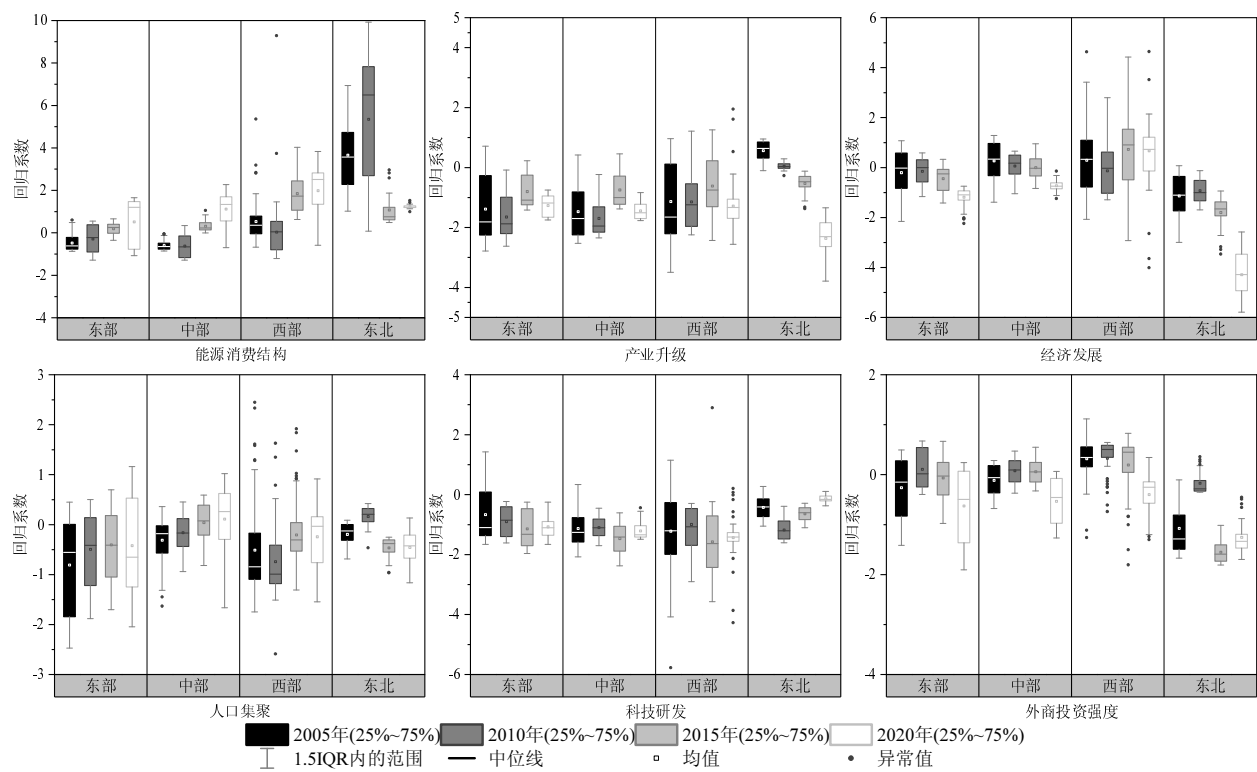


图 4 四大区域各影响因素回归系数箱线图

Fig.4 Boxplots of regression coefficients for various influencing factors in four major regional

