

doi: 10.12097/gbc.2023.07.036

长江三角洲城市群碳排放及其影响因素的多尺度空间关系研究

朱一姝, 吴涵宇*, 马明, 徐瑶瑶, 马灿璇

ZHU Yishu, WU Hanyu*, MA Ming, XU Yaoyao, MA Canxuan

中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016

Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China

摘要: 在推进生态文明建设的新时代背景下, 探究碳排放的分布规律、了解碳排放的驱动因素, 对因地制宜制定减排政策、促进区域高质量发展具有十分重要的意义。长三角城市群是中国经济发展最活跃的区域之一, 同时也面临着日益严峻的碳排放问题。以长三角城市群碳排放量为研究对象, 以县域为研究尺度, 应用莫兰指数、冷热点分析等空间分析方法, 挖掘该区域碳排放的空间分布规律, 并基于 MGWR 模型分析该区域碳排放及其影响因素的多尺度空间关系。结果表明: ①长三角城市群碳排放的空间上存在显著的 H-H (高-高) 型集聚和 L-L (低-低) 型集聚; ②长三角城市群碳排放的冷点主要分布在安徽省宣城市 and 安庆市, 热点主要分布在上海市及苏南地区; ③GPP、道路密度、GDP、产业占比等在全局范围内对碳排放产生不同影响, NDVI、人口密度、用电量在局部范围内对碳排放产生不同影响。道路密度、GDP、用电量越大对碳排放的正向影响越大, 第三产业占比越小对碳排放的负面影响越大。提出通过优化交通路线、鼓励绿色出行、加强道路监管等减少高密度交通网带来的碳排放, 通过优化城镇产业布局、升级产业结构、加快技术升级等减少因产业结构带来的影响, 通过引导劳动力合理转移、扩大城市绿化面积、提升区域固碳能力等减少碳排放。

关键词: 长江三角洲城市群; 碳排放; 空间异质性; 空间尺度; 影响因素; 环境地质调查工程

中图分类号: X141; X171 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2024)07-1233-10

Zhu Y S, Wu H Y, Ma M, Xu Y Y, Ma C X. Multi-scale spatial relationship between carbon emissions and influencing factors in the Yangtze River Delta. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(7): 1233–1242

Abstract: In the context of the new era of promoting the construction of ecological civilization, it is of great significance to explore the distribution pattern of carbon emissions and understand the driving factors of carbon emissions, in order to formulate emission reduction policies in accordance with local conditions and promote the high-quality development of the region. The Yangtze River Delta urban agglomeration is one of the most active regions in China's economic development, and at the same time, it is also facing the increasingly serious problem of carbon emissions. Taking the carbon emissions of the Yangtze River Delta urban agglomeration as the research object and the county as the research scale, we apply the spatial analysis methods such as Moran's I, cold and hot spot analysis to excavate the spatial distribution of carbon emissions in the region and analyze the multi-scale spatial relationship between carbon emissions and their influencing factors in the region based on the MGWR model. The following results are drawn: ① There are significant H-H (high-high) clustering and L-L (low-low) clustering of carbon emissions in the Yangtze River Delta urban agglomeration; ② The cold spots of carbon emissions in the Yangtze River Delta urban agglomeration are mainly distributed in Xuancheng and Anqing cities in Anhui Province, while the hot spots are mainly distributed in Shanghai, as well as in the southern part

收稿日期: 2023-07-31; 修订日期: 2024-03-07

资助项目: 中国地质调查局项目《云平台地质调查南京地调中心节点运行维护与网络安全保障》(编号: DD20230705)和《淮河流域水文地质与水资源调查监测》(编号: DD20230079)

作者简介: 朱一姝(1992-), 女, 硕士, 工程师, 从事 GIS 技术与应用研究。E-mail: zyishu@mail.cgs.gov.cn

* 通信作者: 吴涵宇(1984-), 男, 高级工程师, 从事信息化技术与管理研究。E-mail: whanyu@mail.cgs.gov.cn

of Jiangsu Province; ③ GPP, road density, GDP, the proportion of the primary, secondary and tertiary industry have different impacts on carbon emissions on the global scale, and NDVI, population density and electricity consumption have different effects on carbon emission in local scale. It is also concluded that the greater the road density, GDP and electricity consumption, the greater the positive impact on carbon emissions, and the smaller the proportion of tertiary industry, the greater the negative impact on carbon emissions. The paper also puts forward several policy suggestions to reduce carbon emissions in the Yangtze River Delta urban agglomeration, including reducing carbon emissions due to high-density transportation network by optimizing transportation routes, encouraging green travel, and strengthening road supervision, etc., reducing the impact due to industrial structure by optimizing the industrial layout of towns and cities, upgrading the industrial structure and accelerating the technological upgrading, and reducing carbon emissions by guiding the reasonable transfer of labor force, expanding the greening area of the cities and upgrading the region's solid state capacity, etc. to reduce carbon emissions.

Key words: Yangtze River Delta; CO₂ emission; spatial heterogeneity; spatial scale; influencing factors; environment geological survey engineering

随着温室气体的累积, 气候变暖正严重威胁着人类赖以生存的环境(许吟隆等, 2020)。减少 CO₂ 排放已成为日益严峻的全球性问题。中国是世界上最大的碳排放国, 碳排放量约占全球的 28%。伴随着经济持续增长, 减排压力日益增大。长江三角洲城市群(以下简称“长三角城市群”)是中国经济增长的引擎之一, 也是全国最大的经济实体(张仁开, 2017)。作为经济发展最前沿的地区(韩传峰等, 2022), 长三角城市群过去 30 年经历了快速的城市化和工业化, 能源消耗激增、产业结构不协调等导致碳排放量高居不下。面对经济增长和节能减排的双重压力, 迫切需要明确碳排放空间分布规律, 探究碳排放与影响因素间复杂的空间关系。同时, 长三角地区地貌类型丰富, 以丘陵、平原为主, 拥有通江达海、承东启西、联南接北的区位优势, 推动绿色低碳循环发展的示范及引领作用突出(田时中, 2024)。此外, 长三角城市群人口密集、劳动力丰富、社会活力高, 作为中国第一梯队的城市群(单菁菁等, 2022), 其碳排放和影响因素的研究可以为其他城市群相关研究提供理论和方法借鉴, 更为相关减排政策的制定提供信息。

