

DOI: 10.20103/j.stxb.202310072144

陈飞, 徐鹤, 李永贺. 长三角地区城市密度对碳排放绩效的影响效应与机制. 生态学报, 2024, 44(10): 4092-4104.

Chen F, Xu H, Li Y H. Low-carbon development effects and mechanisms of urban density in the Yangtze River Delta region. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(10): 4092-4104.

长三角地区城市密度对碳排放绩效的影响效应与机制

陈 飞*, 徐 鹤, 李永贺

上海应用技术大学城市建设与安全工程学院, 上海 201418

摘要: 城市密度是衡量城市各要素空间集聚程度的表征也是调控城市各要素资源分配效率的重要手段。过往主要围绕城市密度的物质形态测度来研究城市空间资源利用与环境问题, 少有立足碳排放绩效的视角来研究城市密度的演变逻辑。立足生态效益中自然资源投入最小化与获得价值最大化的观点, 从经济、社会、环境三个维度构建碳排放绩效综合评价指标, 以长三角 41 个城市为例, 基于标准差椭圆分析城市密度与碳排放绩效的时空演变及关联特征, 采用地理加权回归模型与地理探测器相结合的方法, 确定城市密度对碳排放绩效的影响效应及机制。结果表明: (1) 城市密度与碳排放绩效均升高, 城市密度增速减慢, 而碳排放绩效增速加快; 二者均呈东南—西北向发展且关联性不断增强。(2) 城市密度分指标对碳排放绩效的影响效应存在时空差异, 东南部多数城市各分指标影响系数增大且作用方向不变; 西北部人口密度负向影响显著增强, 经济密度的影响由负转正, 而空间密度的影响由正转负。(3) 城市密度与其他经济社会因素交互后对碳排放绩效产生影响, 其中经济密度与产业结构协同作用对碳排放绩效的影响最大, 且与因子独立作用相比, 人口密度与其他影响因素的交互效应增幅最大。理清城市密度对碳排放绩效的影响效应及机制, 可以为城市空间结构的合理优化提供依据。

关键词: 碳排放绩效; 城市密度; 影响效应; 交互作用

Low-carbon development effects and mechanisms of urban density in the Yangtze River Delta region

CHEN Fei*, XU He, LI Yonghe

Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China

Abstract: Urban density is a representation of the spatial clustering degree of various elements within a city and is also an important means regulating the efficiency of resource allocation among these elements. Previous studies have predominantly focused on the physical form of urban density to examine the utilization of urban spatial resources and environmental concerns, with little consideration for carbon emission performance in studying the evolutionary logic of urban density. This study is grounded in the viewpoint of maximizing ecological benefits by minimizing natural resource input and maximizing value gained. A comprehensive evaluation index of carbon emission performance is constructed from three dimensions: economic, social, and environmental. Taking 41 cities in the Yangtze River Delta as an example, the spatio-temporal evolution and correlation characteristics of urban density and carbon emission performance were analyzed based on standard deviation ellipse. The geographic weighted regression models and Geodetecor were used to determine the impact effect and mechanism of urban density on carbon emission performance. The results indicate that: (1) Both urban density and carbon emission performance have increased, with the growth rate of urban density slowing down while the growth rate of carbon emission performance accelerating. The development pattern exhibits a southeast-to-northwest development pattern with

基金项目: 上海哲学社会科学规划项目(2022BCK001)

收稿日期: 2023-10-07; 网络出版日期: 2024-02-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Ldcarch@163.com

continuously strengthening correlation. (2) There are spatiotemporal differences in the impact of sub-indicators of urban density on carbon emission performance. In the southeastern region, most cities show an increase in the impact coefficient of each sub-indicator, maintaining directions of influence. Conversely, in the northwestern region, population density's negative impact significantly intensifies, economic density changes from negative to positive influence, and spatial density's impact shifts from positive to negative. (3) The interaction between urban density and other economic and social factors influences carbon emission performance. The synergistic effect between economic density and industrial structure has the greatest impact on carbon emission performance. Additionally, compared to the independent effects of factors, the interaction effect between population density and other influencing factors experiences the most significant increase. Clarifying the impact and mechanisms of urban density on carbon emission performance can provide a basis for the rational optimization of urban spatial structure.

Key Words: carbon emission performance; urban density; effects; interactive effect

“双碳”背景下城市空间格局正在发生变化,随着城市群经济、人口与产业的空间集聚与扩散,土地资源、生态环境与城市可持续发展之间的矛盾凸显。城市密度既是量化空间要素集聚程度的关键指标,也是应对城市资源环境问题、管控城市形态的重要工具。优化城市空间结构和功能定位,控制城市规模,确定适宜的城市密度指标既是城市空间资源集约利用的必要条件,更是实现“降碳增效”的重要保证。根据“目标-手段”谱系,降碳只是“双碳”目标推进中一个阶段或手段,而资源环境约束下的效益提升才是最终目标。其核心理念不仅关注碳排放规模及强度控制,更强调发展质量和生活水平方面的效益目标产出,而表征经济、社会及空间层面的环境绩效引申出的碳排放绩效,契合了这种需求。因此,“双碳”目标下,城市密度视角下的碳排放绩效评估是检验空间发展质量优劣的关键,基于碳排放绩效的城市密度指标确定及调控,为土地集约化利用以及城市空间合理布局提供科学的决策与实践依据。

城市密度包括单位土地上的人口规模、经济产出以及土地开发强度等,即人口密度、经济密度和空间密度。反映了城市建成区内各类要素的空间分布与投影^[1],描述了各类要素的资源分配效率以及城市空间形态特征,强调了城市内部空间结构的高效与集约化程度,具有社会、经济及环境多重效应^[2]。在城市密度与低碳发展关系研究上,建成区土地利用方式、功能结构以及建筑物系统决定城市密度特征,并显著影响碳排放^[3]。当城市土地利用方式发生改变,经济产出主要由第三产业增加值或科技附加值驱动时,可以尽早实现碳达峰目标^[4]。同样,人口密度增加可以提高公共交通服务设施的使用率^[5],对城市减碳控碳有积极作用。低密度城市郊区碳排放远高于高密度城市中心区域^[6]。土地开发强度涉及城市不同功能组团结构特征、建筑布局及承载功能,高土地开发强度往往具有一定的混合功能性,较易形成紧凑化的城市布局,通过提高资源投入效率,降低碳排放^[7],而低土地开发强度下,土地利用粗放化、集约化发展缓慢,造成土地利用碳排放大量增加^[8]。以上研究从各自不同角度证明了城市密度与碳排放存在的线性关系。然而,新的观点认为,随着城市功能的聚集与扩散,空间结构不断重组,城市密度对于碳排放的影响是非线性的,需要叠加其它社会经济要素分析。比如,一些学者从城市复杂性系统的角度出发,对城市密度与碳排放之间的倒U型曲线进行了验证^[9-11],当城市密度水平较低时,提高密度能显著提升土地资源利用效率,降低碳强度;然而当城市密度超过一定门槛值时,过高的密度会带来交通能耗、健康及生态安全风险等问题,因此提高城市密度并非必然带来综合效益的提升。在城市密度对碳排放的影响效应上,主要讨论了空间^[12]、人口^[13]、经济^[14]及土地利用效率^[15]等各类密度指标对碳排放的直接影响及间接影响^[16]。研究范围及对象从单个城市和定性描述逐渐向城市群和定量分析转变^[17-19]。多运用计量分析方法如 STIRPAT 模型^[20]、面板回归模型^[21]、中介效应模型^[22]、脱钩发展模型和灰色关联度模型等^[23]。

