

# 长三角城市群碳达峰的因素分解与情景预测

岳书敬<sup>1</sup>

(东南大学, 江苏 南京 211189)

**【摘要】:** 文章基于 2005—2017 年长三角城市群碳排放数据, 构建因素分解模型研究长三角城市群碳排放的驱动因素, 通过设定基准、低排放和技术突破三种情景, 分析长三角城市群在三种情景下的碳排放变动趋势以及实现碳达峰的可能路径。研究结论如下: (1) 城市和城市群视角下的分解结果均显示人均产出效应是长三角城市群碳排放增加的主要驱动力, 而工业碳强度效应对碳排放的增加具有较强的抑制作用。(2) 在基准、低排放和技术突破三种情景下, 长三角城市群分别于 2029 年、2027 年和 2025 年实现碳达峰, 技术进步对碳减排的促进作用较为显著。(3) 不同情景下的核密度分析发现, 从基准情景到低排放情景再到技术突破情景, 长三角城市群碳达峰的效果越发显著, 碳排放的峰值由分散变为集中状态。

**【关键词】:** 碳达峰 驱动因素分解 情景预测

**【中图分类号】:** F293 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1002-6924(2021)09-0115-10

## 一、引言

降低碳排放、增强绿色发展、促进人与自然和谐共生是构建生态文明体系的重要发展内涵, 也是提高人类生存福祉和践行“两山理论”的有效发展方式。作为负责任的大国, 我国为应对全球气候变化和治理环境污染等做出了突出贡献, 并承诺力争到 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和的宏伟发展目标。如何实现碳达峰以及促进经济增长和绿色低碳发展的双重任务是当前应当重点关注的领域之一, 而明确何种因素促进了碳排放的高速增长以及制定合理的区域减排目标等是实现碳达峰的重要前提。<sup>[1][2,2][2]</sup>

随着我国经济的长期良好发展和工业化、城镇化水平的不断提升, 加之区位优势等因素, 在当前已形成了以京津冀城市群、长三角城市群以及粤港澳大湾区等为代表的多层次、多核心的城市群发展模式, 其中长三角城市群在经济、教育和科技等领域均处于各城市群的发展前列, 对我国经济的高质量增长和科技进步等做出了突出贡献。在 2030 年碳达峰宏伟目标约束下, 有必要深入分析长三角城市群在应对气候变化和碳减排等方面的相关问题, 尤其自“十四五”规划和 2035 年远景目标纲要颁布以来, 长三角城市群应当担负时代发展责任, 结合自身发展的禀赋优势, 有效探索碳达峰实现路径和制定碳达峰发展方案, 为碳达峰工作开展提供长三角城市群的样板案例。同时, 结合当前国内外碳排放的变动情况以及相关的节能减排政策可以发现, 针对不同的研究对象, 可能会出现多种碳达峰的相关实现方案。因此, 需要结合长三角城市群碳排放的变动情况, 通过设定多种可能存在的发情景, 分析不同情景下碳排放的变动趋势以及实现碳达峰的相关路径。

基于此, 文章利用 2005—2017 年中国城市层面的碳排放数据, 构建城市碳排放的因素分解模型和情景预测方法, 分析长三

**作者简介:** 岳书敬, 东南大学经济管理学院教授, 博士生导师, 东南大学中国特色社会主义发展研究院研究员, 主要研究方向: 环境经济。

**基金项目:** 教育部人文社会科学研究规划基金“基于城市群空间网络视角的长江经济带绿色发展研究”(20YJA790085); 中央高校基本科研业务费专项资金“上市公司自媒体信息披露的市场效用研究”(2242021S20022); 南京新时代中国特色社会主义发展研究院课题“南京建设低碳先锋城市路径研究”(2021-12-1)

角城市群实现碳达峰的驱动因素以及在不同发展情景下长三角城市群碳排放的变动情况，并通过核密度估计方法探讨长三角城市群在三种情景下的整体变动趋势，以期为长三角城市群碳达峰的实现路径提供相关借鉴。

## 二、文献综述

随着气候变化问题的不断加剧，国际社会对气候变化问题的治理和关注上升到了新的高度，同时也成为全球各国共同面临的问题。碳达峰作为我国治理气候变化和全球碳排放问题的重要承诺，对我国当前阶段的碳减排任务提出了重要考验，尤其在“十四五”期间，需要制定翔实的碳减排方案，为提前实现碳达峰以及顺利开展碳中和任务等提供坚实支撑。<sup>[4][5]</sup>因此，应当有效促进我国的低碳高质量发展，不断拓展碳达峰的相关实现路径。