目前, 学者们针对长三角城市群碳排放及其影响因素的时空关系进行了大量研究。Zha et al. (2022)评估了 2006—2020 年长三角的碳排放, 指出发展数字经济可以有效地降低当地和周边地区的碳排放强度。Song et al. (2015)基于对数平均迪氏指数模型, 定量分析了长三角地区碳排放的驱动因素, 发现经济规模对碳排放增加的驱动作用最大, 并且能源强度是碳排放的重要制约因素。Zhu et al. (2021)认为, 优化产业结构不仅可以在保持经济高

速增长的同时减少碳排放量, 还会显著降低能源强度和提高生态效率。Sun et al. (2020)通过扩展 STIRPAT (Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence and Technology)模型对长三角交通运输碳排放进行了分析, 发现人口规模、国内生产总值 (Gross Domestic Product, GDP)、民用车辆保有量、能源强度、客运、货运周转量等是影响交通运输碳排放的关键因素。

然而, 现有的研究模型大多从全局性出发, 空间位置的作用没有得到应有的重视, 导致估计可能存在偏差。例如, OLR (Ordinary Logistic Regression) 作为全局模型, 其得到的回归参数估计是整个研究区域内的平均水平, 难以反映地理现象及关系的空间变化特征, 即空间异质性(Gao et al., 2022)。地理加权回归模型(Geographically Weighted Regression, GWR), 允许回归系数随空间位置的变化而变化, 可以很好地解释变量的局部空间关系与空间异质性, 比 OLR 模型更适合估计参数(Brunsdon et al., 1996)。但 GWR 未考虑到不同自变量与因变量间不同的空间尺度。为此, 本文利用多尺度地理加权回归模型(Multiscale Geographically Weighted Regression, MGWR), 针对各变量采用特定的空间带宽, 使每个变量有不一样的空间平滑程度, 可以更好地探究变量对空间尺度和空间位置上碳排放的影响, 使结果更加真实可靠(Fotheringham et al., 2017)。目前已经被广泛应用于房价(沈体雁等, 2020)、PM_{2.5}(Bi et al., 2022)、景观格局(Hu et al., 2022)等研究。

除此之外, 已有针对碳排放的大量研究, 多数是基于省域(周嘉等, 2019; 彭璐璐等, 2021)、市域(文

枫等, 2016; 韦彦汀等, 2022) 等较大尺度, 缺乏县域尺度的相关研究。长三角区县众多, 地理环境、产业结构和社会治理存在明显差异(张杰等, 2022), 延续现有的研究方法不免会忽略区域发展差距。另外, 多数研究分析了碳排放与社会经济因素之间的线性关系, 对生态环境因子的研究较少。生态环境差异对区域能源效率与节能减排都有潜在的影响(王兵等, 2016)。因此, 本文以县域为研究尺度, 细化碳排放及其影响因素的空间关系, 综合考虑各区县的生态环境差异和社会经济多样性, 以支持更有效的碳减排决策。

综上所述, 本文以长三角城市群为研究对象, 以县域为研究尺度, 运用局部莫兰指数、冷热点分析探究该区域碳排放的空间分布规律, 基于 MGWR 模型分析该区域碳排放及其影响因素之间的空间关系, 充分考虑不同区县的碳排放尺度差异, 揭示各变量对碳排放的影响作用, 为相关部门制定节能减排政策, 助推区域高质量、可持续发展提供参考和依据。

1 研究区域概况

长三角城市群位于中国沿江沿海“T”字带, 由 27 个城市组成, 共 202 个县(区), 面积约 $35.8 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占全国面积的 3.7%, 常住人口约 2.3 亿人, 占全国人口的 16.8%, GDP 约 23.7 亿元, 拥有 8 个 GDP 万亿的城市(刘林等, 2022)。长三角城市群是中国经济

发展活跃、开放程度高、创新能力强的重要区域之一(张明等, 2011; 周权平等, 2021), 但由于区域内发展对能源的需求过高, 面临着日益严峻的碳排放问题。目前长三角城市群的碳排放量占全国总排放量的 20% 以上(曹丽斌等, 2020), 2000—2020 年, 碳排放增长率约为 6.74%, 碳汇增长率约为 0.70%, 碳排放量远高于碳汇量(李建豹等, 2024), 节能减排任务迫切且艰巨。

2 数据与方法

2.1 研究数据

本文以长三角城市群碳排放数据作为研究变量, 数据来源于全球环境中心 ODIAC (Open-source Data Inventory for Anthropogenic CO₂) 网格化碳排放数据集 (<https://db.cger.nies.go.jp/ged/ja/>), 具有较高的精度并被广泛应用。根据相关研究(Xu et al., 2015; 杨文越等, 2019; Guo et al., 2022; 顾张锋等, 2022; 张定源等, 2022; 赵先超等, 2022), 本文选取对碳排放具有显著影响的解释变量, 各解释变量描述如表 1 所示。将同期的归一化植被指数(Normalized Differential Vegetation Index, NDVI)、总初级生产力(Gross Primary Production, GPP)作为自然因子解释变量, 人口密度、道路密度、用电量、GDP, 以及第一产业、第二产业、第三产业占比作为社会经济解释变量。NDVI 和 GPP 是生态环境的重要参数, 为评估

表 1 解释变量描述

Table 1 Explanatory variable description

变量类型	变量	变量描述	单位	空间分辨率	时间分辨率
自变量	碳排放量	化石燃料燃烧、生产水泥和天然气燃烧等产生的二氧化碳排量	t/km ²	1 km	年度
自然因子解释变量	归一化植被指数	县域尺度平均归一化植被指数		1 km	年度
	总初级生产力	县域尺度平均总初生产力	kgC/m ²	500 km	年度
	道路密度	城市道路占地	/km	1 km	年度
社会经济解释变量	人口密度	单位面积上的人口数量	/km	1 km	年度
	用电量	县域尺度总用电量	kw·h	1 km	年度
	GDP	县域尺度国内生产总值	元	县域	年度
	第一产业占比	县域尺度第一产业占比	%	县域	年度
	第二产业占比	县域尺度第二产业占比	%	县域	年度
	第三产业占比	县域尺度第三产业占比	%	县域	年度

