

长三角差异化工业碳达峰路径研究

陈芳^{1, 2} 曹晓芸¹¹

(1. 安徽大学 经济学院, 安徽 合肥 230601;

2. 安徽大学 创新发展战略研究院, 安徽 合肥 230601)

【摘要】: 长三角是中国经济增长引擎,但其工业经济是建立在能源消耗基础上的粗放式繁荣,成为实现减排目标的攻坚深水区。运用 IPCC 碳排放核算方法,基于空间差异及分布动态视角,研究 2009—2019 年长三角地区 36 座城市工业碳排放现状及空间格局动态演进趋势、分解长三角工业碳排放的驱动因素并归纳其碳达峰趋势的聚类特征。研究结果表明:长三角整体工业碳排放呈现增加的态势;地理分布呈现“东高西低”且重心向西偏移,空间格局兼具集群性与非均衡性;产业结构、能源结构、能源强度、城市化和劳动力效率是长三角工业碳排放主要驱动因素;区域内城市达峰趋势分为脱碳先锋型、脱碳潜力型、转型困难型和达峰滞后型四种类型。在此基础上,梳理了长三角地区工业低碳高效发展路径。

【关键词】: 长三角 工业碳排放 空间格局 驱动因素 聚类特征

【中图分类号】: F127;F061. 5 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1001—4403(2022)04—0041—11

一、引言

CO₂等温室气体排放引起的全球气候变化成为人类命运共同体面临的最大的非传统安全挑战。2003 年英国能源白皮书《我们的能源未来》提出“低碳经济”,开启了全球范围内“控碳、降碳”的实践。气候变化的治理是典型的公共产品,需要全球各国和地区都积极承担相应的责任;据经济合作与发展组织(OECD)统计数据显示,截止到目前全球公认已稳定达到碳排放峰值的国家和地区 54 个,占全球碳排放总量的 40%;自 2006 年中国 CO₂排放量超过美国,一直是全球最大的温室气体排放国。¹同时作为全球第一人口大国、最大发展中国家,在人口压力、工业化进程阶段等发展硬约束下,2020 年习近平主席宣布:2030 年前 CO₂排放达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和。“双碳”承诺不仅是中国实现高质量发展的内在要求,也是大国责任与担当的外在彰显,更是重塑新发展格局的内外路径融合的根本落脚点。在碳达峰“全国一盘棋”的战略指导下长三角“要谋先手棋”,2020 年长三角经济总量占比约为 24%,成为三大经济增长极中最活跃的地区,但其工业经济是建立在大量消耗基础上的“粗放式”繁荣³,长三角“双碳”目标实现既是国家推动部分区域率先达峰,完成达峰目标的战略部署,更是借力“十四五”发展实现长三角绿色生态一体化的重要路径。因此,摸清长三角“碳家底”、找准“减碳能力”,进而厘清“双碳”路径正是本文研究意义所在。

国内外关于碳达峰、碳中和的研究首先聚焦于“碳排放驱动因素分解的模型工具”,主流方法有 IDA 类⁴与 SDA 类⁵。IDA 法以能源恒等式为基础,凸显驱动因素结构变化的作用效果⁶,而没有将技术进步、要素间替代等与其变化密切相关的要素纳入考

作者简介: 陈芳,安徽大学经济学院副教授,主要从事区域经济学、绿色发展研究;曹晓芸,安徽大学经济学院助教,主要从事区域经济学研究, E-mail:374604632@qq.com。

基金项目: 国家社会科学基金项目“长江经济带跨界污染协同治理及政策研究”(项目编号:20BJL101)的阶段性成果

虑范围,缺乏各要素间相互关系的底层逻辑梳理⁷;SDA法则以投入产出表与消耗系数矩阵为基础,可以达到精细化产业部门最终能源需求的目的⁸,但未克服算法的复杂性与数据的难获得性等缺陷⁹。随着研究深入新方法随之涌现,比如生产理论中的Shephard产出距离函数法¹⁰,规避了前两种方法的不足,具有较好的经济解释能力,但仍未重视碳排放的空间外溢效应。国内相关研究更注重从“影响因素分析的实践结论”梳理“双碳”目标的着力点。中国经济增长整体尚未完全摆脱“自然消耗增加型”模式¹¹,粗放型经济产出效应仍是工业碳排放增加的最主要因素⁵;只有当经济集聚水平达到阈值后,减排效应才会显现。¹²产业结构变动会引起碳排放量的改变,产业结构效应为碳排放的抑制因子¹³,缩减第二产业对经济的贡献率,可以有效降低碳排放量。此外,能源强度降低也是工业碳排放减少的重要因素。³