通过梳理相关文献发现，当前有关碳达峰的研究可总结为如下三条路径：第一，关于碳达峰的内涵界定与定性分析。<sup>[6][7]</sup>Liu等定性分析了我国实现碳达峰目标的价值意义，同时从制定区域排放目标、增强排放数据核查、加强排污权市场监管和鼓励应用绿色技术等方面提出了我国实现碳达峰的相关对策建议。<sup>[1][2][8]</sup>第二，从国家整体或区域宏观层面分析其实现碳达峰的可行性和相关路径。<sup>[8][9][10][11]</sup>Su&Lee运用最优控制和STIRPAT模型分析了中国实现碳达峰的相关路径。<sup>[12]</sup>Ding等分析了在不同碳税情景下中国的碳达峰问题。<sup>[13]</sup>第三，从重点行业或居民生活等微观层面运用能源系统优化或蒙特卡洛模拟等方法，结合情景预测分析其实现碳达峰的相关方案。<sup>[14][15]</sup>邵帅等对我国制造业碳排放的影响因素进行分解，并利用蒙特卡洛模拟方法分析了制造业实现碳达峰的相关路径。<sup>[2][21]</sup>杨冕等研究了我国高耗能行业碳排放的驱动因素，并通过情景分析方法研究了高耗能行业实现碳达峰的行动方案。<sup>[16]</sup>

同时，由于碳排放的流动性特征，若要提升碳达峰的实现效果，需要通过地区间的协同减排和共同努力。<sup>[17][18]</sup>各地区尤其是城市群之间应当有效促进碳减排的协同和联动效应，以提升碳减排的规模效应和顺利实现碳达峰目标。

综上所述，众多学者从区域或行业等多种视角下深入研究了我国实现碳达峰的相关问题，为我国的绿色低碳发展和高质量增长等提供了良好的参考借鉴，但当前从城市群视角下对城市层面碳达峰的相关研究却较少涉及，对城市的碳达峰实现路径有待进一步补充完善。因此，文章立足于城市群的视角，选取在我国经济、教育和科技等领域均较为发达的长三角城市群为代表，通过构建LMDI因素分解模型，从城市群层面分析了碳排放的驱动因素，以明晰不同因素对城市群碳排放的影响程度；在此基础上，通过设定基准情景、低排放情景和技术突破情景，以剖析长三角城市群在不同发展情景下实现碳达峰的相关发展路径。

## 三、研究方法 with 数据来源

### （一）长三角城市群碳排放的因素分解模型构建

基于Kaya恒等式以及Liu等<sup>[19]</sup>和Yang等<sup>[20]</sup>等学者的研究方法和变量选取，结合长三角城市群碳排放的变动特征，构建了长三角城市群碳排放的LMDI因素分解模型，相关公式如下所示：

$$\begin{aligned} C_t &= P_t \cdot \frac{G_t}{P_t} \cdot \frac{I_t}{G_t} \cdot \frac{C_t}{I_t} \\ &= T \cdot L \cdot S \cdot Q \end{aligned} \quad (1)$$

其中， $C_t$ 、 $P_t$ 、 $G_t$ 和 $I_t$ 分别表示 $t$ 时期长三角城市群中各城市的碳排放量（百万吨）、年末总人口（万人）、GDP（亿元）和第二产业增加值（亿元）；而 $T$ 、 $L$ 、 $S$ 、 $Q$ 分别表示人口规模效应、人均产出效应、产业结构效应和工业碳强度效应对长三角城市群碳排放的影响因素。

不同驱动因素的具体分解情况可表示如下：

$$\Delta C_T = \frac{C^t - C^0}{\ln C^t - \ln C^0} \ln \left( \frac{T^t}{T^0} \right) \quad (2)$$

$$\Delta C_L = \frac{C^t - C^0}{\ln C^t - \ln C^0} \ln \left( \frac{L^t}{L^0} \right) \quad (3)$$

$$\Delta C_S = \frac{C^t - C^0}{\ln C^t - \ln C^0} \ln \left( \frac{S^t}{S^0} \right) \quad (4)$$

$$\Delta C_Q = \frac{C^t - C^0}{\ln C^t - \ln C^0} \ln \left( \frac{Q^t}{Q^0} \right) \quad (5)$$

