

长三角城市群碳达峰水平测度、 时空演变及影响因素研究

邹秀清¹, 杨林茵¹, 孙学成², 刘邵军¹

(1. 上海电力大学 经济与管理学院, 上海 201306;

2. 国网青海省电力公司海东供电公司, 青海 海东 810600)

摘要:在运用 Kaya 恒等式模型预测碳排放峰值的基础上, 构建碳达峰指数分析长三角城市群碳达峰水平的时空演变规律, 采用时空地理加权回归模型 (GTWR) 全面揭示其影响因素。结果表明: (1) 在考察期内, 长三角城市群碳达峰水平以 2012 年为界存在持续增长和震荡调整两个阶段; (2) 长三角城市群碳达峰水平呈现显著的空间聚集特征, 各城市的碳达峰水平在不同时间段内呈现上下波动的趋势; (3) 各影响因素随时间演化规律表明, 人口规模、城镇化水平、对外开放水平、碳排放强度在考察期内对长三角城市群碳达峰水平存在显著的抑制作用, 经济水平始终表现为促进作用, 产业结构因素的作用效果自 2013 年开始由抑制转为促进; (4) 不同城市中各影响因素的作用强度和波动方向存在明显的空间差异。

关键词:碳达峰水平; 时空演变; 影响因素; 长三角城市群

DOI:10.13956/j.ss.1001-8409.2025.11.08

中图分类号:X321

文献标识码:A

文章编号:1001-8409(2025)11-0064-08

Measurement, Spatio-temporal Evolution, and Influencing Factors of Carbon Peak Levels in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration

ZOU Xiu-qing¹, YANG Lin-yin¹, SUN Xue-cheng², LIU Shao-jun¹

(1. College of Economics and Management, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 201306;

2. Haidong Power Supply Company, State Grid Qinghai Electric Power Company, Haidong 810600)

Abstract: Based on the peak of carbon emission prediction using the Kaya constant equation model, this paper constructs a carbon peak index to analyze the spatial and temporal evolution of the carbon peak level in the Yangtze River Delta (YRD) urban agglomeration, and adopts the spatial and temporal geographically weighted regression (GTWR) model to comprehensively reveal its influencing factors. The results show that: (1) During the study period, the carbon peak level of the YRD urban agglomeration has two phases: continuous growth and oscillatory adjustment, with 2012 as the boundary. (2) The carbon peak levels of the YRD urban agglomeration show significant spatial aggregation characteristics, and the peak carbon levels of each city show upward and downward fluctuations in different time periods. (3) The evolution pattern of the influencing factors over time shows that population size, urbanization level, openness level and carbon emission intensity have a significant inhibitory effect on the carbon peak level of the YRD city cluster during the period of investigation, while the economic level always shows a facilitating effect, and the effect of the industrial structure factor has changed from an inhibitory effect to a facilitating effect from 2013 onwards. (4) There are obvious spatial differences in the intensity and direction of fluctuation of the influencing factors in different cities.

Key words: carbon peak level; spatial and temporal evolution; influencing factors; the Yangtze River Delta urban agglomeration

引言

人类活动产生的大量温室气体是导致全球变暖和环境恶化的重要原因^[1]。作为全球最大的二氧化碳排放国, 中国提出在 2030 年前实现碳达峰的目标, 这一承诺对实现全球绿色可持续发展具有深远的影响^[2]。鉴

于中国各地区在经济基础、产业结构与资源禀赋等方面存在较大差异, 各地应根据自身的发展特点制定差异化的碳减排目标和碳达峰行动方案^[3]。其中, 长三角城市群作为“一带一路”经济带的枢纽, 是中国经济发展的重要引擎^[4]。与此同时, 长三角城市群还具有碳排放规模

收稿日期: 2024-12-29

基金项目: 国家社会科学基金项目(19GBL214)

作者简介: 邹秀清(1973—), 男, 教授, 江西庐山人, 研究方向为资源经济与低碳经济; 杨林茵(1999—), 女, 硕士研究生, 河南南阳人, 研究方向为低碳经济(通讯作者); 孙学成(1998—), 男, 硕士, 河北昌黎人, 研究方向为低碳经济; 刘邵军(2000—), 男, 硕士研究生, 安徽合肥人, 研究方向为低碳经济。

大、碳集聚度高的特点。据统计,2019年长三角城市群碳排放总量约为1840百万吨,占中国当年碳排放总量约21.7%^[5]。鉴于此,对长三角城市群进行科学的碳排放峰值预测,定量评估各城市的碳达峰水平,并深入探究其时空演变规律及影响机理,对于推动长三角区域协同达峰,实现绿色一体化发展具有重要意义。

1 文献综述

自《巴黎协定》后,各缔约国陆续公布了碳达峰碳中和的路线图^[6]。其中,中国等发展中国家的快速工业化与城市化发展,对全球碳排放量达到峰值具有决定性影响^[7]。有学者预测,中国将于2028年实现碳达峰,峰值为117.7亿吨碳排放^[8];也有学者基于自下而上的方法,预测发现中国将于2028—2034年达到碳排放峰值^[9]。在省级研究层面,蔡辰等基于STIRPAT模型预测到上海市在2020年实现碳达峰^[10],陈书林等预测在基准情景下浙江省碳达峰的时间为2040年^[11];罗闯等采用LEAP模型预测发现江苏省在3种设置情境下达峰的时间为2023年或2025年^[12];陆妍霏等通过STIRPAT扩展模型和岭回归模型对安徽省碳排放峰值进行动态预测^[13]。仍有部分学者聚焦于建筑业^[14]、电力行业^[15]、交通行业^[16]等不同行业的碳达峰进程研究。

近年来,学者采用多种方法研究碳排放轨迹以及未来趋势。Cai等基于灰色预测模型预测中国碳排放趋势,中国将在2029年实现碳达峰,碳排放量为102亿吨^[17];Wu等基于碳排放与经济增长的协调性,利用Tapio脱钩模型对中国碳达峰时间进行预测^[18];Zhao等通过构建SD模型预测中国建筑业碳排放,结果发现在基准情景下碳达峰速度最快,达峰时间为2027年^[19];Liu等基于STIRPAT模型,预测中国在9种情境下的碳达峰时间^[20]。

