

长三角地区碳排放效率时空特征及影响因素分析

李建豹^{1, 2} 黄贤金^{3, 4} 揣小伟³ 孙树臣⁵¹

(1. 南京财经大学 公共管理学院, 江苏 南京 210023;

2. 南京财经大学 政府管理研究中心, 江苏 南京 210023;

3. 南京大学 地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023;

4. 国土资源部海岸带开发与保护重点实验室, 江苏 南京 210023;

5. 聊城大学 环境与规划学院, 山东 聊城 252059)

【摘要】: 长三角区域一体化发展战略上升为国家战略, 要求建立区域间协调机制, 引导低碳产业, 弥补绿色发展的短板。掌握长三角地区碳排放效率时空特征及其影响因素, 对长三角地区低碳高效发展及顺利实现碳减排目标具有重要的现实意义。基于考虑非期望产出的 SBM-DEA 模型与窗口分析相结合的方法, 测算碳排放效率, 利用传统统计分析与空间分析相结合的方法, 分析了 1995~2017 年长三角地区碳排放效率时空特征, 并考虑空间因素, 构建空间杜宾面板模型分析其影响因素。结果表明: (1) 1995~2017 年碳排放效率总体呈波动变化趋势。2017 年, 上海、苏州和无锡的碳排放效率为 1。碳排放效率绝对差异与相对差异呈波动变化, 且变化趋势基本一致。碳排放效率存在不均衡现象。(2) 碳排放效率区域差异明显, 2005 年后, 空间格局变化不大, 上海、苏州和无锡形成了碳排放效率高值区。碳排放效率重心主要分布在南京市, 总体向西北移动。(3) 空间杜宾面板模型结果表明: 提高技术水平是改变碳排放效率的重要途径。城镇化和空间因素对碳排放效率具有明显的正向作用; 外商投资、单位 GDP 能耗和生态环境对碳排放效率具有明显的负向作用。

【关键词】: 碳排放效率 时空特征 空间杜宾面板模型

【中图分类号】: F205 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227 (2020)07-1486-11

全球气候变暖速度的日益加剧, 引起了国际社会的高度关注, 减少碳排放是应对全球气候变暖的根本性策略, 也是中国生态文明建设的重要内容。2007 年, 中国碳排放量已超过美国, 成为世界上最大的碳排放国^[1], 面临较大的碳减排压力。中国政府积极主动承担了碳减排任务, 并制定了详细的碳减排目标。2014 年, 中国政府正式提出到 2030 年左右碳排放量有望达到峰值, 2015 年, 提出到 2030 年碳排放强度比 2005 年下降 60%~65%等目标。十九大报告中提出, 推动效率变革, 提高全要素生产率, 降低碳排放量,

作者简介: 李建豹(1986-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为城镇化碳排放、土地利用与规划。E-mail: lijianbao888@126.com; 黄贤金, E-mail: hxj369@nju.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41901245); 江苏高校哲学社会科学研究项目(2019SJA0254); 国家社会科学基金重大项目(17ZDA061)。

提高碳排放效率,以实现可持续发展。碳排放效率与碳减排目标的实现及经济低碳发展有密切关系,是低碳经济发展的重要指标,能够准确反映经济的投入产出关系。因此,开展碳排放效率及其影响因素研究,可为政府提出高效碳减排政策提供科学依据,有助于保障碳减排目标的顺利实现,对促进经济低碳高效发展具有重要的意义。

国内外学者研究碳排放效率问题主要使用了数据包络分析模型(Data Envelopment Analysis, DEA)、数据包络窗口分析模型、SBM-DEA 模型(Slack Based Measure-Data Envelopment Analysis, SBM-DEA)、超效率 SBM-DEA 模型和三层次元边界 DEA 模型等方法。Charnes 等^[2]首次提出了数据包络分析模型,现已被广泛应用到碳排放效率领域^[3~8]。Zhang 等^[9]应用数据包络窗口分析模型计算了中国碳排放效率及减排潜力发现,西北地区碳减排潜力最大。袁凯华等^[6]使用 SBM-DEA 模型分析了中国省域碳排放效率发现,多数省域碳排放效率呈上升趋势,南方省域综合效率上升速度比北方快。王兆峰等^[10]使用超效率 SBM-DEA 模型与 Malmquist 指数分析了 2010~2016 年湖南省 14 市的碳排放效率时空特征发现,碳排放效率存在明显的空间差异。Feng 等^[8]提出了三层次元边界 DEA 模型,首次将效率分解为结构效率、技术效率和管理效率,并将其用于中国碳排放效率研究。结果表明,由于结构无效、技术无效和管理无效,中国碳排放效率相对较低。

碳排放效率的研究尺度多集中在国家尺度^[5,11~15]或省域尺度^[9,16~19],从城市尺度研究碳排放效率的较少。钱志权等^[15]使用 Malmquist-Luenberger 指数方法测算了 1995~2012 年东亚地区碳排放效率发现,碳排放效率总体呈下降趋势,各经济体间的差异较大,且呈扩大趋势。袁长伟等^[19]使用超效率 SBM 模型计算了中国省域交通运输碳排放效率,并分析了其时空特征及影响因素,结果表明,碳排放效率变化符合环境库兹涅茨曲线,且存在明显的空间集聚特征。节能技术水平对碳排放效率具有明显的正向作用。

现有文献虽然对碳排放效率开展了大量研究,但仍存在以下不足:第一,使用考虑非期望产出的 SBM-DEA 模型和窗口分析相结合的相对较少,该方法可以考虑非期望产出的同时,将时间维考虑在内,能更好地研究碳排放效率的动态变化特征。第二,研究尺度多集中在国家或省域尺度,对城市尺度的研究相对较少。对城市尺度的研究,可以提供比国家或省域尺度,更加精确的模拟结果,有利于提出符合城市发展实际的碳减排政策。第三,多忽略了空间因素对碳排放效率的影响,而空间因素对碳排放效率具有重要影响,忽略空间因素可能导致模拟结果的偏误。