3.2.1 能源消费结构、产业升级对城市碳强度影响的时空分异 样本期内,东部、中部与西部地区能源消费结构系数由负转正.这是因为在研究初期,中国

经济发展迅速,较高的经济增速在一定程度上缓解了能源消费增长引致的碳强度升高,因此高碳化能源消费并未造成碳强度增长;随着我国一系列去产

能政策的出台以及可再生替代能源技术的进步,能源结构持续优化,煤炭消费占比有所降低,碳强度持续下降,能源消费结构与碳强度表现为同向变动。

空间上看,东部与中部能源结构系数相差不大,演变趋势大致相同,这是因为东中部之间的产业转移弱化了彼此的经济结构差异,促使地区间能源消费趋于动态平衡。不同于东部与中部,西部城市能源消费结构系数在样本后期增幅明显,能源消费结构对碳强度影响较为显著,这可能得益于中国“一带一路”倡议的提出。“一带一路”倡议促进了西部各省与沿线国家在经贸、能源、生态等领域的交流合作,也加快了西部城市的产业调整与转型升级,能源消费结构不断优化,单位产值能源消耗与碳排放亦有所下降。东北地区尤为特殊,系数在样本初期较大,中后期大幅下跌至零值附近,经过多年的去产能、调结构,东北地区能源消费结构已有所改善,但受限于工业体量较大,能源消费结构进一步调整的空间较小,产业转型难度也相对较高,单纯依靠降低煤炭消费的方式难以带来碳强度的大幅降低。

除东北地区产业升级系数仅在研究初期略高于零外,四大区域产业升级系数在多数时间内均小于零,随着时间推移,系数绝对值波动上升,说明产业升级抑制了城市碳强度增长,且抑制程度逐渐增强。东、中、西三大区域系数的变化趋势基本一致,表现为下降-上升-下降,但始终小于零,说明产业升级在以上区域的降碳效果并不稳定。

空间上看,东北地区产业升级系数持续降低,尤其 2015 年后呈断崖式下降,研究后期成为了所有区域中的负高值区,表明东北地区产业升级带来的降碳效果较为显著。长期以来,东北作为中国的老工业区,第二产业占比居高不下,产业调整空间较大,随着东北振兴等国家战略相继提出与推行,尤其是 2016 年《东北振兴“十三五”规划》的实施,东北地区步入了产业结构调整加速期,辖内资源枯竭型产业与城市进行积极转型,产业结构不断优化,新产业与新业态相继涌现,单位产值碳排放大幅下降。

3.2.2 经济发展、人口集聚对城市碳强度影响的时空分异 样本期内,四大区域经济发展对碳强度主要表现为抑制作用,且抑制强度逐渐增强。据统计,中国城市平均碳强度从 2005 年的 4.5t/万元降为 2020 年的 2.1t/万元,而人均 GDP 则持续增长,经济发展与

碳强度之间呈负相关,从数据角度再次验证结论的稳健性。中国经济经历迅猛发展的同时,也在积极调整与改善增长方式,致力于由粗放式高碳增长向集约式低碳发展模式的转变,逐步降低了经济发展对能源消耗的依赖程度,随着经济增长效率与质量不断提升,对碳强度的促减效果也愈发明显。

空间上看,东、中、西三大区域中,东部城市经济发展系数绝对值最大,说明东部城市经济发展对碳强度的促减效果更好。究其原因,相比中西部,东部经济发展对资源要素依存度更低,且东部多数企业位于供应链下游,能源利用效率更高,有效降低了能源消费在经济增长中的比重。东北地区经济发展对碳强度抑制作用最大,且在 2015~2020 年间,系数降幅较大,这可能得益于 2004 年提出的“东北振兴”战略。东北作为老工业区,资源类城市众多且资源开采历史悠久,本世纪以来,随着资源类城市主打资源的枯竭,单纯依靠资源开采拉动区域经济增长的粗放发展模式难以为继。2016 年《关于深入推进实施新一轮东北振兴战略加快推动东北地区经济企稳向好若干重要举措的意见》的提出,为东北资源类城市发展替代产业,实现经济转型提供了政策指导与财政扶持,此后几年里,资源类城市能源开发在经济增长中的占比大幅下降。

样本初期,东、中、西部人口集聚系数基本为负,随着时间推移,绝对值逐渐减小,少部分城市系数在研究后期略大于零,说明人口集聚有利于城市碳强度降低,但减排效果逐渐变弱。这得益于人口集聚的成本优化和能源消耗的规模效益,即人口集聚产生的规模经济效应大于能源消费的增长。研究初期,人口集聚通过发挥集聚经济的成本优势,引导经济活动和生产要素在空间上集聚,共享基础设施,避免重复建设,推动规模经济发展和产业结构升级,提高了资源利用效率,但随着中国人口增长乏力与人口红利的逐渐消失,经济增速放缓,城市发展集聚经济的规模效益与成本优势不再显著,对能源强度的分担效用与抑制效果减弱。