长三角城市群碳排放驱动因素的总效应可表示为：

$$\Delta C = \Delta C_T + \Delta C_L + \Delta C_S + \Delta C_Q \quad (6)$$

## （二）长三角城市群碳达峰的情景预测方法

参考邵帅等<sup>[2,21]</sup>、王勇等<sup>[21]</sup>和 Ding 等<sup>[13]</sup>等学者关于情景预测的分析方法，将其引入到长三角城市群碳排放的情景预测分析中。长三角城市群碳排放的变动可能出现以下三种情形：即继续保持当前发展状态，相关节能减排政策和规划具有连贯性的基准情景；加大低碳可持续发展要求，出台更加严格环保政策的低排放情景以及实现重大绿色生产技术进步的技术突破情景。因此，结合上述因素分解模型的基本方法，设定基准情景、低排放情景和技术突破情景三种可能的发展状况，并以 2017 年为基期，分析“十四五”和“十五五”时期长三角城市群碳排放的变动情况。

长三角城市群碳排放的驱动因素在 t+1 年的变动情况可表示如下：

$$T_{t+1} = T_t \cdot (1 + \delta) \quad (7)$$

$$L_{t+1} = L_t \cdot (1 + \chi) \quad (8)$$

$$S_{t+1} = S_t \cdot (1 - \beta) \quad (9)$$

$$Q_{t+1} = Q_t \cdot (1 - \alpha) \quad (10)$$

基于此，长三角城市群在 t+1 年的碳排放可表示为：

$$\begin{aligned} C_{t+1} &= T_{t+1} \cdot L_{t+1} \cdot S_{t+1} \cdot Q_{t+1} \\ &= T_t \cdot (1 + \delta) \cdot L_t \cdot (1 + \chi) \cdot S_t \cdot (1 - \beta) \\ &\quad \cdot Q_t \cdot (1 - \alpha) \end{aligned} \quad (11)$$

其中  $\delta$ 、 $\lambda$ 、 $\beta$  和  $\alpha$  分别表示人口规模增长率、人均产出增长率、产业结构变化率和工业碳强度变化率。因此，长三角城市群碳排放的变化率可表示如下：

$$\omega = (1 + \delta) \cdot (1 + \lambda) \cdot (1 - \beta) \cdot (1 - \alpha) - 1 \quad (12)$$

根据以下原则设定长三角城市群碳排放驱动因素变化率的方向：首先当人口规模效应和人均产出效应的增长率在增加时，由于规模效应的促进作用，相关的碳排放也会随之增加；其次当第二产业占 GDP 的比重下降时，相关的碳排放也会随之下降，即产业结构效应的优化会促进低碳经济的发展；最后，当工业碳强度效应增加时，每单位工业增加值所隐含的碳排放也会随之增加。

根据长三角城市群各城市在“十三五”期间的减排情况，结合各城市的“十四五”发展规划纲要等政策文件制定发展目标和增长约束，参考王勇等<sup>[22]</sup>和 Fang 等<sup>[23]</sup>学者的设定方法，构建基准、低排放和技术突破三种情景，并分别对三种情景下长三角城市群碳排放驱动因素的变化率进行设定。

在基准情景下，设定长三角城市群中的各项政策和规划等保持连贯性，长三角城市群碳排放驱动因素的变化率与既有数据基本保持一致，经济健康平稳运行，低碳发展有序推进，各城市的产业结构有一定程度的优化，但低碳环保技术进步有限，契合当前的发展状况。在低排放情景下，长三角城市群更加注重低碳环保和节能减排效果，存在一定的低碳环保技术进步，相关职能部门通过一系列环保政策加强环境治理和碳减排工作，产业结构进一步优化，持续推动经济的高质量增长和可持续发展。在技术突破情景下，长三角城市群自上而下的进一步制定相关的鼓励技术创新和绿色低碳技术研发的政策和方案，各城市增加技术创新对城市低碳发展的贡献度和参与度，自下而上的改进绿色低碳生活方式，将绿色生产技术应用到城市发展的全方面。

2021 年我国全面放开“三胎”政策，结合“全面二孩”政策的实施效果对人口规模增长率进行设定，假定短期内会出现一定程度的人口增长，但一定时期内不会出现大幅度的波动；同时，结合长三角城市群中“一线”与“新一线”城市的规划布局以及周边“卫星城市”的高效发展，会存在一定的人才吸引力，也将成为影响人口规模变动的影响因素。由于在一般情形下人口规模不会出现大幅变动，因此，设定基准、低排放和技术突破三种情景下的人口规模增长率保持一致。