植被对碳排放的影响提供了关键的生态信息。而经济发展、电力消费、产业结构、人口分布等则是城市能源消耗的重要因素。综合考虑自然和经济因素,能够更全面深入地挖掘碳排放背后的复杂机制,促进碳减排政策的制定和实施。

其中,NDVI 数据来源于中科院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>);GPP 数据来源于新罕布什尔大学地球系统研究中心(<https://eos.unh.edu/earth-systems-research-center/>);人口密度数据来源于 World Pop(<https://www.worldpop.org/>);道路密度数据来源于 Open Street Map(<https://www.openstreetmap.org/>),并根据 OSM(Open Street Map)道路网数据处理;GDP、产业占比来源于中国国家统计局发布的《中国县域统计年鉴》(李锁强, 2020);用电量来源于西南财经大学制作的 1 km 分辨率年度用电量数据集(Chen et al., 2022)。

2.2 研究方法

为探究长三角城市群碳排放空间规律与影响机制,本文应用局部莫兰指数和冷热点分析方法揭示碳排放的空间分布异质性,识别高低值区域;此外,还引入了对空间数据更具有解释性的 MGWR 模型,该模型充分考虑了不同变量的尺度差异,能够更全面地解释碳排放及其影响因素的空间关系。

2.2.1 局部莫兰指数

局部莫兰指数是一种常用的空间统计方法,可以用于衡量特定位置的碳排放水平与其邻近位置之间的关联程度,从而进一步识别不同区县碳排放的空间聚集格局(Anselin, 1995)。其计算公式如下:

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{s^2} \sum_j w_{ij} (x_j - \bar{x}) (i \neq j) \quad (1)$$

其中, x_i , x_j 分别为区县 i 和 j 已知的碳排放量; $\bar{x}$ 为碳排放量的均值; n 为区县个数; w_{ij} 为空间权重矩阵,若区县 i 和 j 相邻,则 $w_{ij} = 1$,反之 $w_{ij} = 0$ 。当局部莫兰指数大于 0 时,表明该区县碳排放与周围存在空间集聚性,值越大集聚效应越明显;当局部莫兰指数小于 0 时,则表明区县碳排放呈现空间分散性,值越小辐射效应越强;如果该指数等于 0,则表示区县碳排放不存在空间关联性,呈随机分布态势。

2.2.2 冷热点分析

冷热点分析是通过计算 Getis-Ord G_i^* (G 系数)进行空间异质性的局域统计,可以直观地反映高或低聚类的具体位置和聚集程度(Getis et al., 1992)。

本文利用 G 系数,对比单个区县及其相邻区县的局部碳排放量总和与长三角城市群碳排放量总和的差值。当局部总和与预期相差较大,无法计算随机结果时,会获得具有统计意义的 z 得分。若 z 得分为正数, z 值越高则高聚类越密,反之亦然。通过冷热点分析,可以识别长三角城市群碳排放量高/低聚类的具体位置和聚集程度。公式如下:

$$G_i^*(d) = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij}(d)x_j}{\sum_{j=1}^n x_j} \quad (2)$$

其中, x_j 为区县 j 已知的碳排放量; n 、 w_{ij} 同公式 (1); d 为距离尺度。

2.2.3 多尺度地理加权回归模型

传统的 OLR 本质是全局模型,最大的缺点是忽略了地理事物或现象的空间异质性特征。Brunsdon et al. (1996) 提出 GWR 模型,通过空间自相关概念建立空间权重矩阵,从而量化样本间的空间依赖关系,利用局部加权最小二乘法进行参数估计(李丹丹等, 2013),能够有效地处理地理事物或现象的空间异质性。其中,权重的具体计算通过关于空间距离的单调减函数实现,称为核函数。在碳排放研究中, GWR 可以用来探索碳排放与各种空间因素之间的关系,并解释空间异质性对这些关系的影响。通过 GWR,可以在局部区域内建立针对碳排放的回归模型,从而更准确地捕捉局部空间的特征。基于 GWR 模型构建的碳排放和影响因素模型如公式 (3) 所示:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_k \beta_k(u_i, v_i) x_{k,i} + \varepsilon_i \quad (3)$$

其中, (u_i, v_i) 是区县 i 的坐标; $\beta_0(u_i, v_i)$ 表示截距; $\beta_k(u_i, v_i)$ 表示区县 i 上的第 k 个回归参数; $x_{k,i}$ 为碳排放影响因素; ε_i 为随机误差项。

但是经典的 GWR 模型,假设每个模型内部不同自变量-因变量的局部关系是基于相同空间尺度变化的,未考虑系数间差异化的尺度问题。为进一步优化模型, Fotheringham et al. (2017) 提出 MGWR 模型,允许每个自变量设置不同的带宽反映不同的空间尺度,能够更全面地探索碳排放与空间因素之间的关系,并解释不同尺度上的空间异质性对这些关系的影响。空间带宽越大,空间异质性的程度越低,自变量与因变量间的关系趋向于全局关系,反之,空间带宽越小,空间异质性的程度越高,自变量与因变量间的关系趋向于显著的局部关系。MGWR 的计算公式如下:

$$y_i = \sum_{j=1}^k \beta_{bwj}(u_i, v_i) x_{ij} + \varepsilon_i \quad (4)$$

其中, (u_i, v_i) 是区县 i 的坐标; $\beta_k(u_i, v_i)$ 表示区县 i 上的第 k 个回归参数; bw_j 表示第 j 个碳排放影响因素回归系数的带宽; x_{ij} 表示第 j 个碳排放影响因素在区县 i 上的观测值; ε_i 为随机误差项。