综上,以往研究针对城市密度与碳排放的关系具有较多的积累,但仍有三个问题需进一步讨论:①在低碳发展评价指标上,过往研究主要囿于碳排放规模或强度的测算,缺乏基于碳排放经济及碳排放福利综合绩

效的考虑。②在城市密度对低碳发展影响效应和机制方面,既有研究侧重于从全局角度分析碳排放形成机理^[24],对同一因素影响效应时空差异的研究相对较少。例如北方城市人口密度的增加可以显著提高能源使用效率,这种影响在南方城市并不显著^[25]。③缺乏城市密度与其他经济社会等因素之间的交互作用对碳排放绩效的影响。例如,城市土地蔓延扩展会与产业结构协同作用进一步加剧环境污染,此外密度对环境的影响机制还依赖于自身的城市规模大小^[26]。因此,忽略城市密度可能与其他影响因素交互作用对碳排放的间接影响,会导致估计结果不一致,造成实际结果与虚拟结果的偏差。

本研究以长三角 41 个城市为例,基于生态经济学理论从经济、社会以及环境三个层面构建碳排放绩效综合指数,表达城市低碳发展水平,填补了城市低碳发展在社会福利评价上的缺失,拓展了碳排放绩效的内涵;其次,采用多元线性(OLS)回归、GTWR 回归,针对城市密度对碳排放绩效影响的时空差异进行深入探究;最后,利用 GeoDector,进一步探究城市密度与其他影响因子之间的交互作用,以及对碳排放绩效的潜在影响。

研究的贡献在于综合识别和量化了城市密度对碳排放绩效的全局、局部和间接影响,有助于提出效益导向的城市空间供给与管控方式,以期为建设与空间规划提供依据,并具有普适的推广价值。

1 研究方法 with 数据

1.1 变量选取

1.1.1 核心解释变量:城市密度

不同城市内人口规模、经济强度和土地扩张等不同,导致城市密度对碳排放绩效的影响效应及机制存在显著差异。人口密度对碳排放绩效的影响主要通过生产及生活方式来实现。人口密度增高,虽然单位用地的能源消耗碳排放增加,然而人口聚集抵消了土地低密度蔓延造成的交通及基础设施能耗^[27]。经济聚集较高的城市会促使产业不断升级,逐步淘汰能耗高、碳排放量大的产业,进而促进区域低碳发展,相反经济欠发达城市更需要以低碳发展为导向倒逼经济增长方式转型^[28]。城市空间密度提高可以优化城市居住空间和通勤效率,间接影响城市居民碳排放;然而对于已经达到较高紧凑空间形态的城市,过度聚集会加剧人地关系矛盾反而导致碳排放的上升^[29]。因此,考虑密度的多样性及其与碳排放绩效之间的关系,本文选取人口密度、经济密度和空间密度构建城市密度指标体系,具体计算方法见表 1。

表 1 城市密度指标

Table 1 Indicators of urban density

城市密度 Urban density	缩写 Abbreviation	描述 Description
人口密度 Population density	PD	城镇年末常住人口/建成区面积
经济密度 Economic density	ED	第二第三产业产值/建成区面积
空间密度 Road network density	RD	路网长度/建成区面积

1.1.2 被解释变量:碳排放绩效

碳排放绩效是衔接“双碳”目标和经济高质量发展的关键点,包括单要素指标和全要素指标^[30]。单要素指标多以人均碳排放、碳生产率和碳强度来评价低碳发展水平。由于碳排放绩效表达了城市各项活动中的要素投入与期望产出效率,是资本、劳动力等经济要素投入下共同作用的结果,故在测算过程中需要突出指标的“全要素”特点^[31]。随着数据包络分析法(DEA)的不断发展,学者将经济生产过程中的能源消费、资本投资、劳动力作为投入指标计算 GDP 期望产出与 CO₂非期望产出,即全要素碳排放绩效^[32]。然而无论是单要素指标还是多要素指标,都是立足新古典主义经济学的角度来看待环境问题,难以表征社会层面非市场性福利的产出^[33]。因此本文立足生态经济学视角,基于城市绿色发展的内涵,将碳排放绩效指数定义为能源投入(即碳排放)最小化及经济社会福利产出最大化,由碳经济绩效和碳福利绩效分指标构成,分别采用国内生产总值及人类发展指数(HDI)与 CO₂总排放量的比值衡量碳排放绩效,测度公式如下:

$$CEP = \frac{1}{2}CEE + \frac{1}{2}CSE \quad (1)$$

式中, CEP 为碳排放绩效综合指数(下简称碳排放绩效), CEE 为碳排放经济绩效, CSE 为碳排放福利绩效。

$$CEE = \frac{GDP}{CE} \quad (2)$$

$$CSE = \frac{HDI}{CE} \quad (3)$$

式中, CE 为碳排放量, 衡量能源投入; GDP 为国内生产总值, 衡量经济产出; HDI 为人类发展指数, 衡量社会福利产出。

$$HDI = \frac{1}{3}(H_1 + H_2 + H_3) \quad (4)$$

人类发展指数(HDI)由预期寿命、教育水平和收入水平三个基本指标综合而成^[34]。预期寿命数据仅限省级层面, 城市层面难以获得。且根据以往研究, 医疗水平与预期寿命显著相关。因此, 本研究选择每万居民平均医疗床位数代替寿命指标(H_1); 教育指标(H_2)用每万人在校生数衡量; 收入指标(H_3)用人均收入水平来衡量。三个社会福利指标同样重要, 权重相等, 并根据公式(4)计算。

1.1.3 其他控制变量

除城市密度之外, 影响碳排放绩效的因素还有很多, 在参考前人研究的基础上, 基于数据的可比性与可获得性, 选取以下指标作为控制变量:

一是能源消耗水平(ENG), 反映人类发展和消费方式的转变, 且与节能减排技术水平密切相关^[35], 以人均能源消耗量衡量。二是产业结构(INS), 第二产业碳排放较高, 产业的结构优化促进城市向更加可持续发展的方向发展, 以“第三产业增加值与第二产业增加值之比”来衡量^[36]。三是技术进步(TECH), 可以提高能源效率, 提升碳绩效水平^[37], 以科技投入占国内生产总值的比重衡量。

1.2 研究方法

1.2.1 标准差椭圆

标准差椭圆模型是一种基于空间统计方法, 可视化描述研究对象空间分布多维特征的统计学方法。该模型能基于空间数据的标准差构建椭圆, 通过椭圆面积形状、中心位置迁移路径、分布形状变化及各椭圆空间重叠面积来研究对象或变量的空间分布、发展重心迁移、各组数据的空间关联性大小及演变特征, 计算方法见参考文献^[38-39]。