一些研究通过识别碳排放及碳排放强度的影响因素,助力碳达峰目标的达成。Zhu等采用LMDI分解方法实证发现CO₂主要驱动因素已由能源强度转变为能源结构且驱动机制存在较大区域差异^[21];邹璇等基于空间计量模型研究发现城市内部多中心结构可有效降低碳排放强度,但具空间异质性^[22];谢品杰等从经济、社会、能源三个方面选取了8个可能影响碳排放强度的因素,得出各因素影响具有时期异质性^[23]。

尽管学者对碳排放的驱动因素和峰值进行了大量的研究,但仍存在一定的空白。首先,现有文献大多以国家或省份为研究对象,缺乏对国家重大战略区域空间尺度的具体研究。其次,现有文献的研究内容主要集中在碳排放峰值及时间的预测,尚未有文献构建碳达峰水平评价指标,以测度各城市的碳达峰进程和碳达峰能力。最后,现有文献对碳排放量、碳排放强度与碳排放效率的驱动因素进行识别分析,但尚未有文献直接考察碳达峰水平区域差异的形成机理,并研究其影响因素的时空异质性。

鉴于此,本文基于Kaya恒等式模型,预测长三角城

市群各城市在基准情景下的碳排放峰值及时间,并以此构建碳达峰指数,定量评估长三角城市群2005—2020年碳达峰水平及其时空演变特征;采用GTWR模型,深入探讨碳达峰水平驱动因素的时空异质性。本文可能的边际贡献在于:一是在研究尺度上,突破既有研究多聚焦国家或省级宏观尺度的局限,以城市群为基本单元构建“国家战略—区域实践”的衔接纽带,选取中国重点战略区域长三角城市群为研究对象,为全国实现区域层面碳达峰提供了典范。二是在研究方法上,针对现有碳达峰评价体系忽视“达峰进度”动态属性的缺陷,通过建立包含碳排放量、碳达峰峰值双维度的综合评价体系,创新性地构建碳达峰指数,同时兼顾达峰规模与时序进度的表征。三是在理论机制研究上,采用GTWR模型研究各驱动因子影响碳达峰水平的时空异质性,据此提出“时空适配”的政策优化路径,完善了区域碳达峰驱动理论的分析框架。

2 研究方法与指标选取

2.1 模型方法

2.1.1 基于Kaya恒等式的碳排放及峰值预测模型

Kaya恒等式构建的基础框架,能够量化分析不同因素对碳排放的贡献并为碳排放的预测提供思路与方法^[24]。在Kaya恒等式基础上,本文参考Raupach等的做法^[25],构建拓展的Kaya恒等式预测碳排放峰值,具体为:

$$C_t^i = P_t^i \cdot \frac{GDP_t^i}{P_t^i} \cdot \frac{C_t^i}{GDP_t^i} = P_t^i \cdot EG_t^i \cdot TL_t^i \quad (1)$$

式(1)中, C_t^i 表示城市*i*第*t*年的CO₂排放;对应地GDP_{*t*}^{*i*}表示生产总值; P_t^i 代表人口总量; EG_t^i 代表区域经济发展水平,用城市人均GDP表示; TL_t^i 代表能源清洁利用的技术水平,用单位GDP产生的CO₂排放量表示。

基于以上Kaya恒等式拓展模型,以2020年为基期,在基准情景下预测长三角城市群各城市2021—2035年碳排放量及峰值。其中,城市*i*碳排放的驱动因素在*t*+1年的变动情况可表示为:

$$P_{t+1}^i = P_t^i \cdot (1 + \alpha_{t+1}^i) \quad (2)$$

$$EG_{t+1}^i = EG_t^i \cdot (1 + \beta_{t+1}^i) \quad (3)$$

$$TL_{t+1}^i = TL_t^i \cdot (1 + \gamma_{t+1}^i) \quad (4)$$

基于此,城市*i*在*t*+1年的碳排放可表示为:

$$C_{t+1}^i = P_{t+1}^i \cdot EG_{t+1}^i \cdot TL_{t+1}^i \quad (5)$$

上式中, α_{t+1}^i 、 β_{t+1}^i 、 γ_{t+1}^i 分别表示城市*i*第*t*+1年的人口规模变化率、人均产出增长率和技术水平变化率。

2.1.2 碳达峰指数的构建

在预测碳排放峰值的基础上,本文构建碳达峰指数(PCEI)测度长三角各城市碳达峰水平,具体为:

$$PCEI_t^i = \frac{C_t^i}{C_{t_{max}}^i} \quad (6)$$

$$\begin{cases} PCEI_t^i = 1, t = t_{max} \\ 0 < PCEI_t^i < 1, t \neq t_{max} \end{cases} \quad (7)$$

式(6)、式(7)中, C_{it}^i 为城市 i 第 t 年的碳排放量, C_{it}^i 为城市 i 的碳排放峰值。PCEI _{i} ^{t} 为城市 i 在第 t 年的碳达峰指数,反映了城市 i 在 t 年碳排放量与碳排放峰值的接近程度,指数趋近 1 表明逼近峰值,超过 1 则表示进入达峰后阶段。

2.1.3 时空地理加权回归模型

时空地理加权回归模型 (GTWR) 在地理加权回归 (GWR) 的基础上引入时间维度,解决了时间与空间的非平稳问题,相对于 GWR,其回归结果更加有效。本文中,碳达峰水平 (PCEI) 为因变量,人口规模、城镇化水平、经济水平、对外开放水平、产业结构水平、碳排放强度为自变量,构建 GTWR 模型,以探究长三角城市群各子单元影响因素的时空异质性。为消除各变量间量纲对回归结果的影响,本文对所选取的变量进行了对数化处理,最终构建了 GTWR 模型:

$$\ln PCEI_i = \beta_0(u_i, v_i, t_i) + \beta_1(u_i, v_i, t_i) \ln P_i + \beta_2(u_i, v_i, t_i) \ln UL_i + \beta_3(u_i, v_i, t_i) \ln EL_i + \beta_4(u_i, v_i, t_i) \ln OL_i + \beta_5(u_i, v_i, t_i) \ln IS_i + \beta_6(u_i, v_i, t_i) \ln CEI_i + \varepsilon_i \quad (8)$$