3 实验结果

3.1 长三角城市群碳排放空间自相关性分析

首先使用局部莫兰指数对研究区碳排放进行分析, 其结果如图 1 所示。可以看出, 长三角城市群碳排放量呈现正相关特征, 其中 High-High(高-高)型集聚, 即碳排放量相近且都为相对高值的地区, 主要出现在上海市的大部分地区及苏州市、无锡市、常州市等江苏南部的大多数区县, 这些区县分布在长三角东部沿海地区, 经济发展水平高、人口规模庞大、交通网密集, 因此形成 High-High(高-高)型集聚。Low-Low(低-低)型集聚, 即碳排放量相近且都为相对低值的地区, 主要出现在安徽省的安庆市、池州

市、宣城市、滁州市的大部分区县及浙江省杭州市北部的部分区县, 这些区县受经济发展、地理位置、区位因素等影响, 形成 Low-Low(低-低)型集聚。总体来说, 碳排放量在空间上定量的表现为同质性, High-High(高-高)型集聚和 Low-Low(低-低)型集聚区县占多数, High-Low(高-低)型集聚, 即本区县碳排放量高, 临近区县碳排放低, 以及 Low-High(低-高)型集聚, 即本区县碳排放量低, 临近区县碳排放高的情况占少数, 说明相邻区域碳排放量存在交互作用。

3.2 长三角城市群碳排放冷热点分析

为了探究碳排放的高值和低值在空间上发生聚类的具体位置, 使用 Getis-Ord G_i^* 进行冷热点分析。长三角城市群碳排放的冷点主要分布在安徽宣城市 and 安庆市(图 2), 这些地区经济发展相对较慢, 工业化程度较低, 因此碳排放量相对较低。热点主要分布在上海市及江苏省苏州市、无锡市、常州市、南通市, 这些地区具有优越的区位条件, 地理位置好、资源丰富、交通运输便利, 因此经济发展快、城市化水

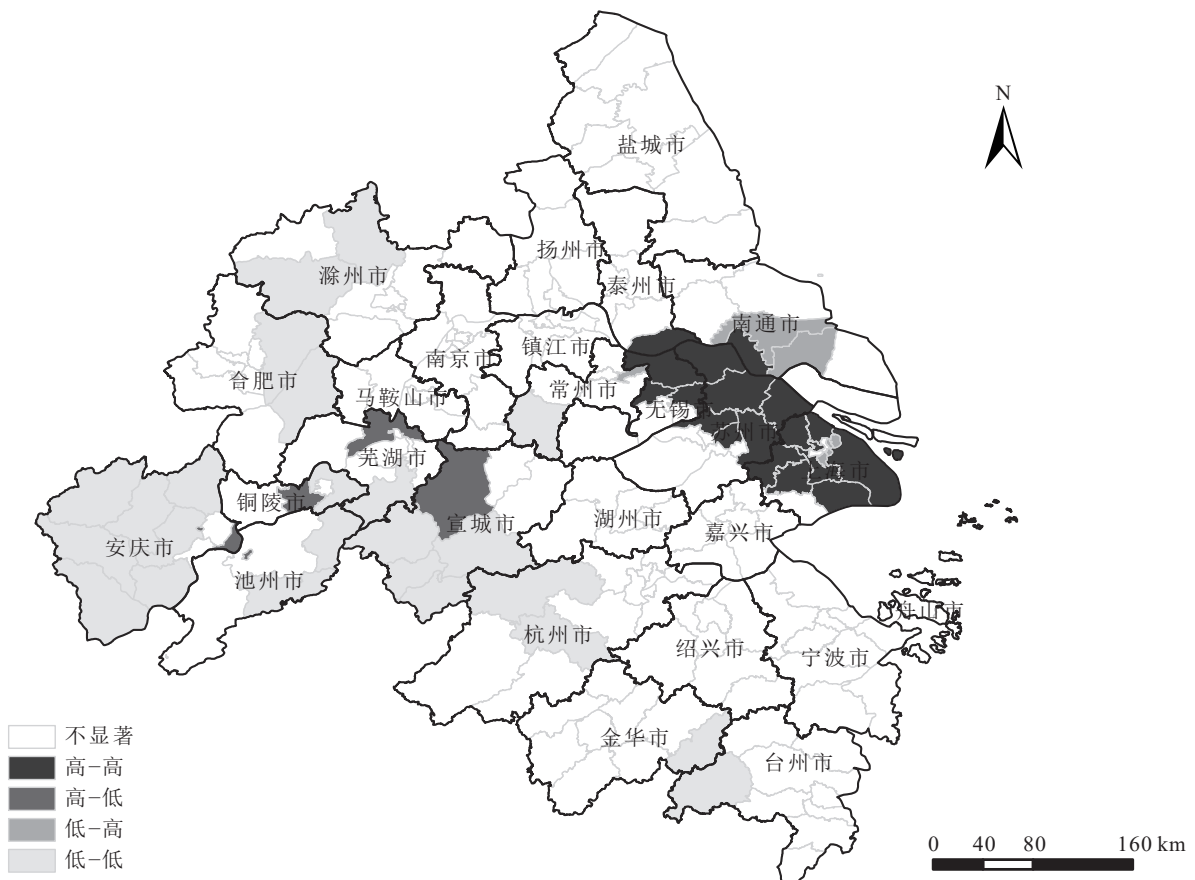


图 1 长三角城市群碳排放聚类图

Fig. 1 The cluster diagram of carbon emission in the Yangtze River Delta urban agglomeration