结合各驱动因素变化率的既有数据，通过对三种情景下相关驱动因素的变化率进行设定，预测“十四五”和“十五五”时期长三角城市群碳排放可能存在的变化情况。

### （三）数据来源与说明

为保证数据来源的严谨性以及限于数据的可得性，文章选取 2005—2017 年作为研究区间，以此来分析长三角城市群碳排放的驱动因素，并进行碳达峰的情景预测分析，其中长三角城市层面的人口、GDP 和工业增加值数据来源于历年《中国城市统计年鉴》和 Wind 数据库，各城市的碳排放数据来源于 CEADs 数据库，该数据采用人工智能算法将 DMSP/OLS 和 NPP/VIIRS 两套夜间灯光数据进行融合，自上而下地测度了中国县级的 CO<sub>2</sub> 排放量，<sup>[24]</sup>城市层面的碳排放数据通过城市下属区县加总所得。

## 四、实证结果与分析

### （一）长三角城市群碳排放的因素分解分析

#### 1. 基于城市层面的视角

从 2005—2017 年长三角城市群 26 个城市的视角研究碳排放的驱动因素，以剖析研究区间内不同城市碳排放增长的内在原理。通过对长三角城市群 26 个城市碳排放因素分解的综合对比发现，人口规模效应和人均产出效应对上海和苏州碳排放增长的贡献比较大，同时，产业结构效应和工业碳强度效应也较大幅度地抑制了上海和苏州碳排放的增长；而以滁州和芜湖等为代表的城市，需要进一步优化产业结构，提升碳减排效果，增强与长三角城市群周边发达城市的合作和关联，以实现碳减排的协同发展效应。

根据数据特征和长三角城市群碳排放的变动趋势，选取 2005—2010 年、2010—2015 年以及 2015—2017 年三个阶段进行分析，即对“十一五”时期、“十二五”时期和“十三五”初期进行综合对比研究（见图 1、图 2 和图 3）。

