

碳排放权交易制度、产业绿色转型及其外部性*

孙传旺 陈智龙 孙博文

内容提要:绿色发展是高质量发展的底色,产业结构绿色转型有利于推动新质生产力的形成与发展。已有研究表明,中国碳交易(简称“碳交易”)制度能够促进本地产业绿色转型。本文研究发现,碳排放权交易试点制度对周边非碳交易试点地区(简称“周边地区”)的产业结构低碳化具有负外部性效应。具体而言,本文根据中国税收调查数据库构建区县产业结构低碳化指标,基于反事实双重差分等方法进行实证架构搭建。研究结果表明,碳交易试点制度阻碍了试点地区相邻省份辖区内区县的产业结构低碳化,尤其是与试点地区直接毗邻或者外围50公里以内的区县;此外,这种负向作用会受到周边地区规制力度和试点地区碳价水平的影响。值得注意的是,本文立足于新质生产力的发展逻辑,分析碳交易制度外部性的机制渠道,验证了产业布局、要素配置以及技术创新三种不同的机制因素。为阐明技术创新对于碳交易制度负外部性的缓解效应,本文进一步测算了各行业低碳效率指标,并采用三重差分方法发现高技术行业低碳效率会因碳交易制度而提升,但其他行业并未发生变化。聚焦于碳交易制度的产业绿色转型外部性,本文结论不仅对于当前碳交易市场范围从试点扩大到全国的制度改革提供理论依据与实证支持,而且为构建全国生态要素统一大市场的新质生产关系、加快形成新质生产力贡献生动案例与学理参考。

关键词:新质生产力 碳排放权交易制度 产业绿色转型 外部性效应

一、引言

习近平总书记在中共中央政治局第十一次集体学习时强调,新质生产力是由技术革命性突破、生产要素创新性配置、产业深度转型升级而催生的先进生产力质态。绿色发展是高质量发展的底色,新质生产力本身就是绿色生产力。新质生产力将绿色低碳理念贯穿于现代化产业体系发展始终,以产业绿色化推动经济社会全面绿色低碳转型(黄群慧和盛方富,2024)。在此背景下,碳排放权交易制度既是推动绿色低碳转型的机制保障,也是适应新质生产力发展的新型生产关系的制度体现。2024年,中共中央、国务院印发《关于加快经济社会发展全面绿色低碳转型的意见》,提出推进碳排放权交易市场和温室气体自愿减排交易市场建设。作为一种协同推动节能减排(Cui et al., 2021)与技术创新(胡珺等, 2020)的环境规制工具,中国碳交易试点制度于2011年启动,旨在通过配额交易制度改革推动产业绿色转型。大量关注碳交易试点制度与产业结构转型的研究发现,制度实施不仅促进了试点地区高技术行业和低碳行业发展(于向宇等, 2021),而且能够加快三次产业间替代演进以及生产要素优化配置(刘满凤和程思佳, 2022),实现试点地区的产业结构转型。然而,碳交易制度对于全国地区,尤其是周边地区产业绿色转型的外部性效应,以及背后的作用机制仍缺乏深入的实证研究与理论解释。

* 孙传旺,厦门大学经济学院中国能源经济研究中心、厦门大学计量经济学教育部重点实验室,邮政编码:361005,电子信箱:cw_sun@foxmail.com;陈智龙,厦门大学经济学院,邮政编码:361005,电子信箱:zhilong_chen2000@163.com;孙博文(通讯作者),中国社会科学院数量经济与技术经济研究所,邮政编码:100732,电子信箱:sunbowen@cass.org.cn。本研究得到国家自然科学基金重大项目(21&ZD109)、国家自然科学基金青年项目(72303239)的资助。作者感谢匿名评审专家的宝贵意见。当然,文责自负。

产业绿色低碳转型是新质生产力形成和发展的重要表现。本文基于新质生产力的形成逻辑,从产业、要素和技术三个维度剖析碳交易制度的外部性效应。碳交易制度是一种旨在优化碳排放生态要素配置效率(孙博文,2024)的新型生产关系。但是以行政区域为边界的碳交易试点制度,可能在试点与周边地区之间筑起碳要素市场壁垒,周边地区碳排放要素无法参与碳交易试点市场,加剧地区间碳要素配置的非均衡状态,相对扩大非试点地区市场扭曲。区域制度整合是消除市场分割的关键(刘志彪和孔令池,2021),若试点地区碳交易制度对于周边地区产业绿色转型产生了负外部性,那么当前致力于突破行政边界、“由试点推广到全国”的碳交易制度改革,有利于消除市场壁垒,缓解对于周边地区低碳转型的负外部性影响。