国家多次强调避免“双碳”政策的“一刀切”和不符合地方实际情况的现象,与基于社会经济发展、自然资源禀赋、工业化进程阶段、人口压力和政策文化等多维度识别差异化的碳减排路径研究形成相互佐证。比如,其一,以社会经济发展阶段为划分标准,基于各类型城市工业碳排放的规模效应、结构效应和技术效应减排贡献的作用效果,三线城市的碳减排难度明显大于一、二线城市³;其二,以工业化进程为划分标准,基于城市的支柱产业和经济结构差异,能源城市与重工业城市的碳排放强度明显高于轻工业城市、高科技城市与服务业城市,其减排工作的效果更优¹⁴;其三,依据产业结构划分为工业城市、商业城市和混合经济城市,研判其人口规模、国内生产总值与能源消耗之间比例关系的区别,高度商业化的城市表现出人口规模、国内生产总值与能源消耗的高度相关性,碳减排难度更大¹⁵;其四,依据碳达峰趋势划分为低碳潜力型城市、低碳示范型城市、人口流失型城市、资源依赖型城市 and 传统工业转型期城市,区分各类型城市的达峰目标设计和行动重点,并将低碳潜力型城市 and 传统工业转型期城市认定为落实2030年达峰行动的关键一环¹⁶;等等。

精准识别碳排放驱动因素是长三角实现“低碳经济”的痛点,但现有文献少有基于空间模型工具探究长三角工业碳排放驱动因素,更缺乏对长三角城市类型特征的系统梳理,弱化了相关研究结论的借鉴意义。本研究以长三角地区2009—2019年的工业能源数据为基础,测算历年的工业能耗碳排放和空间分布及其演进趋势,架构长三角各城市间的低碳协同机制,破解单一区域无法有效应对复杂的气候问题,形成工业低碳转型与高质量发展的叠加效应、集成效应及系统性合力¹⁷;深入分析长三角城市工业碳排放的类型特征和驱动因素,为各城市地方政府设计因地制宜的达峰路线、明确达峰目标和重点任务提供参考依据。使当地气候政策目标与经济社会发展的政策目标协调统一,以期引领全国零碳转型,成为国家绿色发展的样板,为其他地区腾出发展空间、预留发展时间。

二、长三角城市工业碳排放基本特征

采用IPCC的核算方法对长三角城市工业的碳排放现状进行“摸底”。其能源利用结构以煤炭为主,还包括焦煤、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气和汽油液化气等化石能源,本文选取这9种能源衡量长三角工业直接碳排放、选取电力衡量间接碳排放。各燃料的二氧化碳排放系数取自《省级温室气体清单编制指南(试行)》;电力碳排放系数的具体数值参考国家发改委2011年发布的《省级温室气体清单编制指南(试行)》。

长三角城市工业碳排放量与经济发展状况基本吻合,经济发展与资源消耗还未实现实质性脱钩。基于碳排放总量维度,安徽、江苏、浙江分别有3、4、9个高碳城市。长三角各城市的功能定位和经济社会基础不同,城市工业碳排放也存在差异:2009年宁波工业碳排放量居长三角首位,高达17121.7万吨,而黄山处于最低位,约为261.9万吨,二者相差约65倍;至2019年工业碳排放量最高的苏州与最低的黄山相差约24415.9万吨,该差值在样本期内上升47%,区域内碳减排的协同推进任重道远。基于碳排放达峰趋势维度,长三角整体工业碳排放虽仍呈现上升趋势,上海、徐州、南通、泰州、杭州、淮北和宿州初现达峰特征。此外,南京、无锡、常州、宁波、温州、马鞍山、阜阳和亳州,工业碳排放量已无明显波动,呈现达峰趋势。苏州、连云港、扬州、镇江和浙江与安徽大部分城市工业碳排放仍有逐年上升的势态,释放危险信号,成为长三角未来减排工作的重点关注区域。

三、长三角城市工业碳排放空间格局与分布特征

(一)空间格局及演进动态

运用重心-标准差椭圆分析 2009 年与 2019 年两个特征时点长三角工业碳排放的重心转移及标准差椭圆。样本考察期内，工业碳排放的标准差椭圆主要位于长三角东部地区和中部地区，基本呈现“西北-东南”分布格局，与长三角城市工业碳排放特征事实相符：高碳排放区集中在以苏州为核心的中部偏东的位置，以连云港与宁波连成的对角线将低碳排放区与高碳排放区分隔开来，呈现出“高碳排放区与低碳排放区交替分布”的空间结构；安徽与浙江部分城市的工业碳排放均偏低，江苏中南部地区与上海的工业碳排放较高，地理分布呈现“东高西低”的空间格局。从椭圆面积比看，样本期末椭圆面积略小于样本初期，说明长三角工业碳排放存在空间集聚的趋势。从重心移动轨迹及方向看，长三角工业碳排放分布重心在样本期内由无锡向西南方向移动至常州，表明西部单元格城市工业碳排放的增长速度高于区域内平均水平。由此可见，碳排放不仅可以沿着贸易路径在生产端与消费端转移，在长三角内部也沿着产业转移的方向实现了生产端之间的转移。

