

引用格式: 吴涛, 曹湛, 叶琴, 等. 长三角城市产业演化对碳排放效率的影响[J]. 资源科学, 2026, 48(3): 740-754. [Wu T, Cao Z, Ye Q, et al. Impact of urban industrial evolution on carbon emission efficiency in Yangtze River Delta[J]. Resources Science, 2026, 48(3): 740-754.] DOI: 10.18402/resci.2026.03.17

# 长三角城市产业演化对碳排放效率的影响

吴涛<sup>1</sup>, 曹湛<sup>1</sup>, 叶琴<sup>2</sup>, 戴靓<sup>3</sup>

(1. 同济大学建筑与城市规划学院, 上海 200092; 2. 上海师范大学环境与地理科学学院, 上海 200234; 3. 南京财经大学公共管理学院, 南京 210023)

**摘要:**【目的】在“双碳”目标与“新质生产力”发展的双重驱动下, 产业转型成为提升碳排放效率的核心途径。本文从产业演化视角出发, 旨在考察城市产业转型升级的过程如何影响碳排放效率。【方法】以长三角城市群为例, 基于2013—2022年企查查企业数据与碳排放数据构建面板模型, 揭示城市产业路径演化(新进入产业的关联密度)与产业能级演化(新进入产业的复杂度)对城市碳排放效率的影响及其异质性作用。【结果】①碳排放效率呈现显著的空间分异, 高效率城市主要分布在沪宁杭沿线、沿海和部分区域边缘城市。②产业路径与产业能级在城市间表现出差异化演进特征, 且演进节奏存在明显分化。③城市产业路径突破与碳排放效率呈正相关, 而产业能级向高复杂领域跃迁与碳排放效率呈负相关。④分组回归进一步显示, 城市产业演化与碳排放效率的关系具有阶段异质性: 产业能级提升在城市不同发展阶段总体呈负相关, 且负相关强度随经济发展水平提高而逐步减弱; 中等经济发展阶段的都市中, 产业路径依赖对碳排放效率的负向影响更为突出。【结论】研究结果揭示了产业转型升级与碳排放效率之间的复杂关系, 对“产业升级必然促进绿色低碳发展”的认知提供补充与修正, 并为评估产业政策的碳减排效应提供理论与实践参考。

**关键词:** 产业路径动态; 产业能级动态; 碳排放效率; 关联密度; 复杂度; 长三角

DOI: 10.18402/resci.2026.03.17

## 1 引言

全球气候变暖对可持续发展构成严峻挑战, 产业活动作为能源消费与碳排放的重要来源, 是实现减排目标的关键领域。改革开放以来, 中国在快速工业化与经济增长过程中, 长期面临增长与减排的平衡压力, 产业体系总体能源消费与碳排放规模居于高位<sup>[1]</sup>。在碳减排约束不断强化的背景下, 自“十一五”时期以来, 我国持续强化节能减排与绿色转型导向, 着力推动产业结构整体升级与能源结构优化, 加快构建绿色低碳循环经济体系<sup>[2]</sup>。通过将单位GDP能耗、单位GDP二氧化碳排放等约束性指标纳入地方考核体系, 以制度力量倒逼产业转型与能效提升<sup>[3]</sup>。在此背景下, 产业转型升级如何影响

碳排放效率, 成为学术界与政策界共同关注的核心议题<sup>[4]</sup>。

在实践方面, 推动产业转型升级已经成为各国落实低碳发展的主要路径。例如, 德国通过《国家工业战略2030》推动工业领域绿色低碳转型, 日本依托《绿色增长战略》发展新能源与环保产业。中国于2024年发布《关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见》, 明确指出要推动重点行业绿色低碳转型以落实“双碳”目标。在实证研究方面, 相关结果表明: ①产业从资源与劳动密集型产业向技术和资本密集型产业转型, 有助于降低对高能耗、高污染发展路径的依赖<sup>[5]</sup>; ②产业转型升级通常伴随着技术进步与能源结构的优化, 可提升能源效率并促

收稿日期: 2024-08-30; 修订日期: 2026-01-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(52008298; 42271212); 中央高校基本科研业务经费项目(2025XR09)

作者简介: 吴涛, 男, 江西萍乡人, 硕士研究生, 研究方向为城市创新网络。E-mail: taowu@tongji.edu.cn

通讯作者: 曹湛, 男, 湖北潜江人, 博士, 助理教授, 研究方向为城市大数据、城市网络和创新网络。E-mail: 1989caozhan@tongji.edu.cn

2026年3月

进清洁能源替代,从而降低碳排放<sup>[6,7]</sup>;③除了新兴产业对传统产业的替代以外,传统产业通过绿色技术改造也能实现碳排放效率提升<sup>[8]</sup>。然而,既有研究多采用三次产业占比、工业增加值等结构性指标来测度产业转型,难以刻画其动态演化过程,亦不足以深入揭示其与碳排放效率之间的复杂机制。本文借助演化经济地理中的“关联度-复杂度”分析框架,从路径演化和能级演化两个方面刻画城市产业转型升级特征,并基于此分析城市产业转型升级过程对碳排放效率的影响。

长三角城市群是中国经济发展最活跃、产业活力最强、产业链体系最完善的区域之一,肩负着探索区域新发展格局和推动新质生产力加快发展的战略使命,是全国高质量一体化发展的示范区,也是实现“双碳”目标的重要区域。2010年以来,该区域碳排放强度的增长幅度持续收窄,区域碳排放效率整体呈现稳步提升趋势(图1),这与区域持续推进产业结构优化与要素配置效率提升、实施创新驱动发展战略密切相关<sup>[9]</sup>。然而,长三角城市群中不同城市在产业转型节奏、经济增长与环境保护的协调程度上仍存在差异<sup>[10,11]</sup>。基于此,本文以长三角城市群为研究对象,结合企业微观大数据和城市碳排放数据,探讨2013—2022年长三角城市群产业动态演化过程对城市碳排放效率的影响机制,并尝试回

答以下问题:①城市产业路径演化(新进入产业关联密度)对碳排放效率的影响;②城市产业能级演化(新进入产业复杂度)对碳排放效率的影响;③上述影响在不同经济发展水平城市中的异质性表现。

## 2 文献综述与研究假说

### 2.1 演化经济地理与产业演化研究

产业演化是指城市新旧动能转换的过程,涵盖新兴产业对传统产业的演替以及高复杂产业对低复杂产业的演替<sup>[12]</sup>。演化经济地理在过去20年间发展迅速,为理解区域与城市产业演化提供了重要分析框架<sup>[13]</sup>。相关研究强调,地方新产业的形成和壮大既具有偶然性,也依赖于地方长期的累积过程<sup>[14]</sup>。同时,不同城市禀赋基础的差异直接决定其产业能级演进的机会,大多情况下仅有少数城市有能力发展高复杂度的产业<sup>[15,16]</sup>。

在此基础上,演化经济地理学者提出了基于“关联度-复杂度”的产业演化分析框架<sup>[17-19]</sup>。关联度用于刻画产业路径演化,体现为“路径依赖”与“路径突破”两种模式<sup>[14]</sup>。根据“关联法则”,城市更易发展与现有产业基础相关联的新产业,即呈现路径依赖;但在制度变革与创新驱动下,城市也可能实现路径突破,发展关联性较弱的新产业<sup>[15,16]</sup>。现实中,“路径突破”与“路径依赖”并非二元对立,二者通常共同作用,形成差异化的演化路径<sup>[11]</sup>。实证