本文的研究不仅能够为新质生产关系如何适应新质生产力的发展提供机制证据,而且还将对我国进一步打破生态要素市场分割、构建全国统一大市场贡献学理智慧。研究主线如下:第一,基于中国税收调查数据库构建区县产业结构低碳化指标,使用双重差分方法发现碳交易制度显著降低周边地区产业结构低碳化水平。第二,除了平行趋势检验外,从模型设定、工具变量、指标构造和潜在干扰因素四个维度进行稳健性估计,确保基准结论的可靠性。第三,为了进一步考察空间壁垒对碳交易试点制度产生外部性的作用,本文对双重差分模型做出更细致的设定,验证外部性效应的距离衰减特征。第四,通过调节效应模型揭示了周边地区规制力度和试点地区碳价水平对碳交易制度外部性的影响。第五,从产业布局、要素配置效率和技术创新三方面检验外部性效应的形成机制。最后,针对技术创新,本文依据企业碳排放和产值规模构建产业低碳效率指标,采用三重差分方法实证揭示技术创新效应对于产业绿色转型外部性的作用。

本文的边际贡献与潜在创新在于如下三点:

在研究立意与指标创新上。区别于以往大量关注碳交易试点制度与当地产业结构的研究,本文另辟蹊径地探究碳交易制度的产业结构低碳化外部性。分别从理论和实证层面,阐明碳交易试点制度阻碍相邻区县产业绿色转型的内在逻辑和机制因素,为研究碳交易试点制度的经济后果和空间溢出效果(董直庆和王辉,2019)贡献新的依据。相较于三次产业相关的产业结构指标(袁航和朱承亮,2018)和碳排放相关的综合产业体系模型(张伟等,2016),本文的产业结构低碳化指标既可以涵盖企业微观信息,又能够体现主导产业结构变迁,反映由新质生产力带来的绿色低碳产业对于高碳排放产业的替代演变过程。

在研究视角与机制分析上。本文聚焦于碳交易制度生产关系内涵,结合新质生产力的形成逻辑,搭建了制度外部性产生的理论框架。碳交易市场本质上是一种优化碳排放要素分配效率的经济制度,而经济制度属于生产关系范畴(方敏,2020)。催生新质生产力的产业、要素、技术三重动能分别对应碳交易制度外部性产生的产业布局、要素配置、技术创新三种因素。鉴于此,本文突破性地依据新质生产力理论,阐释碳交易制度外部性形成的内在机制。详细而言,碳交易制度导致周边地区重点控排行业的产业布局集聚和低碳要素配置效率下降,但也促进了周边地区的技术创新水平。

在实证架构上。除了采用规范的双重差分方法分析碳交易制度外部性效应,还在以下方面对实证设计框架进行改进:首先,针对内生性问题,以空气流动系数事前均值与时间变量的交互项作为碳交易制度的工具变量进行估计。其次,基于千分位经纬度信息,从处理组样本中筛选出直接接壤以及外围50公里以内的周边区县,既重点探讨了“周边地区”边界设定偏误对于实证结果的潜在影响,又再次检验了碳交易制度外部性的效果。最后,为了刻画传统产业绿色转型升级,本文基于企业能源消费碳排放和产出数据,构建了行业层面独特的产业低碳效率指标。特别针对技术创新因素,本文研究发现,高技术行业的产业低碳效率显著提升,但一般行业没有发生明显变化。这一结果诠释了技术创新可以缓解碳交易制度在绿色转型方面的负外部性,也验证了作为新质生产力核心驱动力的技术创新,对能源强度、碳排放效率的促进作用(林伯强和孙传旺,2011)。

本文的研究具有较强的政策意义,为当前碳交易市场范围从试点扩大到全国的制度改革提供了理论依据与实证支持。首先,以行政区划为边界的碳交易试点制度对周边地区存在产业结构低碳化的负外部性,因此,不断加快全国统一碳市场建设,将有助于推动全面绿色低碳转型的发展实践;其次,产业布局、要素配置和技术创新是负外部性的三个重要影响机制,因此,对阻碍周边地区产业绿色调整的主要因素进行准确识别与控制,将有利于加快培育新质生产力;第三,不同区域的碳市场价格与环境规制力度等因素差异,将对试点制度的负外部性形成一定的调节作用,因此,加强碳交易制度与其他政策的有效协同,可以充分缓解负外部性的影响;第四,碳交易试点制度显著提高了周边地区高技术控排行业的碳排放要素生产效率,因此,统筹好整体和局部的关系,更好地发挥试点碳市场在全国碳市场扩大交易范围过程中的实践探索作用。