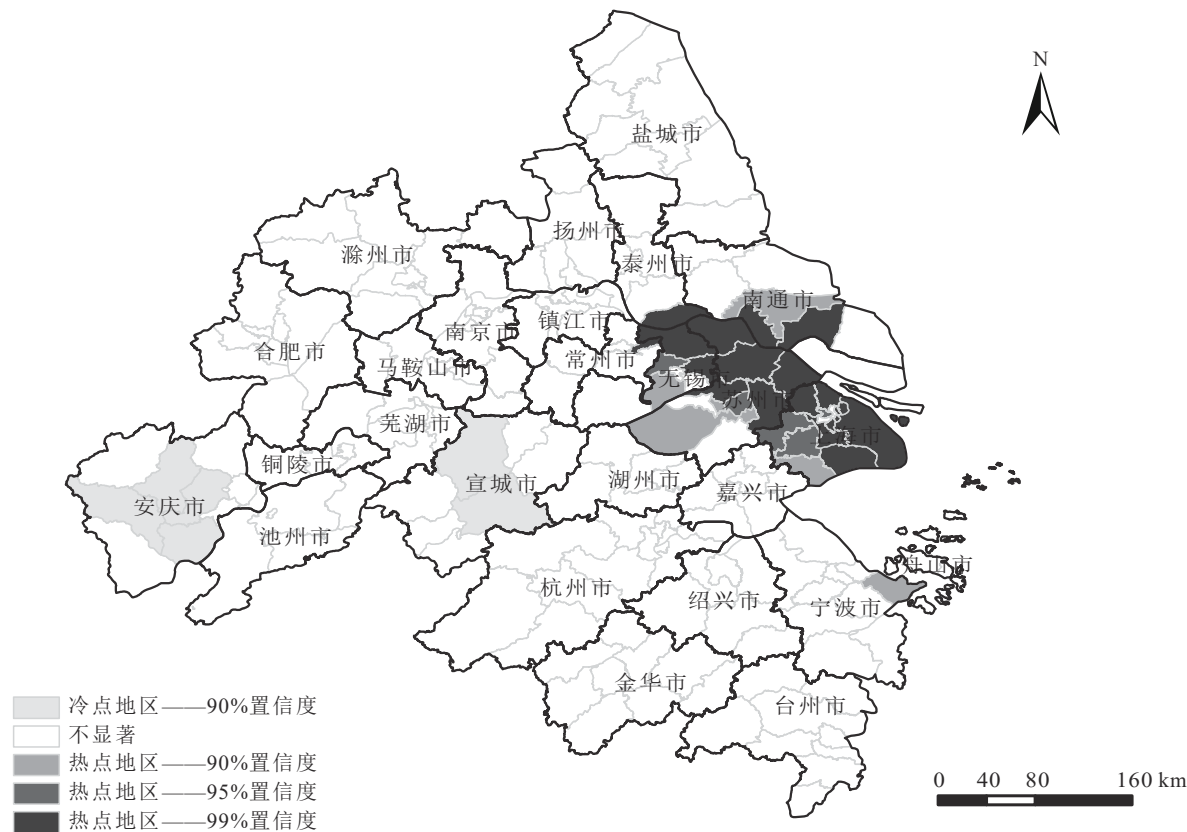


图 2 长三角城市群碳排放冷热点分析结果

Fig. 2 The cold and hot spots of carbon emission in the Yangtze River Delta urban agglomeration

平高、人口密集,碳排放量相对较高。

3.3 长三角城市群碳排放及其影响因素分析

为进一步探究长三角城市群碳排放及其影响因素的空间关系,使用 MGWR 模型对长三角各区县进行地理加权回归分析,得出结果如表 2 所示。其中

带宽大小反映了碳排放影响因素空间尺度的差异性。本文参与样本回归建模的相邻区县个数为 201 个,即带宽范围为 [1, 201]。带宽 MGWR 模型计算得出,NDVI、用电量及人口密度带宽分别为 45、80 和 129,即这 3 个变量对碳排放具有显著的空

表 2 基于 MGWR 模型的解释变量回归结果

Table 2 The regression results of explanatory variables based on MGWR Model

解释 变量	MGWR				
	带宽	均值	标准差	最小值	最大值
Intercept	201.000	7.303	0.019	7.268	7.339
NDVI	45.000	-0.321	0.328	-0.962	0.290
GPP	201.000	-0.016	0.020	-0.054	0.022
道路密度	201.000	0.145	0.010	0.123	0.162
人口密度	129.000	-0.057	0.174	-0.315	0.281
GDP	201.000	0.097	0.007	0.088	0.114
用电量	80.000	0.696	0.170	0.292	0.945
第一产业占比	201.000	-0.051	0.020	-0.551	-0.458
第二产业占比	201.000	-0.012	0.008	-0.023	0.013
第三产业占比	201.000	-0.088	0.008	-0.100	-0.073

间异质性,在局部范围内对碳排放的影响较大。GPP、道路密度、GDP 等变量的带宽值为 201,基本不存在空间异质性,即在全局范围内对碳排放产生影响。

根据空间回归分析结果,可以多角度地探究各变量对长三角城市群碳排放的影响作用,并分析不同作用尺度下各变量回归系数的分布格局。总体来说,道路密度、GDP、用电量的回归系数皆为正值,其中用电量的平均值最大,对碳排放的正向影响最大;第一产业占比、第三产业占比回归系数均为负值,其中第三产业占比的平均值最小,对碳排放的负面影响最大。碳排放浓度的影响因子的空间系数分布如图 3 所示。可以看出,不同影响因素对于碳排放浓度的影响尺度具有差异性。

(1) 自然因子解释变量对碳排放的影响

NDVI 的带宽值为 45,说明对各区县碳排放的

差异影响较大,且回归系数大多为负值,也就是说 NDVI 越高,碳排放量越低。NDVI 主要用来衡量地表的植被覆盖程度,NDVI 指数越高,地表植被的覆盖越好,也意味着更强的碳吸收能力,有助于减少大气中的二氧化碳浓度。对碳排放的负向影响多在长三角城市群的南部地区,在台州市附近达到最大值。这些地区植被丰富且覆盖率高,对减轻碳排放有一定作用。

GPP 的带宽值为 201,基本不存在空间异质性,且回归系数大多为负值,表明 GPP 越高,碳排放量越低。对碳排放的负向影响多在长三角城市群的西部,合肥市、安庆市、铜陵市等。