式(8)中,第 i 个样本表示观察期内的某个城市, PCEI _{i} 表示样本点 i 的被解释变量碳达峰水平, P_i 、 UL_i 、 EL_i 、 OL_i 、 IS_i 、 CEI_i 分别表示样本点 i 的人口规模、城镇化水平、经济水平、对外开放水平、产业结构和碳排放强度 6 个解释变量的取值, β_1 、 β_2 、 β_3 、 β_4 、 β_5 和 β_6 表示样本点的回归系数估计值, ε_i 为随机误差项。 u_i 和 v_i 分别为第 i 个城市的经纬度坐标, t_i 为第 i 个城市的时间坐标, (u_i, v_i, t_i) 为第 i 个城市的时空坐标; $\beta_0(u_i, v_i, t_i)$ 为 i 的时空截距项; $\beta_k(u_i, v_i, t_i)$ 为第 k 个解释变量在时空坐标上第 i 点的回归系数。

2.2 指标选取与数据来源

2.2.1 被解释变量 PCEI

碳达峰指数由当年碳排放量与碳排放预测峰值的比值表示。由于中国缺乏城市级能源消费平衡表,无法从能源消费角度精确核算碳排放量。因此,本文基于能源平衡表核算省级碳排放数据。利用粒子群优化-反向传播算法拟合训练 DMSP/OLS 和 NPP/VIRRS 夜间灯光数据,以获得长三角城市级别的碳排放数据。这一模型的拟合效果高达 0.988。

2.2.2 解释变量

城市的碳达峰指数受多种因素综合影响。Ehrlich 提出的 IPAT 理论认为环境承受的压力主要受 3 个方面的影响:人口规模、富裕程度和技术水平^[26]。因此本文参考相关文献^[27,28],从人口、经济、技术 3 个维度构建指标体系:人口规模、城镇化水平代表人口因素,经济水平和对外开放水平代表经济因素,产业结构和碳排放强度代表技术因素。且 GTWR 模型的估计要求解释变量之间不具有多重共线性,否则会影响结果的准确性。因此,本文利用 Stata17.0 对解释变量进行多重共线性检验,所有解释变量的方差膨胀因子 (VIF) 均小于 10,说明不存在多重共线性,满足 GTWR 模型估计的要求,因

此可以选择这 6 个解释变量进行研究,对解释变量的具体说明为:

(1) 人口规模 (P)。采用城市常住人口衡量,表示在以传统化石能源为主的能源消费结构下,人口规模的增长对城市的碳达峰进程产生影响^[29]。

(2) 城镇化水平 (UL)。采用城市常住人口中城镇人口所占比例衡量。一方面城镇化水平的提升会增加建筑碳排放^[30],另一方面人口聚集效应会促进建筑能源效率高效化,同时也会促进公共交通系统多频化,助力实现碳达峰目标^[31]。

(3) 经济水平 (EL)。采用城市人均 GDP 衡量。根据 Panayotou 等提出的环境库茨涅兹曲线 (EKC) 理论^[32],经济增长与环境污染之间关系可能呈倒“U”型曲线。

(4) 对外开放水平 (OL)。采用城市外商投资占该城市 GDP 的比重表示。对外开放水平代表城市利用外资提高产业技术水平与优化产业结构的能力,但其也伴随着从事高污染活动公司将生产转移到低污染标准国家的可能性,即所谓的“污染天堂”假说^[33]。

(5) 产业结构 (IS)。采用第二产业产值占 GDP 的比重表示。由于第二产业作为耗能大户,会产生大量碳排放^[34],因此产业结构对碳达峰水平具有重要影响。

(6) 碳排放强度 (CEI)。采用碳排放量与地区 GDP 的比值作为度量标准。碳排放强度能够有效地反映城市的技术进步水平和能源利用效率,是评估环境质量的关键指标。

2.3 数据来源

碳排放数据来源于 CEADs 中国碳排放数据库。社会经济数据来源于《中国城市统计年鉴》。对于个别年份缺失的数据,本文采用插值法对其进行填补。

3 结果与分析

3.1 长三角城市群碳排放峰值预测

3.1.1 基准情景设置

首先,本文以常州市为例,对碳排放预测变量作基准情景的设定:

人口规模 (P)。在“十三五”期间,常州市人口从 2015 年的 370.85 万人增加到 2020 年的 385 万人,人口年均增长率为 0.75%。根据国务院发布的《国家人口发展规划》,中国将在 2030 年达到人口峰值,随后人口规模将逐年减小。综合考虑上述因素,本文设定常州市 2021—2025 年人口年均增长率为 0.75%,2026—2030 年为 0.65%,2031—2035 年为 0.30%。

人均 GDP (EL)。根据常州市“十四五”发展纲要,其人均生产总值从 2020 年的 16 万元增长至 2025 年的 20 万元,年均增速达 4.60%。因此,本文设定在“十五五”和“十六五”期间,其经济水平增速略有下降。2026—2030 年,年均增速设定为 4.40%;2031—2035 年,年均增速设定为 4.20%。

技术水平 (TL)。经测算,“十三五”期间江苏省常

州市单位 GDP 碳排放累计降低 20.30%，考虑到技术进步的门槛作用，本文设定其在 2025 年的单位 GDP 碳排放相对于“十三五”末期累计降低 23.00%；其在 2030 年的单位 GDP 相对于 2025 年累计降低 22.00%；其在 2035 年的单位 GDP 相对于 2030 年累计降低 21.00%。