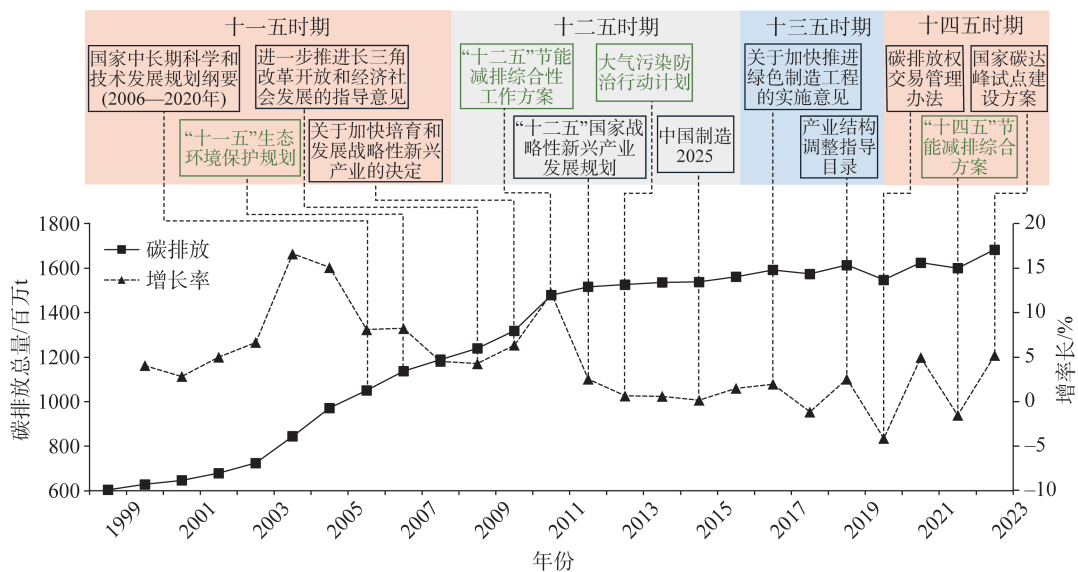


图1 1999—2023年长三角城市群碳排放变化与政策演进

Figure 1 Carbon emission changes and policy evolution of Yangtze River Delta urban agglomeration, 1999-2023

层面,Hidalgo等<sup>[20]</sup>原创性地提出了基于最小共现概率的产品间关联度的测度方法,并据此构建了“产品空间”;Balland等<sup>[17]</sup>在此基础上提出了技术关联密度的计算方法,实现了对“关联法则”的定量检验;Li等<sup>[21]</sup>进一步提出了新进入技术关联密度的计算方法,实现了对“路径依赖”和“路径突破”演化方式的定量比较。

复杂度则用于刻画产业能级演化。不同产业在技术范式、技能需求、资本门槛和管理成本等方面存在不同程度的差异,对于一些位于价值链、创新链较高区段的复杂产业,即便它们与城市既有产业基础存在较高的关联性,也很难在所有城市成功扎根并发展壮大<sup>[22]</sup>。与此同时,决定城市产业竞争力的往往是那些高度复杂的颠覆性产业,但这类产业往往很难被复制和模仿,绝大多数情况下只被少数城市所拥有<sup>[16,18,23]</sup>。这类产业虽然培育难度大、风险高,但一旦成功,城市将获得更高的收益和更强的竞争力。实证研究方面,Hidalgo等<sup>[15]</sup>最早提出了基于二模矩阵迭代的产品复杂度和经济复杂度计算方法;Tacchella等<sup>[24]</sup>在此基础上提出非线性迭代的复杂度改进计算方法。

## 2.2 研究假说

### 2.2.1 产业路径演化对碳排放的影响

已有研究主要从产业构成<sup>[25]</sup>、产业转移<sup>[26]</sup>、产业链<sup>[27]</sup>等不同视角探讨了其与碳排放的关系。然而,既有实证分析主要基于产业部门增加值、行业产出占比等结构性指标,对产业动态演化过程及其对碳排放影响的差异性机制尚未充分揭示。

从产业路径动态演化的角度来看,新旧产业交替过程深刻影响城市碳排放效率(图2)。若新进入产业与本地既有产业的关联度越高,产业演化越倾向于路径依赖,技术与结构调整空间相对有限,易形成低水平扩张并抑制碳排放效率提升;关联度越低,则越倾向于路径突破,更可能通过结构升级、技术迭代与能源利用方式优化推动碳排放效率提升。目前逐渐有部分学者基于“关联法则”从动态的视角来研究地区产业演化对区域碳排放的外部性影响。例如,Li等<sup>[28]</sup>基于规模以上工业企业数据,测度了中国各省份的路径突破和路径依赖水平,发现产业路径突破发展能有效减少碳排放总量。由此,提出本文第一个假说:

H1:城市产业路径动态演化会影响城市碳排放效率。一方面,路径依赖会降低碳排放效率;另一方面,路径突破则会提升碳排放效率。

### 2.2.2 产业能级演化对碳排放的影响

除了产业路径演化,产业能级演化亦有可能影响城市碳排放效率,但学界对此尚未达成共识。部分研究认为,随着产业复杂度的提升,地方技术水平会不断提升,全要素生产率不断提升,碳排放效率也会随之提升<sup>[28]</sup>。一方面,产业复杂度的提升伴随着生产技术进步、管理理念革新与更严格的环境规制,有助于提升碳排放效率。例如,Romero等<sup>[29]</sup>基于67个国家的产品出口数据,研究了产品复杂度对国家碳排放强度的影响,发现高复杂度与低碳排放强度密切相关。Dogan等<sup>[30]</sup>基于面板模型研究了28个OECD国家经济复杂度对碳排放的影响,发现

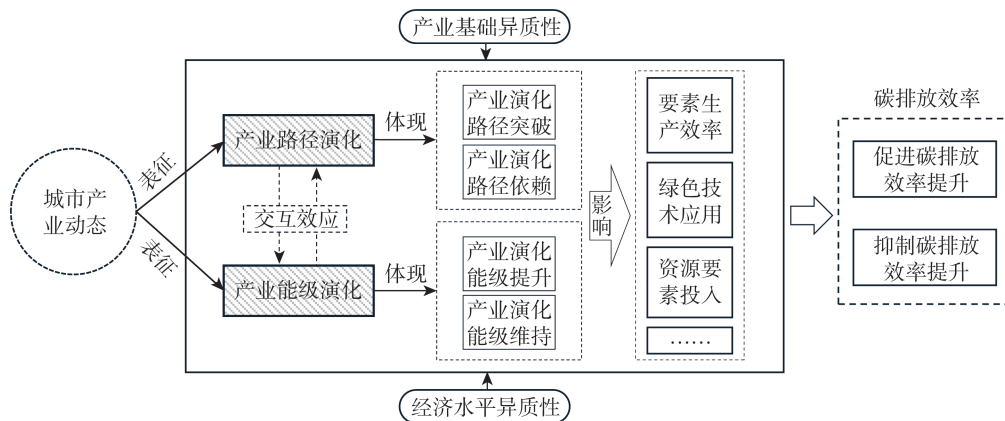


图2 研究机制图

Figure 2 Research mechanism diagram

2026年3月

经济复杂度和可再生能源使用的交互作用可以减缓国家碳排放强度。然而,也有学者持不同观点,认为产业复杂度的提升对地方碳排放效率可能产生抑制作用。杨浩昌等<sup>[31]</sup>利用2006—2020年中国30个省级地区的面板数据发现,产业技术升级可能通过“回弹效应”在短期内抑制碳排放效率,即技术进步的减排收益被产业扩张带来的新增碳排放成本所抵消。此外,也有研究发现,二者间可能存在非线性的倒U型关系,表明复杂产业的发展在初期可能因较高的资源投入而增加碳足迹<sup>[32,33]</sup>。鉴于上述理论与实证分歧,本文提出如下假说:

H2a:城市产业能级提升可推动技术进步、理念革新与环境规制,进而促进城市碳排放效率的提升。

H2b:产业能级提升由于引发的资源消耗与碳排放回弹,会抑制城市碳排放效率的提升。

### 2.2.3 产业演化对碳排放影响的异质性

产业路径与能级演化对碳排放效率的影响可能因城市发展水平与产业基础的不同而呈现异质性。对经济发达、产业基础积累深厚的大城市而言,其产业规模大、多样化程度较高,发展路径突破或高复杂度产业对碳排放效率的边际影响可能较小。相反,对经济水平较低、产业基础薄弱的小城市而言,发展关联度低或高复杂度的产业,往往面临更高的资源投入与适配成本,其经济增长的期望产出可能难以抵消由此带来的碳排放增加,反而可能抑制碳排放效率<sup>[34]</sup>。基于此,提出本文第3个假说:

H3:城市产业演化对碳排放效率的影响具有情境依赖性,在不同经济发展水平与产业积累条件下的城市之间存在差异。

## 3 研究区概况、数据来源与研究方法

### 3.1 研究区概况

本文以长三角城市群为研究对象,涵盖上海市、江苏省、浙江省、安徽省全域共41个地市,总面积35.8万km<sup>2</sup>。截至2023年,该区域常住人口约2.36亿人,占全国总人口的16.7%;碳排放总量约17亿t,约占全国总排放的13.5%。长三角是我国产业体系最完整、产业分工最密集、创新活动最活跃的区域之一,同时内部城市在经济发展水平与产业基