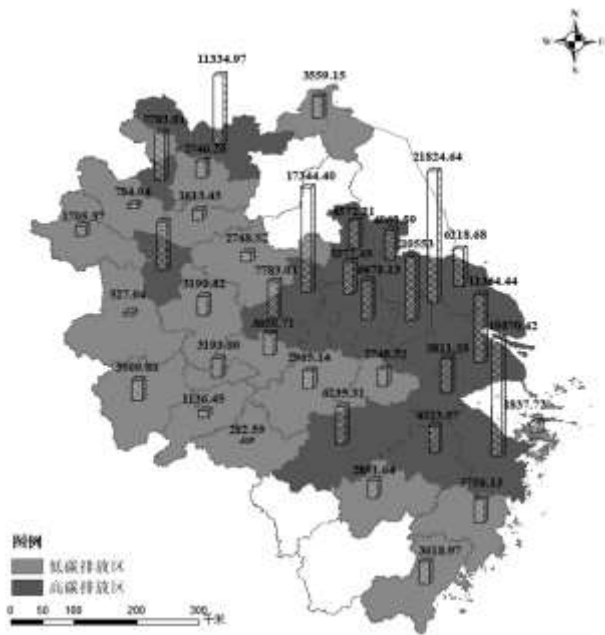


图 1 长三角城市工业碳排放区位

数据来源：作者计算整理所得，下同。

运用核密度估计法刻画 2009 年、2014 年和 2019 年长三角城市工业碳排放的时序动态演进特征(图 3)。其一，核密度曲线的左侧起点逐年降低，低碳排城市占比减少，右侧拖尾逐年延长，由 2009 年的约 19000 万吨增至 2019 年的约 26000 万吨，高碳排放城市占比增加且碳排放量愈来愈大。且核密度曲线的重心位置逐年向右偏移，三年的曲线重心分别出现在 2000、3000 与 4000 万吨左右，表明样本期内长三角工业碳排放整体仍呈现增加的态势。其二，三条核密度曲线均为倒“V”形单峰形状，表明长三角地区工业碳排放重心较为固定。密度最高点均位于 5000 万吨以内，10000 万吨以上的密度虽有反弹趋势但总体小于 0.02%，碳达峰基础相对较好，明确碳达峰攻坚阶段整体性约束指标并坚持减排政策的方向不变、力度不减，可为后续碳中和工作纾缓部分压力。

(二)分布特征

1. 空间集群特征

采用 Q 型邻接关系空间权重矩阵计算各年长三角工业碳排放全局 Moran' sI 指数(表 1), 2009—2019 年长三角工业碳排放呈现地理集聚现象。除 2014 年外长三角工业碳排放的相关性指数均大于 0, 且其对应的 P 值均小于 5%, 可见长三角城市工业碳排放存在显著的正向空间相关性, 而且在样本期内这种集聚效应还较稳定。长三角工业碳排放空间自相关性呈现明显的两个阶段: 下降阶段(2009—2014 年)与波折上升阶段(2015—2019 年)。样本期初期是长三角工业发展的“黄金时期”, 工业发展的区域不平衡性削弱了工业碳排放的空间集聚现象; 自 2015 年以来的空间自相关性波折上升得益于长三角一体化的提出与深度推进, 区域内完善的功能区划分使得城市的经济功能与生态功能区区分开来, 将碳排放锁定在特定范围内, 加剧了碳排放的集群效应。



图 2 2009 年与 2019 年长三角工业碳排放重心-标准差椭圆演进

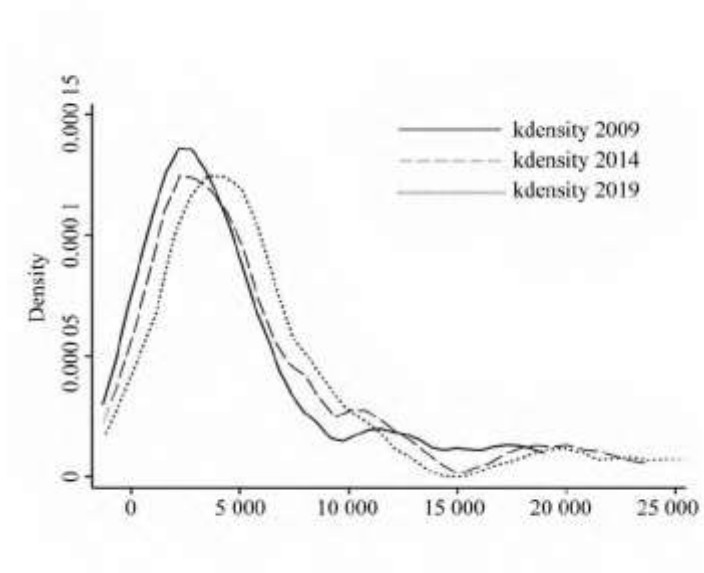


图 3 2009 年、2014 年、2019 年长三角工业碳排放核密度

表 1 长三角工业碳排放全局 Moran' sI 指数

年份	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
全局 Moran' sI 指数	0.47	0.41	0.22	0.23	0.19	-0.02	0.08	0.49	0.41	0.53	0.54

利用局部莫兰散点图描述长三角工业碳排放集群特征。2019 年数据表明,在第一象限即高水平与高水平聚集的城市有 7 个,在第三象限即低水平与低水平聚集的城市有 13 个,说明同向聚集处于主导地位。第一象限的城市多位于东部沿海平原地区,而位于第三象限的城市多来自安徽。究其原因,是所处工业化进程阶段与地理地形因素双重作用的结果。东部沿海地区样本初期经济迅速发展得益于发达的第二产业,近年来受生态环境红线的现实倒逼,虽优化经济结构、转变发展方式,但工业生产碳排放量仍居高不下,且沿海的平原地形有利于二氧化碳的扩散作用,加剧了东部沿海地区工业碳排放的高高集群;而安徽省内多山地,形成了对工业发展与二氧化碳扩散的双重阻碍作用。