长三角地区包括上海市、江苏省的南京、无锡、徐州、常州、苏州、南通、连云港、淮安、盐城、扬州、镇江、泰州、宿迁、浙江省的杭州、宁波、嘉兴、湖州、绍兴、舟山、温州、金华、衢州、台州、丽水及安徽省的合肥、淮北、亳州、宿州、蚌埠、阜阳、淮南、滁州、六安、马鞍山、芜湖、宣城、铜陵、池州、安庆和黄山等 41 市。2016 年 6 月,《长江三角洲城市群发展规划》要求全面推进绿色低碳生态城区建设。2018 年 11 月,长三角区域一体化战略上升为国家战略,要求建立区域间协调机制,引导低碳产业,弥补低碳发展的短板。掌握碳排放效率的时空特征及影响因素,对长三角地区低碳高效发展及实现碳减排目标具有重要的现实意义。因此,基于 1995~2017 年的夜间灯光数据和统计数据,本文利用 SBM-DEA 模型与窗口分析相结合的方法测算长三角地区碳排放效率,采用传统统计分析与时空分析相结合的方法,研究 1995~2017 年碳排放效率的时空特征,运用空间杜宾面板模型分析碳排放效率的影响因素,揭示碳排放效率的影响机理,探求影响碳排放效率的主要因素,为长三角地区低碳高效与区域协调发展提供决策参考。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

就业人员、非农业人口、年末总人口、GDP(1995 年不变价)、第二产业产值和城市土地面积等数据主要源自《中国城市统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《上海统计年鉴》《江苏统计年鉴》《浙江统计年鉴》、EPS 数据平台及各市的国民经济和社会发展统计公报。长三角地区的矢量数据源自国家基础地理信息中心 1:400 万数据库。DMSP/OLS 夜间灯光数据和 VIIRS 夜间灯光数据源自美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)下属的国家地球物理数据中心(National Geophysical Data Center, NGDC)。

投入变量主要包括劳动力、资本和能源,产出变量主要包括期望产出 GDP(1995 年不变价)和非期望产出 (CO₂),其中,劳动力投入用各市的就业人员表示;资本用资本存量表示,资本存量无法从年鉴中直接获得,运用“永续盘存法”计算获得;能源投入用能源消费总量表示,期望产出用各市的 GDP 表示,并将其转换为 1995 年不变价;非期望产出用各市的 CO₂排放量表示。但市域的能源消费量和能源消费碳排放量无法从年鉴中获得,参照李建豹等^[20]和 Li 等^[21]的方法利用 DMSP/OLS 夜间灯光数据和 VIIRS 夜间灯光数据模拟反演获得。能源消费量模拟值与统计值的平均相对误差为 4.69%,CO₂的平均相对误差为 5.09%,说明利用 DMSP/OLS 夜间灯光数据和 VIIRS 夜间灯光数据模拟的能源消费量和能源消费 CO₂排放量精度均较高。

1.2 研究方法

1.2.1 考虑非期望产出的 SBM-DEA 模型

假设有 n 个决策单元,每个决策单元包括投入项、期望产出项和非期望产出项,分别使用向量 $x \in R^m$ 、 $y^g \in R^{s1}$ 和 $y^b \in R^{s2}$ 表示。定义矩阵 $X=[x_1, \dots, x_n] \in R^{m \times n}$, $Y^g=[y_{g11g}, \dots, y_{gnng}] \in R^{s1 \times n}$ 和 $Y^b=[y_{b11b}, \dots, y_{bnnb}] \in R^{s2 \times n}$ 。假设 $X>0$, $Y^g>0$, $Y^b>0$,生产可能性集可以定义为:

$$P = \{(x, y^g, y^b) \mid x \geq X\lambda, y^g \leq Y^g\lambda, y^b \geq Y^b\lambda, \sum_{i=1}^n \lambda = 1, \lambda \geq 0\} \quad (1)$$

式中, λ 表示观测值的权重,权重之和为 1 表示可变规模报酬,权重之和不为 1,则为不变规模报酬。考虑非期望产出的 SBM-DEA 模型可定义如下:

$$\rho^* = \min \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_i^-}{x_{i0}}}{1 + \frac{1}{s_1 + s_2} \left(\sum_{r=1}^{s_1} \frac{s_r^g}{y_{r0}^g} + \sum_{r=1}^{s_2} \frac{s_r^b}{y_{r0}^b} \right)} \quad (2)$$

$$s. t. \begin{cases} x_0 = X\lambda + s^-, y_0^g = Y^g\lambda - s^g, y_0^b = Y^b\lambda + s^b \\ s^- \geq 0, s^g \geq 0, s^b \geq 0, \lambda \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: s^- 和 s^b 分别表示投入过量和非期望产出过量; s^g 表示期望产出不足。当 $\rho^*<1$ 时,表示决策单元无效,当 $\rho^*=1$ 时,表示决策单元有效。

1.2.2 窗口分析法

窗口分析法是将不同时期的同一决策单元当作不同决策单元,采用移动平均法测算效率,可有效地反应效率的动态变化。Charnes 等^[22]将数据包络分析与窗口分析相结合,提出了数据包络窗口分析(DEA window analysis),以估计动态数据的效率。采用窗口分析法计算 1995~2017 年碳排放效率,每个窗口包括 $n \times t$ 个决策单元, n 表示决策单元数,即研究单元总数,本研究中 $n=41$, t 表示窗口的宽度,当 $t=3$ 或 $t=4$ 时,测算的效率最优^[23],本研究中取 $t=3$,第一个窗口包括 1995 年、1996 年和 1997 年。窗口的步长取一年,因此,第二个窗口包括 1996 年、1997 年和 1998 年,1995~2017 年间共 21 个窗口,除 1995 和 2017 年每个决策单元仅有 1 个效率值,1996 年和 2016 年仅有 2 个效率值,其余年份均有 3 个效率值。每年每个决策单元的平均效率表示该年的效