1.2.2 GTWR 回归模型

长三角地区城市发展速度较快, 且各地区发展不均衡, 城市密度对碳排放绩效的影响在时空上存在差异。时空地理加权回归模型(GTWR)在地理加权回归模型上引入了时间维度, 利用区域面板数据, 充分考虑时间和空间的非平稳性^[40], 并进行局部回归参数估计。基于此, 本文在比较 OLS、GWR、MGWR 和 GTWR 回归模型的结果基础上, 采用时空地理加权回归(GTWR)分析不同城市密度对碳排放绩效指数的影响效应, 并对城市密度分指标的重要性及其对碳排放绩效指数影响的时空差异进行分析, 模型公式如下:

$$CEP_i = \beta_0(u_i, v_i, t_i) + \sum_{k=1}^k \beta_k(u_i, v_i, t_i) x_{ik} + \varepsilon_i \quad (5)$$

式中, CEP 为因变量, x_i 为自变量, 包括核心解释变量和控制变量; i 为样本地区; u, v 为样本地区坐标; t 为时间; $\beta_0(u_i, v_i, t_i)$ 为截距项; $\beta_k(u_i, v_i, t_i)$ 为因变量估计系数, 即第 i 个样本点的第 k 个回归参数; $\beta > 0$ 表示解释变量对被解释变量呈正相关, 反之则为负相关; ε_i 为随机扰动项。

1.2.3 GeoDetector

利用地理探测器中的因子探测器分析城市密度以及控制变量单因子对碳排放绩效的解释力, 利用交互探测器分析城市密度与其他环境因素之间是否存在交互作用, 进而增加或降低城市密度对碳排放绩效的解释

力,探测结果用 q 统计量来表示,计算公式如下^[41]。

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{i=1}^L N_i \sigma_i^2 \quad (6)$$

交互探测主要是通过计算自变量 x_1 与 x_2 对于因变量 y 的 q 值及与 x_2 交互后对 y 的 q 值,然后比对单因子的 q 值与双因子交互作用后的 q 值,以此判定交互作用的类型和方向,其交互关系可以分为 5 类,具体见表 2。

表 2 自变量交互作用分类

Table 2 Types of interaction between two independent variables

判定依据 Judgment basis	交互作用类型 Interaction type	判定依据 Judgment basis	交互作用类型 Interaction type
$q(x_1 \cap x_2) < \text{Min}(q(x_1), q(x_2))$	非线性减弱	$q(x_1 \cap x_2) = q(x_1) + q(x_2)$	独立
$\text{Min}(q(x_1), q(x_2)) < q(x_1 \cap x_2) < \text{Max}(q(x_1), q(x_2))$	单因子非线性减弱	$q(x_1 \cap x_2) > q(x_1) + q(x_2)$	非线性增强
$q(x_1 \cap x_2) > \text{Max}(q(x_1), q(x_2))$	双因子增强		

1.2.4 Sigmoid 标准化

本文选取的数据类型为断点年份截面数据,与传统标准化方法比较,Sigmoid 函数标准化不会改变指标大小的排序,处理后的数据更接近正态分布,同时解决同一指标时间序列差距较大造成的计算结果不显著问题。因此,采用 Sigmoid 函数的标准化方法对数据进行无量纲处理^[42-43]。

1.3 研究区域及数据来源

长三角城市群是中国城镇聚集程度及城市密度最高的城镇化地区,也是中国经济发展中的重要引擎。近二十年来,区域整体发展活力及经济水平较高,城市之间联系不断增强。但城镇化的进程加快,致使城市无序蔓延、高碳经济增长模式惯性发展,化石能源消费比重偏高,区域碳排放总量持续增加。人均碳排放从 2000 年的 3.92t 增加至 2020 年的 8.92t。经济及社会福利差距较大,如安徽省近年来碳排放总量与浙江齐平,但国内生产总值及可支配收入仅为后者的 40% 及 54%。面对达峰时间的日益趋近和推进经济持续发展的现实诉求,《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》提出建设长三角生态绿色一体化发展示范区,提升资源配置能力和土地利用效率,统筹推进生态环境高水平保护与经济高质量发展。因此,深入探究长三角城密度对碳排放绩效的影响机制不仅对于本区域低碳发展提供科学依据,同时也为全国其他地区和城市“双碳”目标推进起到引领和示范效应。

因此,本研究选择长三角 41 市作为研究对象,并以 2000、2005、2010、2015 和 2020 年五个断点年份作为研究样本。本研究中建成区面积来源于中国科学院资源与环境科学与数据中心发布的土地利用栅格数据,选取城镇用地以及其它建设用地作为基础数据,并利用 ArcMap 10.6 软件作为图像处理工具,通过矢量行政边界掩膜提取探究区域数据获得;碳排放数据根据《IPCC 国家温室气体列表指南》中的公式及系数计算,能源数据来自于中国碳排放数据库;国内生产总值、城镇年末常住人口等其他数据均来源 2000—2020 年《城市建设统计年鉴》及各省市统计年鉴。部分缺失数据通过插值法进行补充,并进行标准化处理以消除不同量纲的影响。

2 结果与分析

2.1 城市密度与碳排放绩效的时空演变

2.1.1 时间演变特征

城市密度与碳排放绩效水平显著提高,但不同时期二者的提升速度存在差异,如图 1。2000 年至 2010 年,长三角区域一体化发展规划持续推进,城市群内部基础设施逐步完善,受政府干预和市场要素配置的影响,这一阶段建成区人口及经济要素不断集聚,城市密度增速较快,经济及社会福利水平逐步提升。但城镇人

口增长带来生活能源碳排放随居民经济活动及交通出行频率的提高而大幅增长,导致碳排放绩效水平提升缓慢。2010年至2020年,制造业升级,低端劳动力需求减弱,城镇化速度相对于本世纪初期逐步放缓,城市边界扩张和有序蔓延相对于过去逐步得到控制,人口规模和城市密度增速也相应趋缓。然而,随着区域连通性提高,产业集群分工体系逐步完善,城际联系更加紧密,社会经济综合效益提升,碳排放绩效水平提升速度明显加快。总体而言,过去20年中,城市密度与碳排放绩效变化时间上具有一定的协同性,二者发展总体趋势相同,但区域不同发展时期,两者的变化又存在一定的差异性。

2.1.2 空间分布特征

为进一步研究城市密度高低与碳排放绩效的空间分布、关联性及其差异性特征,采用标准差椭圆法从空间分布重心、范围、方向和形状4个方面深入量化城市密度与碳排放绩效的空间格局及其动态变化特征。结果如图2,过去20年,城市密度标准差椭圆的重心坐标位