2. 空间非均衡性

利用基尼系数测度方法刻画 2009—2019 年长三角工业碳排放的非均衡性特征(图 5)。长三角整体工业碳排放的基尼系数较高,平均值为 0.447。呈现明显的空间非均衡特征,需要限制高碳排放城市的工业碳排放的继续走高。在演进趋势上,工业碳排放基尼系数呈现下降趋势:一方面,双碳目标背景下碳排放绝对量的约束伴之以各种配套政策,使得高碳排放城市的能源转型与产业升级成为必然;另一方面,经济发展需要使得部分城市的工业碳排放直线上升。碳排放空间非均衡性的理想状态与未来的发展趋势应该是低排放水平城市间的均衡,长三角目前的工业碳排放空间格局与该理想状态之间仍然存在差距。

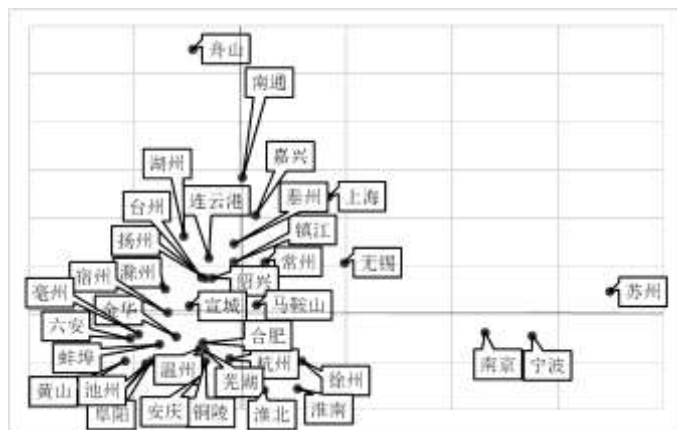


图 4 2019 年长三角工业碳排放局部莫兰指数分布

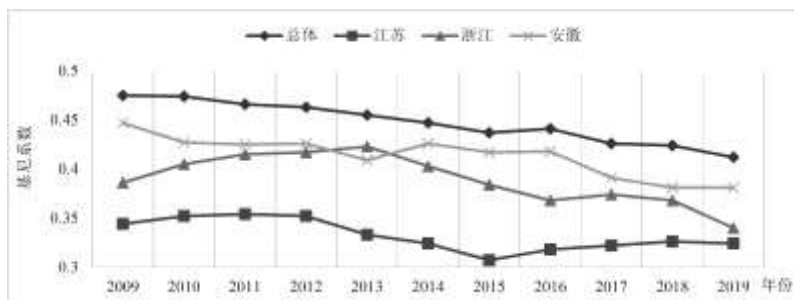


图 5 长三角城市工业碳排放空间非均衡性

域间差异按照省际的标准划分区域¹⁸,无论是基尼系数的数值大小还是演变趋势其空间内部差异均存在较为显著的区别。从具体数值看,安徽的内部差距最大,基尼系数平均值为 0.412;江苏地区内部差距相对较小,基尼系数平均值为 0.332。从演变趋势看,江苏省内空间差异在样本期内波动较小,其基尼系数大致保持不变,围绕 0.332 的均值小幅度波动。浙江省内部的空间差异的动态演变则大致呈两阶段变化,2009—2013 年基尼系数增大,2014 年以后基尼系数缓慢下降。样本期内安徽省内基尼系数大致呈现下降趋势,年均下降率为 17.25%。

四、长三角城市工业碳达峰影响因素及趋势特征

(一)研究方法数据来源

1. 空间计量模型

空间杜宾模型 (SDM)、空间滞后模型 (SAR) 与空间误差模型 (SEM) 是空间效应计量回归的主要模型,为准确刻画长三角工业碳排放驱动因素的空间效应提供了研究思路。空间杜宾模型见表达式 (1)、空间滞后模型见表达式 (2),空间误差模型见表达式 (3)。

$$\ln C = wJC + l_0IS + l_1IS + l_2EN_1 + l_3EN_2 + l_4UR + l_5LF + u_i + \delta_t + \varphi \quad (1)$$

$$\ln C = wJC + l_0IS + l_1IS + l_2EN_1 + l_3EN_2 + l_4UR + l_5LF + \varphi \quad (2)$$

$$\ln C = l_0IS + l_1IS + l_2EN_1 + l_3EN_2 + l_4UR + l_5LF + Q = \gamma J\varphi + \kappa \quad (3)$$

式中: C 为工业碳排放量; w 为空间回归系数; J 为 $n \times 1$ 阶的空间权值矩阵; IS 、 EN_1 、 EN_2 、 UR 、 LF 为 5 个自变量,分别代表产业结构、能源结构、能源强度、城市化和劳动力效率; $1[l_0, l_1, \dots, l_5]$ 为待估参数; u_i 为空间固定效应; δ_t 为时间固定效应; φ 为误差随机项; γ 为空间误差系数; κ 为正态分布的随机误差项。现有研究表明长三角工业碳排放受劳动生产率、能源强度、能源结构、碳排放系数、劳动力等因素影响¹⁹,本文从产业结构、能源、城市化与劳动力四个方面分解长三角工业碳排放的驱动因素,具体的以第二产业增加值占 GDP 比重、标准化的工业煤炭消费量占工业能源消费总量比重、工业能源消费总量占工业增加值比重、建成区面积以及人均 GDP 为代理变量。