率。

2 碳排放效率时间特征分析

2.1 碳排放效率测算

以资本存量、从业人员和能源消费量为投入变量,以 GDP(1995 年不变价)和能源消费碳排放为产出变量,采用考虑非期望产出的 SBM-DEA 模型与窗口分析法相结合,计算 1995~2017 年间长三角地区各市的碳排放效率(表 1)。限于篇幅,表 1 中仅展示了 1995 年和 2017 年的碳排放效率,由表 1 可知,2017 年,碳排放效率为 1 的市包括上海、无锡和苏州,表明以上各市在 2017 年碳排放效率有效,可作为碳排放效率的先进示范区,尽管它们位于碳排放效率的前沿面上,碳排放效率比其它市高,但随着科学技术的进步,碳排放效率仍存在提升空间。

表 1 1995~2017 年长三角地区碳排放效率

名称	1995	2017	名称	1995	2017
上海	1.000	1.000	衢州	0.757	0.841
南京	0.775	0.979	舟山	1.000	0.854
无锡	1.000	1.000	台州	0.967	0.866
徐州	0.926	0.975	丽水	0.708	0.937
常州	0.974	0.901	合肥	0.764	0.896
苏州	0.980	1.000	淮北	0.656	0.893
南通	0.840	0.880	亳州	0.873	0.880
连云港	0.711	0.894	宿州	0.950	0.882
淮安	0.704	0.875	蚌埠	0.818	0.822
盐城	0.942	0.871	阜阳	0.891	0.900
扬州	0.666	0.952	淮南	0.777	0.827
镇江	0.994	0.946	滁州	0.901	0.802
泰州	0.618	0.935	六安	0.874	0.809
宿迁	0.707	0.928	马鞍山	0.777	0.831
杭州	0.902	0.848	芜湖	0.895	0.898
宁波	0.827	0.867	宣城	0.731	0.730
温州	0.898	0.795	铜陵	0.950	0.900
嘉兴	0.657	0.738	池州	0.896	0.836

湖州	0.835	0.805	安庆	0.713	0.851
绍兴	0.839	0.862	黄山	0.847	0.719
金华	0.871	0.906			

2.2 碳排放效率总体呈波动变化趋势

由图 1 可知, 1995~2017 年间, 长三角地区碳排放效率总体上呈波动变化趋势, 碳排放效率降低较多的年份分别发生在 1997 年、1998 年、2003 年、2009 年和 2012 年。碳排放效率降低较多可能是受国内外重大事件的影响, 1997 年, 爆发了亚洲金融危机, 导致出口需求下降, 原材料价格上涨, 对长三角地区外向型经济产生了一定影响, 导致碳排放效率下降。同时, 该影响具有一定的滞后性, 因此, 1998 年的碳排放效率降低也较多。2003 年, 中国爆发了“非典”, 但长三角地区的投资和出口需求高速增加, 以工业为主体的第二产业增加明显, 尤其是高碳制造业, 导致碳排放效率下降。2008 年国际金融危机的爆发, 出口需求大幅度下降, 产品原材料价格上涨, 严重影响了长三角地区的社会经济发展, 导致整体的经济效率低下, 且这种影响存在一定的滞后性, 同时, 中国政府为应对金融危机实施了一系列的措施, 如 2008 年实施的“4 万亿计划”, 资金大量流入基础设施、房地产产业和重化工上游产业等高碳排放产业, 以上产业碳排放效率较低, 因此, 2009 年碳排放效率下降仍相对较多。2010~2011 年碳排放效率升高, 2011 年, 长三角地区碳排放效率达到最高值, 为 0.893, 可能是由于 2011 年碳排放强度目标正式纳入“十二五”规划纲要, 强制性约束各地区降低碳排放强度, 有利于提高碳排放效率。2012 年以后, 中国经济发展速度放缓, 逐渐进入新常态, 受当时刺激消费、扩大内需、拉动经济增长政策的影响, 碳排放效率降低。

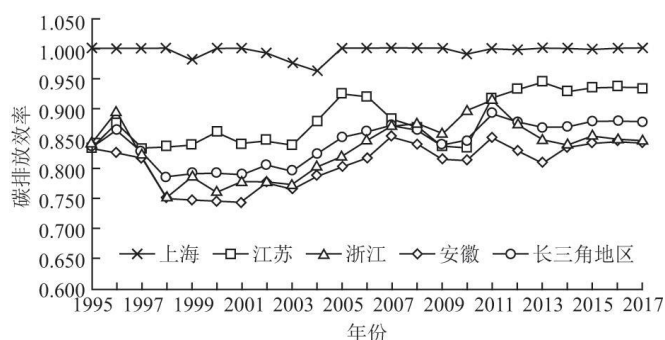


图 1 1995~2017 年长三角地区碳排放效率

上海碳排放效率一直最高, 大部分年份的碳排放效率为 1, 位于碳排放效率的前沿面上, 可能是由于上海经济水平较高, 产业结构合理, 碳排放效率相对较高。江苏碳排放效率的变化趋势和长三角地区基本一致。浙江的碳排放效率大致可分为 4 个阶段: 1995~2000 年, 呈“M”型, 1996 年达到最大值, 为 0.894; 2000~2003 年, 变化不大; 2003~2014 年, 呈“M”型, 2011 年达到最大值, 为 0.914; 2014~2017 年变化不大。2008~2011 年浙江超过江苏和长三角地区碳排放效率平均值。安徽碳排放效率的变化趋势和浙江的基本一致。

2017 年, 长三角地区碳排放效率的平均值为 0.876, 表明要达到 2017 年的效率前沿, 平均碳排放要下降 12.4%。上海、江苏、浙江和安徽的碳排放效率分别为 1、0.934、0.847 和 0.842, 由此可知, 上海的碳排放效率最高, 江苏的高于长三角地区的平均值, 浙江和安徽的低于长三角地区的平均值。上海作为长三角地区碳排放效率的最高区, 其产业结构较为合理, 低碳技术水平较高, 引领长三角地区的低碳发展, 而江苏、浙江和安徽的碳排放效率仍具有较大的提升空间。