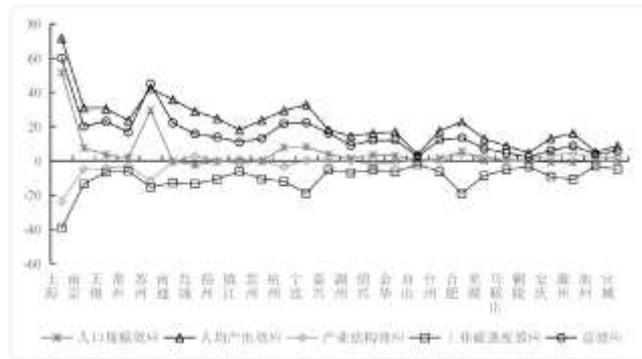


图 1 2005—2010 年长三角城市群碳排放的驱动因素分解

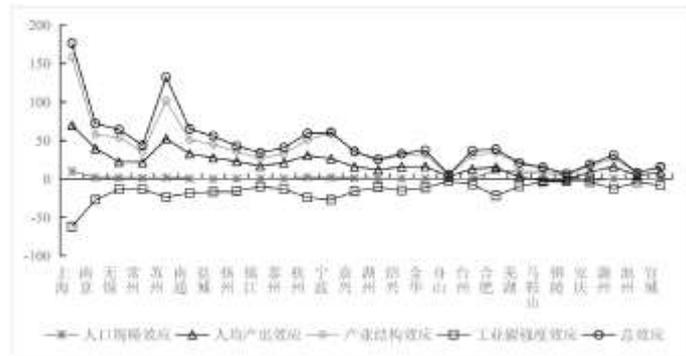


图 2 2010—2015 年长三角城市群碳排放的驱动因素分解

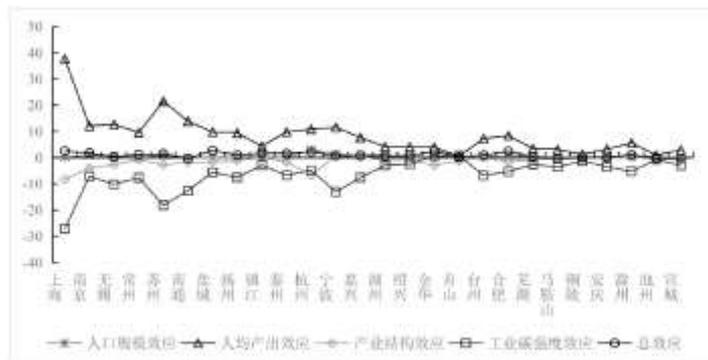


图 3 2015—2017 年长三角城市群碳排放的驱动因素分解

在 2005—2010 年间，整体维度上人口规模效应和人均产出效应促进了长三角城市群碳排放的增长，其中人均产出效应是各城市碳排放增长的主要驱动力；而产业结构效应和工业碳强度效应在一定程度上抑制了长三角城市群碳排放的增长，其中工业碳强度效应较大幅度上抑制了各城市碳排放的快速增长；在“十一五”期间，以上海、苏州和无锡为代表的城市碳排放因素分解的总效应较大，该期间内上述城市的碳排放增加较多。在 2010—2015 年间，整体维度上人口规模效应、人均产出效应和产业结构效应促进了长三角城市群碳排放的增长，仅有工业碳强度效应对城市碳排放的增长具有一定的抑制作用，相对于“十一五”时期而言，产业结构效应对城市碳排放的影响由抑制作用变为了促进作用，表明“十二五”期间，各城市的第二产业增加值占 GDP 的比重在不断上升，第二产业作为重要的能源消耗产业，其产业发展引致的碳排放也随之增加。在 2015—2017 年间，整体维度上人口规模效应和人均产出效应是长三角城市群碳排放增长的主要驱动力；相对于“十二五”时期而言，产业结构效应逐渐对长三角城市群碳排放的增长呈现出一定的抑制作用，表明近年来长三角城市群第二产业在经济发展中的比例有所下降；除金华和舟山外，长三角城市群中其余城市的工业碳强度效应均较大程度的抑制了碳排放的增长。

综合对比“十一五”时期、“十二五”时期以及“十三五”初期长三角城市群碳排放的驱动因素发现，人口规模效应和人均产出效应是城市碳排放增长的主要驱动力，而工业碳强度效应主要抑制了城市碳排放的高速增长，近年来长三角城市群的产业结构呈现出不断优化的发展趋势。

## 2. 基于城市群层面的视角

从长三角城市群的视角分析不同阶段碳排放的因素分解结果（见图 4）。通过对三个阶段内长三角城市群整体维度的碳排放分解发现，人均产出效应是长三角城市群碳排放增长的主要驱动因素，其中在 2005—2010 年间尤为突出，该时间段内人均产出效应对碳排放增长的贡献达到了 5.9395 亿吨，但总体上人均产出效应对碳排放的促进作用在逐渐减弱。此外，产业结构效应和工业碳强度效应均抑制了长三角城市群碳排放的增长，其中工业碳强度效应的抑制作用更加明显，在 2010—2015 年间工业碳强度效应对碳排放增长的抑制效果达到了 4.1205 亿吨。从长三角城市群碳排放的变动来看，其总体上呈现“V”型变化趋势，三个阶段内长三角城市群碳排放的变动分别为 4.007 亿吨、-0.0465 亿吨和 0.4133 亿吨。

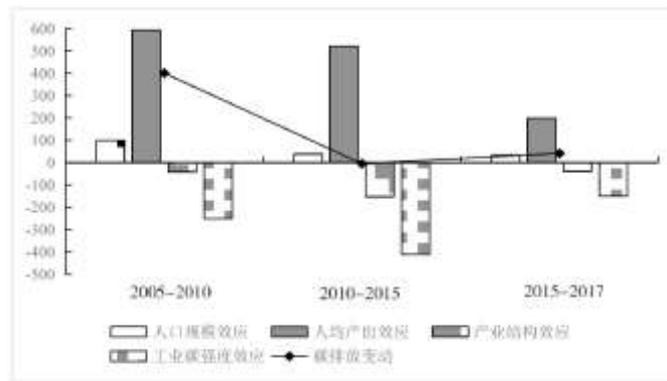


图 4 长三角城市群碳排放变动的分阶段分解结果单位：百万吨

进一步从长三角城市群整体角度分析各驱动因素的累积贡献情况，以明晰各驱动因素对长三角城市群碳排放的动态影响，并以 2005 年作为基期进行分析（见图 5）。通过分析发现，相对于 2005 年，长三角城市群整体维度的碳排放增量在 2012 年达到最大值，之后呈现波动式增长趋势。从长三角城市群整体维度的驱动因素分析结果来看，人口规模效应和人均产出效应都促进了长三角城市群碳排放的增长，其中人均产出效应是长三角城市群碳排放增长的主要驱动力，并且人均产出效应的驱动效果在总

体上呈现持续增长趋势；工业碳强度效应显著抑制了长三角城市群碳排放的增长，是实现碳减排和碳达峰的重要驱动力，并且工业碳强度效应对碳排放的抑制作用总体上呈现扩大趋势，未来可重点关注工业碳强度的低碳发展效应。