2. 聚类分析

采用 K-means 聚类算法分析长三角工业碳排放趋势的类型特征,即通过迭代将样本划分到组内样本相似度最大、组间样本具有高度异质性的 k 个层次化的类别中。参考郭芳等²⁰的研究,同时考虑影响长三角工业生产和碳排放的相关因素构建指标体系,兼顾静态指标和动态指标对长三角 36 个城市进行聚类分析。具体地,静态指标以第二产业增加值占 GDP 比重、人均 GDP、城镇从业人员数量、建成区面积、人均工业能源消费、工业碳排放量为代理变量;动态指标主要考虑 GDP 年均增长率、人口年均增长率、建成区面积年均增长率与碳排放年均增长率。

3. 数据来源及说明

基于数据的可获得性,选取除淮安、盐城、宿迁、衢州和丽水外的 36 个长三角城市进行研究。本文使用的数据来源于《中国城市统计年鉴 (2010—2020)》《中国能源统计年鉴 (2010—2020)》与各城市统计年鉴。

(二)驱动因素分解

1. 基准回归

通过比较 LM 检验、HAUSMAN 检验、LR 检验以及 Wald 检验的结果，判断基准回归模型的选择²¹。首先利用 LM 检验，结果显示统计量在 1%水平上均显著，表明 SEM 模型和 SAR 模型均适用，可以选择 SDM 模型进行分析；进一步运用 Wald 检验和 LR 检验判断空间杜宾模型是否可以转化为空间滞后模型或空间误差模型，检验结果在 1%水平上拒绝原假设；同时 Hausman 检验的 P 值趋近于 0，表明本文选取空间杜宾模型较为合适。

表 2 空间计量回归结果

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
IS	0.5891*** -3.47	0.2103 -1.12	0.5904*** -3.52	0.0495 -1.03	0.1398** -2.05	0.1889** -2.46	0.0484** -2.4229	0.0788*** -5.0385
EN ₁	0.8405*** -6.09	0.5877*** -4.38	0.578*** -4.34	0.7874*** -3.84	0.3369 -0.56	1.1243* -1.82	0.2188*** -7.73	0.0144*** -5.2533
EN ₂	0.2496*** -9.02	0.3107*** -11.48	0.3208*** -11.93	0.0311 -1.12	-0.2143*** (-2.75)	-0.18327* (-2.11)	0.0008* -1.9295	0.0092*** -7.8997
UR	0.4765*** -6.08	0.3107*** -6.06	0.4309*** -6.28	0.2021** -1.96	-0.4599 (-1.55)	-0.2578 (-0.8)	0.0009 -0.7271	0.0036*** -4.9975
LF	0.1403*** -7.3	0.1548*** -10.68	0.1511*** -11.05	-0.0168 (-1.08)	0.0941*** -3.53	0.0773*** -3.01	0.1370* -1.9588	0.0756*** -3.2432
RHO	0.2387***	0.2683**	0.3466**	0.2035**	0.133**	0.331***		
R ²	0.5221	0.5196	0.3799	0.5196	0.6439	0.8796		

注：括号中为统计量 z 值。

表 2 模型①展示了空间杜宾模型的回归结果，所有影响因素均在 1%置信水平下显著，表明产业结构、能源结构、能源强度、城市化与劳动力效率对长三角工业碳排放具有较强的作用效果。产业结构对工业碳排放具有正向效用，表明若第二产业对经济贡献度越小，则可以越早实现碳排放峰值：一方面，节能减排政策主要作用于第二产业，第二产业占比较高的城市承担更大的减排压力，完成相关目标的意愿相对较低；另一方面，第一、三产业通过技术进步所带来的碳减排效果优于第二产业。²² 能源结构与能源强度对工业碳排放具有显著驱动作用，具体表现为长三角工业经济增长与煤炭的锁定效应较强，煤炭在一次能源中的比重高，且短期难以改变²³，提高能源利用效率、促成能源转型仍是长三角工业碳达峰工作的重要任务。同时，城市化对长三角工业碳排放具有显著的正向影响，不能忽视城市化过程中带来的碳排放问题，城市化伴随着资本、人才与技术的集聚，意味着更多的生产需求，促进工业规模的扩大，使得能源消费刚性需求的增加，带动工业能源消费和碳排放的快速增长。²⁴ 劳动力效率对碳排放也展现出显著正向作用，是因为随着工业化生产发展，技术革新促使劳动力效率得到了大幅提高的同时，也造成了能源消费的不断增加，刺激碳排放的增加。²⁵

2. 稳健性检验

选择改变回归模型进行稳健性检验，具体地，模型②采用空间滞后模型，模型③采用空间误差模型，回归结果中各变量系数符号相对稳定，与基准回归相比无明显变动，因此认为该模型通过稳健性检验。

