

引用格式:朱汶郡,石常峰,姚潇,等.长三角城市群碳减排技术溢出的空间关联格局:基于区域生产网络的视角[J].资源科学,2026,48(3):725-739.[Zhu W J, Shi C F, Yao X, et al. Spatial correlation patterns of carbon emission reduction technology spillovers in Yangtze River Delta urban agglomeration: A perspective of regional production network[J]. Resources Science, 2026, 48(3): 725-739.] DOI: 10.18402/resci.2026.03.16

# 长三角城市群碳减排技术溢出的空间关联格局 ——基于区域生产网络的视角

朱汶郡<sup>1</sup>,石常峰<sup>2</sup>,姚潇<sup>3</sup>,张陈俊<sup>4</sup>

(1. 河海大学商学院,南京 211100;2. 河海大学经济与金融学院,常州 213200;3. 河海大学信息科学与工程学院,常州 213200;4. 江苏科技大学经济管理学院,镇江 212100)

**摘要:**【目的】在加速畅通国内大循环背景下,探究碳减排技术通过区域生产网络传导对城市群碳排放空间关联的影响,有助于促进区域经济循环低碳化转型。【方法】本文构建嵌入污染生产函数的多部门一般均衡模型以阐释区域生产网络中的碳减排技术溢出机制,进一步结合空间计量模型和投入产出分析方法,考察2006—2021年长三角城市群碳减排技术溢出的网络关联效应、技术溢出下的碳排放空间结构特征及其传递路径。【结果】①生产网络传导下的长三角城市群碳排放存在显著空间集聚效应及时间路径依赖特征。碳减排技术进步通过生产网络产生跨区域协同减排作用,其中需求侧拉动型技术溢出效应相较于供给侧推动型更为显著。②碳减排技术溢出效应存在空间异质性,在中心城市与经济发达地区溢出效应显著,而边缘地区受创新资源约束导致溢出效应较弱。经济发展和人口集聚对碳排放呈现出正向网络溢出效应。③长三角城市群碳排放网络呈明显的行政区内部集聚特征,省际层面以江苏和安徽为碳排放输出者,上海和浙江则表现为碳排放接收者。在以江苏为起点、上海及国际需求为终点的碳排放传导路径中,浙江与上海承担了重要的中间生产职能,成为连接生产与消费的关键枢纽节点。【结论】碳减排技术通过生产网络形成显著空间溢出效应,是推动区域协同减排的重要机制。建议强化区域间绿色技术扩散通道建设,优化跨区域碳排放责任分担机制与联防联控体系,完善基于生产网络的全链条碳减排方案,从而推动长三角城市群整体经济社会发展绿色转型。

**关键词:**碳排放;生产网络;碳减排技术溢出;空间关联效应;空间计量模型;长三角城市群

DOI: 10.18402/resci.2026.03.16

## 1 引言

伴随中国“双循环”新发展格局的加速构建,城市群作为经济规模最大、经济密度最高的区域单元,日益成为畅通国内大循环的关键支点。然而,城市化快速推进叠加工业化粗放发展使得城市群不可避免地面临化石能源消费规模大、碳排放总量高等突出问题<sup>[1]</sup>。《2030年前碳达峰行动方案》强调,长三角地区要贯彻碳排放“双控”要求,积极培育绿色发展动能,增强一体化发展内生动力并率先推动

经济社会发展全面绿色转型。碳减排技术作为绿色发展和创新驱动的重要交汇点,已成为解决经济增长与绿色发展矛盾的重要突破口,对推动经济低碳健康发展具有重要意义<sup>[2]</sup>。同时,随着一体化发展持续推进,城市群内部不断深化的区域产业分工使得生产网络紧密交织,贸易邻近关系引致的碳排放空间关联也随之得到强化<sup>[3,4]</sup>。在此背景下,生产链上游部门通过清洁能源替代、低碳工艺改良或绿色材料应用等方式实现碳减排技术进步时,能够通

收稿日期:2025-01-05;修订日期:2025-06-20

基金项目:国家自然科学基金项目(42471334);江苏省社会科学基金一般项目(24EYB005);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(B250207064)

作者简介:朱汶郡,女,江苏扬州人,博士研究生,研究方向为低碳经济学。E-mail: 250420020001@hhu.edu.cn

通讯作者:石常峰,男,江苏扬州人,副教授,研究方向为资源环境管理。E-mail: 20161953@hhu.edu.cn

过中间产品跨区域流通带动下游部门实现碳减排技术“被动提升”。相似地,下游地区的高环保标准或绿色消费需求会对上游供应商形成技术升级压力,促使上游企业主动改进生产工艺或采用绿色技术。由此,碳减排技术在区域间呈现明显的空间溢出效应和路径依赖特征。

然而,技术进步对碳排放的影响具有两面性:一方面,绿色导向的技术进步有助于碳减排;另一方面,生产效率导向的技术进步反而会引致产能扩张从而加剧碳排放<sup>[5]</sup>。碳减排技术是否具备与生产技术相似的传播机制,以及其如何通过跨区域生产网络实现空间传导仍缺乏系统性的理论构建与实证检验。现有研究的共性结论是,发达区域通过空间关联机制向欠发达区域进行低碳技术和绿色知识的转移应予以鼓励或政策引导<sup>[6,7]</sup>。先进碳减排技术的区域间推广和共享可以加速技术创新迭代、促进资源优化配置,进而带来经济、社会和环境三方面的区域协同效益<sup>[8,9]</sup>。然而,生产网络视角下碳减排技术在区域间的传导方向、作用机制与强度仍缺乏系统分析,相关结论仍待进一步实证支持。

对于碳排放及其空间关联性的研究,已有学者从不同层面进行了广泛而深入的分析。研究方法层面,相关研究主要可概括为3类:第一类研究使用多区域投入产出模型,侧重于刻画跨区域生产-消费活动引发的碳泄漏、碳转移现象,但对其驱动效应的探究囿于结构分解分析框架<sup>[10]</sup>。第二类研究使用社会网络分析方法,从全局高度解析碳排放网络结构及其动力学行为以识别多维空间关联效应,但其对于复杂耦合网络采取的宏观识别模式使得不同维度下差异化空间邻近关系难以被区分<sup>[11,12]</sup>。第三类研究采用STIRPAT框架和空间计量模型相结合的研究范式,预先设定空间权重矩阵以表征碳排放空间关联,并允许纳入不同影响因素以开展实证研究,从而可以更加灵活准确地考察碳排放溢出效应<sup>[13,14]</sup>。地理区域层面,现有研究已经从国家<sup>[15]</sup>、省域<sup>[16]</sup>、城市<sup>[9]</sup>等尺度揭示了我国碳排放空间格局及其关联特征,但以跨省城市群作为对象的研究仍有所欠缺。作为区域协调发展典型,城市群具备区域生产协作的功能集成与先行条件,其背后的碳排放空间关联尤为显著<sup>[17]</sup>。溢出机制层面,现有研究主要以个体之间的地理邻近或经济邻近关系为作用渠

道<sup>[18-20]</sup>,较少关注贸易邻近关系作为空间关联效应的载体作用,难以充分契合国内大循环这一客观现实。另有部分研究尽管纳入了区域贸易关联,但主要以最大贸易伙伴、铁路货运量等度量指标表征区域贸易强度<sup>[21]</sup>,对于中间产品贸易关系和最终产品贸易关系并未进行有效区分,未能清晰认识其碳排放空间溢出机制。

上述文献为本文的研究提供了理论基础和方法借鉴,但仍存在以下不足:①现有研究多基于经验模型识别碳减排技术的空间溢出效应,但在机制层面,特别是将碳减排技术嵌入区域生产网络以解释上下游协同减排路径方面仍缺乏系统理论框架。②空间权重设定仍以地理或经济邻近为主,对基于投入产出关联的区域生产网络结构关注不足,难以刻画“双循环”背景下碳减排技术的空间溢出机制。③城市群作为区域协同发展的重要单元,其内部产业分工所形成的碳排放传导关系与关键节点仍待深入识别,现有研究多聚焦省域或城市尺度,较少关注跨省城市群碳排放的空间传导路径与协同机制分析。

综上,本文从区域生产网络视角出发考察长三角城市群碳排放空间关联效应,并剖析其碳排放结构特征与关键路径,为长三角城市群实现更畅通低碳的国民经济循环提供重要决策依据。本文的边际贡献及创新点如下:①通过嵌入碳减排技术变量对Copeland等<sup>[22]</sup>的经典污染生产函数进行扩展,并构建多部门一般均衡模型,从供给侧与需求侧两个维度阐释碳减排技术在生产网络中的空间溢出机制,拓展了碳减排技术溢出的理论分析视角;②构建基于投入产出关联的空间权重矩阵,并结合STIRPAT框架刻画碳减排技术沿生产网络传导的空间关联效应,丰富了碳排放空间计量研究的权重设定方式;③聚焦长三角城市群这一国家“双碳”目标与区域一体化发展协同推进的关键空间单元,从生产-消费网络视角系统剖析其碳排放传导路径、关键节点与结构特征,为城市群层面协同推进碳减排提供支撑。