空间上看,只有西部地区系数始终小于零,说明西部城市人口集聚对碳强度抑制效果较好。原因在于,西部平均人口密度在所有区域中最小,人口增长空间较大,特别是“一带一路”倡议的提出,引导人口向西部集聚,人口红利不断释放,规模效益与成本

优势逐步显现,带动技术进步与产业升级,促进了能源效率的提升.东北地区系数波动下降为负值,说明东北地区人口密度的降低推动了碳强度增长.这是由于近年来东北地区人口大量流失,导致劳动力缺乏,滞缓了当地的经济发展与产业升级,单位产值能耗水平不降反增,这可能也是东北地区碳强度在2020年出现回弹的原因之一.

3.2.3 科技研发、外商投资强度对城市碳强度影响的时空分异 样本期内,四大区域科技研发系数基本为负,科技研发抑制了碳强度上升.东、中、西部地区系数的变化趋势大体一致,总体呈下降趋势,而东北地区系数的变化趋势则恰好相反.这可能是因为东北地区人口流失导致其人才储备匮乏,人才的缺失进一步阻碍了当地企业的科技研发与创新发展,技术更迭迟缓,产业转型困难,对区域整体碳强度的改善效果较弱.

空间上看,中、西部多数时间内均为回归系数负高值区,意味着中、西部地区科技研发对碳强度的抑制效果较好.究其原因,中西部地区技术水平较低,但也意味其拥有巨大的提升潜力,随着西部大开发、中部崛起政策与“一带一路”倡议的施行,中西部不断缩小与东部的经济差异,加强了人才培育与人才引进,技术红利充分释放;此外,据《中国区域科技创新评价报告 2020》研究显示,近年来中、西部地区科技创新水平进步较快,成果转化率大幅提升.

外商强度系数先上升后下降最终趋于负值,说明外商投资对中国整体碳强度的增长由促进转为抑制,这得益于中国全球价值链地位的不断攀升.中国在加入WTO后,凭借自身资源和劳动力比较优势积极参与国际分工,中低端价值链嵌入模式导致资源的快速枯竭和日益严峻的环境问题,增加了单位产值碳排放,一度陷入低收益和高污染的困境,成为发达国家的“污染避难所”.随着中国参与国际分工的地位持续提升,污染密集型产业陆续退出,加之政府积极出台各项政策支持技术创新,不断突破发达国家技术封锁,生产技术不断进步,单位能耗呈下降趋势.

空间上看,东北地区外商投资系数始终小于零但波动较大,尤其2010年后,东北地区系数从零值附近大幅下降,说明东北地区外商投资对碳强度抑制效果显著增强.作为中国向北对外开放的“桥头堡”,

在“一带一路”倡议提出后,东北地区积极融入“一带一路”建设,引入国际投资,通过与沿线国家开展多层次合作引进先进生产技术与管理经验,促进产业升级,同时依靠“一带一路”倡议的区域的产业链优势,将过剩产能有效转移,提高了生产效率.

3.3 稳健性讨论

为缓解遗漏变量与研究方法偏差对实证结论的影响,采用增添变量与变换研究方法的方式进行稳健性检验.对于增添变量的检验方式,在所有解释变量基础上继续引入城镇化水平(城镇人口占年末总人口比重),依旧采用GTWR模型进行实证分析,结果显示校正后 R^2 为0.693,与表2十分接近,其余参数变化也很小.同时将所有解释变量回归系数进行描述性统计并与表3进行对比,发现各变量回归系数均值的正负方向均无变化,只在大小上略有浮动.对于变换研究方法的检验方式,采用GWR模型,依次对2005, 2010, 2015, 2020年的数据进行回归测算,最终将每年所有变量回归系数进行汇总并进行描述性统计,与表3对比,发现各变量均值、四分位数方向和大小均十分接近.以上两种方式均可在一定程度上验证结果的稳健性.限于篇幅,稳健性检验结果未在文中展示,可联系作者获取.