3. 空间效应分解

基于 SDM 估计结果，对长三角工业碳排放的各种驱动因素进行空间效应的分解，具体地，模型④为直接效应、模型⑤为间接效应以及模型⑥为总效应。由表 2:①产业结构对工业碳排放的直接效应与间接效应均为正，且间接效应在 5%水平上显著，表明本地区的第二产业发展程度对邻近地区碳排放具有显著的促进作用。究其原因，地理距离是产业转移的重要影响因素，产业升级时倾向于就近选择承接地，加重了邻近地区的碳排放负担。②能源结构对工业碳排放的直接效应在 1%水平上显著为正，间接效应不显著，表明工业碳排放主要受本地能源结构影响，而邻近地区的溢出效应不明显。③能源强度对工业碳排放的间接效应在 1%水平上呈现负显著，表明邻近地区的能源强度对本地区的碳排放具有显著的抑制作用。随着城市功能划分愈发完善，将高碳排放锁定在能源强度偏高的地区，可为周边地区释放碳排放负担。④城市化对工业碳排放的间接效应为负且不显著，表明邻近地的城市化会疏解当地碳排放压力，但效果不显著。⑤劳动力效率与能源强度的表现相反，其间接效应在 1%水平上呈现正显著。源于经济的辐射带动作用，劳动力效率偏高的地区会刺激周边区域的碳排放量也大幅增加。

4. 异质性检验

选取样本初期与样本末期两个时间节点进行异质性检验，模型⑦为 2009 年的回归结果以及模型⑧为 2019 年的回归结果。由表 2:①与 2009 年相比，2019 年的产业结构与能源强度对工业碳排放的作用效果均增强，碳达峰工作应聚焦二者重点攻坚，全面精准发力。②能源结构对工业碳排放的作用效果在 2019 年变弱，源于绿色科技的研发与清洁技术的推广使得碳排放空间收紧，弱化了能源结构在 2019 年的影响效力。③2009 年城市化对工业碳排放的刺激作用不显著，是因为 2009 年长三角整体城市化水平不高，并非影响工业碳排放的主要因素。而随着城市化进程的深入，在 2019 年其对工业碳排放呈现显著的促进作用。④无论是样本初期还是样本末期，劳动生产率都是驱动工业碳排放增加的最重要因素之一，劳动力效率的全方位提升对碳排放的抑制作用还未显现。

(三)进一步分析：趋势特征

聚类结果显示，当前长三角城市的工业碳达峰趋势大致分为 4 类(表 3)。其中，第一类为“脱碳先锋型城市”，包括上海、南京、无锡、常州等 7 个城市，是长三角有望率先达峰城市。此类城市经济体量大且处于稳步增长，城市化水平高，产业结构以服务业为主；虽然当前碳排放量仍相对较高，但碳排放增长速度居长三角最低水平，年均增长率约为 2%。

表 3K 均值聚类结果

城市特征	个数	城市
脱碳先锋型	7	上海、南京、无锡、常州、苏州、杭州、宁波
脱碳潜力型	9	南通、扬州、镇江、泰州、嘉兴、湖州、绍兴、舟山、合肥
转型困难型	8	徐州、连云港、温州、金华、台州、芜湖、马鞍山、滁州
达峰滞后型	12	蚌埠、淮南、淮北、铜陵、安庆、黄山、阜阳、宿州、六安、亳州、池州、宣城

第二类为“脱碳潜力型城市”，包括南通、扬州、镇江、泰州等 9 个城市。此类城市劳动力扩张速度快于人口增长速度，宜

居的生活环境与高度发达的配套设施发挥对劳动力的虹吸作用，区域内人口数量充足。同时，得益于发达的第二产业，脱碳潜力型城市经济发展水平较高，但其碳排放量较小，有望将碳排放峰值控制在较低水平。长三角生态绿色一体化发展示范区建设为脱碳先锋型城市与脱碳潜力型城市架构跨区域减排协同机制奠定基础，成为长三角落实“2030年前碳达峰”行动的先行区。

第三类为“转型困难型城市”，包括徐州、连云港、温州、金华等8个城市。此类城市中以资源型地区居多，比如徐州、马鞍山和滁州等，经济发展水平处于中下游水平，城市化水平偏低。产业结构偏重型化，第二产业占比约为44.85%；人口增速较快，疏解了当地劳动力不足的问题的同时，致使工业品需求增加，加剧了产业结构矛盾的同时刺激了碳排放增长。

第四类为“达峰滞后型城市”，包括蚌埠、淮南、淮北、铜陵等12个安徽省城市。此类城市经济发展尚处于起步阶段，经济发展潜力大，但失业率高、人口流失大使得劳动力短缺问题突出制约其发展；由于第二产业欠发达，工业碳排放量较小，但粗放式的发展方式带来能源强度较高。达峰滞后型城市需警惕随经济增长驱动碳排放快速增长的可能性，寻求碳排放绝对量约束与经济社会发展中的平衡。