## 2 研究方法与数据来源

### 2.1 生产网络下碳减排技术溢出的理论模型

#### 2.1.1 纳入碳减排技术的生产部门碳排放

为厘清以中间品贸易为载体的碳减排技术溢

出效应导致个体碳排放变化的潜在机制,有必要在部门层面将碳排放行为与生产行为联系起来。为此,考虑一个封闭的简单经济系统,其中包含  $N$  个垂直关联的部门。为简化分析,假定各部门采用包含希克斯中性技术进步的两要素 Cobb-Douglas 生产函数形式,将部门  $k$  的“潜在产出”  $y_k$  表示如下:

$$y_k = A_k l_k^{\alpha_k} m_k^{\beta_k} \quad (1)$$

式中:  $A_k$  为部门  $k$  的生产率;  $l_k^{\alpha_k}$  为劳动要素投入;  $\alpha_k$ 、 $\beta_k$  分别为劳动和中间产品的产出弹性;  $m_k^{\beta_k}$  为中间产品投入,满足  $m_k = \prod_{z=1}^N x_{kz}^{s_{kz}}$ ,  $x_{kz}$  为部门  $k$  对部门  $z$  的中间产品投入的需求;  $s_{kz}$  为部门  $k$  在中间投入组合中对来自部门  $z$  的中间产品投入  $x_{kz}$  的相对产出弹性,反映该投入在中间产品投入  $m_k^{\beta_k}$  中的重要性,有  $\sum_{z=1}^N s_{kz} = 1$ 。

进一步假设严格的碳减排制度(如碳税、碳配额、履约成本等)会导致企业产生额外碳成本,从而迫使企业在更高的实际产出和更低的碳排放之间做出抉择,以最大化其考虑碳成本的最终利润。因此,设定部门  $k$  将一部分“潜在产出”用于碳减排过程,其余部分转化为净产出  $q_k$ 。

$$q_k = (1 - a_k) y_k = (1 - a_k) A_k l_k^{\alpha_k} m_k^{\beta_k} \quad (2)$$

式中:  $a_k$  为部门  $k$  将潜在产出用于碳减排的份额。遵循 Shapiro 等<sup>[23]</sup>关于污染生产技术模型的基础设定,并参考胡雨朦等<sup>[24]</sup>的做法,通过纳入碳减排技术  $\theta_k$  来进一步得到部门  $k$  的碳排放技术模型:

$$c_k = \left( \frac{1 - a_k}{\theta_k} \right)^{\frac{1}{\gamma_k}} A_k l_k^{\alpha_k} m_k^{\beta_k} \quad (3)$$

式中:  $c_k$  为碳排放规模;  $\gamma_k$  为因部门而异的碳排放弹性,取决于部门  $k$  在生产技术、要素投入等方面的原始属性,满足  $0 < \gamma_k < 1$ 。结合式(2)、(3)消去  $(1 - a_k)$ ,可以将部门  $k$  的实际产出写成碳排放与生产要素联合投入的 Cobb-Douglas 函数形式:

$$q_k = \theta_k c_k^{\gamma_k} (A_k l_k^{\alpha_k} m_k^{\beta_k})^{1 - \gamma_k} \quad (4)$$

由上式可以发现,在引入碳减排技术  $\theta_k$  后,碳排放  $c_k^{\gamma_k}$  可以被看作是与劳动力  $l_k^{\alpha_k}$ 、中间产品  $m_k^{\beta_k}$  类似的一种生产要素,部门  $i$  通过雇佣劳动、利用中间产品、支付碳成本来进行实际生产。

### 2.1.2 代表性家庭的效用设定

通过设定如式(5)所示的代表性家庭效用函数形式来表征家庭从消费产品和提供劳动中获得的总效用  $V$ :

$$V = g(l) \prod_{k=1}^N f_k^{b_k} \quad (5)$$

式中:  $b_k \in (0,1)$  为代表性家庭对于最终产品  $f_k$  的消费权重,满足  $\sum_{k=1}^N b_k = 1$ ;  $g(l)$  被设定为劳动  $l$  的递减函数。由于家庭的收入仅来自劳动供给,因此代表性家庭的预算约束方程可以写成:

$$\sum_{k=1}^N p_k f_k = el \quad (6)$$

式中:  $p_k$  为部门  $k$  生产的产品价格;  $e$  为家庭提供劳动的工资水平。

### 2.1.3 一般均衡下的碳减排技术溢出效应

在市场出清条件下,产品供给等于产品需求:

$$q_k = f_k + \sum_{z=1}^N x_{kz} \quad (7)$$

部门  $k$  的利润函数  $\pi_k$  为:

$$\pi_k = p_k q_k - el - r_k c_k - \sum_{z=1}^N p_z x_{zk} \quad (8)$$

式中:  $r_k$  为部门  $k$  排放二氧化碳的单位成本。需要注意的是,  $x_{kz}$  与  $x_{zk}$  分别对应中间投入结构与中间需求结构,从投入与产出两个维度共同描述部门间的经济联系。

在企业利润最大化条件下,对劳动投入、中间品投入以及碳排放分别求取利润函数的一阶条件,并结合市场出清条件,可以得到部门产出、价格以及碳排放之间的均衡关系。进一步对碳排放函数进行对数微分,可以得到部门碳排放变化与技术水平变化之间的基本关系式:

$$d \ln q_k = d \ln \theta_k + d \ln c_k + \beta_i (1 - \gamma_i) \sum_{z=1}^N s_{kz} d \ln f_z \quad (9)$$

式中:  $d \ln(\cdot)$  为对数全微分。写成矩阵形式:

$$d \ln \mathbf{q} = d \ln \boldsymbol{\theta} + d \ln \mathbf{c} + \mathbf{s} \boldsymbol{\beta} \boldsymbol{\chi} d \ln \mathbf{f} \quad (10)$$

式中:  $d \ln \mathbf{q}$ 、 $d \ln \boldsymbol{\theta}$ 、 $d \ln \mathbf{c}$  和  $d \ln \mathbf{f}$  分别为由  $d \ln q_k$ 、 $d \ln \theta_k$ 、 $d \ln c_k$  和  $d \ln f_k$  组成的  $N \times 1$  阶列向量;  $\boldsymbol{\beta}$  和  $\boldsymbol{\chi}$  分别为组成元素为  $\beta_k$  和  $(1 - \gamma_k)$  的  $N \times N$  阶对角矩阵;  $\mathbf{s}$  为由  $s_{kz}$  组成的  $N \times N$  阶矩阵。结合市场出清

条件,可得:

$$d \ln q = d \ln f \quad (11)$$

代入式(10)进行整合,并定义  $U = (s\beta\chi)^{-1}$ ,可以得到:

$$d \ln c = -U d \ln \theta - (U - I) d \ln p + (U - I) d \ln r \quad (12)$$

式中: $I$ 为单位矩阵。

进一步将经济均衡状态下的部门碳排放变化分解为自身碳减排技术进步变动的影响、关联部门碳减排技术进步变动的影响、关联部门产品价格与碳成本的差额变动影响:

$$d \ln c_k = (-d \ln \theta_k) + \left( -\sum_{z=1}^N (u_{kz} - 1_{z=k}) d \ln \theta_z \right) + \left( -\sum_{z=1}^N (u_{kz} - 1_{z=k}) (d \ln p_z - d \ln r_z) \right) \quad (13)$$

式中: $u_{kz}$ 为  $N \times N$ 阶矩阵  $U$ 的内部元素; $d \ln p_z$ 为  $N$ 维阶列向量  $d \ln p$ 的内部元素; $1_{z=k}$ 为指示函数,当  $z = k$ 时取1,否则取0。第一项为碳减排技术直接效应,第二项为碳减排技术溢出效应,第三项为产品价格与碳成本的差额溢出效应。在其他条件不变的情况下,部门  $k$ 的碳减排技术直接效应为负,表明部门碳减排技术进步能够有效降低自身碳排放。碳减排技术溢出效应表明在经济循环中部门  $z$ 减排技术进步对部门  $k$ 碳排放的影响系数主要受中间品支出占比的影响。

由上述模型所得到的碳减排技术溢出效应存在两种可能的作用机制(图1):①供给侧推动型溢

出机制,即在生产过程的中游和下游企业通过使用上游供应商的低碳中间产品,从而间接提升自身生产效率并降低碳排放。这种溢出效应通常是被动的,因为企业并不需要主动寻求碳减排技术进步,而是通过市场活动自然获得。②需求侧拉动型溢出机制,即上游企业为满足下游客户的产品需求主动进行技术学习和吸收,这需要上游企业具备较强的技术吸收能力和下游企业具备较高的技术分享意愿。在这两种机制中,供给侧推动型技术溢出更多是外部技术被动输入的结果,而需求侧拉动型技术溢出则强调企业内部的主动性和学习能力。