常州市基准情景设置见表 1。按此思路，本文对长三角城市群 27 个城市分别设置了基准场景。

表 1 江苏常州 2021—2035 年碳排放预测变量基准情景设置

变量	2021—2025 年	2026—2030 年	2031—2035 年
P	0.75%	0.65%	0.30%
EL	4.60%	4.40%	4.20%
TL	-6.00%	-5.50%	-5.20%

3.1.2 碳排放峰值预测

基于基准情景设定，本文采用 Kaya 恒等式对长三角城市群各城市 2021—2035 年的碳排放量进行预测。各城市的碳排放量峰值及达峰时间如表 2 所示。

表 2 长三角城市群各城市碳达峰时间及峰值

城市	碳达峰时间 (年)	碳达峰量 (万吨 CO ₂)	城市	碳达峰时间 (年)	碳达峰量 (万吨 CO ₂)
安庆市	2029	2045.83	绍兴市	2027	4047.70
常州市	2032	5067.61	苏州市	2031	14441.46
池州市	2032	911.91	台州市	2027	3968.75
滁州市	2032	3812.07	泰州市	2028	4485.84
杭州市	2027	6944.33	铜陵市	2030	773.94
合肥市	2029	5027.87	温州市	2030	5191.41
湖州市	2032	3041.66	无锡市	2031	6990.60
嘉兴市	2026	4425.56	芜湖市	2029	2063.45
金华市	2027	4386.83	宣城市	2028	1739.06
马鞍山市	2031	1841.30	盐城市	2029	6267.35
南京市	2025	7383.95	扬州市	2028	4482.08
南通市	2029	6917.85	镇江市	2027	3839.06
宁波市	2030	7849.79	舟山市	2030	780.11
上海市	2025	24558.74			

表 2 显示，在基准情景下，除常州、池州、滁州、湖州、马鞍山、苏州和无锡外，其他城市有望在 2030 年之前实现碳达峰。其中，上海和南京于 2025 年最早实现碳达峰。长三角城市群的平均碳达峰年份预计在 2028—2029 年（早于国家规划中的碳达峰年份 2030 年），碳排放峰值达到 5306.89 万吨。

3.2 碳达峰指数及其时序特征

为了更好地探索长三角城市群各城市碳达峰水平的变化趋势，本文使用堆积折线图来展示各城市碳达峰指数的逐年累计情况（见图 1）。

图 1 中，安庆市位于最底部，舟山市位于最上部，堆积次序与图例次序保持一致。图中较为稀疏的部分代表相应城市当期的碳达峰指数较高，而较为密集的部分则代表相应的碳达峰指数较低。2005—2020 年长三角城市群的碳达峰水平曲线的稀疏性和波动性存在一定规律，在时序上可以分为两个发展阶段：

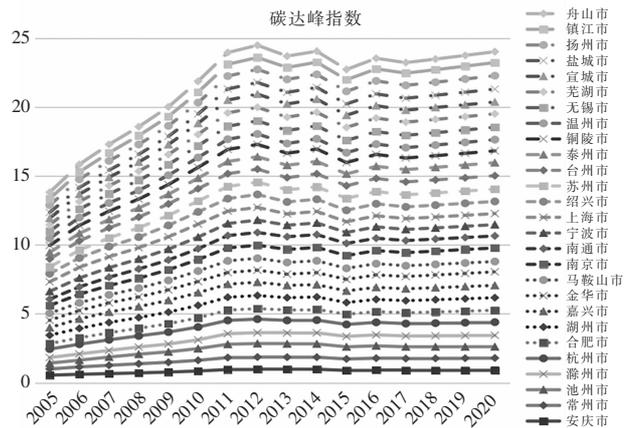


图 1 长三角城市群 2005—2020 年碳达峰指数堆积折线图

(1) 持续增长期:2005—2012 年

在这一阶段，各城市的碳达峰指数累计值从 2005 年的 13.82 增长到 2012 年的 24.47，平均碳达峰指数从 0.51 增长至 0.91。从 Kaya 恒等式的角度进行分析，这一时期各城市的碳达峰指数主要受到人口、人均 GDP 和能耗强度 3 个驱动因素的影响。尽管碳排放强度呈下降趋势，但是人均 GDP 的增长速度远超过了碳排放强度的下降速度。以南京市为例，这一时期其人均 GDP 的年均增长率达到了 15.7%，而碳排放强度的年均下降率仅为 7.9%。因此，这一时期各城市的经济发展总体上呈现出高耗能和粗放型的特点。

(2) 震荡调整期:2012—2020 年

这一阶段，堆积图呈现“先下后上”的波动趋势。2012—2015 年，各城市的碳达峰指数累计值由 24.51 下降至 22.72，出现了堆积值的“低谷”。其原因在于这一时期的人口增长和经济发展的速度低于碳排放强度的下降速度。2015—2020 年，堆积线图呈现反弹趋势，各城市的碳达峰指数累计值增长至 24.01，但低于 2012 年水平。在这一时期，平均碳达峰指数由 0.91 下降至 0.89，总体呈现出震荡下降的趋势。这可能是由于各城市经济高速增长以及“二孩政策”的全面放开导致各城市的碳排放增加。

3.3 长三角城市群碳达峰水平的空间特征

为了研究长三角城市群的碳达峰情况，本文利用 Arcgis 结合自然断点法将长三角城市群的碳达峰指数分为 4 个等级梯度，如图 2 所示，长三角城市群的碳达峰指数呈现出明显的空间聚集效应。结合各地级市碳达峰指数具体数值的变化趋势，可以观察到：

2005—2010 年，城市碳达峰水平差距开始缩小，多数城市指数上升，但芜湖、宣城、温州出现下降。值得注意的是，铜陵、马鞍山因增幅不足导致等级下降。2010—2015 年，差距持续缩小，杭州、湖州、嘉兴、宁波、上海、绍兴、温州和舟山 8 个城市指数下降，其余 19 个城市均保持增长。2015—2020 年，仅安庆、池州、马鞍山、南通、宣城 5 个城市指数下降，其余城市均呈上升态势，区域差异进一步收窄。