五、长三角城市工业碳达峰路径对比及优化策略

考虑区域碳排放现状、碳减排能力、发展定位不同²⁶，长三角各类型城市应差异化制定达峰时间等约束性指标并自主部署阶段性任务。

（一）脱碳先锋型城市率先达峰，实现全方位引领与借鉴

脱碳先锋型城市碳排放增速较慢，其经济发展正处于全面深度脱碳化的阶段。城市产业结构调整已经基本完成，相较于其他三种类型的城市，产业减排潜力较小。该类城市中有5个是国家发改委批设的低碳试点城市，且包含上海与杭州两个碳排放已呈现达峰状态的城市，达峰基础理想，可将达峰目标设置在“十四五”初期。脱碳先锋型城市应锚定技术革新，提高能效，实现技术节能。上海、南京、苏州、杭州等拥有扎实科研基础的城市着力自主技术创新扶持，对基础理论、关键技术、工程应用等进行系统性、变革性的研究，部署二氧化碳的捕集、利用及封存等低碳前沿技术探索²⁷，加快“卡脖子”绿色关键核心技术攻关；以“新基建”为契机，推进云计算、大数据、物联网、移动通信、人工智能、区块链和边缘计算等新一代信息技术与新能源技术的交叉融合，抢占颠覆性产业科技创新制高点；实施绿色化低碳化变革和数字化智能化创新“双轮驱动”，催生新技术新产业新业态新模式。

（二）脱碳潜力型城市尽快达峰，高质量支撑长三角低碳发展

“低端拥挤、高端短缺”的工业结构现状，致使脱碳潜力型城市碳排放量仍处于震荡上升状态，但同时也意味着其第二产业减排空间广阔，潜力明显，因此预计该类城市在“十四五”初期碳排放会继续缓慢上升，随后在“十四五”后期达峰。其工业碳达峰的首要任务仍是增量经济的低碳化，坚持以“高端、数字、融合、集群、品牌”为发展方针，推动产业转型。具体来说，明确碳减排目标和指标，倒逼传统产业的绿色转型，严格控制高耗能、高排放项目建设；推进产业升级迭代，以产业高级化、城市清洁化、生产高效化与规模化提升城市低碳发展效率，构建现代产业体系，推动城市经济迈入高质量发展的新轨道。特别是，合肥、南通等区域内综合实力较强的城市，率先培育数字经济、高端装备制造等战略新兴产业，推动集成电路、生物医药、人工智能三大先导产业规模倍增；加快建立市场导向的低碳发展长效机制，架构绿色低碳的产业链供应链价值链，培育参与未来竞争新的动力源。

（三）转型困难型城市厘清发展与减排关系，在当前节奏稳步推进达峰

转型困难型城市与达峰滞后型城市多属于老工业城市和资源型城市，产业发展层次低、链条短、产品附加值低、产能过剩等

问题突出，低碳转型形势严峻，但尚有较大潜力可挖，是未来碳减排的重点。该类城市达峰基础相对薄弱，由于其经济发展尚处在加速阶段，碳排放仍呈现增长趋势，二者尚未表现出脱钩迹象，且产业结构仍具有较大的调整和转型空间，需要在达峰过程中梳理好碳排放、产业转型与经济发展的关系，预计该类城市在“十四五”期间碳排放会继续上升，将达峰目标设置在2026—2029年逐步达峰为宜。产业转型困难的城市全方位赋能钢铁、水泥、有色金属、玻璃等重点行业和重要领域低碳化改造，推进清洁生产；通过发展替代行业创造新的经济增长动能，对冲化石能源转型的经济风险；克服产业结构转型的短期阵痛，遏制“两高”项目盲目发展，承接产业转移时对标国际先进水平提高准入门槛，破解生产端碳排放“转移”问题。资源转型困难的城市侧重提高资源节约和综合利用水平，扭转能源结构高碳化现状，逐步戒断对煤炭的依赖；形成对煤电发展的上限约束，规划好煤电退出的路线图，构建新型电力系统；完善可再生能源发电补贴政策²⁸，推动风电、水电产业的发展，提高绿电占比；驱动能源体系向以清洁能源为主导、数字化技术与可再生能源相融合的分布式智能能源体系转变，以清洁、绿色方式满足用能需求。

(四) 达峰滞后型城市全力跟上整体达峰步骤²⁹，以碳汇增量锻造碳中和优势

达峰滞后型城市普遍存在产业结构单一、生态破坏严重、基础设施和城市功能老化、经济社会发展活力不足等问题，转型发展和城市更新尤为迫切。鉴于达峰滞后型城市目前碳排放与经济增长尚未表现出脱钩迹象，允许该类城市工业达峰时间滞后于区域内平均水平，给该地区经济发展预留空间。预计其碳排放在“十四五”和“十五五”期间仍会保持上升趋势，建议将达峰目标锚定在2030年左右。达峰滞后型城市在实现工业碳达峰时应秉持“绿水青山就是金山银山”的理念，压缩粗放式的第二产业的发展空间，以第三产业的大发展推动经济大跨越，确保发展与保护协同共生。在安庆、池州、宣城为主的生态资源良好、碳汇用地规模较大的城市，特别是淀山湖、新安江、大别山、黄山等区域，积极打造生态旅游、康养、文化等产业业态，不断扩大绿色服务供给数量与质量，在保证碳汇功能的基础上实现高质量发展，为后续碳中和工作打好基础。

注释：

1 根据英国风险评估公司 Maplecroft 公布的温室气体排放量数据。

2 数据来源于《中国统计年鉴(2021)》。

3 于明亮、李雨蒔、陈文浩等：《长三角地区能源消费变化的驱动因素分解研究——基于1995—2016年数据的分析》，《东南大学学报(哲学社会科学版)》2020年第2期，第69-79页。

4 Wang H, Ang B W, Bin Su. Assessing drivers of economy-wide energy use and emissions: IDA versus SDA. *Energy Policy*, 2017, 107; L' schel Andreas, Rexh' user Sascha, Schymura M. Trade and the environment: An application of the WIOD database. *Chinese Journal of Population, Resources and Environment*, 2013, 11(1), pp. 51-61.