(2) 社会经济因子解释变量对碳排放的影响

道路密度的带宽值为 201,说明其对各区县的碳排放影响差异不大,且回归系数均为正值,道路密度

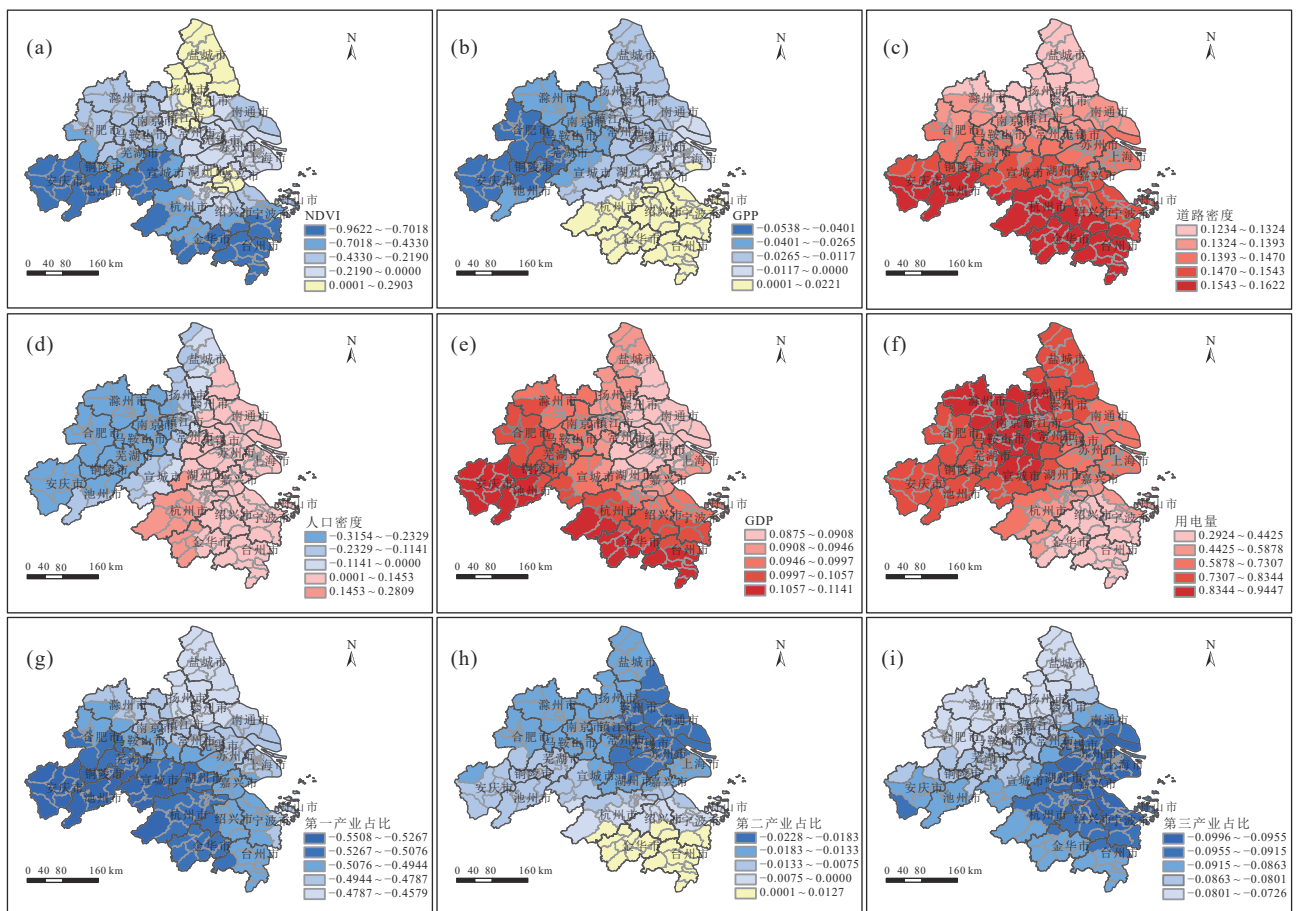


图 3 基于 MGWR 模型的影响因素回归系数的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of regression coefficients of influencing factors based on MGWR Model

a—NDVI 回归系数; b—GPP 回归系数; c—道路密度回归系数; d—人口密度回归系数; e—GDP 回归系数; f—用电量回归系数;
g—第一产业占比回归系数; h—第二产业占比回归系数; i—第三产业占比回归系数

越高,碳排放量越高。道路密度在全局范围内对碳排放产生正向作用,这是由于道路网越密的地区,城市化程度与经济水平相对较高,各种能源的消耗及汽车的尾气排放是造成碳排放的主要原因(Brondfield et al., 2012)。

人口密度的带宽值为 129,具有较强的空间异质性。人口密度对碳排放的影响呈现出两极分化。在城市群的西北部地区,人口密度对碳排放有负向驱动,人口的聚集使得能源利用和交通出行方式发生改变,有效地提升能源资源的有效配置和集约利用。在城市群的东南部地区,包括上海、浙江及江苏南部大部分区县,人口密度对碳排放有正向驱动,因为这些地区就业机会多,吸引大量人才,人口密度高,将导致出行和基础设施需求增加,二氧化碳排放量增加(Wang et al., 2020)。

GDP 的带宽值为 201,基本不存在空间异质性,在全局范围内对碳排放产生影响。GDP 的回归系数均为正值,表明 GDP 越高,碳排放量越高。对碳排放的正向影响在皖南地区最大,向北方方向逐渐减弱,这是由于皖南地区 GDP 的来源主要是通过资源消耗带动的,随之带来碳排放量的增多。

用电量的带宽值为 80,具有较强的空间异质性。用电量的回归系数均为正值,表明用电量越高,碳排放量越高。用电量对碳排放的正向影响在南京市附近达到最大值,以南京市为中心向东南方向逐渐减弱。电力行业是二氧化碳排放的主要来源之一,目前许多电力来自燃烧化石燃料,如煤炭、石油和天然气。除此之外,一些县域存在能源密集型产业,会造成用电量激增,如钢铁、有色金属、化工等,增加了二氧化碳排放。