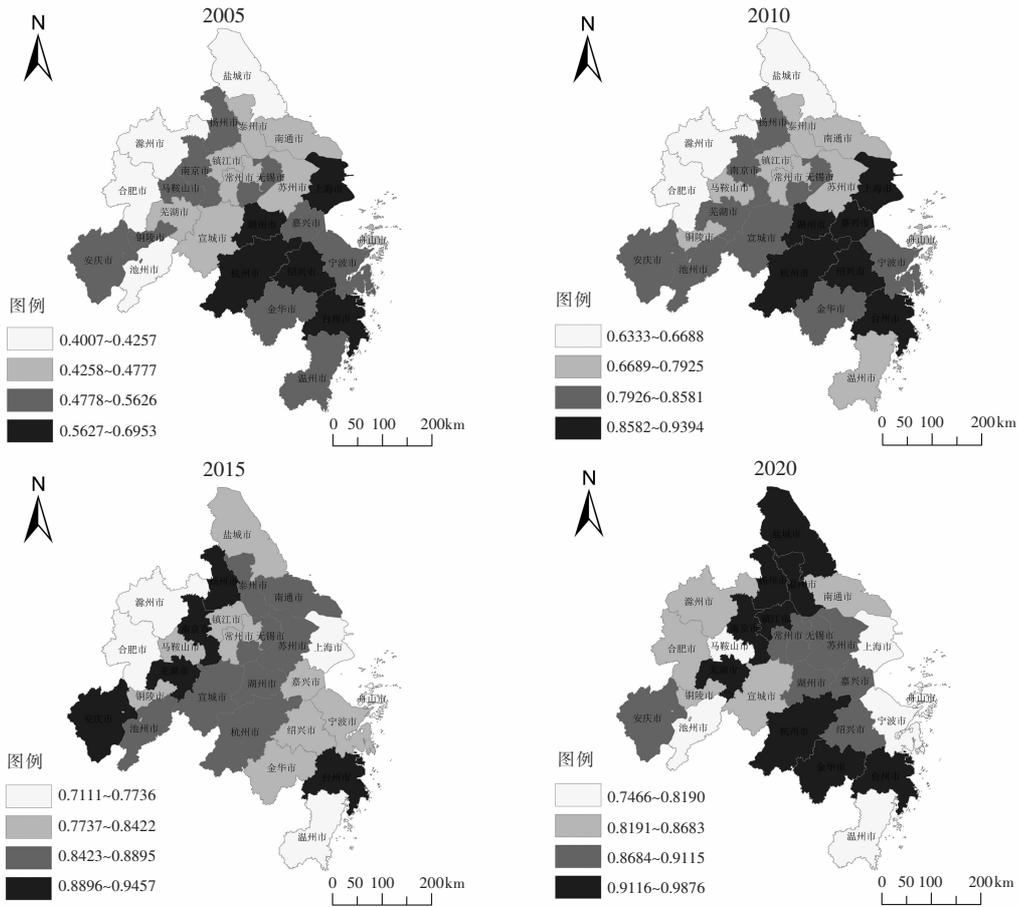


图2 2005年、2010年、2015年、2020年碳达峰指数演变规律

注:该图基于自然资源部地图技术审查中心标准地图服务网站下载的审图号为GS(2023)2767号的标准地图制作,底图边界无修改

3.4 碳达峰影响因素分析

由于长三角城市群的碳达峰水平在时空上呈现明显的集聚特征,且各影响因素在城市不同发展阶段对碳达峰的贡献存在较大差异。因此,本文基于2005—2020年的长三角城市群面板数据,采用GTWR模型估计各城市碳达峰水平影响因素的参数,并通过局部分析探讨长三角城市群碳达峰影响因素的时空异质性。

3.4.1 GTWR模型检验结果

首先,本文分别构建时空地理加权回归模型(GTWR)和普通最小二乘回归模型(OLS)。通过比较分析这两种模型的回归结果,验证GTWR模型的合理性。表3显示,OLS模型的拟合优度小于GTWR模型的拟合优度。此外,GTWR模型的赤池信息准则(AICc值)为-1229.2,进一步验证了GTWR模型的优越性。因此,采用GTWR模型来探究长三角城市群碳达峰水平影响因素的时空异质性。

表3 模型检验结果

模型参数	OLS	GTWR
R ²	0.672	0.951
AICc	-708.5	-1229.2

3.4.2 影响因素的时间演化

各变量回归系数均值随时间变化趋势如图3所示,下面分析各影响因素的具体时序特征。

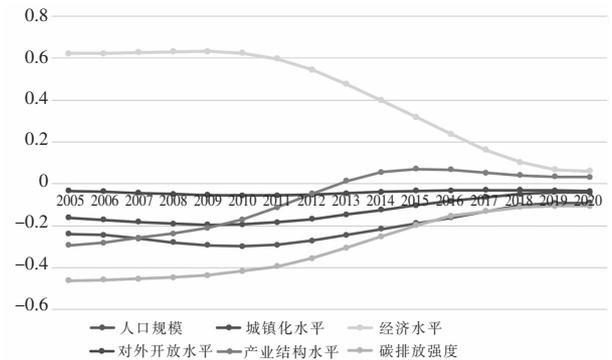


图3 2005—2020年长三角城市群碳达峰回归系数变化趋势

(1) 人口规模影响碳达峰水平的时序特征

人口规模在研究期内持续对长三角城市群的碳达峰水平产生抑制作用,其回归系数在由2005年的-0.2400增长至2020年的-0.0912,抑制作用强度逐年减弱。这一趋势的原因可能在于人口素质大幅提升,居民的

活用能和出行方式趋于绿色,减轻了人口规模对长三角城市群碳达峰的抑制作用。

(2) 城镇化水平影响碳达峰水平的时序特征

城镇化水平对长三角城市群的碳达峰水平存在强度不断降低的负向作用,回归系数在研究期内由-0.1624增加至-0.0415。这种现象的内在逻辑可以归结为城市的能源供给更加集约化和低碳化,出行消费绿色化。这些绿色行为带来的碳排放削弱效应逐渐抵消并覆盖城镇化中城镇建设带来的碳排放增加效应。