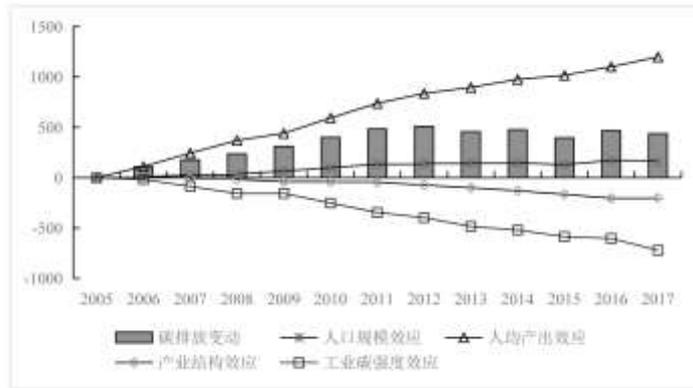


图5 长三角城市群碳排放驱动因素的累积贡献单位：百万吨

## （二）长三角城市群碳达峰的情景预测分析

基于长三角城市群碳排放的因素分解结果，在基准、低排放和技术突破三种情景下，对“十四五”（2021—2025年）和“十五五”时期（2026—2030年）长三角城市群碳排放的变动情况进行预测分析，判断三种情景下长三角城市群碳排放的变动趋势和实现碳达峰的时间节点（见图6）。在基准情景下，即按照现有发展模式前提下，长三角城市群碳排在2029年达到峰值，其由2021年的12.1687亿吨增长到了2029年的12.5728亿吨，之后碳排放出现下降，在现有发展模式下长三角城市群的碳排放将会出现一段时间的持续增长，若要尽早实现碳达峰，需要进一步制定更加严格的低碳发展战略；基准情景下，长三角城市群将在“十五五”后期完成碳达峰目标。在低排放情景下，长三角城市群在2027年实现碳达峰，其由2021年的12.0096亿吨增长到了2027年的12.2972亿吨，之后下降到了2030年的12.1892亿吨，长三角城市群碳排放的增长得到了有效抑制，该情景下已取得了较好的碳减排效果；低排放情景下，长三角城市群将在“十五五”前中期完成碳达峰目标。在技术突破情景下，长三角城市群碳排在2025年就可实现达峰，其由2021年的11.8686亿吨增长到了2025年的12.0163亿吨，之后下降到了2030年的11.7304亿吨，该情景下长三角城市群的碳排放显著下降，碳排放由上升到下降的拐点提前出现，碳减排效果显著；技术突破情景下，长三角城市群将在“十四五”末期完成碳达峰目标。

综合对比分析发现，相较于2017年长三角城市群的碳排放情况，2030年在基准情景下长三角城市群碳排放增加了0.6838亿吨，低排放情景下增加了0.3472亿吨，而技术突破情景下减少了0.1116亿吨；相较于现有发展模式，在低排放和技术突破情景下都具有较强的碳减排效果，其中技术突破情景对碳减排的促进作用更为显著，表明技术进步是碳减排的主要驱动力。

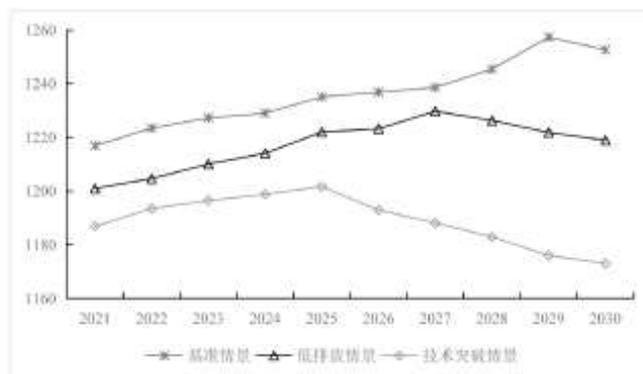


图 6 长三角城市群碳排放在三种情景下的变动情况（2021—2030）单位：百万吨

结合上述情景预测结果，进一步运用核密度估计方法，从三种情景下构建长三角城市群实现碳达峰的核密度图（如图 7 所示）。在基准、低排放和技术突破三种情景下，长三角城市群碳排放的核密度估计依次左移，并且峰值不断上升、宽度不断缩小以及对应更小的碳排放值，碳排放的峰值由分散变为集中状态，表明从基准情景到低排放情景再到技术突破情景，长三角城市群的碳减排效应越发突出，其实现碳达峰的效果逐渐显著，而且长三角城市群碳排放的区域差异呈现下降趋势。通过对比分析发现，基准情景下长三角城市群碳排放具有较大的区域差异，各城市间的碳排放存在较大的异质性，而在低排放和技术突破情景下，长三角城市群碳排放的区域差异在逐渐缩小，反映出在不断增强的碳减排规划和技术进步条件下，城市群内部的协同减排效果更加显著；相较于基准情景和低排放情景而言，技术突破情景下的长三角城市群将有更大的碳减排空间，对于提前实现碳达峰具有较强的参考价值。