### 2.2 基于生产网络传导的碳减排技术溢出效应检验

IPAT理论框架认为环境压力主要由某个区域的人口因素、经济因素以及技术因素所决定,已经成为考查碳排放影响因素的经典方法。进一步发展的STIRPAT框架采用对数形式的回归模型,并将技术因素视为可拓展项,允许纳入其他影响因素以进行更全面的环境影响考察<sup>[25,26]</sup>。因此,基于STIRPAT模型框架设立如下基准回归模型:

$$\ln C_{it} = \mu_0 + \mu_1 \ln C_{it-1} + \mu_2 \ln POP_{it} + \mu_3 \ln PGDP_{it} + \mu_4 \ln IS_{it} + \mu_5 \ln GI_{it} + \ln \varepsilon \quad (14)$$

式中: $i$ 为样本城市; $t$ 为年份; $C_{it}$ 为碳排放总量; $POP_{it}$ 为人口规模; $PGDP_{it}$ 为经济发展水平; $IS_{it}$ 为产业结构; $GI_{it}$ 为绿色减排技术水平; $\varepsilon$ 为随机误差项; $\mu_0 - \mu_5$ 为一组待估参数。显然,碳减排技术因素在改进的污染生产模型和STIRPAT框架中是同质的,并且均被认为是有效降低碳排放规模的关键所在。因而基于污染生产模型揭示的碳减排技术溢出效

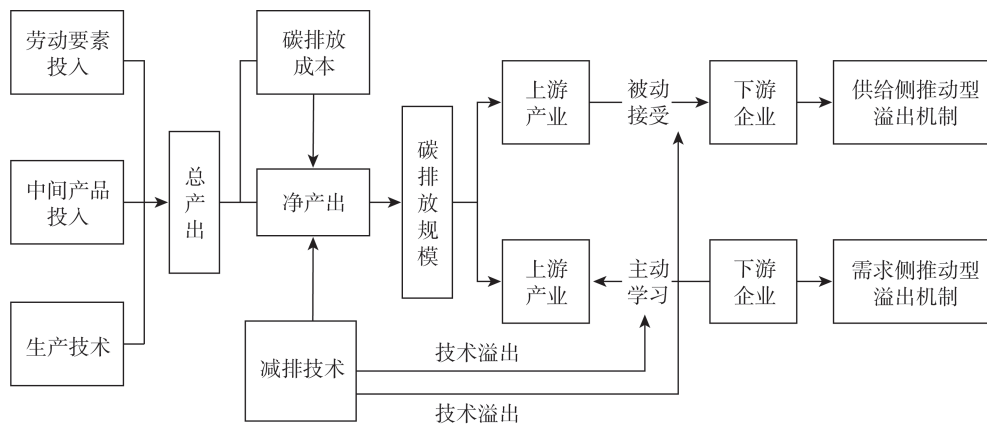


图1 碳减排技术溢出效应的作用机制图

Figure 1 Mechanism diagram of spillover effects of carbon emission reduction technologies

2026年3月

应作用机制,结合 STIRPAT 框架设定如式(15)所示的空间回归模型。

$$\begin{aligned} \ln C_{it} = & \mu_0 + \mu_1 \ln C_{i,t-1} + \mu_2 \sum_j w_{ij} C_{jt} + \mu_3 \ln POP_{it} + \\ & \mu_4 \ln PGDP_{it} + \mu_5 \ln IS_{it} + \mu_6 \ln GI_{it} + \\ & \mu_7 \sum_j w_{ij} \ln POP_{jt} + \mu_8 \sum_j w_{ij} \ln PGDP_{jt} + \\ & \mu_9 \sum_j w_{ij} \ln IS_{jt} + \mu_{10} \sum_j w_{ij} \ln GI_{jt} + \ln \varepsilon \end{aligned} \quad (15)$$

式中: $j$ 为与城市*i*存在生产关联关系的其他城市; $w_{ij}$ 为生产关联强度矩阵中的对应元素, $\mu_6 - \mu_{10}$ 代表一组待估参数。由前文机制推导可知,碳减排技术溢出效应在生产网络中与中间产品的投入解构密切相关,因此本文基于中国城市尺度多区域投入产出表中的中间产品流量矩阵构建生产网络空间权重矩阵。具体而言,对长三角城市群的中间产品流量矩阵进行标准化处理,得到基于供给端推动的生产网络空间权重矩阵  $W_{supply}$ ;将中间产品流量矩阵进行转置与行标准化,得到基于需求端拉动的生产网络空间权重矩阵  $W_{demand}$ 。为进一步考察碳排放空间关联可能存在的其他影响因素偏向,在式(15)中我们同样考虑了经济发展、人口规模以及产业结构在生产网络下的溢出作用。此外,为规避双向因果关系以及遗漏变量等导致的模型内生性问题,本文将滞后一期的碳排放变量引入式中。

### 2.3 基于多区域投入产出模型的碳排放生产网络分析

多区域投入产出模型(MRIO)能够刻画产品生产、消耗在地区、部门间的平衡关系与连锁关系<sup>[27]</sup>,其矩阵平衡关系为:

$$X = (I - Z)^{-1} F \quad (16)$$

式中: $X$ 为总产出矩阵; $Z$ 为直接消耗系数矩阵; $F$ 为最终需求矩阵,包括满足当地的最终需求、满足区域外的最终需求和出口。地区碳排放可表示为:

$$EC = BX = B(I - Z)^{-1} F = BLF \quad (17)$$

式中: $EC$ 为区域直接碳排放矩阵; $B$ 为区域碳排放强度矩阵; $L$ 为 Leontief 逆矩阵。在式(17)中碳排放以隐含碳的形式嵌入经济循环过程,为深入透视隐含在里昂惕夫逆矩阵下的生产网络复杂中间传导关联,采用结构路径分析方法将隐含碳分解为无穷

条反映上下游关联的传导路径:

$$\begin{aligned} EC^m = & \sum B^r L^h F^{hn} = B^r F^n + B^r \sum_{u=1}^M L^{ru} F^{un} + \\ & B^r \sum_{u=1}^M L^{ru} \sum_{v=1}^M L^{uv} F^{vn} + \dots \end{aligned} \quad (18)$$

式中: $r$ 、 $h$ 和 $n$ 分别为上游生产、中游生产以及最终消费3类节点; $u$ 和 $v$ 分别为中间生产环节; $M$ 为生产环节的节点总数量;“……”表示更高阶生产路径项,其一般形式为长度为 $k$ 的投入产出传导路径。上述路径中有两类不在本文的考察范畴内:其一是所有的一阶路径;其二是生产环节仅涉及单一地区的路径,例如三阶路径中 $r = u = v$ 的情况。因为这两类路径中的生产环节并不依赖区域间分工合作关系,未能直接引发跨区域的碳排放空间关联。

## 2.4 变量选取及数据来源

### 2.4.1 变量选取

本文以碳排放总量为被解释变量,绿色减排技术水平为核心解释变量,并结合 IPAT、环境库兹涅茨曲线(EKC)<sup>[28]</sup>等理论以及已有研究<sup>[29-31]</sup>,选取人口规模、经济发展水平与产业结构作为控制变量,构建空间计量模型。

(1)人口规模。根据 IPAT 理论,人口数量是影响环境压力的基础性因素。人口规模扩大通常伴随能源消费、交通运输和生活活动的扩大,进而推动碳排放水平上升。因此,采用常住人口总量衡量城市人口规模。

(2)经济发展水平。依据 EKC 假说,经济发展水平与碳排放之间可能呈现倒 U 型关系。在经济发展的初期阶段,工业化和城市化进程带动能源消耗和碳排放增加;而当经济发展达到一定阶段后,社会对环境质量的重视程度提升、绿色技术应用增多,碳排放强度可能随之下降。因此,人均 GDP 可以较好地反映经济发展水平对碳排放的综合影响。

(3)产业结构。以高耗能的重工业部门为主的第二产业是碳排放的主要来源。产业结构的不合理布局往往导致能源利用效率低下与碳排放增加。随着我国“双碳”目标的推进,推动产业结构优化成为碳减排的重要路径。因此,使用第二产业产值占比作为产业结构的代表性指标,以探究其对碳排放的影响。

### 2.4.2 数据来源

本文所使用的数据样本为长三角城市群41个城市的的面板数据。城市碳排放数据来源于ODIAC公布的全球碳排放栅格数据(<https://odiac.org/index.html>),其数据源主要基于化石燃料数据,并结合区域发电厂数据和卫星观测的夜间灯光进行分配与修正,数据精度为1 km×1 km。以城市行政边界为统计单元,使用ArcGIS软件对ODIAC栅格数据进行空间聚合,最终得到长三角城市群41个城市的碳排放量面板数据。由于ODIAC数据库每年发布的数据版本会对过去数据进行回溯修正,为保持数据的稳定性与研究结果的稳健性,本文选定至少经过3次数据修正的2006—2021年为研究期。该时间段覆盖了中国“十一五”“十二五”“十三五”以及“十四五”规划开局期,能够系统反映长三角区域在不同时期政策背景下的碳排放演化特征,具有良好的代表性与分析价值。控制变量数据来源于《中国城市统计年鉴(2007—2022年)》,缺失数据以各城市统计年鉴、社会统计公报中数据或插值法作为补充。核心解释变量碳减排技术进步通过城市绿色专利申请数据衡量,数据来源于国家知识产权局专利数据库(<http://www.sipo.gov.cn>),该数据结合中国专利数据以及世界知识产权局公布的绿色专利分类号标准获得。