2.3 碳排放效率绝对差异与相对差异均呈波动变化, 且变化趋势基本一致

由图 2 可知,标准差与变异系数均呈波动变化趋势。1998 年碳排放效率的标准差最大,为 0.140,2017 年的最小,为 0.068,降低了 51.183%。1998 年碳排放效率的变异系数最大,为 0.179,2017 年的最小,为 0.078,降低了 56.307%。在 1995~1997、1998~1999、2001~2002、2003~2004、2005~2008、2009~2010 和 2011~2017 年期间,碳排放效率的标准差下降,表明在以上时期碳排放效率的绝对差异呈减小趋势。在 1997~1998、1999~2001、2002~2003、2004~2005、2008~2009 和 2010~2011 年期间,碳排放效率的标准差呈上升趋势,表明以上时期碳排放效率绝对差异增加。碳排放效率变异系数的变化趋势与标准差的基本一致,表明碳排放效率的绝对差异与相对差异的变化趋势基本一致。

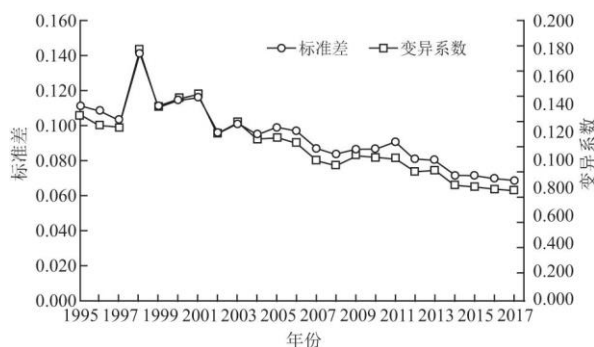


图 2 1995~2017 年碳排放效率标准差与变异系数

2.4 碳排放效率的动态演进特征

为了较为详细地分析长三角地区碳排放效率的动态演进特征,使用核密度研究其动态分布特征,选择常用的 Epanechnikov 函数,选取 1995 年、2000 年、2005 年、2010 年和 2017 年 5 个时间截面数据,绘制核密度曲线(图 3)。由图 3 可知,碳排放效率的密度分布曲线呈明显的向右平移,表明长三角地区各市的碳排放效率呈上升趋势;从密度分布曲线的峰度变化可知,1995~2017 年,长三角地区各市碳排放效率由“宽峰型”逐渐发展为“尖峰型”,且变化较为明显,说明各市碳排放效率有趋同趋势;从曲线的形状可知,1995~2017 年,长三角地区碳排放效率呈“双峰”模式,表明一部分市的碳排放效率集聚在相对较高水平,另一部分市的碳排放效率集聚在相对较低水平。2005 年碳排放效率表现出明显的“双峰”模式,第一波峰碳排放效率集中分布在 0.80 左右,主要分布在芜湖、滁州、六安、淮安和宁波;而第二波峰碳排放效率集中在 0.95 左右,主要分布在南京、南通、镇江和温州。这种“双峰”模式意味着长三角地区的碳排放效率存在不均衡现象。

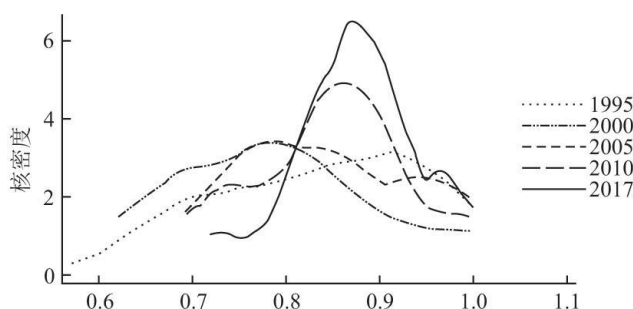


图 3 1995~2017 年碳排放效率核密度估计

3 碳排放效率演化空间特征分析

3.1 碳排放效率空间分布特征

运用自然断点法,将碳排放效率分为4类(图4),由图4可知,1995年,上海、无锡和舟山的碳排放效率为1。泰州的碳排放效率最低,为0.618。碳排放效率较高值区主要分布在上海、苏州、无锡、常州、镇江、盐城、徐州、舟山、台州、宿州和铜陵,碳排放效率较低值区主要分布在连云港、宿迁、淮安、扬州、泰州、嘉兴、丽水、安庆和淮北。2005年,上海、苏州、无锡、盐城、宿迁、徐州和舟山的碳排放效率为1。黄山的碳排放效率最低,为0.691。较高值区主要分布在上海和江苏,较低值区主要分布在浙江的湖州、嘉兴、衢州、丽水和安徽的蚌埠、淮南、池州、黄山、宣城。与1995年相比,碳排放效率较低值区明显扩张,尤其在浙江省和安徽省,江苏省的碳排放效率提升速度明显快于浙江省和安徽省。2017年,上海、苏州和无锡的碳排放效率为1。黄山的碳排放效率最低,为0.719。较低值区主要分布在嘉兴、宣城和黄山。与2005年相比,碳排放效率较高值区数量相同,碳排放效率较低值区数量减少。浙江省的碳排放效率升高速度快于江苏省,可能与沪杭甬产业带的深度开发有关。