础上存在显著差异,为检验产业演化影响的空间异质性提供了典型样本基础。

### 3.2 数据来源

本文采用IPCC推荐方法(<https://www.ipcc.ch/>)测算城市碳排放数据,依据城市能源消费量计算碳排放量。测度产业演化特征数据来源于企查查企业注册数据库,该数据库基于企业的注册资本、企业关联、经营状态、参保员工数量等关键指标,并按照统一算法将企业划分为微型、小型、中型和大型4类。为确保样本的经济代表性,研究中剔除了主要从事生活服务类业务的微型企业。依据《国民经济行业分类》(GB/T 4754—2017)将企业行业类别统一归并至97个行业大类。在计算产业相关度和产业复杂度等指标时,以企业注册资本进行加权,以反映不同产业的实际影响。此外,为保持分析样本行政区划的一致性,所有企业的行政区划代码按照2013年版行政区划标准(GB/T2260—2013)进行归并处理。本文研究期为2013—2022年。

### 3.3 因变量:城市碳排放效率测度

本文采用基于非期望产出的超效率SBM模型测度长三角城市的碳排放效率(CE)。该模型能够同时处理期望产出与温室气体排放等非期望产出,并通过松弛变量刻画投入-产出偏离,相较传统DEA模型更适用于碳排放绩效与生态效率等问题的测度<sup>[35-38]</sup>。经典SBM模型效率值介于0至1之间,无法对多个同时处于前沿面的决策单元做进一步区分。为此,本文参考了Song等<sup>[39]</sup>的处理方法,引入超效率SBM模型来测度各城市的碳排放绩效。该模型允许效率值超过1,从而实现对全部城市的碳排放效率进行有效比较与排序。CE值越大,表示城市在既定投入条件下能够获得更高产出并伴随更低碳排放,即碳排放效率越高。借鉴已有研究,选取固定资产投资、从业人员数量、电力消费量作为投入变量,期望产出为地区生产总值,非期望产出为CO<sub>2</sub>排放量<sup>[37]</sup>。

### 3.4 自变量:城市产业演化测度

本文以新进入优势产业的关联密度和复杂度两个指标测度城市产业演化。其中,新进入优势产业关联密度用于刻画城市产业路径演化(路径依赖或路径突破),新进入优势产业复杂度用于刻画城

市产业能级演化(向高级化、复杂化演进的程度)。

产业关联密度的计算借鉴 Hidalgo 等<sup>[20]</sup>的方法,核心依据是“关联法则”。其基本计算逻辑为:若某城市在  $t$  年新进入的优势产业与  $t-1$  年既有优势产业之间的关联度较高,表明产业演化更趋向于路径依赖;反之,则表明产业演化更趋向于路径突破。首先,在统计长三角各城市 97 个行业大类企业注册总资本的基础上,计算不同产业在城市中的区位熵,通过 0-1 二值化处理识别出城市所具有显性比较优势的产业:

$$LQ_{i,c,t} = \frac{x_{i,c,t} / \sum_c x_{i,c,t}}{\sum_i x_{i,c,t} / \sum_c \sum_i x_{i,c,t}} \quad (1)$$

$$RCA_{i,c,t} = \begin{cases} 1, & \text{if } LQ_{i,c,t} \geq 1 \\ 0, & \text{if } LQ_{i,c,t} < 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $LQ_{i,c,t}$ 为城市  $c$  在年份  $t$  的产业  $i$  的区位熵; $x_{i,c,t}$ 为城市  $c$  在年份  $t$  的产业  $i$  的企业注册总资本; $RCA_{i,c,t}$ 为城市  $c$  在年份  $t$  是否在产业  $i$  上具有显性比较优势的二值变量。基于上式,通过比较  $t$  年和  $t-1$  年城市  $c$  的  $RCA$  变化,可以判别  $t$  年城市  $c$  新出现的比较优势产业:若  $RCA$  在  $t-1$  时段为 0 ( $RCA_{i,c,t-1}=0$ ),且在  $t$  时段为 1 ( $RCA_{i,c,t}=1$ ),则认为产业  $i$  为城市  $c$  在  $t$  年新进入的产业。随后,采用 Jaccard 指数计算不同产业之间的关联度:

$$\varphi_{ij,t} = \frac{co\_occ_{ij,t}}{occ_{i,t} + occ_{j,t} - co\_occ_{ij,t}} \quad (3)$$

式中: $\varphi_{ij,t}$ 为  $t$  年产业  $i$  与产业  $j$  的关联度; $occ_{i,t}$ 和  $occ_{j,t}$ 分别为在  $t$  年以产业  $i$  和产业  $j$  为比较优势产业的城市数量; $co\_occ_{ij,t}$ 为在  $t$  年比较优势产业  $i$  和产业  $j$  共现的城市数量。

最后,采用 Balland 等<sup>[17]</sup>提出的关联密度计算方法,测度城市中新进入优势产业与该城市既有优势产业之间的关联程度。计算公式如下:

$$NIRD_{i,c,t} = \frac{\sum_{j \neq i} (\varphi_{ij,t-1} \times RCA_{j,c,t-1})}{\sum_{j \neq i} \varphi_{ij,t-1}} \times 100 \quad (4)$$

$$IRD_{c,t} = \frac{\sum_{i=1}^n NIRD_{i,c,t}}{n} \quad (5)$$

式中: $NIRD_{i,c,t}$ 为  $t$  年城市  $c$  新进入的产业  $i$  与该城市

$t-1$  年既有产业的关联密度; $IRD_{c,t}$ 为  $t$  年城市  $c$  中所有新进入产业关联密度的均值; $n$ 为  $t$  年城市  $c$  中所有新进入产业的数量。 $IRD_{c,t}$ 即为测度产业路径演化的核心自变量,其值越大反映城市产业演化的路径依赖倾向越强,值越小反映路径突破倾向越强。

本文中的另一个核心自变量为新进入产业复杂度,用于测度城市产业演化能级,借鉴 Hidalgo 等<sup>[15]</sup>提出的反射法。该算法的核心原理是复杂度高的产品或技术只被少数地区所拥有,而复杂度较低的产品或技术则普遍存在于大多数地区<sup>[22]</sup>。首先,定义城市产业多样性与产业遍在性:

$$k_{c,t} = \sum_i RCA_{i,c,t} \quad (6)$$

$$k_{i,t} = \sum_c RCA_{i,c,t} \quad (7)$$

式中: $k_{c,t}$ 为  $t$  年  $c$  城市的产业多样性; $k_{i,t}$ 为  $t$  年产业  $i$  在所有城市中的遍在性。

在此基础上,通过迭代计算得到城市复杂度 ( $NECI$ ) 与产业复杂度 ( $NPCI$ ):

$$NECI_{c,t} = \frac{1}{k_{c,t}} \sum_i (RCA_{i,c,t} \times NPCI_{i,t}) \quad (8)$$

$$NPCI_{i,t} = \frac{1}{k_{i,t}} \sum_c (RCA_{i,c,t} \times NECI_{c,t}) \quad (9)$$

式中: $NECI_{c,t}$ 为  $t$  年城市  $c$  的复杂度; $NPCI_{i,t}$ 为  $t$  年产业  $i$  的复杂度。通过迭代运算直至  $NECI_{c,t}$  和  $NPCI_{i,t}$  的排名结果达到稳定。

然后,为消除产业复杂度指标的年度波动,计算各产业在所有年份中复杂度  $NPCI_{i,t}$  的均值,得到其平均复杂度,并以此作为进入复杂度的计算基础:

$$\overline{PCI}_i = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T NPCI_{i,t} \quad (10)$$

式中: $\overline{PCI}_i$ 为产业  $i$  在研究期内的平均复杂度; $T$ 为研究期包含的年份数。在此基础上,计算城市  $c$  在  $t$  年新进入优势产业的平均复杂度,构建新增产业复杂度指标:

$$ECI_{c,t} = \frac{1}{n_{c,t}} \sum_{i \in N_{c,t}} \overline{PCI}_i \quad (11)$$

式中: $N_{c,t}$ 为城市  $c$  在  $t$  年新进入的优势产业集合; $n_{c,t}$ 为该集合中产业的数量。 $ECI_{c,t}$ 为城市  $c$  在  $t$  年新进入优势产业的平均复杂度,用于衡量该城市产业能

2026年3月

级动态演化,其值越大表明城市产业能级向高复杂领域演化。

### 3.5 控制变量

此外,参考已有研究,本文选取若干控制变量<sup>[40-42]</sup>用于反映城市不同维度的异质性特征。其一是表征城市经济发展水平的相关指标,包括城市生产总值(GDP)和人口总量(POP);其二是表征城市静态产业结构特征和科学技术发展水平的指标,包括第二产业生产总值占比(INDR)和人均科技研发投入(TECH);其三是表征城市环境规制程度和能源利用结构的指标,包括单位产值SO<sub>2</sub>排放量(EC)和单位用电产值(ENER)。以上数据来源于《中国城市统计年鉴》,数据采集时段为2013—2022年。最终确定了本文所使用的所有变量,详见表1。