第一产业占比的带宽值为 201,基本不存在空间异质性,在全局范围内对碳排放产生影响。第一产业的回归系数均为负值,表明第一产业占比越高,碳排放量越低。这是由于第一产业多以利用自然力为主,因此产生的碳排放较少。第一产业占比作为全局尺度的影响因素,在整个城市群内对碳排放的影响程度相差不大。

第二产业占比的带宽值为 201,基本不存在空间异质性。但第二产业占比在全局范围内没有通过显著性检验,表明其第二产业占比对各区县碳排放影响关系不显著。

第三产业占比的带宽值为 201,基本不存在空间

异质性,且第三产业的回归系数均为负值,表明在全局范围内对碳排放产生负向影响,即第三产业占比越高,碳排放量越低。影响最大的为城市群的东部,包括上海市、苏州市、嘉兴市、宁波市、舟山市等大部分区县,这些地区服务业、金融业等第三产业较多,产生的碳排放相对较低。

4 结论及建议

本文综合运用莫兰指数、冷热点分析及 MGWR 模型,探究长三角城市群碳排放的空间分布规律,以及不同影响因素对长三角城市群碳排放的空间异质性影响。主要结论如下。

(1)长三角城市群碳排放有显著的空间集聚性,其主要表现为 H-H(高-高)型集聚和 L-L(低-低)型集聚,H-H(高-高)型集聚主要出现在上海市及江苏省南部大多数区县,L-L(低-低)型集聚主要出现在安徽省大部分区县。

(2)长三角城市群碳排放的冷点主要分布在安徽省的宣城市和安庆市,热点主要分布在上海市及江苏省的苏州市、无锡市、常州市、南通市。

(3)GPP、道路密度、GDP、第一产业占比、第二产业占比、第三产业占比在全局范围内对长三角城市群碳排放产生影响。NDVI、人口密度及用电量在局部范围内对长三角城市群碳排放产生影响。同时,道路密度、GDP、用电量对长三角城市群碳排放产生正向影响,第三产业占比对长三角城市群碳排放产生负面影响。

基于上述结论,本文提出了长三角城市群减少碳排放的政策建议。首先,建议对交通采取一系列措施,例如在各区县内优化运输线路、推广新能源车辆、鼓励公共交通、加强道路监管等,从而减轻交通拥堵,减少碳排放。其次,建议进一步优化城镇产业布局、加快产业结构和技术升级,有效遏制碳排放。要以城镇化为产业调整的契机,引导因地制宜发展文旅产业,适当限制高耗能产业发展,大力发展低碳服务业。此外,建议相关部门注重规划人口密度,引导劳动力合理转移,缓解人口密集城市的压力。同时,扩大城市绿化面积、加强林业建设、改善区域生态,以及提升区域固碳能力等,这些政策都有利于进一步减少碳排放。

本文针对碳排放空间分布规律及其影响因素的空间关系研究仍存在不足,下一步将获取并整合不

同年份的碳排放数据,全面探究碳排放时空分布规律,分析在时间维度下各影响因素的异质性结果。同时将进一步扩充碳排放影响因素的选择,完善对各解释变量的空间溢出性研究,为长三角城市群早日实现“双碳”目标提供更好的依据与支撑。