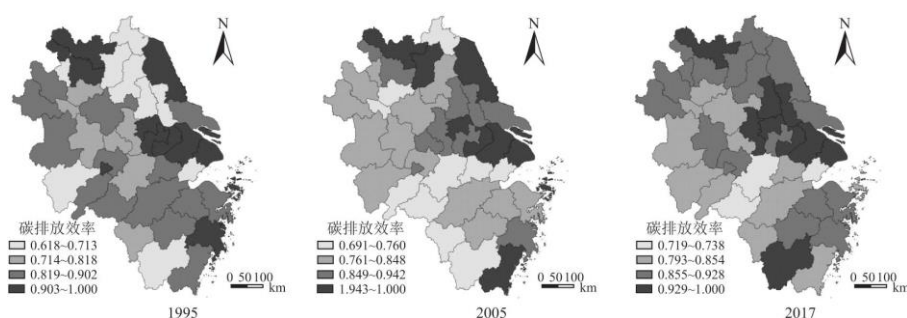


图4 1995~2017年碳排放效率空间分布图

3.2 碳排放效率趋势分析

为了深入分析长三角地区碳排放效率的总体特征,对各市碳排放效率进行趋势分析得到图5,图中每根与Z轴平行竖线的高度表示该市碳排放效率的大小,竖线与XY平面的交点表示该市所在的地理位置,黑点表示竖线在东西向和南北向上的投影,黑点在东西向和南北向平面上拟合得到图中的趋势线。由图5可知,1995年长三角地区的碳排放效率拟合曲线在东西向上,呈“U”型,在南北向上,略呈倒“U”型,表明1995年长三角地区的碳排放效率,在东西向上,中部地区较低,东部高于西部,在南北向上,中部较高,南部高于北部。2005年长三角地区的碳排放效率拟合曲线在东西向上,呈上升趋势,东部高于中部和西部,在南北向上,略呈弧形,南部低于中部和北部,表明与1995年相比,2005年长三角地区的碳排放效率在东西向上差异明显扩大,在南北向上,北部地区碳排放效率升高较快,超过南部。2017年长三角地区的碳排放效率拟合曲线在东西向上,自西向东略呈升高趋势,东西差距明显缩小,在南北向上,自北向南呈下降趋势,表明与2005年相比,在东西向上,中西部地区的碳排放效率升高较快,东西差距明显缩小,在南北向上,碳排放效率变化速度基本与2005年相同。经以上分析可知,1995~2017年间,碳排放效率在东西向上,总体呈东部高于西部,中部地区升高较快的趋势,南北向上,北部地区升高较快,超过南部地区。主要是由于苏北地区及安徽北部地区碳排放效率提高较快。

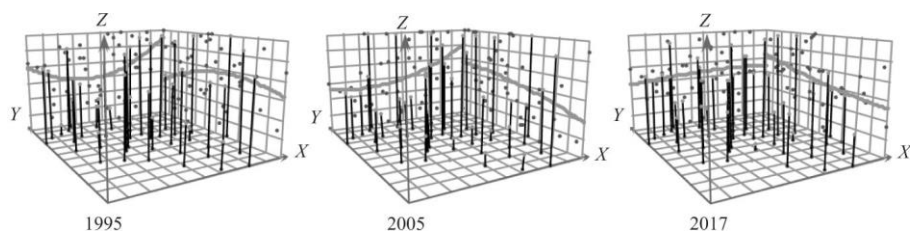


图 5 1995~2017 年碳排放效率趋势分析图

3.3 碳排放效率重心演化轨迹分析

为探索长三角地区碳排放效率在空间上的偏移趋势,计算 1995~2017 年的长三角地区碳排放效率重心,并绘制重心转移图(图 6)。由图 6 和表 2 可知,1995~2017 年间,碳排放效率重心分布在南京市,向西北移动了 8.038km,表明长三角地区的西北部碳排放效率提高相对较快,与其他地区的差距缩小。1998 年、1999 年和 2011 年长三角地区碳排放效率重心实际移动距离较大,均大于 6.000km。1998 年实际移动距离最大,向东北移动了 8.099km,可能是由于长三角南部地区受亚洲金融危机影响较大,且存在一定的滞后性,而苏北地区受影响相对较小;1999 年,向东南移动了 6.273km,由于采取应对亚洲金融危机的措施已起到较好效果,长三角地区南部地区经济得到较大程度的恢复,碳排放效率升高;2011 年,向西北地区移动了 6.215km,可能是由于 2011 年碳排放强度目标正式纳入国家“十二五”规划纲要,以文件硬性要求约束碳排放强度,而苏北地区碳排放强度相比长三角其他地区高,为实现碳减排目标,不得不降低碳排放强度,提高碳排放效率。



图 6 1995~2017 年碳排放效率重心转移图

表 2 1996~2017 年碳排放效率重心转移距离与方向

年份	移动距离 (km)			移动方向
	东西向	南北向	实际	
1996	3.044	0.837	3.157	东北
1997	-3.465	-0.453	3.495	西南
1998	3.646	7.231	8.099	东北
1999	1.729	-6.030	6.273	东南
2000	-2.140	3.347	3.973	西北
2001	3.123	-4.201	5.234	东南
2002	-3.910	3.413	5.190	西北
2003	1.044	-0.011	1.044	东南
2004	-0.057	0.894	0.896	西北

2005	-1.586	3.177	3.551	西北
2006	0.025	-2.401	2.401	东南
2007	-2.332	-3.124	3.899	西南
2008	-0.027	-1.004	1.005	西南
2009	0.123	-1.608	1.613	东南
2010	2.517	-3.372	4.208	东南
2011	-2.607	5.642	6.215	西北
2012	-0.419	3.187	3.215	西北
2013	0.604	2.176	2.258	东北
2014	-1.973	0.151	1.979	西北
2015	-0.052	-0.594	0.596	西南
2016	-0.473	0.577	0.747	西北
2017	0.278	-0.342	0.440	东南

3.4 碳排放效率空间集聚特征分析

为了进一步研究局部空间集聚特征,计算碳排放效率的Getis-OrdGi*指数,识别碳排放效率的热点区(本市和相邻市碳排放效率均较高)和冷点区(本市和相邻市碳排放效率均较低),并在5%显著性水平下,绘制碳排放效率Gi*集聚图(图7)。由图7可知,1995年,碳排放效率的热点区仅有泰州,冷点区主要分布在盐城和滁州。与1995年相比,2005年碳排放效率空间格局发生了较大变化,碳排放效率的热点区分布在泰州、南通和连云港,冷点区转移到杭州、衢州、池州和黄山。与2005年相比,2017年碳排放效率空间格局变化不大,热点区分布在泰州、常州和镇江,冷点区分布在杭州、池州和黄山。总体而言,2005年以后,碳排放效率的热点区和冷点区空间格局变化不大。