### 3.6 回归模型构建

本研究采用面板模型,且同时考虑时间固定效应和城市固定效应。由于因变量城市碳排放效率为连续数据,故采用OLS面板回归作为基准模型。表达式如下:

$$CE_{c,t} = \alpha_0 + \alpha_1 \ln IRD_{c,t} + \alpha_2 \ln ECI_{c,t} + \alpha_3 (\ln IRD_{c,t} \times \ln ECI_{c,t}) + \sum_k \alpha_k \ln X_{k,c,t} + \mu_c + \mu_t + \epsilon_{c,t} \quad (12)$$

式中:被解释变量CE<sub>c,t</sub>代表城市c在t年的碳排放效率,其值越大,表明城市在既定投入水平下能够获得更高的产出、产生相对更少的碳排放,即碳排放效率越高;X<sub>k,c,t</sub>为城市c在t年的第k个控制变量;α<sub>0</sub>为常数项;α<sub>1</sub>-α<sub>3</sub>分别表示核心解释变量及其交互项的回归系数;α<sub>k</sub>为第k个控制变量的回归系数;μ<sub>c</sub>和μ<sub>t</sub>分别表示城市固定效应与年份固定效应;ε<sub>c,t</sub>为随机扰动项。为减少面板模型可能存在的异方差影响,对解释变量与控制变量取自然对数处理。

## 4 结果与分析

### 4.1 长三角城市群碳排放效率和产业动态的时空演变格局

#### 4.1.1 长三角城市群碳排放效率时空演变格局

长三角41个城市碳排放效率呈现明显的阶段性波动与空间集聚特征(图3、图4)。时间上,碳排

表1 变量描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of variables

变量	最小值	最大值	平均值	标准差
CE	0.358	2.000	0.844	0.350
IRD	8.371	99.601	58.833	19.307
ECI	30.410	66.896	49.788	4.253
GDP	462.245	44653.000	5114.303	6115.448
POP	73.800	1504.000	519.234	278.119
INDR	25.660	72.140	45.516	6.806
TECH	16.099	3108.522	559.413	602.228
EC	0.505	140.618	17.586	20.904
ENER	3.332	37.837	10.189	6.077



图3 2013—2022年长三角城市群碳排放效率年均值变化趋势图

Figure 3 Trends of annual average carbon emission efficiency in Yangtze River Delta urban agglomeration, 2013-2022

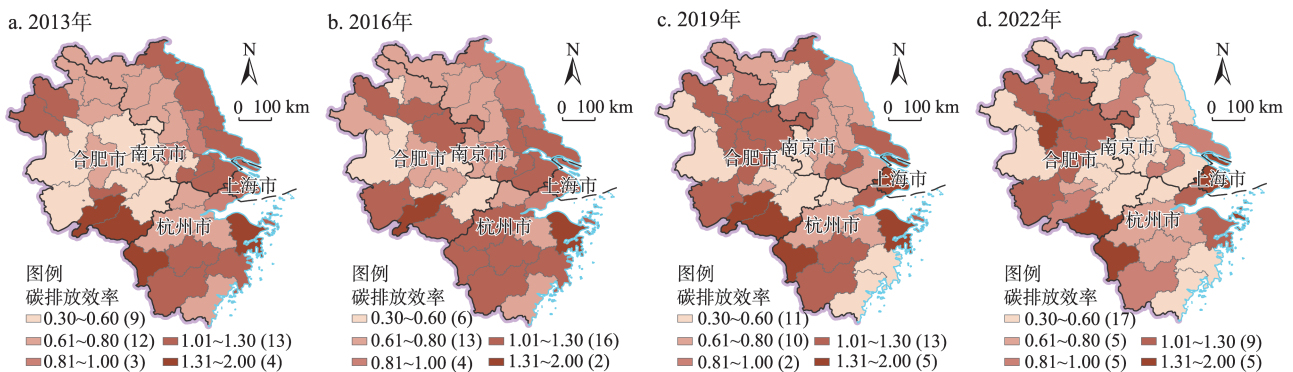


图4 2013—2022年长三角城市群碳排放效率时空演变格局

Figure 4 Spatiotemporal evolution patterns of carbon emission efficiency in Yangtze River Delta urban agglomeration, 2013-2022

注:括号内为数值范围内城市数量。下同。

放效率总体经历“高位—回落—回升—趋稳”的阶段演变:2013—2016年维持在相对较高水平,2016—2018年出现阶段性回落,2019年后碳排放效率回升,并在研究期末趋于相对稳定。

碳排放效率空间格局整体表现为“中心低、外围高”的特征(图4)。碳排放效率高值区域主要集中在以上海为核心的沪宁走廊沿线、江浙两省沿海沿湾地区中具有较好的产业基础、新旧动能转换较快的城市。此外,以轻资产、小规模加工或旅游业为主的浙南、皖北与皖南部分城市也表现出较高的碳排放效率。

#### 4.1.2 长三角地区产业发展动态演化路径

研究期内,长三角城市产业路径动态演化呈现清晰的空间分异(图5)。总体上,核心城市多呈现路径依赖趋势,而外围城市则更倾向于路径突破。这一格局与产业基础差异密切相关——核心城市比较优势产业门类更为丰富、产业体系更为成熟,新增产业多沿既有能力与链条加深扩展,使路径依

赖特征更突出;相较之下,外围城市原有产业多样性相对不足,新增产业更可能通过跨越既有技术与市场组合实现突破式进入,从而表现为更强的路径突破倾向。

此外,长三角各城市产业路径演化持续发生变动,部分地区在不同时段存在由依赖向突破(或相反)的阶段性切换,其节奏与当地经济发展模式密切相关。从区域对比来看,不同经济板块在演化节奏出现一定分异。江苏部分城市(尤其是苏南、苏中)在研究期内表现出更明显的路径突破趋势。其可能的原因是:其外资主导、重资产的产业发展模式,在遭遇全球产业链重组与技术迭代压力后,被迫倒逼加速技术突破与自主创新。相比之下,浙江以“块状经济”为主,企业规模小、资产轻,体现出较强的结构惰性与渐进式改良特征。

#### 4.1.3 长三角地区产业发展动态演化能级

长三角城市产业能级的动态演化呈现出较强的空间稳定性(图6),产业复杂度整体保持显著的

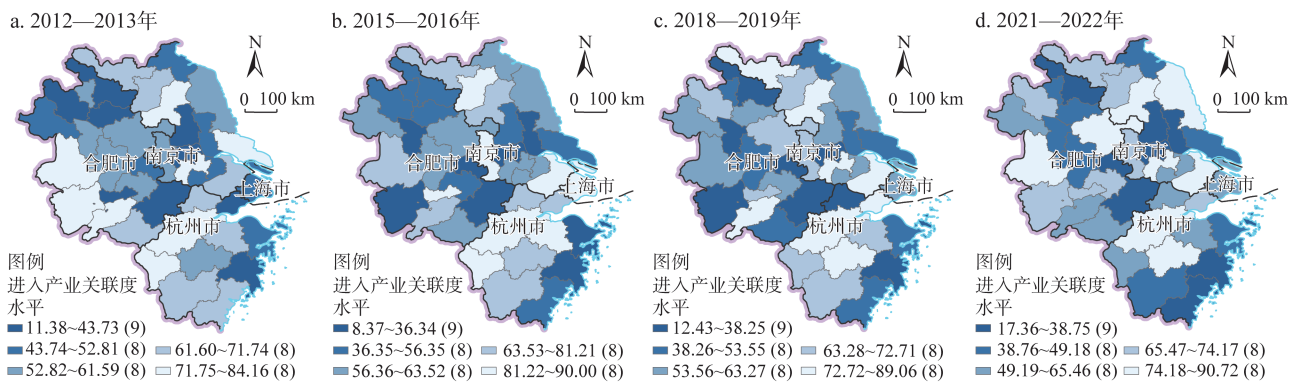


图5 2013—2022年长三角城市群产业路径动态演化空间分布格局

Figure 5 Spatial distribution patterns of dynamic industrial pathway evolution in Yangtze River Delta urban agglomeration, 2013-2022