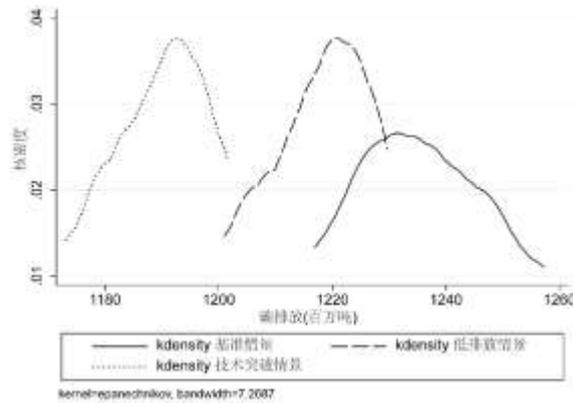


图 7 三种情景下长三角城市群碳达峰的核密度估计图

## 五、结论与政策建议

### （一）研究结论

文章基于 2005—2017 年长三角城市群的碳排放数据，通过构建 LMDI 因素分解模型和情景预测方法，综合研究了长三角城市群碳排放的驱动因素，并通过设定碳排放变动的基准情景、低排放情景和技术突破情景，分析长三角城市群在三种情景下实现碳达峰的相关路径，得到如下结论：第一，从长三角城市群和 26 个城市碳排放驱动因素的分解结果均显示，人口规模效应和人均产出效应促进了长三角城市群碳排放的增长，其中人均产出效应对长三角城市群碳排放增长的驱动效果更加显著，而工业碳强度效应是长三角城市群碳减排的主要驱动力，较大程度地抑制了碳排放的高速增长；长三角城市群的碳排放增量在 2012 年达到最大值，之后呈现波动式增长趋势。第二，通过对长三角城市群碳排放的情景预测分析发现，在基准情景下长三角城市群将在 2029 年实现碳达峰；在低排放情景下长三角城市群将在 2027 年实现碳达峰；而在技术突破情景下长三角城市群在 2025 年就可实现碳达峰目标；情景预测的结果表明技术进步对碳减排的促进作用较为显著。第三，通过核密度估计发现，从基准情景到低排放情景再到技术突破情景，长三角城市群的碳排放峰值由分散变为集中状态，表明长三角城市群碳达峰的效果越来越显著，其中技术突破情景下的碳减排效应最大。

### （二）对策建议

根据实证分析结果和长三角城市群碳排放的变动特征，提出如下促进长三角城市群绿色低碳发展和实现碳达峰的对策建议。

第一，持续改善长三角城市群的产业结构。相关职能部门应充分发挥长三角城市群在区位优势、经济发展和科技教育等领域的禀赋资源，促进第二产业的高质量发展和第三产业的规模增长，进一步增强第三产业发展对经济增长的贡献度；同时结合长三角城市群碳排放驱动因素的分解结果发现，工业碳强度效应对碳排放增长的抑制作用较大，因此可进一步提升工业碳强度的减排效应，从产业结构优化的角度增强长三角城市群的低碳发展。

第二，进一步加强经济高质量发展要求。长三角城市群在当前已逐渐构建起高质量发展体系，但结合实证结果发现，人均产出效应是长三角城市群碳排放增加的主要驱动力，侧面体现了长三角城市群的经济高质量发展水平仍有待提高；同时，结合各城市碳排放的变动趋势和“十四五”发展规划等政策文件，需要进一步构建适宜各城市发展特色的绿色高质量发展规划和经济增长目标。

第三，有效开发利用低碳环保技术。长三角城市群碳排放的情景预测结果显示，技术突破情景下长三角城市群将在2025年实现碳达峰，相较于基准和低排放情景，技术突破情景下的碳减排效果尤为突出。因此，为有效促进长三角城市群的低碳发展，应结合各城市的禀赋资源和发展实际，积极引进国内外先进的低碳环保技术，合理开发利用到长三角城市群的生产生活中，增强低碳环保技术进步对各城市绿色发展的促进作用，以争取尽早实现碳达峰发展目标。