3.4 政策建议

(1)从政策扶持与市场调控两方面促进南北地区城市碳强度的协同改善.一方面,可在北方具有典型代表意义的城市中率先开展减排降碳试点工作,在产业结构调整、绿色技术研发、低碳交通运输等方面给予政策扶持,进而以点带面,加速北方城市减排降碳工作的快速推进.另一方面,加快构建南北跨区域碳排放权交易市场,不断完善碳配额分配机制,将更多区域与行业纳入碳交易体系,运用市场化工具促进南北地区低碳协同发展.

(2)遵循区域城市的实际发展情况,制定差异化碳减排策略.①东部地区可依托自身经济和区位优势,不断优化外商投资结构,重点发展高技术与现代服务业,改善经济增长质量,降低能源产业在经济增长中占比.②中部地区可通过推动产学研融合发展,构建企业为主体,高校与科研机构协同发力的产学研融合研发体系,引导高校、科研机构与企业之间的交流合作与人才流动,推动技术成果转化应用,带动相关行业技术更迭与产业升级,促进碳强度改

善.③西部地区可依托中心城市建立人才孵化基地、制定宽松落户政策释放人口红利与增长潜力,充分利用城市经济发展的规模效益与成本优势,促进技术进步与传统产业升级,提升能源利用率.④西部地区可凭借区位及资源优势,开发风电、太阳能等新能源,提高可再生能源消费比例,开展与中东部的能源项目合作与技术交流,加速产业转型.⑤东北地区可通过制定优惠政策改善营商环境,以省会为中心引入国际投资,通过与“一带一路”沿线国家开展多层次合作引进先进生产技术与管理经验,促进城市产业升级,促进碳减排.

4 结论

4.1 中国城市碳强度虽逐年降低,但仍远超同期发达国家平均水平,减排空间较大.碳强度逐渐呈现“北高南低”的空间非均衡分布,随着时间推移,南北分异趋势愈发明显,侧面反映出中国南北区域发展的不协调.核密度估计显示,全国及四大区域城市碳强度均显著降低.东部、中部、东北城市碳强度区间差异均逐渐收敛,区域发展越发均衡.相比之下,东部城市多级分化现象更为明显,东北地区则更加均衡;西部城市碳强度先升后降,碳强度高值热点城市集聚分布.空间方向性分析表明,东北部城市碳强度平均高于西南部.碳强度热点区域由山西运城城市向西北方向转移,西北地区逐渐成为碳排放的主要贡献区域.

4.2 GTWR 实证结果表明,在不同区域及不同发展阶段内,影响因素作用强度和波动趋势各不相同.①能源消费结构对碳强度呈正向影响,煤炭为主导的能源消费方式仍是阻碍中国碳强度降低的重要因素.由于经济转型难度较高,现阶段能源消费结构对东北城市碳强度的影响效果较为微弱.②产业升级有益于城市碳强度降低,现阶段东北地区城市产业升级的降碳效果最为显著.③总体来看,经济发展对碳强度呈抑制作用且抑制强度逐渐增大,中国经济增长效率与质量的提升有效降低了经济发展对能源消耗的依赖程度;空间上看,经济发展对东北地区城市碳强度的促减效果最好,对中西部地区的效果较差.④人口集聚有效抑制了碳强度增长,但随着中国人口增长乏力与人口红利的逐渐消失,抑制效果逐渐减弱.得益于“一带一路”倡议提出,西部地区

人口红利逐步释放,人口集聚对碳强度抑制效果较为显著.⑤科技研发对碳强度抑制效果逐步增强,四大区域中,中、西部地区城市抑制效果相对较好.⑥外商投资在早期加速了中国城市碳强度增长,随着中国嵌入全球价值链地位的不断攀升,“污染光环”效应逐步显现;现阶段外商投资对东北地区碳强度促减效果强于其他地区.