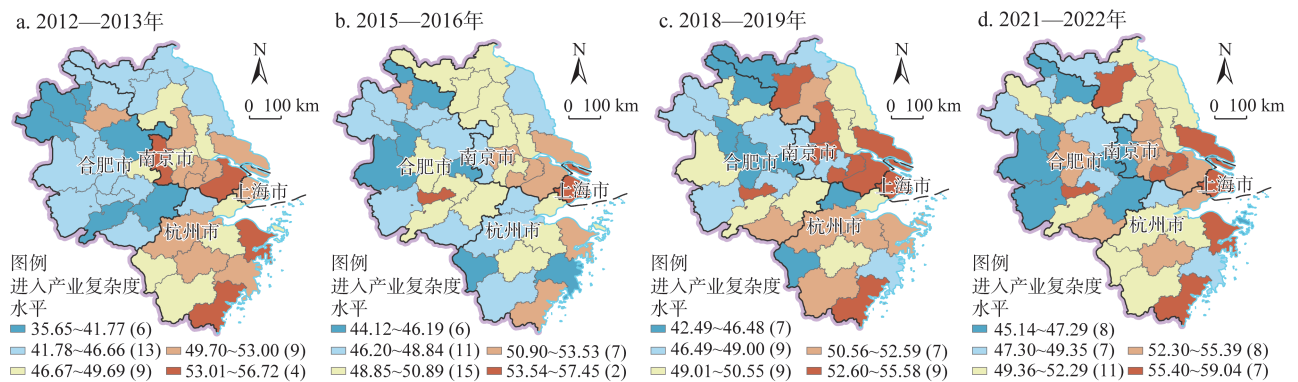


图6 2013—2022年长三角城市群产业能级动态演化空间分布格局

Figure 6 Spatial distribution patterns of dynamic industrial capacity evolution in Yangtze River Delta urban agglomeration, 2013-2022

2026年3月

“核心-外围”特征。以上海及苏南、浙东沿海地区核心城市为代表的高能级城市,产业复杂度提升较为明显;相较之下,外围城市的复杂度水平整体偏低、变动幅度相对有限。这些核心城市地区作为改革开放以来的先行区域,已形成较为完整的现代化产业体系,并在复杂技术领域占据领先地位,因而具备持续向高复杂度产业迭代升级的能力。

#### 4.2 基准面板回归结果

模型(1)和(2)检验了产业路径演化对碳排放效率的独立作用,模型(3)和(4)考察了产业能级演化的影响,模型(5)考察了产业路径和能级演化对碳排放效率的共同影响及交互作用(表2)。

模型(1)结果显示,城市产业路径演化(*IRD*)在1%的水平下与碳排放效率显著负相关,表明路径依抑制碳排放效率提升,而路径突破则提升碳排放效率。在控制经济发展水平、产业基础与环境规制等变量后,模型(2)结果保持稳健。由此,假说H1得到验证。具体而言,产业演化路径依赖通常意味

着城市产业发展仍延续粗放模式,依赖传统技术与能源结构,这种低水平复制和低效率扩张的产业发展惯性会不可避免地增加环境恶化的派生成本,造成“碳锁定”现象<sup>[43]</sup>。例如,苏南、皖北等长三角地区在研究期初始阶段主要依赖化工、纺织、钢铁等传统产业,形成了产业发展的“惯性”,导致其碳排放效率低于区域平均水平。相反,路径突破则能推动新旧动能转换,优化生产方式与能源结构,减轻环境负外部性<sup>[44]</sup>。例如,苏南地区在近年来严格的化工产业整治政策的倒逼之下,依托原有技术基础,成功向生物医药、氢能等新兴领域转型,推动产业路径突破,显著提升了碳排放效率,为区域低碳转型提供了示范。

模型(3)和模型(4)的回归结果显示,城市新进入产业的复杂度与碳排放效率在5%水平下显著负相关,表明产业向高复杂度领域演化会抑制碳排放效率的提升。该结果在引入控制变量前后均保持一致。因此假说H2b成立,假说H2a被拒绝。对此

表2 碳排放效率基准回归结果

Table 2 Baseline regression results of carbon emission efficiency

基准回归	因变量: <i>CE</i>				
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
<i>lnIRD</i>	-0.183*** (0.047)	-0.143*** (0.046)			0.281 (0.326)
<i>lnECI</i>			-0.396** (0.170)	-0.382** (0.165)	0.480 (1.290)
<i>lnIRD</i> × <i>lnECI</i>					-0.159 (0.449)
<i>lnGDP</i>		0.340** (0.151)		0.368*** (0.208)	0.364** (0.151)
<i>lnPOP</i>		-0.218* (0.154)		-0.204*** (0.155)	-0.626*** (0.155)
<i>lnINDR</i>		-0.646*** (0.184)		-0.718*** (0.183)	-1.189*** (0.184)
<i>lnTECH</i>		0.052* (0.043)		0.039 (0.020)	0.037 (0.044)
<i>lnEC</i>		-0.012 (0.033)		-0.013 (0.038)	0.006 (0.028)
<i>lnENER</i>		0.166*** (0.044)		0.174*** (0.059)	0.165*** (0.044)
城市固定效应	YES	YES	YES	YES	YES
年份固定效应	YES	YES	YES	YES	YES
样本数	410	410	410	410	410
<i>R</i> <sup>2</sup>	0.044	0.198	0.013	0.213	0.241

注:括号内为计量标准误差;\*,\*\*、\*\*\*分别表示10%、5%和1%的水平上显著。下同。

的解释主要基于两方面:一方面,许多高复杂产业虽然能够带来更高的利润和更强的产业竞争力,但往往也伴随着难以忽略的高能耗和高排放(如人工智能、芯片制造、新能源汽车行业等均高度依赖电力);另一方面,城市在发展这些高复杂产业的过程中,往往需要规模更大的资源配置和资源投入,包括基础设施建设、财政资金投入、专业人才培养等,这些基础支撑要素的投入也会给城市带来碳排放的增加<sup>[43,45]</sup>。同时,高复杂度产业在形成规模效应前,易产生技术进步的“回弹效应”,即经济效益提升被快速增长带来的排放成本所抵消<sup>[46]</sup>。这也与近期关于新兴技术领域潜在能耗与碳排放问题的研究相符<sup>①</sup>。

模型(5)在基准回归模型的基础上进一步纳入了产业路径和能级演化的交互项。交互项系数虽然不显著但为负,暗示二者之间可能有潜在的调节作用:当城市路径突破主要集中于高复杂度领域时,碳排放效率提升;反之,当路径依赖集中于低复杂度领域时,效率同样改善。

控制变量的影响与已有研究大体一致。其一,经济规模(*GDP*)对碳排放效率具有显著促进作用。人口总量(*POP*)则显著抑制碳排放效率,与前文针对产业演化的分析结果对比,一定程度上反映生活

碳减排难度高于产业碳减排<sup>[47]</sup>。其二,第二产业占比(*INDR*)与碳排放效率显著负相关,说明产业规模作为城市产业发展的既有禀赋是阻碍碳减排治理的关键因素,科技投入水平(*TECH*)呈现显著的正向支撑作用。其三,环境规制强度(*EC*)对城市碳排放效率影响不显著,但能源利用效率对城市碳排放效率有显著正向影响。

#### 4.3 模型稳健性检验

为检验基准模型结果的稳健性,本文进一步引入空间计量方法并使用多种替代指标进行验证。考虑到地理邻近可能带来碳排放效率的空间相关性,研究构建空间滞后面板模型进行估计(表3)。结果显示,空间滞后面板模型的回归结果与基准回归结果大体一致。此外,本文将行业划分层级由国民经济行业分类大类调整为中类,重新构建城市产业数据,采用最小共现概率法替代Jaccard指数计算产业演化相关指标<sup>[20]</sup>,将产业复杂度指标用基准年和结尾年数据代替复杂度均值,所有替代指标下的回归结果均与原始模型保持一致,进一步支持了研究结果的稳健性。

#### 4.4 异质性分析结果

为进一步探究产业演化影响的异质性,本文基于城市经济发展水平进行分组回归,采用人均*GDP*

表3 空间滞后面板模型的稳健性检验

Table 3 Robustness tests of spatial lag panel model

稳健性检验	因变量: <i>CE</i>				
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
<i>lnIRD</i>	-0.163*** (0.044)	-0.101** (0.042)			0.458 (1.253)
<i>lnECI</i>			-0.475*** (0.155)	-0.360** (0.159)	0.235 (1.280)
<i>lnIRD×lnECI</i>					-0.143 (0.323)
<i>w × CE</i>	0.144** (0.070)	0.026 (0.075)	0.125* (0.072)	0.016 (0.075)	0.039 (0.075)
控制变量	NO	YES	NO	YES	YES
城市固定效应	YES	YES	YES	YES	YES
年份固定效应	YES	YES	YES	YES	YES
样本数	410	410	410	410	410