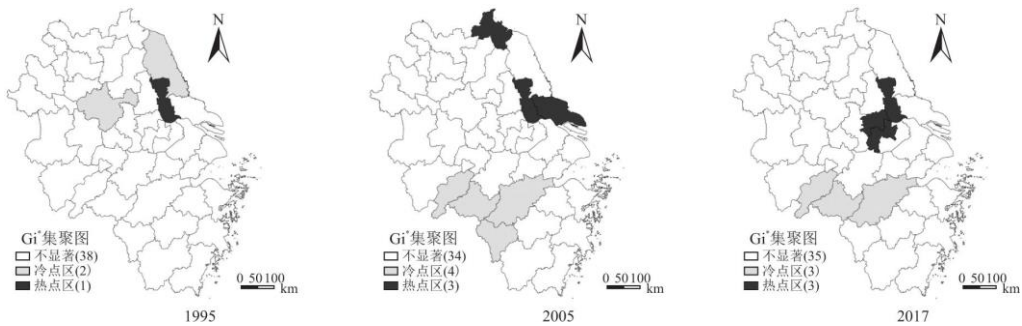


图7 1995~2017年碳排放效率Gi*集聚图

4 碳排放效率影响因素分析

4.1 变量选择

影响碳排放效率的因素有多种,综合分析现有研究^[10,12,24],以碳排放效率为因变量,从城镇化、产业结构、人口密度、外商直接投资、技术进步和生态环境等方面,选择城镇化水平(UR)、第二产业比例(IS)、人口密度(PD)、外商直接投资(FI)、技术进步(TP)和生态环境(EE)为自变量。其中,城镇化水平用非农业人口占总人口比例表示;第二产业比例用第二产业产值占地区生产总值的比例表示;人口密度用总人口与市域面积比值表示;外商直接投资用外商实际投资额占地区生产总值的比例表示;借鉴沈杨等^[25]的研究,技术进步用单位 GDP 能耗表示;生态环境用人均绿地面积表示。利用 Min-Max 标准化法对各变量进行无量纲化处理。1995~2017 年碳排放效率的 Moran' sI 值为 0.308, P 值<0.01,表明碳排放效率存在明显的正的空间自相关。考虑碳排放效率及其影响因素的空间关联性和差异性,选择空间杜宾模型分析各因素对碳排放效率的影响。

4.2 模型估计

Hausman 检验值为 29.790, P 值为 0.005,因此,应选择固定效应模型,空间固定效应的 LR 检验值为 666.401, P 值小于 0.001,表明应考虑空间固定效应,时间固定效应的 LR 检验值为 162.756, P 值小于 0.001,表明应考虑时间固定效应,因此,应考虑使用时空固定效应模型。采用最大似然估计法估计空间杜宾面板模型(表 3)。模型的 R² 值为 0.663,说明自变量能够解释因变量的 66.3%,模型拟合效果较好。 ρ 为 0.152, P 值<0.01,通过了 1%水平的显著性检验,表明长三角地区碳排放效率在各市间存在空间溢出效应,即提高本市碳排放效率,有助于相邻市碳排放效率的提高。

表 3 空间杜宾面板模型与空间滞后面板模型估计结果

变量	空间杜宾面板模型	空间滞后面板模型	变量	空间杜宾面板模型
UR	0.130**	0.087**	W*UR	-0.089
IS	-0.025	-0.044	W*IS	-0.095
PD	0.081	0.080	W*PD	-0.081
FI	-0.066**	-0.050*	W*FI	0.052
TP	-0.475***	-0.481***	W*TP	0.107
EE	-0.080***	-0.084***	W*EE	-0.080***
ρ	0.152***	0.155***		
R ²	0.663	0.660		

空间杜宾模型的估计系数无法代表各影响因素的变化对碳排放效率的边际效应,依据其估计系数,推导出直接效应与间接效应(表 4)。由表 4 可知,城镇化水平对碳排放效率的直接效应和间接效应分别表现为正向作用和负向作用,其中,直接效应的弹性系数为 0.127,且通过了 5%水平的显著性检验,表明在其他因素保持不变的条件下,城镇化水平每提高 1%,碳排放效率提高 0.127%。长三角地区城镇化水平较高,管理水平和技术水平较高,基础设施和资源利用率较高,提高城镇化水平,有助于碳排放效率的提高。间接效应的弹性系数为-0.078,但未通过 5%水平的显著性检验,表明城镇化水平对相邻市碳排放效率的空间溢出效应为负,但不显著,说明提高本市的城镇化水平,不利于相邻市碳排放效率的提高,但并不明显。

表 4 空间杜宾面板模型的直接效应与间接效应

变量	直接效应	间接效应	总效应
UR	0.127**	-0.078	0.049
IS	-0.029	-0.115	-0.144
PD	0.078	-0.074	0.004
FI	-0.063**	0.045	-0.017
TP	-0.472***	0.035	-0.436***
EE	-0.084***	-0.106**	-0.191**

第二产业比例对碳排放效率的直接效应和间接效应均为负,但均未通过 5%水平的显著性检验,表明第二产业比例对碳排放效率有负向作用,但不明显。其中,第二产业比例对碳排放效率直接效应的弹性系数为-0.029,表明第二产业比例每降低 1%,碳排放效率提高 0.029%。第二产业比例对相邻市碳排放效率空间溢出效应的弹性系数为-0.115,表明降低第二产业比例,有助于相邻市碳排放效率的提高。第二产业多为高碳排放和高能耗产业,是碳排放的重要来源,碳排放效率相对较低。因此,降低第二产业比例,既有利于提高本市碳排放效率,也有利用提高相邻市的碳排放效率。应结合各市的现状,充分发挥各市的资源、环境、人力和技术等方面的优势,发展相应的优势产业,淘汰“高消耗、高污染、高排放”产业,降低碳排放,提高碳排放效率。

人口密度对碳排放效率的直接效应和间接效应分别为正和负,但均未通过 5%水平的显著性检验,表明人口密度对本市碳排放效率具有正向影响,对相邻市碳排放效率具有负向影响,但并不明显。在一定阈值范围内,人口密度较高值区,容易产生集聚效应,有利于提高基础设施和资源的利用效率,进而提高碳排放效率。而对相邻市碳排放效率的影响,主要通过人口流动实现。当人口密度较高时,人们对各种资源和环境的压力增大,生活质量也会受到影响,为了更好地生活,可能会选择相邻市,进而影响相邻市。