(3) 经济水平影响碳达峰水平的时序特征

2005—2010年长三角经济水平对碳达峰的促进作用稳定,系数由0.6220微增加至0.6225。2010年后该效应显著减弱,至2020年系数降低至0.0608。主要原因是近年来长三角地区绿色发展及循环经济提升了资源利用效率,同时经济结构优化进程中转型动力不足,导致经济促进作用持续衰减。

(4) 对外开放水平影响碳达峰水平的时序特征

对外开放水平对长三角城市群的碳达峰水平影响较为稳定,其回归系数由2005年的-0.0331逐渐下降至2020年的-0.0346。这一趋势的原因可以归结为两方面:首先,一些城市的环境准入门槛较低,因此一些外资企业将高碳排放和高污染产业迁移到这些城市。其次,外商投资规模的增加扩大了企业的生产规模,导致

更多的能源消耗和碳排放。

(5) 产业结构影响碳达峰水平的时序特征

2005—2012年,长三角城市群产业结构对碳达峰的抑制作用渐弱,系数从-0.2933升高至-0.0469。2013年起产业结构由抑制转为促进作用,系数于2020年达到0.0317。原因在于初期第二产业高耗能行业占比过高,后通过发展低耗能产业及技术改造,产业结构实现转型优化。

(6) 碳排放强度影响碳达峰水平的时序特征

碳排放强度增长对长三角城市群碳达峰水平始终表现为抑制作用,但其抑制作用强度持续降低,由2005年的-0.4621降低至2020年的-0.1062。这种变化的原因可能是碳减排措施使得能源密集型企业的用能成本上升,从而减少了企业在低碳技术研发上的投资,最终导致降低碳排放强度对碳达峰水平提升的贡献度逐渐降低。

3.4.3 影响因素的空间异质性

对研究期内各影响因素回归系数估计值取均值处理,利用 Arcgis 将其划分为 4 个等级,以便更直观地观察各影响因素对不同城市碳达峰水平作用强度的差异,结果如图 4 所示。

(1) 人口规模影响碳达峰水平的空间特征

各城市人口规模回归系数呈趋同性聚集且均为负值,表明人口增长会抑制碳达峰进程。系数空间分布呈

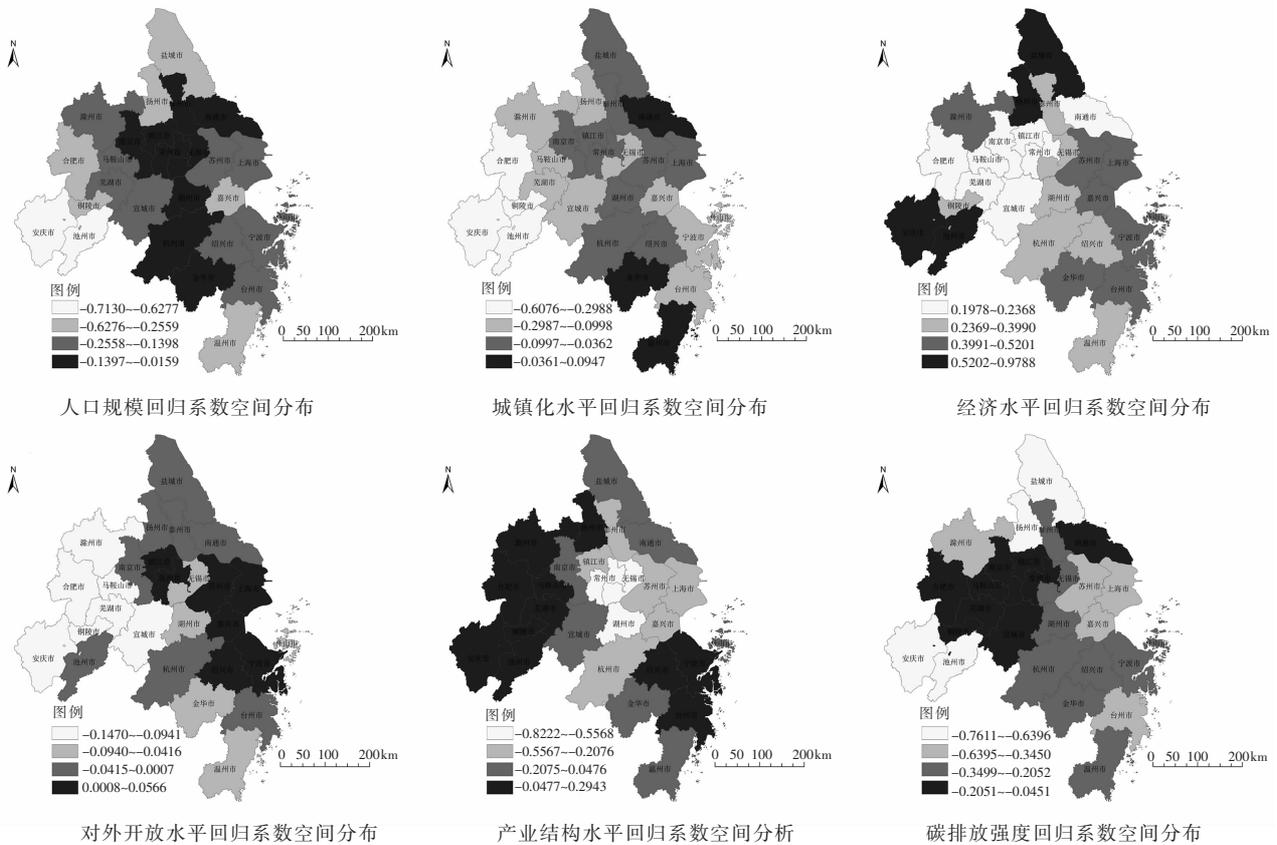


图 4 影响因素的空间异质性

注: 该图基于自然资源部地图技术审查中心标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2023)2767 号的标准地图制作, 底图边界无修改