生产网络空间权重矩阵通过计算投入产出表的中间产品流量矩阵表示,区分供给侧推动型和需求侧拉动型两类溢出机制,数据来源于中国碳核算数据库(CEADs)编制的2012、2015、2017年中国城市尺度多区域投入产出表。由于城市间投入产出关联比较稳定,在未发生重大冲击或明显产业转型的情况下不会出现大幅变化,因此使用2012、2015、2017年中间产品流量均值来近似表征研究期内生产网络空间权重矩阵具备一定可行性。

## 3 结果与分析

### 3.1 长三角城市群碳减排技术溢出效应

#### 3.1.1 空间相关性分析

从表1可知,两种空间权重矩阵设定下的全局莫兰指数均呈现显著正向特征且随时间推移保持上升趋势,这一发现表明,长三角地区生产网络联

表1 2006—2021年两种空间权重矩阵下碳排放全局空间相关性检验

Table 1 Global spatial correlation tests of carbon emissions under two spatial weight matrices, 2006-2021

年份	$W_{supply}$	$W_{demand}$
2006	0.084**	0.107***
2007	0.087**	0.108**
2008	0.089***	0.108**
2009	0.087**	0.108***
2010	0.088***	0.118***
2011	0.092***	0.118***
2012	0.093**	0.123***
2013	0.093***	0.123***
2014	0.094**	0.124***
2015	0.102***	0.122***
2016	0.104***	0.124***
2017	0.111***	0.124***
2018	0.112***	0.124**
2019	0.112***	0.124***
2020	0.114**	0.125**
2021	0.114**	0.127**

注:\*\*\*、\*\*、\*分别表示通过1%、5%、10%水平上的显著性检验。下同。

系紧密的城市之间,其碳排放水平存在显著的空间正相关关系。但2020—2021年莫兰指数的显著性水平均有所下降,可能是因为新冠疫情防控期间停产停工等应急措施削弱了城市间的产业关联,进而影响了碳排放的空间关联性。进一步分析发现,基于需求侧拉动生产网络矩阵的莫兰指数普遍高于供给侧推动矩阵下的测算结果,表明需求侧空间依赖性强于供给侧的特征。其原因可能在于产业链上游城市的中间品供应通常面向多个下游城市,而不同接收城市在能源结构和技术水平方面的差异性在一定程度上缓冲了碳排放的空间溢出效应。由此,我们选择基于 $W_{demand}$ 的空间权重矩阵作为本文的核心模型进行研究。

从图2可以看出,局部莫兰指数结果主要呈现高-高型、低-高型和低-低型3种集聚特征。处于高-高型和低-低型碳排放集聚区的城市规模相对较大,主要分布于江苏省和浙江省,说明此类城市在市场贸易下的碳排放集聚水平较高。从时间演化趋势来看,2006—2021年间碳排放空间集聚城市的覆盖范围逐渐扩大,尤其是高-高型与低-低型集聚

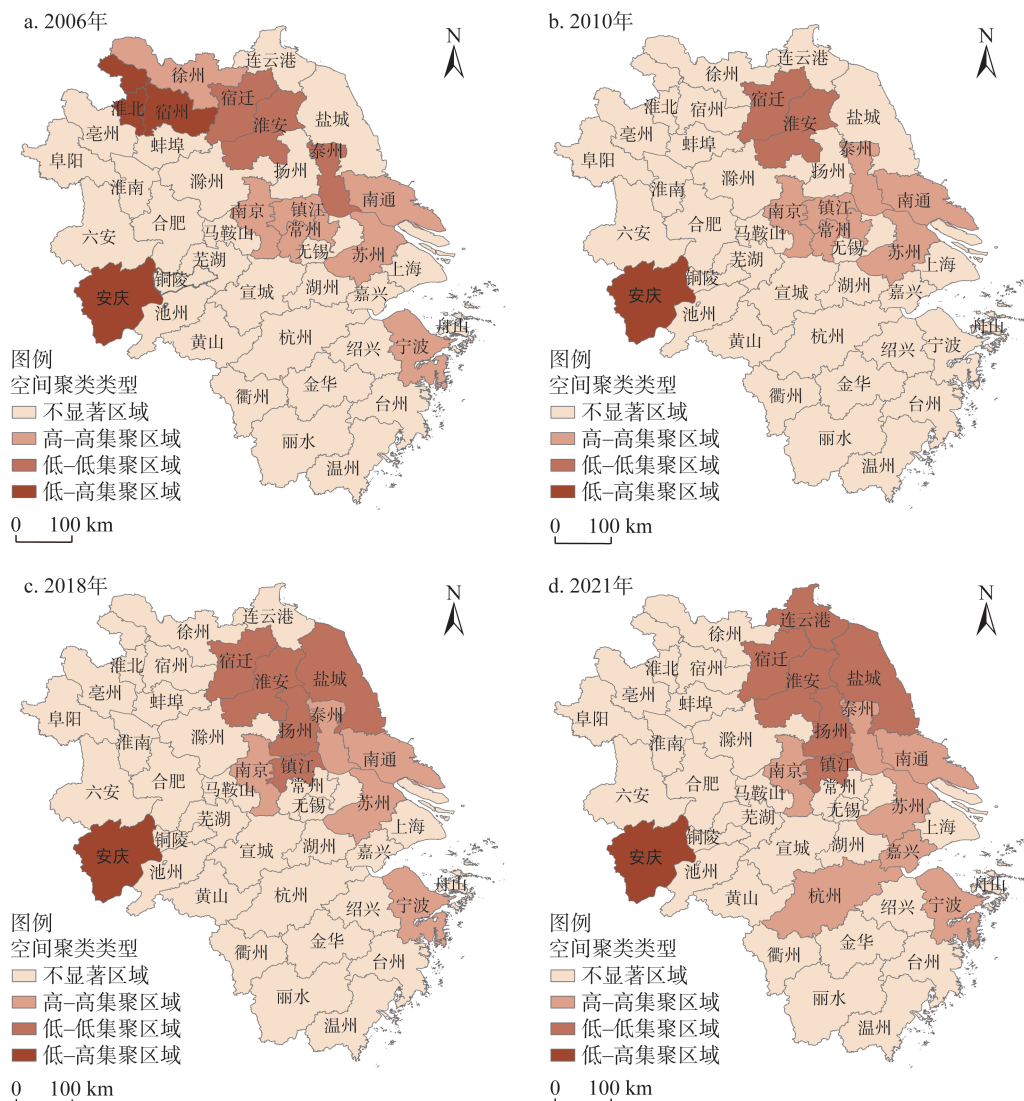


图2 2006—2021年长三角城市群碳排放的局部莫兰指数LISA图

Figure 2 LISA diagrams of local Moran's I of carbon emissions in Yangtze River Delta urban agglomeration, 2006-2021

注:图中标识的空间聚类区域均至少在5%的统计水平上显著。

类型,而低-高型集聚城市的规模则相对稳定。以研究期起始年份2006年为例,江苏省城市数量较多且空间集聚特征较为典型,徐州、南京、常州、苏州、镇江、南通等地均呈现碳排放高-高集聚特征,仅宿迁、淮安、泰州等地呈现低-低集聚特征,在一定程度上反映出区域一体化初期产业基础与资源配置的不均衡。在“十一五”规划收官阶段,空间格局基本稳定,高排放城市依然集中在沪苏沿线,低排放区域则多分布于安徽中南部。尽管污染联防联控机制已初步建立,但高耗能产业尚未完成实质性转移,碳排放的空间集聚效应仍较显著。随着“十二五”期间生态文明建设持续推进,“十三五”时期绿

色发展理念逐步落实,江苏省加快风电、光伏等清洁能源布局,带动碳强度逐步下降。碳排放低-低型集聚城市逐渐扩大。2021年,随着“十四五”开局和一体化战略深化,区域低碳转型加快推进。镇江、常州等城市成功退出高碳排放“俱乐部”,镇江、扬州、盐城与连云港转为低-低型,而泰州则转为高-高型集聚类型。

### 3.1.2 基准回归结果分析

由表2可以看出,列(1)、(2)分别为控制个体固定效应与个体时间双向固定效应下基于OLS回归的估计结果。此外,在需求侧空间权重矩阵设定下,LM检验、稳健的LM检验以及LR检验均表明空