于长三角的东南部区域,表现出东南高西北低的空间格局,且由于西北部城市密度增长速度更快,因此发展重心向西北迁移;椭圆外部区域,主要是安徽省西北部以及江苏省北部等地的城市密度升高,空间分布面积逐渐增大;分布方向上,以东南—西北为主要变化轴,高密度城市在长轴方向增长明显,短轴与长轴的比例波动减小,形状趋于扁平化。碳排放绩效标准差椭圆的重心坐标从西北向东南部迁移,表明东南部城市碳排放绩效的增速更快;空间分布面积缩小,高碳排放绩效城市进一步在椭圆内部集中,省际边缘城市与都市圈核心城市绩效水平差异扩大,区域碳排放绩效水平分化逐渐拉大;分布方向与城市密度相同,高碳排放绩效城市在长轴方向集聚明显,短半轴与长半轴比值增大,空间分布形状趋于圆化。

通过城市密度与碳排放绩效的标准差椭圆的比较可以看出:一方面,城市密度与碳排放绩效的空间分布格局均呈现东南—西北方向,空间分布重叠范围逐渐增大,空间关联性不断增强。另一方面,两者的重心坐标移动方向以及长半轴变化趋势相反。与东南部相比较,西北部城市密度提速更快,而碳排放绩效提升较慢。主要是由于西北部多以高耗能、高污染的工业为基础支撑产业,尤其是淮南及淮北二市高度依赖煤炭单一资源及行业的支撑,粗放式发展拖累了碳排放绩效提升。东南部城市密度升高带来碳排放绩效的显著提升,其部分大城市如杭州不断发展低碳产业和公共轨道交通;小城市如丽水、黄山等市以生态农业及旅游业为支柱,生态资源丰富,碳汇能力强。综上,受地区资源禀赋、产业结构及政策制度等因素的影响,城市密度与碳排放绩效的空间关联性存在区域差异。

2.2 城市密度对碳排放绩效的影响

为进一步揭示长三角地区城市密度各变量对碳排放绩效的影响效应及机理,本文以后者为被解释变量,前者的分指标为解释变量,并加入产业结构、技术进步以及能源水平三项指标为控制变量以提升模型拟合优度,构建回归模型。

2.2.1 GTWR 模型拟合优度检验

首先利用普通最小二乘法(OLS)模型对研究数据进行检验,结果如表3所示:解释变量方差膨胀因子(VIF)值均 <7.5 ,不存在冗余变量,模型不存在共线性问题,同时显著性检验结果显示 P 值均 <0.05 ,各解释变量均显著。进一步观察Koenker(BP)的值具有统计学上的显著性,使用稳健概率来评估解释变量的统计显著

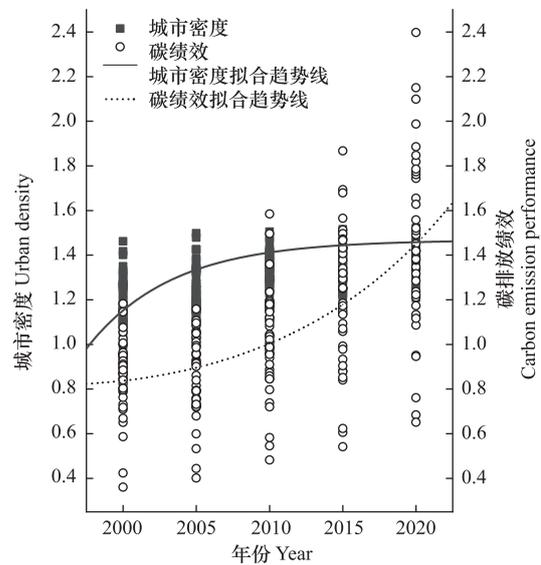


图1 城市密度与碳排放绩效时间变化趋势

Fig.1 Temporal trends in urban density and carbon emission performance

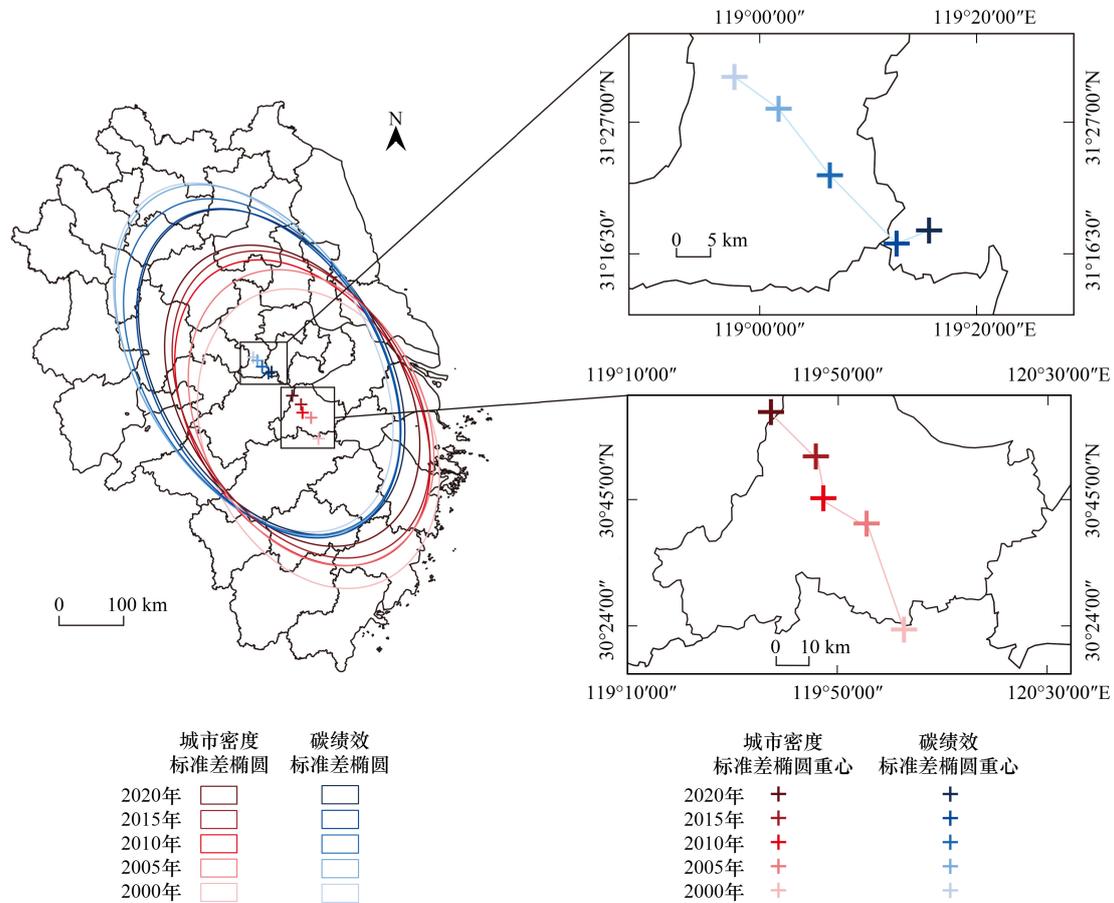


图 2 城市密度与碳排放绩效空间分布标准差椭圆比较

Fig.2 Urban density and carbon emission performance spatial distribution standard deviation ellipses