致谢:感谢参与本论文研究的所有人员,感谢审稿专家提出的宝贵意见。

参考文献

- Anselin L. 1995. Local Indicators of Spatial Association—LISA[J]. *Geographical Analysis*, 27(2): 93–115.
- Bi S, Chen M, Dai F. 2022. The impact of urban green space morphology on PM_{2.5} pollution in Wuhan, China: A novel multiscale spatiotemporal analytical framework[J]. *Building and Environment*, 221: 109340.
- Brondfield M N, Hutya L R, Gately C K, et al. 2012. Modeling and validation of on-road CO₂ emissions inventories at the urban regional scale[J]. *Environmental pollution*, 170: 113–123.
- Brunsdon C, Fotheringham A S, Charlton M E. 1996. Geographically weighted regression: a method for exploring spatial nonstationarity[J]. *Geographical analysis*, 28(4): 281–298.
- Chen J, Gao M, Cheng S, et al. 2022. Global 1 km×1 km gridded revised real gross domestic product and electricity consumption during 1992–2019 based on calibrated nighttime light data[J]. *Scientific Data*, 9(1): 202.
- Fotheringham A S, Yang W, Kang W. 2017. Multiscale geographically weighted regression (MGWR)[J]. *Annals of the American Association of Geographers*, 107(6): 1247–1265.
- Gao Y, Zhao J, Han L. 2022. Exploring the spatial heterogeneity of urban heat island effect and its relationship to block morphology with the geographically weighted regression model[J]. *Sustainable Cities and Society*, 76: 103431.
- Getis A, Ord J K. 1992. The analysis of spatial association by use of distance statistics[J]. *Geographical analysis*, 24(3): 189–206.
- Guo F, Zhang L, Wang Z, et al. 2022. Research on Determining the Critical Influencing Factors of Carbon Emission Integrating GRA with an Improved STIRPAT Model: Taking the Yangtze River Delta as an Example[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(14): 8791.
- Hu J, Zhang J, Li Y. 2022. Exploring the spatial and temporal driving mechanisms of landscape patterns on habitat quality in a city undergoing rapid urbanization based on GTWR and MGWR: The case of Nanjing, China[J]. *Ecological Indicators*, 143: 109333.
- Song M, Guo X, Wu K, et al. 2015. Driving effect analysis of energy-consumption carbon emissions in the Yangtze River Delta region[J]. *Journal of Cleaner Production*, 103: 620–628.
- Sun H, Hu L, Geng Y, et al. 2020. Uncovering impact factors of carbon emissions from transportation sector: Evidence from China's Yangtze River Delta Area[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 25: 1423–1437.
- Wang H, Zhang X. 2020. Spatial heterogeneity of factors influencing transportation CO₂ emissions in Chinese cities: Based on geographically weighted regression model[J]. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 13: 977–989.
- Xu X, Tan Y, Chen S, et al. 2015. Urban household carbon emission and contributing factors in the Yangtze River Delta, China[J]. *PLoS ONE*, 10(4): e0121604.
- Zhu B, Zhang T. 2021. The impact of cross-region industrial structure optimization on economy, carbon emissions and energy consumption: A case of the Yangtze River Delta[J]. *Science of The Total Environment*, 778: 146089.
- Zha Q, Huang C, Kumari S. 2022. The impact of digital economy development on carbon emissions—based on the Yangtze River Delta urban agglomeration[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 10: 2033.
- 曹丽斌, 李明煜, 张立等. 2020. 长三角城市群 CO₂ 排放达峰影响研究[J]. *环境工程*, 38(11): 33–38+59.
- 顾张锋, 徐丽华, 马淇蔚等. 2022. 浙江省都市区碳排放时空演变及其影响因素[J]. *自然资源学报*, 37(6): 1524–1539.
- 韩传峰, 宋府霖, 滕敏敏. 2022. 长三角地区碳排放时空特征、空间聚类与治理策略[J]. *华东经济管理*, 36(5): 24–33.
- 李丹丹, 刘锐, 陈动. 2013. 中国省域碳排放及其驱动因子的时空异质性研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 23(7): 84–92.
- 李锁强. 2020. 中国县域统计年鉴. 2019, 县市卷[M]. 北京: 中国统计出版社.
- 刘林. 2022. 长三角地区万亿 GDP 城市经济增长预测研究[J]. *南通大学学报(社会科学版)*, 38(6): 48–59.
- 李建豹, 陈红梅, 张彩莉等. 2024. 长三角地区碳源碳汇时空演化特征及碳平衡分区[J]. *环境科学*, 7: 4090–4100.
- 彭璐璐, 李楠, 郑智远等. 2021. 中国居民消费碳排放影响因素的时空异质性[J]. *中国环境科学*, 41(1): 463–472.
- 单菁菁, 武占云, 张卓群. 2022. 中国城市发展报告 (No. 15 大国治城之城市群高质量发展迈向人与自然和谐共生的现代化 2022 版)/城市蓝皮书[M]. 北京: 社会科学文献出版社.
- 沈体雁, 于瀚辰, 周麟等. 2020. 北京市二手住宅价格影响机制——基于多尺度地理加权回归模型 (MGWR) 的研究[J]. *经济地理*, 40(3): 75–83.
- 田时中. 2024. 长三角绿色低碳循环发展的创新驱动机理及效应识别[J]. *长江流域资源与环境*, 33(2): 254–270.
- 文枫, 鲁春阳. 2016. 重庆市土地利用碳排放效应时空格局分异[J]. *水土保持研究*, 23(04): 257–262, 268.
- 王兵, 杨雨石, 赖培浩等. 2016. 考虑自然环境差异的中国地区能源效率与节能减排潜力研究[J]. *产经评论*, 7(1): 82–100.
- 韦彦汀, 李思佳, 张华. 2022. 成渝城市群碳排放时空特征及其影响因素[J]. *中国环境科学*, 42(10): 4807–4816.
- 许吟隆, 赵运成, 翟盘茂. 2020. IPCC 特别报告 SRCCL 关于气候变化与粮食安全的新认知与启示[J]. *气候变化研究进展*, 16(01): 37–49.

- 杨文越, 曹小曙. 2019. 多尺度交通出行碳排放影响因素研究进展[J]. 地理科学进展, 38(11): 1814–1828.
- 张定源, 张景, 牛晓楠等. 2022. 空间冲突理论分析与实证研究[J]. 华东地质, 43(01): 17–29.
- 张杰, 陈海, 刘迪等. 2022. 基于县域尺度土地利用碳排放的时空分异及影响因素研究[J]. 西北大学学报(自然科学版), 52(01): 21–31.
- 张明, 陈国光, 刘红樱等. 2011. 长江三角洲表层土壤 Sn 元素的空间分布特征及影响因素[J]. 地质通报, 30(07): 1147–1154.
- 张仁开. 2017. 长三角建设世界级创新型区域的战略思考[J]. 江南论坛, (01): 4–6.
- 赵先超, 彭竞霄, 胡艺觉等. 2022. 基于夜间灯光数据的湖南省县域碳排放时空格局及影响因素研究[J]. 生态科学, 41(01): 91–99.
- 周嘉, 王钰萱, 刘学荣等. 2019. 基于土地利用变化的中国省域碳排放时空差异及碳补偿研究[J]. 地理科学, 39(12): 1955–1961.
- 周权平, 杨海. 2021. 无人机技术在长三角水网平原区生态环境地质调查中的应用示范[J]. 华东地质, 42(02): 175.

《地质通报》第 43 卷第 8 期要目预告

- 地球系统科学基本原理与应用展望 张万益等
- 自然资源-社会经济-生态环境的关联演化认知 王军等
- 自然资源-社会经济-生态系统耦合视角下的生态保护修复转型思考 王军等
- 地球系统科学视角下美国湿地保护修复的经验及启示——以大沼泽地综合修复计划为例 胡雅璐等
- 基于生态系统服务供需变化的赤水河流域生态修复分区与策略 孙雨芹等
- 基于地球关键带类型的国土空间生态修复分区研究——以河南省西峡县为例 黄培真等
- 小尺度地球关键带分类框架与实证研究——以河南省西峡县为例 李潇等
- 黄土高原关键带土壤水文过程研究进展与展望 王云强等
- 双碳目标下资源型城市转型发展研究 刘玲娜等
- 中国过去 2000 年耕地的时空变化及其可持续利用策略 王发浩等
- 中国地理格局历史演变规律及规划启示 李方舟等
- 白氢的天然优势、国外勘查布局进展及对我国的启示 吴珍珠等
- 陕西略阳何家垭铜镍硫化物矿床铂族元素地球化学特征 舒子辉等
- 大兴安岭中段扎赉特旗地区石炭纪高镁闪长岩、埃达克岩的发现及其对构造演化的意义 庞雪娇等
- 湖北蕲春烈马咀白垩世花岗岩地球化学特征、辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及地质意义 刘欣等
- 北大别木子店地区早白垩世辉长岩锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及其地质意义 万俊等