参考文献:

- [1] Pan X, Guo S, Xu H, et al. China's carbon intensity factor decomposition and carbon emission decoupling analysis [J]. *Energy*, 2022,239:122175.
- [2] Zhang F, Deng X, Phillips F, et al. Impacts of industrial structure and technical progress on carbon emission intensity: Evidence from 281 cities in China [J]. *Technological Forecasting and Social Change*. 2020,154:119949.
- [3] Huang Y, Zhu H, Zhang Z. The heterogeneous effect of driving factors on carbon emission intensity in the Chinese transport sector: Evidence from dynamic panel quantile regression [J]. *Science of the Total Environment*, 2020,727:138578.
- [4] 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 H Z, Ma L. 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.
- [5] 赵桂梅,耿 涌,孙华平,等.中国省际碳排放强度的空间效应及其传导机制研究 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2020,30(3):49-55.
Zhao G M, Geng Y, Sun H P, et al. Spatial effects and transmission mechanism of inter-provincial carbon emission intensity in China [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2020,30(3):49-55.
- [6] 王少剑,谢紫寒,王泽宏.中国县域碳排放的时空演变及影响因素 [J]. *地理学报*, 2021,76(12):3103-3118.
Wang S J, Xie Z H, Wang Z H. The spatiotemporal pattern evolution and influencing factors of CO₂ emissions at the county level of China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021,76(12):3103-3118.
- [7] Zhao Y, Chen R, Zang P, et al. Spatiotemporal patterns of global carbon intensities and their driving forces [J]. *Science of the Total Environment*, 2022,818:151690.
- [8] 原 娜,孙欣彤.中国省际碳排放强度时空演变及驱动因素研究 [J]. *环境科学与技术*, 2022,45(S1):168-176.
Yuan Y, Sun X T. Spatial-temporal evolution and driving factors of inter-provincial carbon emission intensity in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2022,45(S1):168-176.
- [9] 张卓群,张 涛,冯冬发.中国碳排放强度的区域差异、动态演进及收敛性研究 [J]. *数量经济技术经济研究*, 2022,39(4):67-87.
Zhang Z Q, Zhang T, Feng D F. Study on regional differences, dynamic evolution and convergence of carbon emission intensity in China [J]. *Journal of Quantitative & Technological Economics*, 2022, 39(4):67-87.
- [10] Feng K, Hubacek K, Guan D. Lifestyles, technology and CO₂