性,稳健性回归 P 值均 < 0.1 ,说明改变参数时,模型结果仍然保持比较稳定一致的解释,通过了系数稳健性检验;同时联合 F 统计量和卡方统计量结果表明模型整体具有显著性,且 $P(\text{Jarque-Bera})$ 不显著,表示该模型残差呈正态分布。

表 3 OLS 回归模型检验结果

Table 3 Regression model test results

变量 ⁽¹⁾ Variable	方差膨胀因子 VIF ⁽²⁾	T 统计量 T -statistic	P 值 P -value	稳健性回归检验 Robust T	稳健性回归 P 值 Robust P
Cons	—	2.1514	0.0326	1.9470	0.0529
PD	2.3950	-2.1314	0.0343	-2.1649	0.0316
ED	6.5600	5.1711	0.0000	5.0936	0.0000
RD	3.4440	-1.9974	0.0471	-1.7880	0.0753
TECH	1.7131	2.7681	0.0062	2.6319	0.0092
INS	1.2516	6.8167	0.0000	6.1406	0.0000
ENG	2.255 0	-2.3324	0.0207	-2.4078	0.0170

(1) Cons: 常数项 Constant; TECH: 技术进步 Technological progress; INS: 产业结构 Industrial structure; ENG: 能源消耗水平 Energy consumption level; (2) VIF: 方差膨胀因子 Variance inflation factor

OLS 回归可以在一定程度上反映城市密度对碳排放绩效存在影响,但受制于区域发展差异性,不同发展阶段及区域,城市密度对碳排放绩效的影响效应不同,因此需要引入表达空间差异性和空间依赖性的计量模

型。在此利用地理加权 (GWR)、多尺度地理加权 (MGWR) 和时空地理加权回归模型 (GTWR) 并对拟合结果进行比较分析。表 4 结果显示,各解释变量的正负影响、相对大小基本一致,验证了模型结果的可信度。除经济密度外,人口密度和空间密度的提升会显著降低碳排放绩效水平。综合考虑回归模型中核心变量的显著性、拟合优度和 AICc 值,GTWR 模型表现出更好的回归结果,因此,本研究基于该模型的回归结果展开分析。

表 4 回归模型拟合优度与结果比较
Table 4 Comparison of regression results and parameters

变量 Variable	OLS 模型 OLS Model	GWR 模型 GWR Model	MGWR 模型 MGWR Model	GTWR 模型 GTWR Model
PD	-0.308 ***	-0.703 **	-0.729 **	-0.794 ***
ED	0.305 ***	0.426 ***	0.602 **	0.442 ***
RD	-0.135 **	-0.192 *	-0.206	-0.198 ***
INS	0.826 ***	0.813 *	0.339	0.782 ***
ENG	-0.044 *	-0.031 *	-0.545	-0.042 *
TECH	2.957 ***	1.886 **	0.234 *	2.106 ***
R^2 R-squared	0.495	0.806	0.857	0.916
调整 R^2 Adjusted R-squared	0.607	0.765	0.853	0.913
阿凯克信息准则 AICc	17.704	72.964	-30.315	3.411
联合 F 统计量 F-statistic	32.366 ***	—	—	—
联卡方统计量 Chi-Squared Statistic	139.802 ***	—	—	—
Koenker (BP) 检验 P [Koenker (BP)]	34.328 ***	—	—	—
Jarque-Bera 检验 P (Jarque-Bera)	0.574	—	—	—

*、**、*** 分别表示通过 10%、5%、1% 显著水平检验; AICc: 阿凯克信息准则 Akaike information criterion

2.2.2 GTWR 回归结果分析

借助 GIS 平台对 GTWR 模型结果进行可视化,受篇幅影响,此处仅展示 2000、2010 以及 2020 年回归系数的空间分布,结果如图 3 所示: 41 个城市人口密度对碳排放绩效的影响有正有负,总体负向影响不断加强。人口密度提高对碳排放绩效的影响存在两种可能,一是集聚效应,人口密度升高能够提高公共交通分担率以及服务设施共享率,有助于经济社会发展,提升碳排放绩效水平;二是直接或间接导致城市资源消耗和环境压力倍增,成为碳排放绩效降低的主要影响因素。从影响效应时空分布及差异性上看,2000 年至 2010 年,负向影响区域主要集中在安徽省大部分地区、江苏省沿海以及浙江省会地区,正向影响区域分布在浙江省南部和江苏省内陆。2010 年至 2020 年负向影响范围扩大至浙江省中部,到 2020 年,安徽省北部人口密度对碳排放绩效的负向影响进一步加强。研究初期,长三角东南部和西北部城市人力资源空间分布不均衡,东南部城市知识密集行业占比更大,人口密度对碳排放绩效的影响主要为正向;而在西北部,随着地区发展及人口聚集,人口密度增加带来环境绩效的提升小于拥挤带来的环境绩效的降低幅度,负向影响效应增强;但西北部也有少数城市,通过积极引进高素质人才,优化人口结构,促使人口密度对碳排放绩效的影响由负转正。

经济密度升高可以显著提高碳排放绩效,经济密度对碳排放绩效的影响系数均值从 2000 年的 0.225 升高到 2020 年的 0.724,正向影响不断增强。近年来,长三角地区产业结构不断向着高端化发展,以研发设计、金融服务和信息传输为代表的高技术产业及生产性服务业比重上升,经济集聚度不断提高,碳强度同比下降,经济密度对碳排放绩效的正向影响效应趋于增强。从影响效应的时空变化上看,2000 年至 2010 年,西北部大部分城市经济密度对碳排放绩效影响为负,而在长三角其他地区这种影响为正;2010 年至 2020 年,随着城市发展水平提高,东南部经济密度对碳排放绩效的正向影响效应进一步增强,西北部也逐渐由负向转为正向,呈现 V 型反转,西北部回归系数升高幅度较东南部更为明显。这意味着,在西北部地区,提升经济密度可以比东南部地区获得更好的实施效果。与东南地区相比西北部城市多为资源依赖型城市,经济发展水平相对较低,现存大量制造业仍然延续着传统的粗放型发展方式,在此背景下,提升经济密度对环境污染的改善作用更