注:*w*为空间权重矩阵,*w × CE*表示被解释变量*CE*的空间滞后项,用于刻画邻近城市碳排放效率对本城市碳排放效率的空间溢出影响。

① 类似的报告如《先进人工智能安全国际科学报告》(2024年5月发布);报告指出,人工智能行业,尤其是作为高复杂度产业代表的数据中心,在能源消耗和碳排放方面的问题需要被重视。

2026年3月

的三分位数将长三角城市划分为较高、中等、较低3个经济发展阶段,以检验产业路径与能级演化对不同发展阶段城市碳排放效率的差异化影响,具体结果见表4。

结果显示,产业路径演化在各经济发展阶段的回归系数均为负;其中,中等经济发展水平城市的负向作用显著,且系数绝对值最大。这表明,在处于产业加速调整与扩展阶段的城市中,产业路径演化对碳排放效率更为敏感。一方面,这类城市尚未形成高度稳定的产业结构,新产业进入更容易改变既有生产组织方式;另一方面,相关多样化扩展往往伴随既有产业规模扩大、生产强度提升以及能源需求快速增长,使得路径演化在短期内更可能加重碳排放压力,从而对碳排放效率产生显著抑制。相较之下,在原有产业基础较为薄弱、产业活动强度有限的较低经济发展水平城市中,路径演化尚不足以对碳排放效率产生稳定而显著的影响;而在较高经济发展水平城市中,产业体系趋于成熟,新产业进入对既有结构的边际扰动效应明显减弱,产业路径演化对碳排放效率的影响亦未表现出显著性。

从产业能级演化来看,3类城市的回归系数均呈现负向特征,但在较低经济发展水平城市中达到统计显著性,并表现出较大的负向系数。这一结果表明,向高复杂度产业演化在短期内普遍伴随着较高的能源消耗和要素投入,其对碳排放效率的约束效应更易集中于经济基础较为薄弱的城市。在较低经济发展水平城市中,高复杂度产业往往意味着对外部技术、资本和高端要素的高度依赖,基础设

施和配套体系尚不完善,使得产业升级过程中的能源消耗和碳排放成本更为突出。相比之下,在中等或较高经济发展水平城市中,产业体系相对成熟,技术积累和要素配置能力较强,高复杂度产业更容易嵌入既有产业链和创新体系,其新增碳排放压力在一定程度上可通过技术替代、能源结构优化和管理效率提升加以缓释。

此外,进一步通过分组箱形图探究不同产业基础城市中产业演化动态对碳排放效率的异质性影响(图7)。首先,按照城市所拥有比较优势产业的平均复杂度将长三角城市等分为3组,用于反映城市产业能级水平。在不同产业能级水平的城市中,产业路径演化与碳排放效率整体呈现负向关系,且该负向效应随着产业能级提升逐步减弱。这表明,路径依赖式发展在不同产业基础城市中均可能对碳排放效率形成约束,但其作用强度存在一定差异。总体来看,产业路径演化对碳排放效率的影响并非简单的“有利”或“不利”,而是显著依赖于城市既有产业基础和能级条件。在产业基础较弱阶段,路径依赖更容易放大高碳锁定风险;而在产业能级较高阶段,其负面效应则明显缓和。基于以上结果,假说H3成立。

## 5 讨论与结论

### 5.1 讨论

在政策实践中,应科学认识产业升级与碳排放的非线性与阶段性关系。本文结果表明,产业路径演化与能级演化并不必然带来立竿见影的减排绩

表4 不同经济发展水平地区异质性回归结果

Table 4 Heterogeneous regression results across regions with different economic development levels

地区异质性	较高经济基础组		中等经济基础组		较低经济基础组	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
lnIRD	-0.094 (0.061)		-0.143** (0.071)		-0.102 (0.106)	
lnECI		-0.118 (0.209)		-0.497 (0.364)		-0.544* (0.291)
lnIRD×lnECI						
控制变量	YES	YES	YES	YES	YES	YES
城市固定效应	YES	YES	YES	YES	YES	YES
年份固定效应	YES	YES	YES	YES	YES	YES
样本数	140	140	130	130	140	140
R <sup>2</sup>	0.459	0.265	0.011	0.029	0.444	0.401

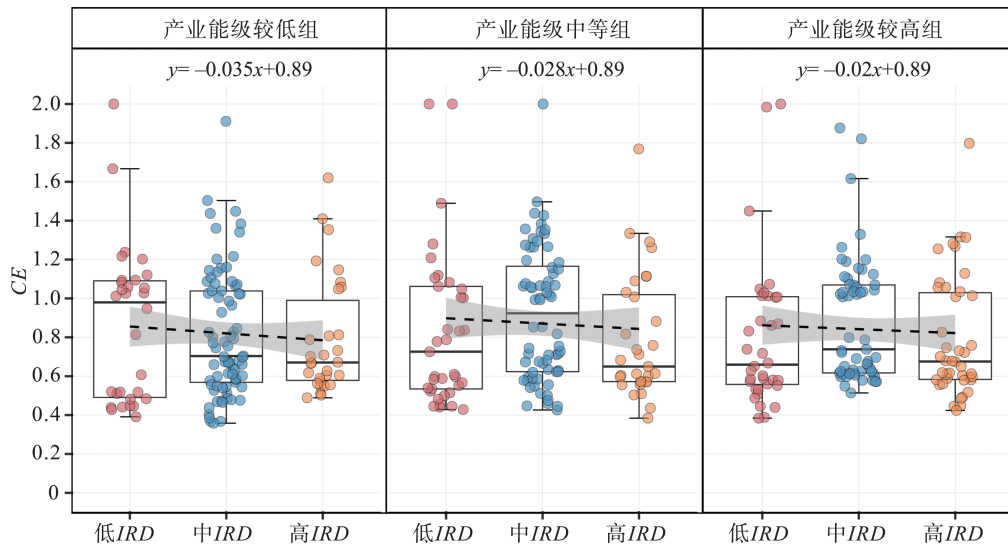


图7 不同产业基础地区异质性箱型图(2013—2022年全样本)

Figure 7 Box plots of heterogeneity across regions with different industrial bases (full sample, 2013-2022)

效：一方面，沿既有技术—组织基础的路径演化，可能因生产惯性、能源结构锁定与要素配置路径依赖而导致碳排放效率降低；另一方面，向高复杂度产业跃迁在短期内往往伴随着更高的资本开支、基础设施投入与能源需求，减排收益需要依赖技术成熟、规模效应释放与制度配套完善后才可能显现。因此，要避免“因噎废食”，不能机械僵化地将“双碳”目标作为停滞产业发展的借口，而需要科学地、系统地评估产业经济的期望产出和碳排放的非期望产出之间的平衡关系。在新发展格局下，中国坚持创新驱动与绿色发展并重，明确提出加快新质生产力发展、创新国家建设、“双碳”目标等重大战略。研究显示，产业转型与绿色发展之间存在矛盾统一性，且影响具有显著区域异质性，这也要求相关政策必须超越“一刀切”模式，实现产业、环境与空间规划的协同与弹性调整。因此，政策制定更应从“目标约束”转向“效率导向”的工具组合，围绕技术替代、过程减排、要素配置效率提升与清洁能源供给等多通道共同发力，以避免仅凭产业高端化或结构升级的线性推断。

具体来讲，要鼓励大城市充分发挥产业基础优势，推动其既有产业资源的交叉整合与技术能力的组合再构，并同步强化“高复杂度产业—能源结构—治理能力”的协同匹配，在城市产业不断迈向高价值区段的同时保证碳足迹和碳排放的可控。结

合本文发现：在经济基础较强地区，高复杂度演化对碳排放效率的约束效应相对缓和，提示其更可能通过技术吸收能力、产业链配套与管理效率提升对冲新增排放压力。此外，也要大力推动中小城市新旧动能转换的效率和节奏，通过促进城市产业非相关多样化提升城市整体产业规模经济和范围经济，但需要结合城市实际产业基础和技术能力选择中低复杂领域的产业机会，以规避因盲目追求产业高端化而带来的高额碳成本。尤其对处于加速扩张阶段的城市，相关多样化扩展可能伴随生产强度提升与能源需求快速增长，从而在短期内对碳排放效率形成更敏感的抑制作用；因此更应将节能改造、绿色工艺替代与园区基础设施低碳化作为“演化配套条件”，以降低扩张过程中的效率损失。