现“中部高—东西低”特征:如安徽安庆等中部城市,因人口扩张加剧传统化石能源消耗,显著抑制碳达峰进程;江苏泰州、浙江湖州等东部城市,得益于人口聚集效应带来的能源集约化供给与效率提升,抑制作用相对较弱。

(2) 城镇化水平影响碳达峰水平的空间特征

长三角城镇化对碳达峰的影响呈“西弱东强”梯度特征。具体而言,城镇化水平对碳达峰的负向抑制效应在安徽省部分地市相对较强。安徽等省因城镇化水平较低、粗放式基建导致碳排放剧增,抑制效应显著;而在浙江省、江苏省的大部分城市以及上海市等地区高城镇化区域因基础设施低碳效能优化,碳排放增量收窄,抑制效应趋弱甚至产生促进作用。

(3) 经济水平影响碳达峰水平的空间特征

长三角经济水平对碳达峰呈现“东高—中低”正向促进格局。上海、浙江省的宁波、金华等4个城市,江苏苏州、盐城和扬州,以及安徽省的滁州、安庆和池州等高回归系数城市,主要因为其通过粗放向集约经济转型,提升了发展质量与效益,有效驱动碳达峰进程。

(4) 对外开放水平影响碳达峰水平的空间特征

长三角对外开放水平对碳达峰呈“东正西负”的梯度特征,大部分长三角城市对外开放水平对碳达峰具有负向作用。其中,江苏省的镇江等城市,浙江省的宁波市等城市及上海市依托环境规制强化和“污染光环”效应,通过外资技术溢出实现资源集约利用;安徽省因低环境准入门槛,吸引了高耗能外资,导致多数城市开放水平与碳达峰呈负相关。

(5) 产业结构水平影响碳达峰水平的空间特征

长三角产业结构回归系数呈“中部低—东西高”的格局,正系数区涵盖浙江省的绍兴等城市,安徽省的安庆、池州等城市及江苏省的扬州。主要原因是工业经济增长积累资金优势,支撑低碳技术开发与高碳项目治理。

(6) 碳排放强度影响碳达峰水平的空间特征

长三角碳排放强度与碳达峰呈负相关,回归系数呈“中部低—东西高”的梯度效应。高系数区集中于安徽省的安庆市和池州市,江苏省的扬州市和盐城市;而安徽省的合肥市、滁州市,江苏省的南京市、镇江市等城市因降碳而推高企业成本,抑制技术革新与生产改造,阻滞碳达峰进程。

4 研究结论与政策建议

4.1 研究结论

(1) 在时间维度上,长三角城市群的碳达峰水平呈现明显的时序特征,可分为两个阶段:2005—2012年的持续增长期和2012—2020年的震荡调整期。在空间维,长三角城市群碳达峰水平相近的城市呈连片分布,具有显著的空间聚集特征。此外,各城市碳达峰水平等级随时间变化而上下波动。

(2) 从各影响因素回归系数在研究期内的时序变化

规律来看,人口规模、城镇化、碳排放强度在研究期内始终抑制碳达峰,作用持续减弱;对外开放水平保持稳定抑制作用;经济水平始终促进碳达峰但效应递减;产业结构以2013年为界,先抑后促。

(3) 各影响因素对长三角碳达峰的影响存在区域差异性。人口规模与产业结构对长三角中部城市抑制较弱,对东、西部抑制较强;城市化与对外开放对长三角碳达峰的抑制作用呈现自东向西递减特征;经济水平对长三角中部促进较弱,对东、西部较显著;碳排放强度则对长三角中部抑制较强,对东、西部较弱。

4.2 政策建议

为推进长三角城市群碳达峰进程,基于研究结论提出以下政策建议:

(1) 针对碳达峰水平的时序阶段性特征,实施差异化阶段治理。在持续增长阶段,侧重于采取技术创新和减排措施,以遏制碳排放的增长。在震荡调整阶段,聚焦于碳排放波动的影响因素,采取实时调控措施。同时促进城市之间的绿色技术合作,提高整个城市群的减排效率。

(2) 针对驱动因素的时序异质性影响特征,构建适配的动态调控体系。对于人口规模、城镇化及对外开放水平三个持续抑制因素,制定长效减排路径,建立长三角绿色建筑标准互认机制,促进人口与城镇化协同优化;严格实施外资绿色准入审查;对于经济水平衰退型促进因素,配套绿色技术迭代方案,建立碳排放监测平台,并接入企业实时碳排放、人口流动程度等数据流;对于产业结构转型影响因素,通过追踪并识别产业结构转型拐点,在拐点之前,对现有高碳项目设定年度减排目标,淘汰落后生产线,并通过技术创新加速新旧阶段绿色化衔接,在拐点之后重点培育绿色产业,推动产业绿色转型。

(3) 针对驱动因素的空间异质性影响特征,推行城市碳达峰分类管控策略。对于人口规模和城镇化水平为碳达峰关键影响因素的城市,应充分发掘城市的规模聚集效应,实现能源的高效利用,同时引导居民绿色消费,鼓励引进低碳技术相关高素质人才,助力碳减排;对于碳达峰受环境规制与外商投资影响较大的城市,政府应加强对高污染产业的监管,以实现生产要素的集约化,实现产业结构的绿色升级。

参考文献:

- [1] Wang Z, Chen H, Huo R, et al. Marginal Abatement Cost Under the Constraint of Carbon Emission Reduction Targets: An Empirical Analysis for Different Regions In China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020(249):119362.
- [2] Fang K, Tang Y, Zhang Q, et al. Will China Peak Its Energy-Related Carbon Emissions By 2030? Lessons From 30 Chinese Provinces[J]. Applied Energy. 2019(25):113852.
- [3] Huang X, Xu X, Wang Q, et al. Assessment of Agricultural Carbon Emissions and Their Spatiotemporal Changes in China, 1997 - 2016[J]. International Journal of Environmental Research and Pub-