表2 长三角城市群碳减排技术空间溢出效应的模型估计结果

Table 2 Model estimation results of spatial spillover effects of carbon emission reduction technologies in Yangtze River Delta urban agglomeration

变量	(1)	(2)	(3)
$\ln C_{t-1}$	0.524***	0.736***	0.858***
$\ln GI$	-0.102***	-0.019*	-0.107**
$\ln PGDP$	0.093***	0.009**	0.106**
$\ln POP$	0.087***	0.017***	0.023**
$\ln IS$	0.040***	0.006*	0.005*
$w \times \ln C$			0.009*
$w \times \ln GI$			-0.126**
$w \times \ln PGDP$			0.013*
$w \times \ln POP$			0.006*
$w \times \ln IS$			-0.007
$R^2$ -within	0.713	0.760	0.743
个体固定效应	YES	YES	YES
时间固定效应	NO	YES	YES

间杜宾模型(SDM)是最优模型选择,如表2中列(3)所示。可以看出,碳排放空间滞后系数显著为正,再次印证长三角城市群碳排放存在着显著的正向空间集聚效应。在区域间产业转移、人口流动以及商品贸易等经济社会活动的驱动下,城市群碳排放表现出“同升同降”的紧密关联特征。这表明单边的碳减排努力容易被整个区域的碳排放增加所抵消,因此城市群碳排放问题必须采取联防联控的协同治理策略。从时间维度来看,碳排放时间滞后系数在1%的显著性水平上为正,这表明当期碳排在很大程度上受前期碳排放规模的惯性影响,即长三角城市群碳排放演变具备较强的路径依赖特征。碳排放“雪球效应”意味着碳减排工作兼具紧迫性和艰巨性:首先,碳减排工作必须尽早开展,否则日益积累的碳排放总量将会加剧碳减排难度;其次,碳减排工作不能浮于表面,必须从根源处扭转碳排放总量的持续增长趋势。

以绿色专利申请数度量的碳减排技术对碳排放具备显著的负向作用,且其空间滞后项系数同样显著为负。这表明碳减排技术进步不仅能够降低城市自身碳排放,还可以通过生产网络的传导机制实现对其他城市碳排放的协同减缓作用。进一步分析可以得到,上游企业为满足下游客户的产品需求而产生的“主动吸收型”碳减排技术溢出效应展

现出良好的协同减排效果。鉴于产业梯度转移的现实特征,以西部欠发达地区为上游生产商、东部发达地区为下游消费者的跨区域生产结构已成为中国国内经济循环的重要特征。因此在当前畅通国内大循环的过程中,尤其可以加强上游欠发达地区在跨区域生产网络中对下游先进碳减排技术的主动学习能力,从而推动跨区域生产网络的低碳转型。

经济发展、人口规模及二者的空间滞后项均有显著的正向影响。从经济发展维度来看,一方面,长三角城市群当前的经济发展仍然会导致碳排放总量增加,这说明当前的经济发展与环境污染的绝对“脱钩”趋势仍没有实现。另一方面,城市的经济发展还会通过产业关联的辐射效应形成区域联动发展,从而导致区域整体的碳排放增长效应显著。就人口规模而言,其空间滞后项系数表现为显著的正向影响,这表明城市人口集聚增加的消费需求会通过区域供应链传导,促使关联城市扩大生产规模从而增加碳排放。此外,本地产业结构对碳排放的影响显著为正,而其空间滞后项为负且不显著。这一现象可能源于产业转移过程中,发达城市向周边区域转移高耗能产业所产生的碳泄漏效应导致整体碳减排效果被部分抵消,从而使得估计系数并不显著。

### 3.1.3 稳健性检验

为保证回归结果的可靠性,本文通过4种方式开展稳健性检验(表3)。一是替换核心解释变量。采用绿色专利授权总量替代申请总量的方式进行模型参数估计。二是更换空间权重矩阵。采用生产网络下的供给侧推动型空间权重矩阵替代需求拉动型空间权重矩阵进行模型参数估计。三是剔除特定年份的潜在冲击。考虑到某些特定年份发生的非常规事件会对回归结果产生难以观测的影

表3 稳健性检验结果

Table 3 Results of robustness tests

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
$\ln GI$	-0.102**	-0.040*	-0.025*	-0.061**
$w \times \ln GI$	-0.104**	-0.061*	-0.068*	-0.056*
个体固定效应	YES	YES	YES	YES
时间固定效应	YES	YES	YES	YES

2026年3月

响,故进一步剔除这些年份的样本以保证基准回归的可靠性,例如2020年新冠疫情。四是对数据进行5%缩尾处理。4种稳健性方案下,核心解释变量及其空间项的估计系数和显著性与前文的研究结果基本一致,一定程度上表明本文结论具有较强的稳健性。

### 3.1.4 异质性分析

不同的发展定位、经济发展水平等可能会带来城市差异化的发展环境,也会影响碳减排技术在生产网络下的空间溢出效应。为考察城市属性不同而产生的减排技术进步对碳排放的异质性空间效应,本文从发展定位、经济水平两方面分别检验碳减排技术的异质性影响。

(1)发展定位差异性。2019年中共中央、国务院发布的《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》中提出,以中心区辐射带动长三角地区高质量发展。其中,中心区包括上海市,江苏省的南京、无锡、常州、苏州、南通、扬州、镇江、盐城、泰州,浙江省的杭州、宁波、温州、湖州、嘉兴、绍兴、金华、舟山、台州,以及安徽省的合肥、芜湖、马鞍山、铜陵、安庆、滁州、池州、宣城共27个城市。因此,本文依据该发展定位划分中心区与非中心区进行异质性检验(表4)。中心区城市的碳减排技术与其空间滞后项对碳减排呈现较为显著的促进作用,表明邻近城市的绿色创新会通过生产关联对本地碳排放产生负向影响,即存在碳减排技术的正向空间溢出效应。而对于非中心区城市而言,核心解释变量与其空间滞后项为负但均不显著,这可能是由于非中心城市受制于创新资源不足、绿色技术转化率低等问题,绿色创新尚未形成对碳排放的实质性约束作用。

(2)经济发展差异性。为考察绿色技术进步在

生产网络传导下所引起的碳减排空间溢出效应在不同城市经济发展水平下的差异性,本文按照2021年长三角城市群人均GDP的中位数进行分组,高于中位数的城市归为高经济水平组,低于中位数的城市归为低经济水平组。模型估计结果如表4所示。经济发展水平较高的组别中,低碳技术及其空间项显著为负,且影响系数超过基准实验结果。这一现象可解释为,经济发达地区具备更强的创新能力、产业配套和政策支持,绿色创新投入更容易发挥协同作用,并通过生产关联影响周边区域。相反地,经济欠发达地区仅有碳减排技术的本地效应显著,而空间溢出效应并不显著,说明尽管低碳技术的进步能够使经济欠发达地区抑制碳排放的增长,但尚未形成通过生产关联引发的需求侧拉动型空间溢出机制。

## 3.2 长三角生产-消费网络的碳排放结构特征

### 3.2.1 生产网络的碳排放特征

从图3a-c可以看出,江苏省的南京、苏州,浙江省的杭州、宁波以及安徽省的合肥在其各自省域碳排放空间关联网络中占据核心节点地位。这些城市作为区域经济发展的核心引擎,通过产业关联效应形成显著的碳排放接收中心,构成长三角城市群碳排放空间关联网络的关键枢纽。次级核心城市包括江苏省的徐州、南通、无锡,浙江省的嘉兴、绍兴、温州以及安徽省的马鞍山、淮南、淮北。此类城市的经济发展通常在较大程度上由碳密集型产业驱动,通过产业集聚效应形成区域性的高碳排放“俱乐部”,从而同时承担碳排放输出与接收的双重功能。

从图3d可以看出。在生产网络传导下,安徽向江苏供给中间产品以及江苏向浙江供给中间产品的过程引发了省际网络中规模最大的两段隐含碳

表4 区域异质性检验结果

Table 4 Results of regional heterogeneity tests

变量	发展定位差异性		经济发展差异性	
	中心区	非中心区	高经济水平组	低经济水平组
$\ln GI$	-0.041*	-0.012*	-0.209***	-0.043*
$w \times \ln GI$	-0.026*	-0.006	-0.216***	-0.038
个体固定效应	YES	YES	YES	YES
时间固定效应	YES	YES	YES	YES