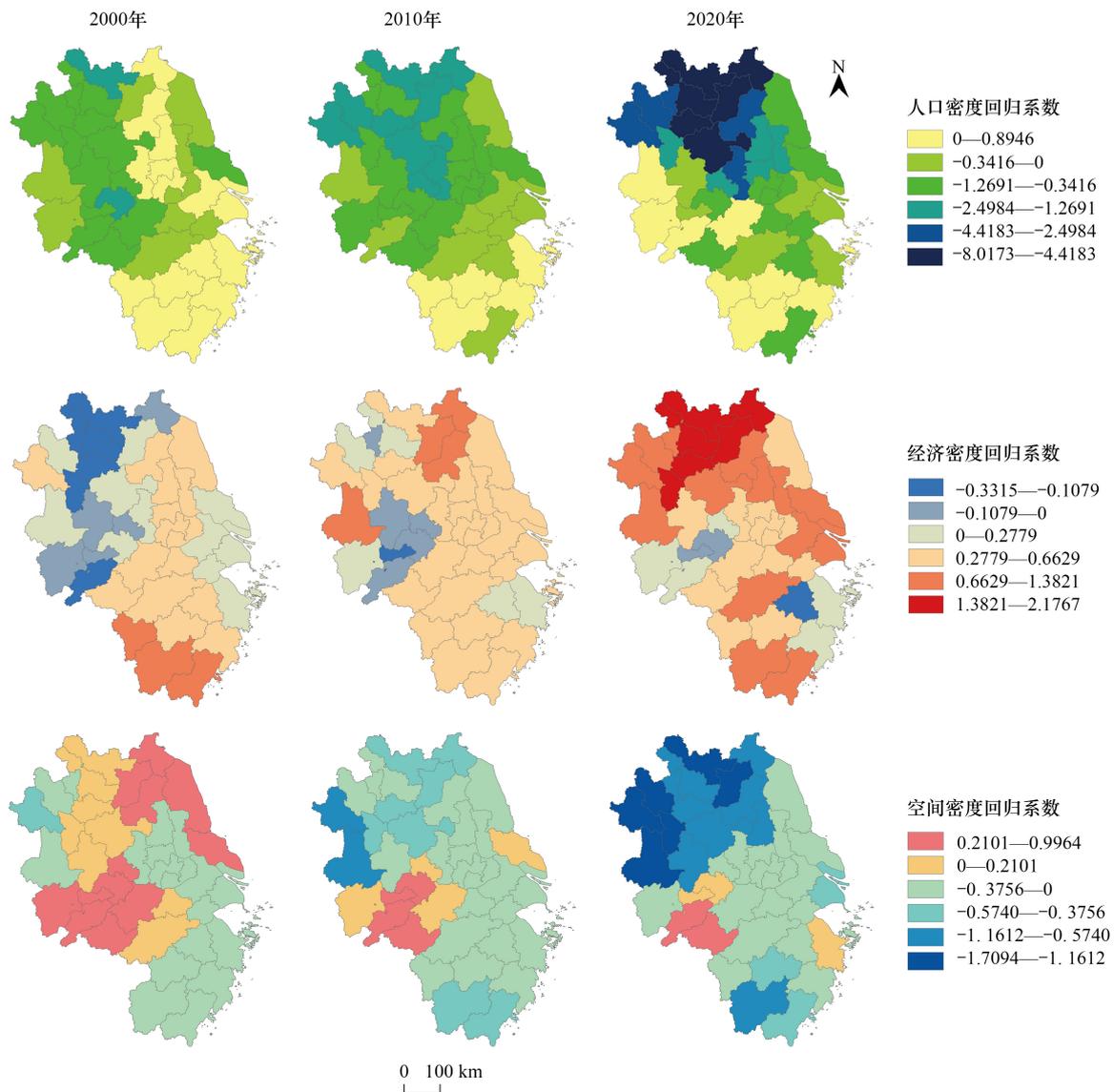


图3 2000—2020年GTWR回归系数的空间格局

Fig.3 The spatial pattern of GTWR regression coefficients from 2000 to 2020

容易发挥出来。

空间密度对碳排放绩效的影响主要表现为负向,影响系数均值由2000年的0.06降低至2020年的-0.49。长三角地区城市空间密度相对较高,但多中心组团和以沿交通干线为主的扩张模式下,城市空间结构趋于复杂,空间形态破碎化加剧,职住功能分离到不同斑块,交通能耗相应升高,导致负向影响效应逐渐增大。影响效应时空差异性上,2000年至2010年城市空间密度对西北部地区碳排放绩效的影响由负向转为正向,东南部地区影响效应增大,但仍以负向为主。2010年后西北负向影响进一步加深,其中安徽省西北部空间密度对碳排放绩效表现出强负向影响。研究初期,西部地区小城市主要以农业、旅游业或小商品等产业为主导,空间密度相应较低,城市组团分散,单位城市空间的碳排放总体偏低。之后,伴随该区域城镇化的不断深入,城市扩张中其他用地类型向建设用地转变,生态及耕地面积降低,打破碳循环,碳排放升高;与此同时,空间密度增高,高能耗建筑密集程度也不断增加,公共空间品质降低,最终导致影响系数由正转负。因此,未来发展的重心应针对不同区域发展阶段,聚焦城市内部空间及功能结构调整,降低单位土地面积下的碳强度。

2.2.3 交互探测结果分析

表 5 给出了各影响因素对碳排放绩效的个体效应强度(q 统计量)。影响因子的影响强度由大到小依次为:产业结构>经济密度>技术进步>空间密度>人口密度>能源消耗水平。这与 GTWR 回归结果中核心变量的影响的相对大小排序有所不同。这是由于城市密度与其他影响因素交互作用所导致。

表 5 影响因子地理探测结果

Table 5 Effect intensity of impact factors of carbon performance

变量 Variable	PD	GD	RD	TECH	INS	ENG
q 统计量 q-statistic	0.171	0.319	0.209	0.284	0.356	0.153
P 值 P-value	0.003	0.000	0.001	0.002	0.000	0.010
解释力排序 Rank	5	2	4	3	1	6

进一步计算影响因子之间的交互作用对碳排放绩效的解释力强弱。交互探测结果可以分为两类,非线性增强(NE)和双因子增强(BE)。

由图 4 可知,与单因子相比,城市密度与其他影响因子交互后对碳排放绩效的影响程度相对于单个因子均有明显增强,个体影响因素的 q 统计量为 15.3%至 35.6%,而交互作用解释力为 39.1%至 56.7%。表明各影响因素对碳排放绩效的影响存在一定的关联性,不存在相互独立的影响因子,各影响因子交互作用后均大于单一因子的作用。城市密度各项指标与能源消耗水平、产业结构以及技术进步等影响因素协同作用,共同影响碳排放绩效。

经济密度与产业结构的交互作用对碳排放绩效的解释力度最大,可以解释 56.7%的碳排放绩效变化。一方面产业结构升级促进城市经济密度不断提升,促使城市空间结构不断优化,而优化了的城市空间结构则为新兴产业提供必要的空间载体,再次推进产业的下一步升级。因此经济密度与产业结构优化的协同作用是影响碳排放绩效空间分布差异的主导力量。

由图 4 和图 5 可知,除 PD∩INS 为双变量增强外,人口密度与其他影响因子的交互作用均为非线性增强,相对于单因子作用解释力显著增强。因此调节人口密度重点在于通过优化人力资本,进而通过技术、知识等效应的传播,转变消费意识、实现技术扩散,减少人均能耗、推动低碳技术进步,促进城市低碳发展水平提高。