- emissions in China: A regional comparative analysis [J]. *Ecological Economics*, 2009,69(1):145–154.
- [11] Liu S, Wang Y, Liang Y. Environmental consequence analysis of oil spills from onshore pipelines with parametric uncertainty [J]. *Process Safety and Environmental Protection*. 2020,141:123–134.
- [12] 朱泳丽,丁利杰.长三角城市群碳排放强度的空间效应及影响因素——基于产业转移视角 [J]. *资源科学*, 2022,44(7):1373–1387.
- Zhu Y L, Ding L J. Spatial effects and influencing factors of carbon emission intensity in the Yangtze River Delta urban agglomeration: An industrial transfer-based perspective [J]. *Resources Science*, 2022, 44(7):1373–1387.
- [13] Zhang F, Deng X, Phillips F, et al. Impacts of industrial structure and technical progress on carbon emission intensity: Evidence from 281 cities in China [J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2020,154:119949.
- [14] 王少剑,黄永源.中国城市碳排放强度的空间溢出效应及驱动因素 [J]. *地理学报*, 2019,74(6):1131–1148.
- Wang S J, Huang Y Y. Spatial spillover effect and driving forces of carbon emission intensity at city level in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019,74(6):1131–1148.
- [15] Song C, Zhao T, Wang J. Spatial-temporal analysis of China's regional carbon intensity based on ST-IDA from 2000 to 2015 [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019,238:117874.
- [16] Cao Y, Zhao Y, Wang H, et al. Driving forces of national and regional carbon intensity changes in China: Temporal and spatial multiplicative structural decomposition analysis [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019,213:1380–1410.
- [17] 宋 鹏,张慧敏,毛显强.面向碳达峰目标的重庆市碳减排路径 [J]. *中国环境科学*, 2022,42(3):1446–1455.
- Song P, Zhang H M, Mao X Q. Research on Chongqing's carbon emission reduction path towards the goal of carbon peak [J]. *China Environmental Science*, 2022,42(3):1446–1455.
- [18] Yan B, Wang F, Dong M, et al. How do financial spatial structure and economic agglomeration affect carbon emission intensity? Theory extension and evidence from China [J]. *Economic Modelling*, 2022, 108:105745.
- [19] Yu Q, Li M, Li Q, et al. Economic agglomeration and emissions reduction: Does high agglomeration in China's urban clusters lead to higher carbon intensity? [J]. *Urban Climate*, 2022,43:101174.
- [20] 肖宏伟,易丹辉.基于时空地理加权回归模型的中国碳排放驱动因素实证研究 [J]. *统计与信息论坛*, 2014,29(2):83–89.
- Xiao H W, Yi D H. Empirical study of carbon emissions drivers based on geographically time weighted regression model [J]. *Journal of Statistics and Information*, 2014,29(2):83–89.
- [21] 王 凯,唐小惠,甘 畅,等.中国服务业碳排放强度时空格局及影响因素 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2021,31(8):23–31.
- Wang K, Tang X H, Gan C, et al. Temporal spatial evolution and influencing factors of carbon emission intensity of China's service industry [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2021,31 (8):23–31.
- [22] Zhang F, Deng X, Phillips F, et al. Impacts of industrial structure and technical progress on carbon emission intensity: Evidence from 281 cities in China [J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2020,154:119949.
- [23] 虞义华,郑新业,张 莉.经济发展水平、产业结构与碳排放强度——中国省级面板数据分析 [J]. *经济理论与经济管理*, 2011,(3):72–81.
- Yu Y H, Zheng X Y, Zhang L. Carbon dioxide emission and economic development: A panel data analysis [J]. *Economic Theory and Business Management*, 2011,(3):72–81.
- [24] 余志伟,樊亚平,罗 浩.中国产业结构高级化对碳排放强度的影响研究 [J]. *华东经济管理*, 2022,36(1):78–87.
- Yu Z W, Fan Y P, Luo H. Research on the influence of industrial structure upgrading on carbon emission intensity in China [J]. *East China Economic Management*, 2022,36(1):78–87.
- [25] 朱于珂,高红贵,徐运保.双向 FDI 协调发展如何降低区域 CO₂ 排放强度?——基于企业绿色技术创新的中介效应与政府质量的调节作用 [J]. *软科学*, 2022,36(2):86–94.
- Zhu Y K, Gao H G, Xu Y B. How does coordinated development of two-way FDI reduce regional CO₂ emission intensity?——Based on the mediating effect of enterprise green technology innovation and the moderating effect of government quality [J]. *Soft Science*, 2022,36(2): 86–94.
- [26] 沈 杨,汪聪聪,高 超,等.基于城市化的浙江省湾区经济带碳排放时空分布特征及影响因素分析 [J]. *自然资源学报*, 2020,35(2): 329–342.
- Shen Y, Wang C C, Gao C, et al. Spatio-temporal distribution and its influencing factors of carbon emissions in economic zone of Zhejiang Bay Area based on urbanization [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020,35(2):329–342.
- [27] 吴建新,郭智勇.基于连续性动态分布方法的中国碳排放收敛分析 [J]. *统计研究*, 2016,33(1):54–60.
- Wu J X, Guo Z Y. Research on the convergence of carbon dioxide emissions in China: A continuous dynamic distribution approach [J]. *Statistical Research*, 2016,33(1):54–60.
- [28] 任晓松,刘宇佳,赵国浩.经济集聚对碳排放强度的影响及传导机制 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2020,30(4):95–106.
- Ren X S, Liu Y J, Zhao G H. The impact and transmission mechanism of economic agglomeration on carbon intensity [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2020,30(4):95–106.
- [29] 中国电力出版社.2021 中国电力年鉴 [M]. 北京:中国电力出版社, 2021.
- China Electric Power Press. 2021 China Electric Power Yearbook [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2021.

作者简介: 李云燕(1963–),女,山东滨州人,教授,博士,主要从事环境经济、低碳政策研究.发表论文 90 余篇.yunyanli@126.com.