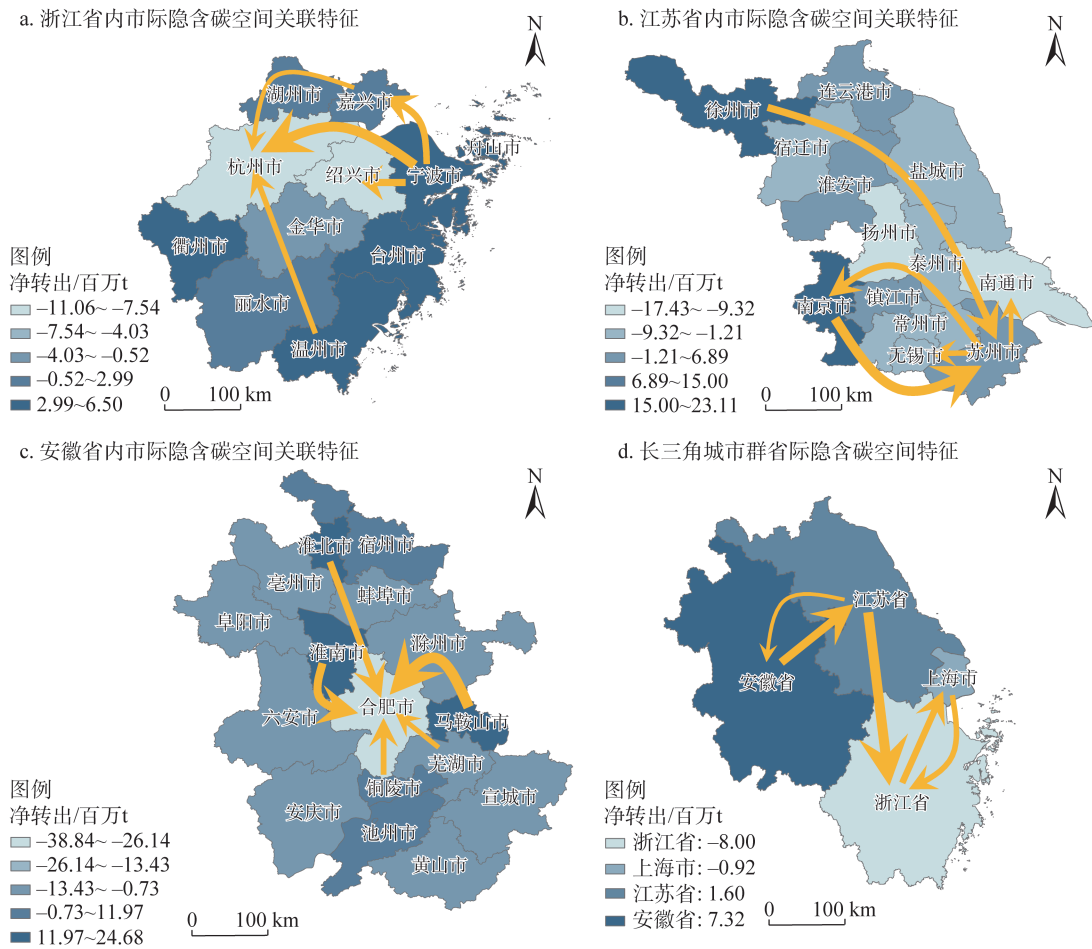


图3 生产网络下碳排放空间关联特征

Figure 3 Spatial correlation characteristics of carbon emissions under production network

注:图3a-c与d分别表示长三角城市群省内市际与省际层面隐含碳净流出的空间关联特征,箭头表示该区域内隐含碳流动量最大的前5条路径,箭头粗细代表流动大小。

流动关系,而上海和安徽之间的碳排放双向关联则相对较弱。可以发现,江苏和安徽在省际网络中主要承担碳排放输出者角色,而上海和浙江则表现为碳排放接收者。这初步表明,江苏和安徽在省际中间产品分工与贸易中需要更好地发挥“干中学”效应以提升碳减排技术。而上海和浙江除了通过进口上游地区的中间产品获得碳减排收益,也需要积极向江苏和安徽转移碳减排技术,以促进区域协同减排效应的形成。

3.2.2 生产-消费网络的碳排放特征

从图4可以看出,上游生产方面,国内其他地区 and 江苏的碳排放规模较大,发挥了碳排放关联“发动机”的作用。中游生产方面,国内其他地区、浙江以及上海的间接碳排放规模较大,承担了碳排放关

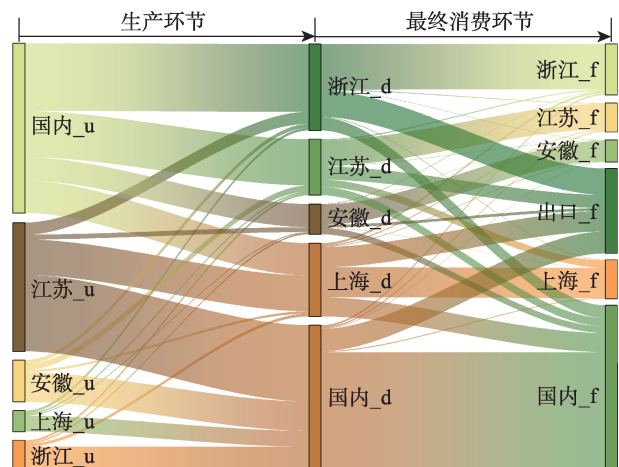


图4 生产-消费网络下碳排放空间关联特征

Figure 4 Spatial correlation characteristics of carbon emissions under production-consumption network

注:u表示上游生产,d表示中游生产,f表示最终消费。

2026年3月

联“经纪人”的作用。最终消费方面,浙江、国内其他地区 and 出口引致的碳排放规模较大,发挥了碳排放关联“牵引者”作用。具体来看,作为中游生产商的浙江与安徽均通过中间产品消费引发了国内其他地区和江苏的碳排放,而江苏主要通过使用国内其他地区和安徽的中间产品引发后两者的碳排放,上海则主要通过使用国内其他地区和江苏的中间产品引发后两者的碳排放。从最终需求角度看,浙江的隐含碳排放主要由本地消费和出口需求驱动;安徽主要由本地消费和国内其他地区需求驱动;江苏主要由本地消费和出口需求驱动;上海则主要由本地消费、国内其他地区需求以及出口需求共同驱动。

### 3.2.3 生产-消费网络的关键碳排放路径

选取碳排放规模最大的35条生产-消费路径进行分析,从图5可以看出,二阶路径16条(碳排放规模累计为242.13百万t)、三阶路径15条(碳排放规模累计为147.57百万t)、四阶路径3条(碳排放规模累计为30.49百万t)、五阶路径1条(碳排放规模为7.21百万t)。可见碳排放规模总体上随着生产阶段延伸而呈现下降趋势,这表明城市群协同减排工作应当注重在生产环节较少的二阶路径、三阶路径上进行开展。从最终消费环节来看,国内其他地区、浙江以及出口在碳排放空间关联中占据重要地位,其消费需求对生产端碳排放产生了较大拉动作用。

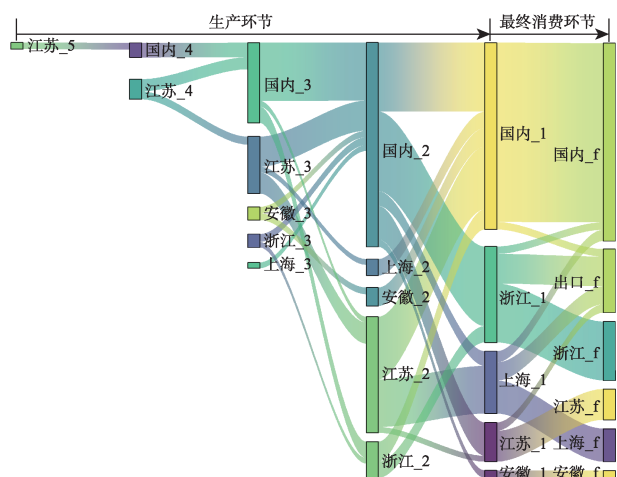


图5 生产-消费网络下碳排放关键路径

Figure 5 Key pathways of carbon emissions under production-consumption network

注:1-5分别表示第1至5生产阶段,f表示最终消费。

从生产环节来看,国内其他地区和江苏始终处于较为关键的地位,在第5生产阶段仅有江苏出现,也形成了唯一一条关键的5阶路径。

图5进一步表明,关键碳排放路径不具备较为复杂的空间交互关系,即通常仅涉及2至3个异质主体,因而存在实施针对性碳减排策略的必要性。在35条关键碳排放路径中,约一半路径以国内其他地区的最终消费为终点。在此类路径中,江苏是主要的生产端碳排放来源。有8条路径以长三角地区内部的中下游生产和最终消费为终点、以国内其他地区上游生产为起点,如路径“国内其他地区(上游生产)—浙江(中游生产)—浙江(最终需求)”。这表明国内其他地区与长三角地区之间存在着不可忽视的生产、消费交互关系,并且该空间交互关系通常不体现在路径的两端节点上,而是主要位于路径的上游和最终需求之间。换句话说,关键碳排放路径的上游生产以及中游生产主体通常保持一致,路径的下游生产和最终消费主体通常保持一致,这表明碳排放空间关联通常由中间产品生产的跨区域市场分工引致。此外,以出口为终点的路径通常由长三角地区的最终产品直接供给,但间接引致了国内其他地区的生产端碳排放。这表明通过与国内其他地区协作打造出口产业链,长三角地区在很大程度上向外部转移了碳排放。生产过程完全位于长三角地区内部的关键碳排放路径仅由上海和江苏组成,如路径“江苏(上游生产)—上海(中游生产)—上海(最终需求)”“江苏(上游生产)—上海(中游生产)—出口(最终需求)”,这表明上海为满足各项最终需求的过程中,通过使用来自江苏的中间产品而产生了大量的碳排放。