5 Arto Iñaki, Dietzenbacher Erik. Drivers of the growth in global greenhouse gas emissions. *Environmental science & technology*, 2014, 48(10).

6 程郁泰、张纳军：《碳排放 IDA 模型的算法比较及应用研究》，《统计与信息论坛》2017年第5期，第10-17页。

7 杜克锐、鄢哲明、杨志明：《能源和环境绩效评价方法的最新研究进展》，《环境经济研究》2018年第1期，第113-138页。

8 Hoekstra R, den Bergh, Jeroen C J M. Comparing structural decomposition analysis and index. *Energy Economics*, 2003, 25(1).

-
- 9 张纳军、程郁泰：《碳排放 SDA 模型的算法比较及应用研究》，《统计与信息论坛》2018 年第 4 期，第 67-74 页。
- 10 Zhou P, Ang B W. Decomposition of aggregate CO₂ emissions: A production-theoretical approach. *Energy Economics*, 2007, 30(3).
- 11 胡美娟、丁正山、李在军等：《生态效率视角下旅游业生态福利及驱动因素——以常州市为例》，《生态学报》2020 年第 6 期，第 1944-1955 页。
- 12 邵帅、张曦、赵兴荣：《中国制造业碳排放的经验分解与达峰路径——广义迪氏指数分解和动态情景分析》，《中国工业经济》2017 年第 3 期，第 44-63 页。
- 13 郭朝先：《中国二氧化碳排放增长因素分析——基于 SDA 分解技术》，《中国工业经济》2010 年第 12 期，第 47-56 页；许士春、习蓉、何正霞：《中国能源消耗碳排放的影响因素分析及政策启示》，《资源科学》2012 年第 1 期，第 2-12 页。
- 14 Auffhammer M, Sun Weizeng, Wu Jianfeng. The Decomposition and Dynamics of Industrial Carbon Dioxide Emissions for 287 Chinese Cities in 1998—2009. *Journal of Economic Surveys*, 2016, 30(3).
- 15 Shan Yuli, Guan Dabo, Hubacek K J, et al. City-level climate change mitigation in China. *Science Advances*, 2018, 4(6).
- 16 Ramaswami A, Jiang Daqian, Tong Kangkang. Impact of the Economic Structure of Cities on Urban Scaling Factors: Implications for Urban Material and Energy Flows in China. *Journal of Industrial Ecology*, 2018, 22(2).
- 17 郭芳、王灿、张诗卉：《中国城市碳达峰趋势的聚类分析》，《中国环境管理》2021 年第 1 期，第 40-48 页。
- 18 陈芳、张书勤：《长江经济带绿色发展不平衡问题：概念框架与评估》，《统计与决策》2021 年第 12 期，第 161-165 页。
- 19 直辖市上海不作为省际研究样本。
- 20 陈芳、张书勤：《长江经济带绿色发展不平衡问题：概念框架与评估》，《统计与决策》2021 年第 12 期，第 161-165 页。
- 21 郭芳、王灿、张诗卉：《中国城市碳达峰趋势的聚类分析》，《中国环境管理》2021 年第 1 期，第 40-48 页。
- 22 限于篇幅，四种检验结果在文章中不做展示，若需要可向作者索取。
- 23 齐晔、刘天乐、宋祺佼等：《低碳城市试点“十四五”期间需助力碳排放达峰》，《环境保护》2020 年第 5 期，第 9-11 页。
- 24 杨莉莉、邵帅、曹建华等：《长三角城市群工业全要素能源效率变动分解及影响因素——基于随机前沿生产函数的经验研究》，《上海财经大学学报》2014 年第 3 期，第 95-102 页。
- 25 林伯强、刘希颖：《中国城市化阶段的碳排放：影响因素和减排策略》，《经济研究》2010 年第 8 期，第 66-78 页。
- 26 苏永乐、冷彩霞、蒋煜宇：《陕西省工业碳排放现状及影响因素研究》，《西安财经大学学报》2020 年第 6 期，第 58-65 页。

27 田成诗、刘怡：《中国碳排放与经济发展存在倒 U 型关系吗？——考虑时间相关效应和异质性的研究》，《运筹与管理》2021 年第 9 期, 第 232-239 页。

28 黄国华、刘传江、赵晓梦：《长江经济带碳排放现状及未来碳减排》，《长江流域资源与环境》2016 年第 4 期, 第 638-644 页。

29 史丹：《能源转型与低碳工业化道路》，《理论视野》2017 年第 11 期, 第 29-32 页。

30 张友国、白羽洁：《区域差异化“双碳”目标的实现路径》，《改革》2021 年第 11 期, 第 1-18 页。