第四，提升长三角城市群之间的协同减排力度。由于碳排放的流动性和外部性特征，相较于单一城市的碳减排工作，城市群之间的协同减排效果往往更加显著。长三角城市群在经济、科技和教育等领域作为我国重要的发展高地，应当进一步加强长三角城市群的一体化发展水平和协同治理能力，率先制定并实现碳达峰目标，为我国的碳达峰工作提供长三角城市群的样板案例，同时可积极吸取国外相关科技创新城市群的发展经验，将其应用到长三角城市群的协同减排规划中。

#### 参考文献:

- [1]Liu Z, Guan D, Moore S, et al. Climate policy:Steps to China' s carbon peak[J]. Nature, 2015(7556):279-281.
- [2]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[J]. 中国工业经济, 2017(3):44-63.
- [2]程云鹤, 董洪光, 耿纪超, 等. 中部地区崛起的能源需求及碳达峰路径研究[J]. 中国工程科学, 2021(1):68-78.
- [4]潘家华. 压缩碳排放峰值加速迈向净零碳[J]. 环境经济研究, 2020(4):1-10.
- [5]胡鞍钢. 中国实现2030年前碳达峰目标及主要途径[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2021(3):1-15.
- [6]刘长松. 碳中和的科学内涵、建设路径与政策措施[J]. 闽江学刊, 2021(2):48-60+121.
- [7]张友国. 碳达峰、碳中和工作面临的形势与开局思路[J]. 行政管理改革, 2021(3):77-85.
- [8]李治国, 朱永梅, 高新伟. 系统耦合下制造业碳排放达峰路径研究——基于山东省的数据[J]. 华东经济管理, 2019(9):22-31.
- [9]冯烽, 白重恩. 广东省能源需求预测与碳排放达峰路径研究——基于混合单位能源投入产出模型[J]. 城市与环境研究, 2019(2):8-27.

- 
- [10]李惠民, 张西, 张哲瑜, 等. 北京市碳排放达峰路径及政策启示[J]. 环境保护, 2020(5):24-31.
- [11]张保留, 吕连宏, 等. 农村居民生活碳达峰路径及对策[J]. 环境科学研究, 2021(6):1-14.
- [12]Su K, Lee C M. When will China achieve its carbon emission peak? A scenario analysis based on optimal control and the STIRPAT model[J]. Ecological Indicators, 2020(112):106138.
- [13]Ding S, Zhang M, Song Y. Exploring China's carbon emissions peak for different carbon tax scenarios[J]. Energy Policy, 2019(129):1245-1252.
- [14]马丁, 陈文颖. 中国 2030 年碳排放峰值水平及达峰路径研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2016(S1):1-4.
- [15]马丁, 陈文颖. 基于中国 TIMES 模型的碳排放达峰路径[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2017(10):1070-1075.
- [16]杨冕, 卢昕, 段宏波. 中国高耗能行业碳排放因素分解与达峰路径研究[J]. 系统工程理论与实践, 2018(10):2501-2511.
- [17]傅京燕, 原宗琳. 中国电力行业协同减排的效应评价与扩张机制分析[J]. 中国工业经济, 2017(2):43-59.
- [18]汪明月, 刘宇, 李梦明, 等. 区域碳减排能力协同度评价模型构建与应用[J]. 系统工程理论与实践, 2020(2):470-483.
- [19]Liu L C, Fan Y, Wu G, et al. Using LMDI method to analyze the change of China's industrial CO<sub>2</sub> emissions from final fuel use: An empirical analysis[J]. Energy Policy, 2007(11):5892-5900.
- [20]Yang P, Liang X, Drohan P J. Using Kaya and LMDI models to analyze carbon emissions from the energy consumption in China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020(21):26495-26501.
- [21]王勇, 韩舒婉, 李嘉源, 等. 五大交通运输方式碳达峰的经验分解与情景预测——以东北三省为例[J]. 资源科学, 2019(10):1824-1836.
- [22]王勇, 毕莹, 王恩东. 中国工业碳排放达峰的情景预测与减排潜力评估[J]. 中国人口·资源与环境, 2017(10):131-140.
- [23]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.
- [24]Chen J, Gao M, Cheng S, et al. County-level CO<sub>2</sub> emissions and sequestration in China during 1997-2017[J]. Scientific Data, 2020(1):391-401.