## 4 结论与政策建议

### 4.1 结论

在国内大循环和“双碳”目标背景下,本文从区域生产网络视角系统考察了碳减排技术溢出对长三角城市群碳排放空间关联的影响机制。通过构建理论模型并结合空间计量与投入产出分析方法,对2006—2021年长三角城市群碳排放的网络关联特征及其传导路径进行了实证分析。主要结论如下:

(1)碳减排技术在生产网络中存在显著溢出效

应,其强度与中间产品投入结构密切相关。实证结果显示,长三角城市群碳排放在生产网络关联下呈现显著的正向溢出特征,且空间关联程度持续增强。徐州、常州等江苏城市正逐步摆脱高碳排放“俱乐部”,而杭州、嘉兴等浙江城市则陆续加速向高碳集群靠拢。同时安徽省内部的碳排放局部空间关联仍不明显,仅有安庆市一直处于低-高集聚类型,淮北和宿州则逐渐不再表现出明显的碳排放空间集聚特征。该变化表明区域碳排放空间格局仍处于调整过程中,长三角城市群的协同减排机制仍有待进一步强化。

(2)碳减排技术进步不仅能够降低本地碳排放,还能通过生产网络传导机制形成跨城市协同减排效应。需求侧拉动型碳减排技术溢出效应要强于供给侧推动型,表明产业链上游城市对中游与下游碳减排技术的“主动吸收”是抑制整体碳排放的重要路径。异质性分析显示,碳减排技术溢出效应在中心城市和经济发达地区更为显著,非中心区和欠发达地区则受限于创新资源不足,技术溢出的碳减排效果较弱。此外,经济发展和人口集聚对碳排放呈现出显著正向网络溢出效应,而产业结构转型则呈现出不显著的负向效应。

(3)长三角城市群碳排放空间关联呈现明显的区域分化特征。从关联方向看,江苏和安徽主要表现为碳排放输出地,而上海和浙江则表现为碳排放接收地。在生产-消费网络中,浙江和出口的最终消费引致了较大规模碳排放,江苏则是关键的生产端碳排放源,并且上海、浙江在碳排放循环中发挥了重要的跨区域联通作用。省际生产-消费路径分析显示,长三角城市群内部的典型碳排放路径多以江苏为生产起点,上海和出口的最终需求为消费终点,浙江、上海则主要承担中间生产环节。

## 4.2 政策建议

基于上述结论,本文提出以下政策建议:

(1)建立长三角梯度化碳减排责任分担机制与碳排放联防联控体系,有序推动区域协同减排格局均衡化发展。一方面,对已退出高碳排放集群的江苏城市(徐州、常州等)实施碳减排成果巩固计划,对新兴高碳集群的浙江城市(杭州、嘉兴等)制定严格的碳排放准入标准。另一方面,制定统一的碳核

算与交易机制,避免单边碳减排效果被区域增长抵消,从而强化区域协同减排机制。同时,重点监测高-高集聚城市(苏州、南京等)的产业关联,推动跨城市低碳供应链合作。

(2)鼓励产业链中游、下游企业与上游地区之间的联合研发,大力发挥需求侧拉动型碳减排技术溢出的重要作用,促进绿色技术跨区域扩散。具体而言,鼓励安徽主动向江苏学习先进碳减排技术,通过“干中学”效应提升自身的碳减排能力。而江苏碳减排工作在被动受益于安徽碳减排技术提升的同时,也需要不断吸收和转化来自上海和浙江的先进碳减排技术。对于上海和浙江,一方面可以通过扩大对江苏产品的需求,强化需求侧对碳减排技术扩散的拉动作用,从而促进自身经济结构转型;另一方面也需要以自身在跨区域产业链中的终端主导地位,积极规范和引导上游地区的生产技术绿色化转型。

(3)构建基于生产-消费网络的全链条碳减排机制,从而优化关键碳排放路径治理。对江苏、安徽等碳排放输出大省,重点实施钢铁、建材等高耗能产业低碳化改造,而对上海、浙江等消费端主导的碳接收地区,强化绿色技术转移并制定覆盖全供应链的绿色采购标准,特别是对来自江苏、安徽的高耗能产品设置低碳要求。此外,鉴于国内其他地区在上游生产、终端消费方面对长三角城市群碳排放的显著影响,在中游与下游生产方面占据相对主导地位的长三角城市群亟须发挥其对国内其他地区的双向碳减排技术溢出效应,以促进全国范围内的碳减排技术传播。

## 参考文献(References):

- [1] 吴康,耿一睿,郭涛.城市群绿色技术创新对碳排放的影响:基于人力资本的调节效应[J].自然资源学报,2024,39(9):2121-2139. [Wu K, Geng Y R, Guo T. The impact of green technology innovation on carbon emissions from the perspective of urban agglomeration: The moderating effect of human capitals[J]. Journal of Natural Resources, 2024, 39(9): 2121-2139.]
- [2] 于诗琪,雷娜.绿色技术创新对碳减排的影响:基于门槛效应和空间溢出效应的实证分析[J].青岛大学学报(自然科学版),2025,38(1):109-118. [Yu S Q, Lei N. Effect of green technology innovation on carbon emission reduction: Empirical analysis based

2026年3月

- on threshold effect and spatial spillover effect[J]. *Journal of Qingdao University (Natural Science Edition)* 2025, 38(1): 109–118.]
- [3] 沈能, 王群伟, 赵增耀. 贸易关联、空间集聚与碳排放: 新经济地理学的分析[J]. *管理世界*, 2014, (1): 176–177. [Shen N, Wang Q W, Zhao Z Y. Trade linkages, spatial agglomeration and carbon emissions: Analysis of the new economic geography[J]. *Journal of Management World*, 2014, (1): 176–177.]
- [4] 刘维林, 程倩. 数字产业渗透、全球生产网络与非对称技术溢出[J]. *中国工业经济*, 2023, (3): 96–114. [Liu W L, Cheng Q. Digital industry penetration, global production network and asymmetric technology spillover[J]. *China Industrial Economics*, 2023, (3): 96–114.]
- [5] Liu Y X, Lei P, He D Y. Endogenous green technology progress, green transition and carbon emissions[J]. *International Review of Economics & Finance*, 2024, DOI: 10.1016/j.iref.2023.12.007.
- [6] Shi C F, Yu Y, Zhi J Q, et al. Unveiling the unequal variation of regional carbon risk under inter-provincial trade in China[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2024, DOI: 10.1016/j.eiar.2023.107391.
- [7] Zhang H Y, Zhang W, Lu Y L, et al. Worsening carbon inequality embodied in trade within China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(2): 863–873.
- [8] 胡珺, 方祺, 龙文滨. 碳排放规制、企业减排激励与全要素生产率: 基于中国碳排放权交易机制的自然实验[J]. *经济研究*, 2023, 58(4): 77–94. [Hu J, Fang Q, Long W B. Carbon emission regulation, corporate emission reduction incentive and total factor productivity: A natural experiment based on China's carbon emission trading system[J]. *Economic Research Journal*, 2023, 58(4): 77–94.]
- [9] 葛力铭, 郑贺允, 孙鹏博, 等. 低碳赋能增效: 低碳城市试点政策对环境福利绩效的影响[J]. *统计研究*, 2024, 41(2): 100–113. [Ge L M, Zheng H Y, Sun P B, et al. Low carbon with empowerment and efficiency: The impact of low-carbon city pilot policy on environmental welfare performance[J]. *Statistical Research*, 2024, 41(2): 100–113.]
- [10] 潘晨, 李善同, 何建武, 等. 考虑省际贸易结构的中國碳排放变化的驱动因素分析[J]. *管理评论*, 2023, 35(1): 3–15. [Pan C, Li S T, He J W, et al. Analysis of the driving forces of changes in China's CO<sub>2</sub> emissions considering inter-provincial trade structure [J]. *Management Review*, 2023, 35(1): 3–15.]
- [11] 邵帅, 徐俐俐, 杨莉莉. 千里“碳缘”一线牵: 中国区域碳排放空间关联网络的结构特征与形成机制[J]. *系统工程理论与实践*, 2023, 43(4): 958–983. [Shao S, Xu L L, Yang L L. Structural characteristics and formation mechanism of carbon emission spatial association networks within China[J]. *Systems Engineering – Theory & Practice*, 2023, 43(4): 958–983.]
- [12] 俞洁, 张勇, 李清瑶. 长三角碳排放空间关联网络结构特征及演化机制[J]. *自然资源学报*, 2024, 39(2): 372–391. [Yu J, Zhang Y, Li Q Y. Structural characteristics and evolutionary mechanism of spatial correlation network of carbon emissions in the Yangtze River Delta[J]. *Journal of Natural Resources*, 2024, 39(2): 372–391.]
- [13] 马诗萍, 谢永顺, 陈宏阳, 等. 中国城市电力生产总碳强度的时空演变及影响因素[J]. *地理学报*, 2024, 79(3): 712–731. [Ma S P, Xie Y S, Chen H Y, et al. Spatio-temporal evolution and influencing factors of aggregate carbon intensity of electricity generation in China's cities[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2024, 79(3): 712–731.]
- [14] 潘雄锋, 袁赛, 李佳奇. 空间溢出视角下市场分割对碳排放影响机制的实证研究: 来自中国30个省份的经验证据[J]. *管理评论*, 2023, 35(7): 14–27. [Pan X F, Yuan S, Li J Q. The impact of market segmentation on carbon emissions from a spatial spillover perspective: Empirical evidence from 30 provinces in China[J]. *Management Review*, 2023, 35(7): 14–27.]
- [15] Gao Y X, Gao M. Spatial correlation network of municipal solid waste carbon emissions and its influencing factors in China[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2024, DOI: 10.1016/j.eiar.2024.107490.
- [16] 肖静, 曾萍. 数字经济赋能地区低碳转型: 内在机制与空间溢出[J]. *现代经济探讨*, 2023, (7): 23–33. [Xiao J, Zeng P. Digital economy empowers region low-carbon transformation: The internal mechanism and spatial spillover[J]. *Modern Economic Research*, 2023, (7): 23–33.]
- [17] Zhu B, Wei C. Strategic interactions for carbon emissions in Chinese cities are influenced by mayors[J]. *Nature Cities*, 2024, 1: 370–377.
- [18] 邵帅, 李欣, 曹建华, 等. 中国雾霾污染治理的经济政策选择: 基于空间溢出效应的视角[J]. *经济研究*, 2016, 51(9): 73–88. [Shao S, Li X, Cao J H, et al. China's economic policy choices for governing smog pollution based on spatial spillover effects[J]. *Economic Research Journal*, 2016, 51(9): 73–88.]
- [19] 田云, 尹恣昊. 技术进步促进了农业能源碳减排吗? 基于回弹效应与空间溢出效应的检验[J]. *改革*, 2021, (12): 45–58. [Tian Y, Yin M H. Does technological progress promote carbon emission reduction of agricultural energy? Test based on rebound effect and spatial spillover effect[J]. *Reform*, 2021, (12): 45–58.]
- [20] Bolea L, Espinosa-Gracia A, Jimenez S. So close, no matter how far: A spatial analysis of CO<sub>2</sub> emissions considering geographic and economic distances[J]. *World Economy*, 2024, 47(2): 544–566.
- [21] Chen S S, Zhang H Y, Wang S H. Trade openness, economic growth, and energy intensity in China[J]. *Technological Forecasting And Social Change*, 2022, DOI: 10.1016/j.techfore.2022.121608.
- [22] Copeland B R, Taylor M S. Trade and the Environment: Theory