本研究仍存在一些局限。首先，企业注册数据虽能较好反映产业动态演化特征，但仍难以直接捕捉企业在生产过程中的能源消耗与排放行为。其次，人工智能、脑机接口、量子信息、新能源汽车等新兴技术和产业的快速涌现及其对碳排放影响值得更深入地研究。未来的研究可以在以下几个方面进行扩展：一是结合颗粒度更高的企业运营数据和能源排放数据；二是在明确产业演化对碳排放效率影响的基础上，深入挖掘其因果机制；三是在新型举国体制的语境下，深入挖掘制度要素在产业演化与城市碳排放相互关系中的重要作用。

2026年3月

## 5.2 结论

本文基于演化经济地理相关理论和方法,聚焦长三角城市群,系统分析了2013—2022年城市产业路径演化与产业能级演化对城市碳排放效率的影响。主要结论如下:

(1)研究期内,长三角城市碳排放效率总体呈现阶段性波动特征,空间格局表现为“走廊-沿海-局部山区/内陆斑块”的复合分布特征:高值主要集中在以上海为核心的沪宁走廊沿线及部分苏浙沿海城市,同时在浙南、皖南等地形成若干高值斑块;相对低值城市更多分布于部分外围与腹地板块。

(2)产业演化特征呈现相对稳定的“核心-外围”结构。产业路径演化上,核心城市的新增产业更倾向于沿既有产业能力展开,表现出路径依赖,而外围城市则更多呈现路径突破,主要由于外围城市的产业多样化空间较大。产业能级演化上,新进入产业的复杂度分布同样与城市既有产业基础和创新能力的紧密相关,核心城市更容易承接并孕育复杂度更高的新增产业,外围城市则更受要素禀赋、配套能力与产业承载条件约束。

(3)基准回归表明,产业演化对碳排放效率具有显著影响且方向清晰:产业路径依赖抑制碳排放效率,路径突破则促进碳排放效率;城市能级跃升会降低碳排放效率,而在低复杂度产业演化则可能提升碳排放效率。此外,城市产业路径动态演化与能级动态演化在影响城市碳排放的过程中可能存在替代效应:若产业演化趋向路径突破,且突破主要集中在低复杂度产业领域时,碳排放效率会提高;若产业演化趋向路径依赖,但专注于高复杂度产业领域时,碳排放效率同样会提升。

(4)异质性检验进一步显示,产业演化效应具有明显的经济发展阶段性与情境依赖:向高复杂度产业演化在不同经济发展水平城市中均表现出对碳排放效率的抑制效应,该效应在经济基础较弱城市中最为显著;产业路径演化的负向影响在中等经济发展阶段最为突出,而随着产业基础和发展水平的提升,产业能级提升对碳排放效率的约束效应逐步减弱。总体而言,随着经济与产业基础提升,产业能级跃迁对效率的约束效应呈现减弱趋势,但路

径依赖带来的减排压力在特定发展阶段仍需重点关注。

## 参考文献(References):

- [1] Xu R, Tong D, Xiao Q, et al. MEIC-global-CO<sub>2</sub>: A new global CO<sub>2</sub> emission inventory with highly-resolved source category and sub-country information[J]. *Science China Earth Sciences*, 2024, 67(2): 450-465.
- [2] 魏亿钢, 石佳伟, 许冠南. 中国低碳政策演进、阶段特征与治理模式变革[J]. *中国科学院院刊*, 2024, 39(4): 761-70. [Wei Y G, Shi J W, Xu G N. Evolution, stage characteristics and governance model transformation of China's low-carbon policy[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2024, 39(4): 761-770.]
- [3] Liu Y, Zhao G, Zhao Y. An analysis of Chinese provincial carbon dioxide emission efficiencies based on energy consumption structure[J]. *Energy Policy*, 2016, 96: 524-533.
- [4] 孙浩, 郭劲光. 地方经济增长目标管理对碳排放效率的影响[J]. *自然资源学报*, 2024, 39(1): 186-205. [Sun H, Guo J G. The impact of local economic growth target management on carbon emissions efficiency[J]. *Journal of Natural Resources*, 2024, 39(1): 186-205.]
- [5] Li X, Xu H. The energy-conservation and emission-reduction paths of industrial sectors: Evidence from China's 35 industrial sectors[J]. *Energy Economics*, 2020, DOI: 10.1016/j.eneco.2019.104628.
- [6] 张悦, 王晶晶, 程钰. 中国工业碳排放绩效时空特征及技术创新影响机制[J]. *资源科学*, 2022, 44(7): 1435-1448. [Zhang Y, Wang J J, Cheng Y. Spatiotemporal characteristics of China's industrial carbon emission performance and influence mechanism of technological innovation[J]. *Resources Science*, 2022, 44(7): 1435-1448.]
- [7] 洪竞科, 黄河, 王先柱. 经济结构转型的碳减排效应[J]. *资源科学*, 2023, 45(11): 2103-2116. [Hong J K, Huang H, Wang X Z. The effect of economic structural transformation on carbon emission reduction[J]. *Resources Science*, 2023, 45(11): 2103-2116.]
- [8] 刘习平, 庄金苑. “双碳”目标下环境规制、绿色技术创新与碳强度[J]. *统计与决策*, 2023, 39(13): 101-5. [Liu X P, Zhuang J Y. Environmental regulation, green technology innovation, and carbon intensity under the “dual carbon” goals[J]. *Statistics & Decision*, 2023, 39(13): 101-105.]
- [9] 胡鞍钢. 中国工业化道路70年: 从落后到引领者[J]. *中央社会主义学院学报*, 2019, (5): 110-123. [Hu A G. Chinese industrialization path over the past 70 years: From a laggard to a leader[J]. *Journal of the Central Institute of Socialism*, 2019, (5): 110-123.]
- [10] 张国俊, 王珏哈, 吴坤津, 等. 中国三大城市群经济与环境协调度时空特征及影响因素[J]. *地理研究*, 2020, 39(2): 272-288.