外商直接投资对碳排放效率的直接效应和间接效应分别表现为负向作用和正向作用,其中,直接效应的弹性系数为-0.063,且通过了 5%水平的显著性检验,表明在其他因素保持不变的条件下,外商直接投资每提高 1%,碳排放效率降低 0.063%,增加外商投资,不利于提高碳排放效率,支持了“污染天堂假说”。外商投资的项目多为高能耗、高污染的项目,应该制定更加严格的环境准入标准,有选择的引入外资。间接效应的弹性系数为 0.045,但未通过 5%水平的显著性检验。

单位 GDP 能耗对碳排放效率的直接效应和间接效应分别表现为负向作用和正向作用,其中,直接效应的弹性系数为-0.472,通过了 1%水平的显著性检验,且绝对值最大,表明在其他因素保持不变的条件下,单位 GDP 能耗每降低 1%,碳排放效率提高 0.472%,降低单位 GDP 能耗,是提高碳排放效率的重要途径。间接效应的弹性系数为 0.035,但未通过 5%水平的显著性检验。单位 GDP 能耗表征技术进步,随着技术水平的提高,能源利用效率提高,进而单位 GDP 能耗降低,因此,应引进先进低碳技术,增加低碳技术投资,对于一些无能力引进先进低碳技术的企业,提供一些资金支持或财政补贴,对积极引进先进低碳技术的企业,应减免其税收,降低其运营成本。

人均绿地面积对碳排放效率的直接效应和间接效应均为负,均通过 5%水平的显著性检验,表明人均绿地面积较高区域碳排放效率相对较低,生态环境保护不利于碳排放效率的提高,该研究结果与王兆峰和杜瑶瑶^[10]的研究结论一致。其中,人均绿地面积对碳排放效率直接效应的弹性系数为-0.084,表明人均绿地面积每降低 1%,碳排放效率提高 0.084%。人均绿地面积对相邻市碳排放效率空间溢出效应的弹性系数为-0.106,表明人均绿地面积每降低 1%,相邻市碳排放效率提高 0.106%。应加强生态环境保护合作,共同改善生态环境,在保护环境的同时,适当提高碳排放效率。

4.3 稳健性检验

为了检验研究结果的稳健性,运用空间滞后模型分析碳排放效率的影响因素。由表 3 可知,空间自回归系数为正且通过了 1% 水平的显著性检验,表明碳排放效率存在空间溢出效应。单位 GDP 能耗和人均绿地面积的弹性系数均为负且通过了 1% 水平的显著性检验,表明单位 GDP 能耗和人均绿地面积对碳排放效率具有明显的负向作用。外商投资的弹性系数为负,通过了 10% 水平的显著性检验,表明外商投资对碳排放效率也具有明显的负向作用。城镇化水平的弹性系数为正且通过了 5% 水平的显著性检验,表明城镇化水平对碳排放效率具有明显的正向作用。产业结构与人口密度的弹性系数分别为负与正,均未通过 10% 水平的显著性检验。以上研究结果与前文研究结果基本一致,说明本文研究结果具有较好的稳定性。

5 结论与建议

随着长三角区域一体化战略上升为国家战略,开展长三角地区城市碳排放效率及影响因素研究,有助于长三角地区各市根据自身情况制定符合自身发展的碳减排政策,从而促进区域协调发展和可持续发展。本文以长三角地区 41 个城市为研究对象,利用考虑非期望产出的 SBM-DEA 模型与窗口分析相结合,测算了 1995~2017 年长三角地区 41 个城市的碳排放效率。采用传统统计分析与空间分析相结合的方法,分析了长三角地区碳排放效率的时空特征,在此基础上,构建空间杜宾面板模型,分析了其影响因素,得出以下主要结论:

(1)碳排放效率总体上呈波动变化趋势,可能受国内外重大事件的影响。2017 年,上海、无锡和苏州的碳排放效率有效。碳排放效率绝对差异与相对差异呈波动变化,且变化趋势基本一致。碳排放效率的密度分布曲线呈明显向右移动,且存在明显的“双峰”模式,表明长三角地区的碳排放效率呈升高趋势,且存在不均衡现象。

(2)碳排放效率空间差异明显,形成了以上海为中心的碳排放效率高值区。1995~2017 年,碳排放效率在东西向上,总体呈东部高于西部,中部地区升高较快的趋势,南北向上,北部地区升高较快,超过南部地区。碳排放效率重心主要分布在南京市,总体向西北移动了 8.038km。2005 年以后,碳排放效率的热点区与冷点区空间格局变化不大,2017 年,碳排放效率热点区分布在泰州、常州和镇江,冷点区分布在杭州、池州和黄山。

(3)碳排放效率受多种因素的影响,且各因素对碳排放效率的影响程度不同。城镇化对本市碳排放效率具有明显的正向作用,对相邻市碳排放效率影响不明显。第二产业的碳排放效率相对较低,降低第二产业比例,有利于提高碳排放效率。在一定阈值范围内,随着人口密度的增加,人们能够充分利用资源和基础设施,提高资源和基础设施的利用率,进而提高碳排放效率。人口密度对相邻市碳排放效率的影响主要通过人口流动实现。外商直接投资带来了污染转移,不利于提高碳排放效率。技术进步是影响碳排放效率的重要因素,是提高碳排放效率的重要途径。长三角地区人均绿地面积较高地区多处于碳排放效率较低地区。

通过以上研究分析,提出了提高碳排放效率的建议:

首先,长三角地区碳排放效率存在明显的空间差异和不均衡现象,应制定差异化的碳减排政策。上海、无锡和苏州等碳排放效率为 1 的区域,应加大低碳技术研发,主动向其他低碳排放效率区提供人员、技术和资金等方面支持,并促进人员、技术和资金等要素的自由流动与优化配置,而低碳排放效率区应加快产业优化升级,淘汰落后产能,同时,积极引入先进低碳技术;其次,技术进步是影响碳排放效率的重要因素,提高技术水平是提高碳排放效率的重要途径,应引进先进低碳技术,加大低碳技术投资;提高城镇化水平,有利于本市碳排放效率的提高,应稳步推进城镇化建设,保证城镇化质量,确保低碳城镇化发展;第二产业碳排放效率相对较低,应加强产业结构调整,降低第二产业比例,积极发展低碳产业,优化产业结构,加强产业关联,推动产业转移,支持战略性新兴产业发展,推动产业升级;在一定阈值范围内,提高人口密度,有利于碳排放效率提高,应适度控制人口密度;外商直接投资对提高碳排放效率具有负向作用,应制定合理的招商引资政策,引进低能耗、低污染的外商投资,减少高能耗、高污染的外商投资;人均绿地面积较高地区,碳排放效率较低,应加强生态环境保护合作,共同改善生态环境,在保护环境的同时,适当提高碳排放效率;最后,长三角地区碳排放效率在各市间存在明显的空间溢出效应,可以设置低碳城市试点,发挥其示范引领作用。在制定碳减排政策时,应综合考虑相邻市,加强各市间碳减排政策及技术合作,加强区域间协调互动,稳步推进长三角区域一体化战略,以

区域一体化提升区域协调发展。

本研究存在一定的局限性。首先,受数据可获得性限制,本研究时间段为 1995~2017 年,若能获得 2017 年以后的数据,可对近期长三角地区碳排放效率时空特征及影响因素开展研究。其次,未考虑江苏省、浙江省与其所包含城市的层次结构,这种层次结构可能对研究结果有一定的影响,未来可以考虑构建空间多层次模型开展相关研究。

参考文献:

- [1]GREGG J S, ANDRES R J, MARLAND G. China:Emissions pattern of the world leader in CO₂ emissions from fossil fuel consumption and cement production[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(8):L08806.
- [2]CHARNES A, COOPER W W, RHODES E. Measuring the efficiency of decision making units[J]. *European journal of operational research*, 1978, 2(6):429-444.
- [3]DYCKHOFF H, ALLEN K. Measuring ecological efficiency with data envelopment analysis (DEA) [J]. *European Journal of Operational Research*, 2001, 132(2):312-325.
- [4]QIN Q, LI X, LI L, et al. Air emissions perspective on energy efficiency:An empirical analysis of China' s coastal areas[J]. *Applied Energy*, 2017, 185:604-614.
- [5]ZHOU D Q, MENG F Y, BAI Y, et al. Energy efficiency and congestion assessment with energy mix effect:The case of APEC countries[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142:819-828.
- [6]袁凯华, 梅昀, 陈银蓉, 等. 中国建设用地集约利用与碳排放效率的时空演变与影响机制[J]. *资源科学*, 2017, 39(10):1882-1895.
- [7]CHOI Y, ZHANG N, ZHOU P. Efficiency and abatement costs of energy-related CO₂ emissions in China:A slacks-based efficiency measure[J]. *Applied Energy*, 2012, 98:198-208.
- [8]FENG C, ZHANG H, HUANG J B. The approach to realizing the potential of emissions reduction in China:An implication from data envelopment analysis[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 71:859-872.
- [9]ZHANG Y J, HAO J F, SONG J. The CO₂ emission efficiency, reduction potential and spatial clustering in China' s industry:Evidence from the regional level[J]. *Applied Energy*, 2016, 174:213-223.
- [10]王兆峰, 杜瑶瑶. 基于 SBM-DEA 模型湖南省碳排放效率时空差异及影响因素分析[J]. *地理科学*, 2019, 39(5):797-806.
- [11]BELTRÁN-ESTEVE M, PICAZO-TADEO A J. Assessing environmental performance in the European Union:Eco-innovation versus catching-up[J]. *Energy Policy*, 2017, 104:240-252.
- [12]GIROD B, STUCKI T, WOERTER M. How do policies for efficient energy use in the household sector induce energy-efficiency innovation?An evaluation of European countries[J]. *Energy Policy*, 2017, 103:223-237.

-
- [13] SAKAMOTO T, MANAGI S. New evidence of environmental efficiency on the export performance[J]. *Applied Energy*, 2017, 185: 615–626.
- [14] IGNATIUS J, GHASEMI M R, ZHANG F, et al. Carbon efficiency evaluation: An analytical framework using fuzzy DEA[J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 253(2): 428–440.
- [15] 钱志权, 杨来科. 东亚地区的经济增长、开放与碳排放效率——来自贸易部门的面板数据研究[J]. *世界经济与政治论坛*, 2015, (3): 134–149.
- [16] 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.
- [17] LIU Z, QIN C X, ZHANG Y J. The energy-environment efficiency of road and railway sectors in China: Evidence from the provincial level[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 69: 559–570.
- [18] ZHOU Y, LIU Y. Does population have a larger impact on carbon dioxide emissions than income? Evidence from a cross-regional panel analysis in China[J]. *Applied Energy*, 2016, 180: 800–809.
- [19] 袁长伟, 张帅, 焦萍, 等. 中国省域交通运输全要素碳排放效率时空变化及影响因素研究[J]. *资源科学*, 2017, 39(4): 687–697.
- [20] 李建豹, 黄贤金, 孙树臣, 等. 长三角地区城市土地与能源消费 CO₂ 排放的时空耦合分析[J]. *地理研究*, 2019, 38(9): 2188–2201.
- [21] LI X, LI D, XU H, et al. Intercalibration between DMSP/OLS and VIIRS night-time light images to evaluate city light dynamics of Syria's major human settlement during Syrian Civil War[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(21): 5934–5951.
- [22] CHARNES A, COOPER W W. Preface to topics in data envelopment analysis[J]. *Annals of Operations research*, 1985, 2(1): 59–94.
- [23] CHARNES A, COOPER W W, LEWIN A Y, et al. *Data envelopment analysis: Theory, methodology, and applications*[M]. Springer Science & Business Media, 2013.
- [24] 孙焱林, 何莲, 温湖炜. 异质性视角下中国省域碳排放效率及其影响因素研究[J]. *工业技术经济*, 2016, 35(4): 117–123.
- [25] 沈杨, 汪聪聪, 高超, 等. 基于城市化的浙江省湾区经济带碳排放时空分布特征及影响因素分析[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(2): 329–342.