- and Evidence[M]. Princeton: Princeton University Press, 2003.
- [23] Shapiro J S, Walker R. Why is pollution from us manufacturing declining? The roles of environmental regulation, productivity, and trade[J]. *American Economic Review*, 2018, 108(12): 3814–3854.
- [24] 胡雨朦, 郭朝先. 数字化对制造业企业碳排放强度的影响研究: 理论建模与机制检验[J]. *北京工业大学学报(社会科学版)*, 2023, 23(5): 153–168. [Hu Y M, Guo C X. Impact of digitalization on carbon emission intensity of manufacturing enterprises: Theoretical modeling and mechanism test[J]. *Journal of Beijing University of Technology (Social Sciences Edition)*, 2023, 23(5): 153–168.]
- [25] Yu S W, Zhang Q, Li Hao J, et al. Development of an extended STIRPAT model to assess the driving factors of household carbon dioxide emissions in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.116502.
- [26] 刘江龙, 任奕帅, 马超群, 等. 城市创新能力对城市空气质量的影响研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2022, 42(9): 2290–2303. [Liu J L, Ren Y S, Ma C Q, et al. The impact of urban innovation capability on urban air quality[J]. *Systems Engineering – Theory & Practice*, 2022, 42(9): 2290–2303.]
- [27] 余丽丽, 彭水军. 新发展格局下产业升级、国内贸易与绿色增长[J]. *系统工程理论与实践*, 2024, 44(7): 2075–2094. [Yu L L, Peng S J. Industrial upgrading, domestic trade and green growth under China's new development pattern[J]. *Systems Engineering – Theory & Practice*, 2024, 44(7): 2075–2094.]
- [28] 徐大丰. 资本深化、技术进步与中国碳排放 EKC 的形成[J]. *系统工程理论与实践*, 2022, 42(6): 1632–1643. [Xu D F. Capital deepening, technological progress and the formation of China's carbon emission EKC[J]. *Systems Engineering – Theory & Practice*, 2022, 42(6): 1632–1643.]
- [29] 陈姜全, 李效顺, 耿艺伟, 等. 中国城镇化与碳排放机制分析及实证研究: 基于经济发展、人口转移和城镇扩张视角[J]. *自然资源学报*, 2024, 39(6): 1399–1417. [Chen J Q, Li X S, Geng Y W, et al. Mechanism analysis and empirical research on urbanization and carbon emissions in China: Based on the perspective of economic development, population transfer, and urban expansion [J]. *Journal of Natural Resources*, 2024, 39(6): 1399–1417.]
- [30] 王青, 傅莉媛, 孙海添. 中国工业生产能源消费碳排放的区域差异、动态演进与影响因素[J]. *资源科学*, 2023, 45(6): 1239–1254. [Wang Q, Fu L Y, Sun H T. Regional differences, dynamic changes, and influencing factors of carbon emissions from industrial production energy consumption in China[J]. *Resources Science*, 2023, 45(6): 1239–1254.]
- [31] 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.]

## Spatial correlation patterns of carbon emission reduction technology spillovers in Yangtze River Delta urban agglomeration: A perspective of regional production network

ZHU Wenjun<sup>1</sup>, SHI Changfeng<sup>2</sup>, YAO Xiao<sup>3</sup>, ZHANG Chenjun<sup>4</sup>

(1. School of Business, Hohai University, Nanjing 211100, China; 2. School of Economics and Finance, Hohai University, Changzhou 213200, China; 3. College of Information Science and Engineering, Hohai University, Changzhou 213200, China; 4. School of Economics and Management, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China)

**Abstract: [Objective]** Under the background of accelerating domestic economic circulation, this study investigates how carbon emission reduction technologies influence spatial correlations of carbon emissions in urban agglomerations through regional production networks, thereby facilitating the low-carbon transformation of regional economic circulation. **[Methods]** This study constructed a multi-sector general equilibrium model incorporating a pollution production function to elucidate the spillover mechanisms of carbon emission reduction technologies in the regional production network. By integrating spatial econometric models and input-output analysis, it

investigated the network correlation effects of carbon emission reduction technology spillovers, the spatial structure characteristics of carbon emissions under technology spillovers, and their transmission pathways in the Yangtze River Delta urban agglomeration from 2006 to 2021. **[Results]** (1) Carbon emissions in the Yangtze River Delta urban agglomeration exhibited significant spatial agglomeration effects and temporal pathway dependence under production network transmission. The technological progress of carbon emission reduction generated cross-regional synergistic emission reduction effects through the production network, with demand-side-driven spillover effects being more prominent than supply-side-driven ones. (2) Spatial heterogeneity was observed in carbon emission reduction technology spillover effects, which were significant in central cities and economically developed regions, whereas peripheral areas showed weaker spillover effects due to constraints on innovation resources. Economic development and population agglomeration showed positive network spillover effects on carbon emissions. (3) The carbon emission network in the Yangtze River Delta urban agglomeration showed pronounced intra-administrative clustering characteristics. At the interprovincial level, Jiangsu and Anhui functioned as carbon emission exporters, while Shanghai and Zhejiang acted as carbon emission importers. In the carbon emission transmission path starting from Jiangsu and ending at Shanghai and international demand, Zhejiang and Shanghai assume important intermediate production functions and become the key hub nodes connecting production and consumption. **[Conclusion]** Carbon emission reduction technologies generate significant spatial spillover effects through the production network, serving as a crucial mechanism for promoting coordinated regional emission reduction. It is recommended to strengthen the construction of interregional green technology diffusion channels, optimize cross-regional carbon emission responsibility-sharing mechanisms and joint prevention and control systems, and refine full-chain carbon reduction solutions based on the production network, thereby advancing the green transformation of the overall socioeconomic development of the Yangtze River Delta urban agglomeration.

**Key words:** carbon emissions; production network; carbon emission reduction technology spillovers; spatial correlation effects; spatial econometric models; Yangtze River Delta urban agglomeration