- [Zhang G J, Wang J H, Wu K J, et al. Spatial-temporal characteristics and influencing factors of coordination between economic and environmental development of three major urban agglomerations in China[J]. *Geographical Research*, 2020, 39(2): 272–288.]
- [11] 李在军, 尹上岗, 姜友雪, 等. 长三角经济增长与碳排放异速关系及形成机制[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(6): 1507–1523. [Li Z J, Yin S G, Jiang Y X, et al. Analysis of allometric relationship and formation mechanism between economic growth and carbon emissions in the Yangtze River Delta[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(6): 1507–1523.]
- [12] 许吉黎, 张虹鸥, 陈奕嘉, 等. 演化经济地理学的理论脉络演进与研究议题展望[J]. *地理研究*, 2023, 42(9): 2433–2450. [Xu J L, Zhang H O, Chen Y J, et al. The sequence of theoretical development and research agendas of evolutionary economic geography[J]. *Geographical Research*, 2023, 42(9): 2433–2450.]
- [13] Boschma R, Frenken K. Some notes on institutions in evolutionary economic geography[J]. *Economic Geography*, 2009, 85(2): 151–158.
- [14] Neffke F, Henning M, Boschma R. How do regions diversify over time? Industry relatedness and the development of new growth paths in regions[J]. *Economic Geography*, 2011, 87(3): 237–265.
- [15] Hidalgo C A, Hausmann R. The building blocks of economic complexity[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(26): 10570–10575.
- [16] Balland P A, Broekel T, Diodato D, et al. The new paradigm of economic complexity[J]. *Research Policy*, 2022, DOI: 10.1016/j.respol.2021.104450.
- [17] Balland P A, Boschma R, Crespo J, et al. Smart specialization policy in the European Union: Relatedness, knowledge complexity and regional diversification[J]. *Regional Studies*, 2019, 53(9): 1252–1268.
- [18] Pinheiro F L, Pierre-Alexandre B, Ron B, et al. The dark side of the geography of innovation: Relatedness, complexity and regional inequality in Europe[J]. *Regional Studies*, 2025, DOI: 10.1080/00343404.2022.2106362.
- [19] Rigby D L, Christoph R, Dieter K, et al. Do EU regions benefit from Smart Specialisation principles?[J]. *Regional Studies*, 2022, 56(12): 2058–2073.
- [20] Hidalgo C A, Klinger B, Barabási A L, et al. The product space conditions the development of nations[J]. *Science*, 2007, 317(5837): 482–487.
- [21] Li Y, Rigby D. Relatedness, complexity, and economic growth in Chinese cities[J]. *International Regional Science Review*, 2022, 46(1): 33–37.
- [22] 曹湛, 李卓欣, 戴靓, 等. 大变局下上海建设全球科技创新中心再审视: 基于“知识合作”与“知识组合”的双重视角[J]. *城市规划学刊*, 2023, (6): 40–49. [Cao Z, Li Z X, Dai L, et al. Reassessing Shanghai's quest to build a global innovative center in the era of great change: Dual perspectives on “knowledge collaboration” and “knowledge combination”[J]. *Urban Planning Forum*, 2023, (6): 40–49.]
- [23] Balland P A, Rigby D. The geography of complex knowledge[J]. *Economic Geography*, 2017, 93(1): 1–23.
- [24] Tacchella A, Cristelli M, Caldarelli G, et al. A new metrics for countries' fitness and products' complexity[J]. *Scientific Reports*, 2012, DOI: 10.1038/srep00723.
- [25] Dong B, Ma X, Zhang Z, et al. Carbon emissions, the industrial structure and economic growth: Evidence from heterogeneous industries in China[J]. *Environmental Pollution*, 2020, DOI: 10.1016/j.envpol.2020.114322.
- [26] 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 S J, Tian S S, Cai Q N, 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.]
- [27] 杨子涵, 彭宝玉, 孙君. 京津冀地区产业链空间网络及其隐含碳排放研究[J]. *地理科学进展*, 2024, 43(2): 215–230. [Yang Z H, Peng B Y, Sun J. Spatial network of industrial chains and their embodied carbon emissions in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Progress in Geography*, 2024, 43(2): 215–230.]
- [28] Li Y. Path-breaking industrial development reduces carbon emissions: Evidence from Chinese Provinces, 1999–2011[J]. *Energy Policy*, 2022, DOI: 10.1016/j.enpol.2022.113046.
- [29] Romero J P, Gramkow C. Economic complexity and greenhouse gas emissions[J]. *World Development*, 2021, DOI: 10.1016/j.worlddev.2020.105317.
- [30] Doğan B, Driha O M, Balsalobre Lorente D, et al. The mitigating effects of economic complexity and renewable energy on carbon emissions in developed countries[J]. *Sustainable Development*, 2021, 29(1): 1–12.
- [31] 杨浩昌, 钟时权, 李廉水. 绿色技术创新与碳排放效率: 影响机制及回弹效应[J]. *科技进步与对策*, 2023, 40(8): 99–107. [Yang H C, Zhong S Q, Li L S. Green technology innovation and carbon emission efficiency: An impact mechanism analysis and the rebound effect[J]. *Science & Technology Progress and Policy*, 2023, 40(8): 99–107.]
- [32] Can M, Gozgor G. The impact of economic complexity on carbon emissions: evidence from France[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(19): 16364–16370.
- [33] Neagu O. The link between economic complexity and carbon emissions in the European Union countries: A model based on the envi-

2026年3月

- ronmental kuznets curve (EKC) approach[J]. Sustainability, 2019, DOI: 10.3390/su11174753.
- [34] Laverde-Rojas H, Guevara-Fletcher D A, Camacho-Murillo A. Economic growth, economic complexity, and carbon dioxide emissions: The case of Colombia[J]. Heliyon, 2021, DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e07188.
- [35] Tone K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2001, 130(3): 498-509.
- [36] 黄建, 冯升波, 杨阳, 等. 全要素能源效率及其测算、比较与验证[J]. 资源科学, 2023, 45(2): 281-295. [Huang J, Feng S B, Yang Y, et al. Total factor energy efficiency and its measurement, comparison, and validation[J]. Resources Science, 2023, 45(2): 281-295.]
- [37] 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 S J, Gao S, Huang Y Y, 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.]
- [38] Zhang J, Zeng W, Wang J, et al. Regional low-carbon economy efficiency in China: Analysis based on the Super-SBM model with CO<sub>2</sub> emissions[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 163: 202-211.
- [39] Song M, Peng J, Wang J, et al. Better resource management: An improved resource and environmental efficiency evaluation approach that considers undesirable outputs[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 128: 197-205.
- [40] 黄志基, 宋名悦. 工业用地出让结构倾向对碳排放效率的影响及其传导机制: 基于绿色技术创新中介视角[J]. 经济地理, 2023, 43(7): 65-76. [Huang Z J, Song M Y. The influence of industrial land transfer structure tendency on carbon emission efficiency and its transmission mechanism: Based on the intermediary perspective of green technology innovation[J]. Economic Geography, 2023, 43(7): 65-76.]
- [41] 乔艺波, 贺灿飞. 撤县设区对县域制造业产业升级的影响: 基于三重差分法的政策评估[J]. 地理学报, 2024, 79(4): 909-930. [Qiao Y B, He C F. Impact of turning counties into districts on county manufacturing upgrading: Policy evaluation with difference in differences in differences[J]. Acta Geographica Sinica, 2024, 79(4): 909-930.]
- [42] 贺舒琪, 穆恩怡, 戴晓冕, 等. “鸟起巢中, 水出源头”: 区域产业演化的碳排放效应[J]. 地理研究, 2024, 43(3): 535-557. [He S Q, Mu E Y, Dai X M, et al. Tracing the origin: Carbon emission effects of regional industrial dynamics[J]. Geographical Research, 2024, 43(3): 535-557.]
- [43] Unruh G C. Understanding carbon lock-in[J]. Energy Policy, 2000, 28(12): 817-830.
- [44] Unruh G C. Escaping carbon lock-in[J]. Energy Policy, 2002, 30(4): 317-325.
- [45] 刘备, 董直庆. 技术进步的能源偏向诱发“碳锁定效应”了吗? [J]. 产经评论, 2020, 11(4): 133-148. [Liu B, Dong Z Q. Has the energy bias of technological progress induced carbon lock-in?[J]. Industrial Economic Review, 2020, 11(4): 133-148.]
- [46] Yu Z, Li W, Duan H. New energy technology innovation and industry carbon emission reduction based on the perspective of unbalanced regional economic development[J]. Sustainability, 2023, DOI: 10.3390/su152215991.
- [47] Wang Z, Yang L. Indirect carbon emissions in household consumption: Evidence from the urban and rural area in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 78: 94-103.

# Impact of urban industrial evolution on carbon emission efficiency in Yangtze River Delta

WU Tao<sup>1</sup>, CAO Zhan<sup>1</sup>, YE Qin<sup>2</sup>, DAI Liang<sup>3</sup>

(1. College of Architecture and Urban Planning, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Environmental and Geographical Sciences, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China; 3. School of Public Administration, Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** [Objective] Driven by both the “dual carbon” goals and the development of new quality productive forces, industrial transformation has become a core approach for enhancing carbon emission efficiency. From the perspective of industrial evolution, this study aims to investigate how the process of urban industrial transformation and upgrading affects carbon emission efficiency. [Methods] Taking the Yangtze River Delta urban agglomeration as an example, this study constructed a panel model based on Qichacha enterprise data and carbon emission data from 2013 to 2022 to reveal the impact of urban industrial pathway evolution (relatedness density of newly entered industries) and industrial capacity evolution (complexity of newly entered industries) on urban carbon emission efficiency and their heterogeneous effects. [Results] (1) Carbon emission efficiency exhibited significant spatial differentiation, and high-efficiency cities were mainly distributed along the Shanghai-Nanjing-Hangzhou corridor, coastal and bay areas, and certain peripheral cities. (2) Both industrial paths and industrial capacity showed differentiated evolutionary characteristics across cities, with evident divergence in their pace of evolution. (3) Urban industrial pathway breakthrough was positively associated with carbon emission efficiency, whereas the leap of industrial capacity toward high-complexity fields was negatively associated with carbon emission efficiency. (4) Grouped regression further showed that the relationship between urban industrial evolution and carbon emission efficiency had stage heterogeneity. The improvements in industrial capacity were generally negatively correlated across different stages of urban development, and the strength of the negative correlation gradually weakened as economic development increased. In cities at the medium economic development stage, the negative impact of industrial pathway dependence on carbon emission efficiency was more pronounced. [Conclusion] The findings reveal the complex relationship between industrial transformation and upgrading and carbon emission efficiency, provide supplements and corrections to the understanding that “industrial upgrading inevitably promotes green and low-carbon development”, and offer theoretical and practical references for evaluating the carbon reduction effects of industrial policies.

**Key words:** industrial path dynamics; industrial capacity dynamics; carbon emission efficiency; relatedness density; complexity; Yangtze River Delta