- lic Health, 2019, 16(17): 3105.
- [4] 薛曜祖, 王晨. 制造业出口升级、要素空间配置与长三角区域协同发展[J]. 软科学, 2024, 38(10): 1-8.
- [5] Sun W, Dong H. Measurement of Provincial Carbon Emission Efficiency and Analysis of Influencing Factors in China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(13): 38292-38305.
- [6] Falkner R. The Paris Agreement and the New Logic of International Climate Politics[J]. International Affairs, 2016, 92(5): 1107-1125.
- [7] Jiang J, Ye B, Liu J. Research on the Peak of CO₂ Emissions in the Developing World: Current Progress and Future Prospect[J]. Applied Energy, 2019(235): 186-203.
- [8] Su K, Lee C. When will China Achieve Its Carbon Emission Peak? A Scenario Analysis Based on Optimal Control and the Stipat Model[J]. Ecological Indicators, 2020(112): 106138.
- [9] Fang K, Tang Y, Zhang Q, et al. Will China Peak Its Energy-Related Carbon Emissions by 2030? Lessons from 30 Chinese Provinces[J]. Applied Energy, 2019(255): 113852.
- [10] 蔡辰, 赵荣钦, 肖连刚, 等. 中国省域尺度碳收支核算与碳达峰碳中和预测[J]. 长江流域资源与环境, 2024, 33(12): 2713-2726.
- [11] 陈书林, 杨莉. 长三角地区碳达峰碳中和情景预测研究[J]. 长江流域资源与环境, 2024, 33(10): 2260-2270.
- [12] 罗闯, 黎林, 王雨豪, 等. 基于Leap模型的江苏省重点行业碳达峰碳中和情景[J]. 环境科学, 2025, 46(1): 1-9.
- [13] 陆妍霏, 宣蔚, 赵力伟. 安徽省碳排放时空格局演变与碳达峰路径预测——基于Stipat扩展模型和岭回归模型[J]. 地域研究与开发, 2024, 43(1): 146-152+173.
- [14] Li B, Han S, Wang Y, et al. Feasibility Assessment of the Carbon Emissions Peak in China's Construction Industry: Factor Decomposition and Peak Forecast[J]. Science of the Total Environment, 2020(706): 135716.
- [15] Wang Y, Su X, Qi L, et al. Feasibility of Peaking Carbon Emissions of the Power Sector in China's Eight Regions: Decomposition, Decoupling, and Prediction Analysis[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019 Ser(26): 29212-29233.
- [16] 宋永朝, 舒秦, 金程容, 等. 中国区域交通碳排放预测与碳达峰路径规划[J]. 环境科学, 2025, 46(4): 1995-2008.
- [17] Cai K, Wu L. Grey Prediction of Carbon Emission and Carbon Peak in Several Developing Countries[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2024, 133(Pb): 108210.
- [18] Wu Y, Xu B. When will China's Carbon Emissions Peak? Evidence from Judgment Criteria and Emissions Reduction Paths[J]. Energy Reports, 2022(8): 8722-8735.
- [19] Zhao X, Long L, Yin S, et al. How Technological Innovation Influences Carbon Emission Efficiency for Sustainable Development? Evidence from China[J]. Resources Environment and Sustainability, 2023: 100135.
- [20] Liu R p, Fang Yr, Peng S, et al. Study on Factors Influencing Carbon Dioxide Emissions and Carbon Peak Heterogenous Pathways in Chinese Provinces, 2024(365): 121667.
- [21] Zhu B, Zhang Y, Zhang M, et al. Exploring the Driving Forces and Scenario Analysis for China's Provincial Peaks of CO₂ Emissions. Journal of Cleaner Production, 2022(378): 134464.
- [22] 邹璇, 杨旭, 刘晨. 中国城市内部多中心结构对碳排放强度的影响及其机制[J]. 资源科学, 2024, 46(7): 1284-1298.
- [23] 谢品杰, 解玉文, 杨帆. 经济周期视角下的中国碳排放强度影响因素研究[J]. 生态经济, 2024, 40(5): 13-20+38.
- [24] Kaya Y. Impact of Carbon Dioxide Emission Control on Gnp Growth: Interpretation of Proposed Scenarios[J]. Intergovernmental Panel on Climate Change/Response Strategies Working Group, May, 1989.
- [25] Raupach M, Marland G, Ciais P, et al. Global and Regional Drivers of Accelerating CO₂ Emissions[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences. U. S. A, 2007, 104(24): 10288-10293.
- [26] Ehrlich Pr, Holdren J p. Impact of Population Growth[J]. Science, 1971, 171(3977): 1212-1217.
- [27] 廖祖君, 张剑宇, 陈诗薇. 碳排放影响因素及达峰路径研究——基于四川省的分析[J]. 软科学, 2023, 37(9): 95-101.
- [28] 马建辉, 孙钰, 郭昭鹏, 等. 基于Gtwr模型的河北省碳排放影响因素异质性研究[J]. 生态经济, 2023, 39(9): 23-29+49.
- [29] 何泉吟, 陈汉驰, 焦成焕. 数字经济、消费提振与实体经济发展——兼论消费异质与人口规模的门槛效应[J]. 技术经济与管理研究, 2025(1): 43-49.
- [30] 霍腾飞, 张锦帆, 乔友凤, 等. 城镇化视角下建筑碳排放达峰动态情景模拟[J]. 环境科学, 2024, 45(12): 6783-6795.
- [31] 王东, 罗红云. 经济集聚与人口集聚协调发展对区域碳排放的影响[J]. 统计与决策, 2025, 41(2): 120-124.
- [32] Panayotou T. Demystifying the Environmental Kuznets Curve: Turning a Black Box into a Policy Tool[J]. Environment & Development Economics, 1997, 2(4).
- [33] 刘乾, 程洪乾, 邵砾群, 等. “双碳”愿景下双向Fdi协调发展助推区域绿色转型的实证研究: 本地效应与空间溢出[J]. 中国软科学, 2024(2): 104-112.
- [34] 刘志华, 徐军委, 张彩虹. 科技创新、产业结构升级与碳排放效率——基于省际面板数据的Pvar分析[J]. 自然资源学报, 2022, 37(2): 508-520.

(责任编辑:李 镜)