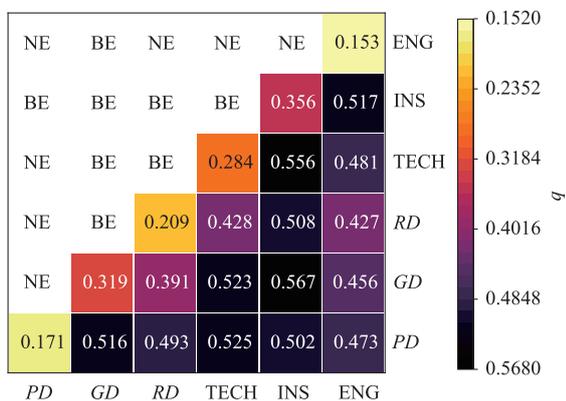


图 4 影响因子交互作用对碳排放绩效的影响

Fig.4 Interactive effects of impact factors of carbon emission performance

NE: 非线性增强 Nonlinear enhance; BE: 双因子增强 Bio-enhance; ENG: 能源消耗水平; INS: 产业结构; TECH: 技术进步; PD: 人口密度; ED: 经济密度; RD: 空间密度

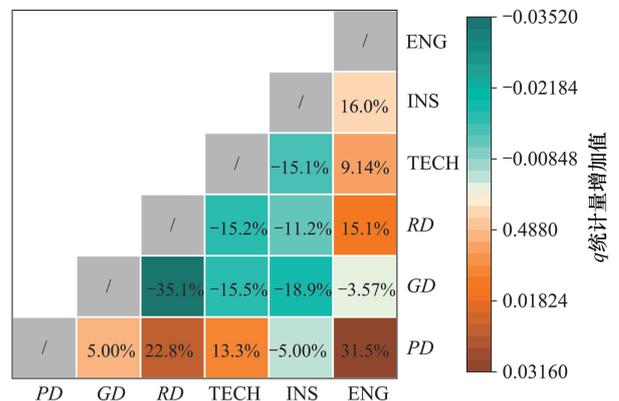


图 5 交互效应强度与个体效应强度之和的具体差值

Fig.5 The specific difference between interactive effect intensity and the sum of two individual effect intensity

图中/表示无此项;ENG: 能源消耗水平; INS: 产业结构; TECH: 技术进步; PD: 人口密度; ED: 经济密度; RD: 空间密度

3 结论与建议

3.1 结论

本文立足生态经济学中的生态效益理论,构建城市密度指标体系,以碳排放绩效作为城市低碳发展的评价标准,测算碳排放绩效综合指数,利用标准差椭圆及地理加权回归模型分析城市密度与碳排放绩效指数的空间格局、变化趋势及前者对后者的影响效应。结论如下:

长三角地区城市密度与碳排放绩效水平显著提高,但不同发展阶段,城市密度的变化存在差异,碳排放绩效也相应表现出不同特征,2000年至2010年,城市密度的增速大于碳排放绩效的增速,2010年至2020年城市密度增速减慢,而碳排放绩效增速加快。城市密度与碳排放绩效的空间分布格局具有一致性,均呈现东南—西北方向分布,且二者之间的空间关联性不断增强。城市密度重心坐标由东南部逐渐向西北部移动;且由于区域核心城市与边缘城市绩效水平差异分化,碳排放绩效空间分布重心由西北部向东南部城市移动。

城市密度对碳排放绩效分布的影响均存在明显的时空非平稳性,但其效应的空间变异程度及所呈分布模式互有区别。时间演变上,人口密度和空间密的负向影响不断扩大,经济密对碳排放绩效的正向影逐渐增强。空间差异上,人口密度对碳排放绩效的影响有正有负,以安徽省为主的西北部区域人口密度对碳排放绩效的影响为负,而以苏南、上海以及浙江省为主的东南部区域人口密度对碳排放绩效的影响为正;经济密度对西北部城市碳排放绩效的正向影响较东南部更为明显;空间密度对西北部城市碳排放绩效的影响先促进后抑制,对东南部影响为负且方向基本不变。

城市密度与其他影响因子存在非线性增强和双因子增强两种交互作用类型,与单因子影响因素相比,交互作用对碳排放绩效的解释力均增强。区域碳排放绩效的变化不是某个影响因子均匀、独立、直接作用的结果,而是城市密度与能源消耗水平、产业结构以及技术进步等影响因素协同作用的产物,其中经济密度与产业结构优化的协同作用是影响碳排放绩效空间分布差异最主要的因素,而人口密度与其他影响因子的交互效应强度与个体效应强度之和相比增强显著。

3.2 建议

上述研究表明,城市密度能够显著影响碳排放绩效,但人口、经济以及空间密度对长三角地区41个城市的影响效应各不相同,在空间上有一定的分异性。根据城市密度与碳排放绩效的空间关联特征分析与规律把握,各城市应明确发展目标定位,科学编制城市及土地利用发展规划,设计完善减排增效制度,通过土地利用方式调整,实现经济增长、社会福利提升与低碳减排的平衡发展。具体建议如下:

在规划层面,把握城市各时期发展和建设重点,采用多指标体系的测度方法,依据用地类型和区位条件确定开发强度、功能定位及用地结构等控制指标,对城市密度进行总体引导及分区管理。其中,东南部城市应充分发挥区域核心城市示范作用,强化城市间政策协同,完善城市群内部碳减排动态联动机制,引导区域城市碳排放绩效不断提升。西北部城市应优化城市密度指标,通过调整用地结构、功能配置优化建成区土地集聚效益,完善密度管控与多系统协调机制,避免指标制定与资源调配过程脱节。

在政策层面,考虑各城市的实际发展,制定差异化和针对性策略,精准施策。如受人口密度影响较大的区域,应制定具有科学性和前瞻性的人口发展政策,通过户籍、土地、社会保障等政策修订调整人口密度,避免短期内人口快速集聚导致城市运行效率降低;设定适宜发展水平的经济密度指标,通过金融及税收优惠政策实现建设用地的集约化利用,通过加强高技术产业引进来限制高污染高排放企业落地等政策;受空间密度影响较大的区域,秉承城市理性与精明增长理念,根据城市发展阶段及地区差异,发挥土地扩张及收缩政策的引导性,促使城市集约化发展。后续制定碳减排政策时,应对城市密度与其他因素可能产生的协同或拮抗作用进行预评估,以期提高政策措施的整体协同性,强调跨部门治理协作的必要性,推动政策效应最大化。

城市密度对碳排放绩效的影响作用是一种多样性、复杂性的动态过程,尽管本研究选取了自然、社会、经济等因素构建综合分析模型,但研究主要基于城市尺度分析,不可避免的忽略了县级、分区尺度甚至是网格尺

度的空间格局演化规律以及部分微观影响因素的变化。同时,本研究虽然重点讨论了城市密度影响效应的时空差异,但缺乏关于碳排放绩效异质性以及密度的溢出效应的探讨,致使影响效应及机制量化分析存在局限性。今后研究可以尝试细化研究尺度,构建竖向对比分析,以确保研究结论更加贴合实际。

参考文献(References):

- [1] 郑德高,董淑敏,林辰辉.大城市"中密度"建设的必要性及管控策略.国际城市规划,2021,36(4):1-9.
- [2] 杨俊宴,史宜.城市规划语境下密度研究的源流演化与展望.国际城市规划,2023,38(2):1-7.
- [3] 冯薇,赵荣钦,谢志祥,丁明磊,肖连刚,孙锦,杨青林,刘天昊,尤增涛.碳中和目标下土地利用碳排放效率及其时空格局——以黄河流域72个地级市为例.中国土地科学,2023,37(1):102-113.
- [4] 郭施宏,高明.城市土地经济密度与碳排放的EKC假说与验证——基于省际静态与动态面板数据的对比分析.南京农业大学学报(社会科学版),2017,17(1):80-90+146-147.
- [5] 田成诗,陈雨.人口虹吸、集聚与城市能源效率——以沪苏浙皖地区为例.统计研究,2022,39(5):93-106.
- [6] Lee S, Lee B. The influence of urban form on GHG emissions in the U.S. household sector. Energy Policy, 2014, 68: 534-549.
- [7] 张苗,吴萌.土地利用对碳排放影响的作用机制和传导路径分析——基于结构方程模型的实证检验.中国土地科学,2022,36(3):96-103.
- [8] 张玥,代亚强,陈媛媛,柯新利.土地利用隐性转型与土地利用碳排放空间关联研究.中国土地科学,2022,36(6):100-112.
- [9] 周璟茹,赵华甫,吴金华.关中城市群土地集约利用与碳排放关系演化特征研究.中国土地科学,2017,31(11):55-61+72.
- [10] 曾永明,张利国.新经济地理学框架下人口分布对经济增长的影响效应——全球126个国家空间面板数据的证据:1992-2012.经济地理,2017,37(10):17-26.
- [11] 袁凯华,甘臣林,杨慧琳,朱庆莹.建设用地扩张与碳排放增长的EKC验证及特征分解研究——以武汉市为例.中国土地科学,2019,33(1):56-64.
- [12] 杨文越,曹小曙.多尺度交通出行碳排放影响因素研究进展.地理科学进展,2019,38(11):1814-1828.
- [13] Ribeiro V H, Rybski D, Kropp P J. Effects of changing population or density on urban carbon dioxide emissions. Nature Communications, 2019, 10(1):1-9.
- [14] 祁慧博,沈欣懿,龙飞,刘梅娟,高晓玮.浙江省县域碳排放的时空格局与影响因素研究.长江流域资源与环境,2023,32(4):821-831.
- [15] 卢新海,李佳,刘超,匡兵,蔡大伟,侯娇.中国城市土地绿色利用效率驱动因素及空间分异.地理科学,2022,42(4):611-621.
- [16] 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.资源科学,2022,44(7):1373-1387.
- [17] 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.经济地理,2021,41(6):187-195.
- [18] 候勃,岳文泽,王腾飞.中国大都市区碳排放时空异质性探测与影响因素——以上海市为例.经济地理,2020,40(9):82-90.
- [19] 郭艺,曹贤忠,魏文栋,曾刚.长三角区域一体化对城市碳排放的影响研究.地理研究,2022,41(1):181-192.
- [20] 陈占明,吴施美,马文博,刘晓曼,蔡博峰,刘婧文,贾小平,张明,陈洋,徐丽笑,赵晶,王思元.中国地级以上城市二氧化碳排放的影响因素分析:基于扩展的STIRPAT模型.中国人口·资源与环境,2018,28(10):45-54.
- [21] 信猛,陈菁泉,彭雪鹏,师岚,钱辉.农业碳排放驱动因素——区域间贸易碳排放转移网络视角.中国环境科学,2023,43(3):1460-1472.
- [22] 屈小娥,骆海燕.中国对外直接投资对碳排放的影响及传导机制——基于多重中介模型的实证.中国人口·资源与环境,2021,31(7):1-14.
- [23] 杨浩,卢新海,匡兵,侯娇.城市紧凑度与碳排放强度的时空互动关系及驱动因素——以长株潭城市群为例.长江流域资源与环境,2021,30(11):2618-2629.
- [24] 何文举,张华峰,陈雄超,颜建军.中国省域人口密度、产业集聚与碳排放的实证研究——基于集聚经济、拥挤效应及空间效应的视角.南开经济研究,2019(2):207-225.
- [25] Fei F, Dai S, Bo Y, Ke H. Urban density, directed technological change, and carbon intensity: An empirical study based on Chinese cities. Technology in Society, 2023, 72: 102151.
- [26] 陈阳,孙婧,逯进.城市蔓延和产业结构对环境污染的影响.城市问题,2018(4):18-25.
- [27] 陈乐,李郇,姚尧,陈栋胜.人口集聚对中国城市经济增长的影响分析.地理学报,2018,73(6):1107-1120.
- [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.中国人口·资源与环境,2020,30(4):95-106.
- [29] 孙宏日,刘艳军,周国磊.东北地区交通优势度演变格局及影响机制.地理学报,2021,76(2):444-458.

- [30] 王少剑, 高爽, 黄永源, 史晨怡. 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. 地理学报, 2020, 75(6): 1316-1330.
- [31] 程钰, 张悦, 王晶晶. 中国省域碳排放绩效时空演变与技术创新驱动研究. 地理科学, 2023, 43(2): 313-323.
- [32] 王凯, 关锐, 胡鸣镝, 李娴, 甘畅. 数字经济与碳排放绩效: 以中国 276 个城市为例. 环境科学研究, 2023, 36(9): 1824-1834.
- [33] 诸大建, 刘国平. 碳排放的人文发展绩效指标与实证分析. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(5): 73-79.
- [34] Wang S, Wang J, Fang C, Li S. Estimating the impacts of urban form on CO₂ emission efficiency in the Pearl River Delta, China. *Cities*, 2019, 85: 117-129.
- [35] 何建坤, 苏明山. 应对全球气候变化下的碳生产率分析. 中国软科学, 2009(10): 42-47+147.
- [36] 辛晓华, 吕拉昌. 中国主要城市技术创新影响环境污染的空间分异与机理. 地理科学, 2021, 41(1): 129-139.
- [37] 邵帅, 张可, 豆建民. 经济集聚的节能减排效应: 理论与中国经验. 管理世界, 2019, 35(1): 36-60+226.
- [38] 贾鹏, 胡燕, 匡海波. 全国空港客货运格局的时空演化及驱动机制研究. 系统工程理论与实践, 2019, 39(5): 1198-1211.
- [39] 马淑燕, 赵作权, 赵紫威, 白冰. 2000-2019 年中国航空客运格局演变及其影响因素研究. 地理科学, 2023, 43(6): 1011-1021.
- [40] Huang B, Wu B, Barry M. Geographically and temporally weighted regression for modeling spatio-temporal variation in house prices. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(3): 383-401.
- [41] 陈田田, 黄强, 王强. 基于地理探测器的喀斯特山区生态系统服务关系分异特征及驱动力解析——以贵州省为例. 生态学报, 2022, 42(17): 6959-6972.
- [42] 俞立平, 阮先鹏, 吴贤豪, 吴凌挺. 基于 Sigmoid 函数的文献计量指标评价标准研究. 情报杂志, 2020, 39(9): 176-182.
- [43] 俞立平, 宋夏云, 王作功. 评价型指标标准化与评价方法对学术评价影响研究——以 TOPSIS 评价方法为例. 情报理论与实践, 2020, 43(2): 15-20+54.