余文结构安排如下:第二部分为制度背景与理论分析;第三部分为指标构建与模型设定;第四部分呈现基准回归结果;第五部分为碳交易制度外部性的机制检验;第六部分进一步探讨了碳交易制度对于周边地区产业低碳效率的影响;第七部分为本文的结论与政策建议。

二、制度背景与理论分析

(一)碳交易制度背景

2011年,中国宣布启动碳排放权交易试点市场建设,旨在利用额交易试点制度促进温室气体减排,推动经济结构转型与产业升级。北京、天津、上海、深圳、广东、湖北、重庆和福建8地陆续启动碳交易试点市场,钢铁、化工等高耗能行业被纳入控排体系,这些举措积极推动产业结构绿色转型与新质生产力的形成发展。2021年7月,全国碳市场正式启动,覆盖碳排放量占全国40%以上的电力行业为首批控排对象。2024年9月,生态环境部表明,积极稳妥有序将水泥、钢铁、电解铝行业纳入全国碳排放权交易市场覆盖范围。^①当前,碳交易的8个试点市场与全国市场并行,试点市场为全国市场的建立提供了先行先试的实践经验和建设探索,全国市场则是试点市场在空间上的延伸和制度上的深化。事实上,在2021年中国碳市场启动之前,我国也多次在碳市场的制度创新上做出尝试。例如,2014年12月,北京市与承德市启动了跨区域碳排放权交易市场建设;2016年3月,北京市又与呼和浩特市、鄂尔多斯市联合开展了跨区域碳排放权交易。“京津冀跨区域碳交易”^②与“京蒙跨区域碳交易”^③力图缓解环境溢出效应带来的外部性问题,为全国碳市场的筹备提供有益探索。可见,减轻行政壁垒阻碍、解决试点制度外部性问题能够为建构和完善全国生态要素统一大市场提供生动实践,更成为了碳交易制度持续改革的必然趋势。然而当前,相关的理论分析与实证研究均较为匮乏,尤其是缺乏从新质生产力和产业绿色转型视角的解释与证据。

(二)理论分析与研究假说

外部性是指一个经济主体的活动对另一个经济主体的效益或成本产生了影响,但是未通过市场价格机制予以反映。也有学者发现,制度本身也可能产生外部性效应,进而对其他经济主体造成影响(Trantidis, 2024)。本文研究的碳交易制度外部性是指试点地区碳交易制度的实施对周边地区产业绿色转型的作用,该外部性表现在以下两方面。一方面,该外部性表现为对周边地区高耗能行业形成“挤入现象”,这种“挤入现象”可能与高耗能行业的产业布局有关。在碳交易制度作用下,试点地区化工、钢铁、水泥等行业生产活动有所受限,相较之下,周边地区高耗能行业的产出布局优势更易发挥,意味着生产规模可能得到了扩大,对高耗能行业的“挤入”阻碍了周边地区产业结构绿色

① 参见:《关于公开征求〈全国碳排放权交易市场覆盖水泥、钢铁、电解铝行业工作方案(征求意见稿)〉意见的函》(环办便函[2024]299号)。

② 参见:《京津冀破冰跨区域碳交易 用市场手段探索生态补偿》,《人民日报》2014年12月19日第9版。

③ 参见:《京蒙启动跨区域碳排放权交易》,《中国能源报》2016年04月04日第2版。

转型。另一方面,该外部性也体现在对周边地区绿色低碳行业造成的“挤出现象”,这种“挤出现象”或与要素配置效率降低有关。与试点地区相比,周边地区碳减排价值难以通过市场呈现,相对加剧要素市场扭曲程度,尤其是在节能环保工程、环境污染监测等领域,对绿色低碳行业的“挤出”阻碍了周边地区产业结构绿色转型。综上,碳交易试点制度对于周边地区产业结构低碳化的负外部性,呈现出“挤入现象”和“挤出现象”。基于此,本文提出假说1:

H1:碳交易制度会对周边地区产业结构低碳化产生负外部性影响。

碳交易制度是一种与新质生产力和绿色生产力的形成与发展相适应的新型生产关系,产业结构低碳化则体现了新质生产力的绿色内涵。新质生产力形成的核心逻辑在于通过技术革命性突破、生产要素创新性配置与产业转型升级的作用实现全要素生产率的有效提升,新质生产力本身就是绿色生产力。从技术维度看,技术的革命性突破推动了节能降碳等先进绿色技术的形成;从要素配置角度看,碳排放权交易等市场化机制引导资本、人才等要素流向绿色低碳产业;从产业转型角度看,高耗能、高排放的传统产业在碳交易制度的作用下逐渐向绿色化、高效化的新兴产业转变。根据假说1的分析,倘若碳交易制度对周边地区的产业结构低碳化产生了负外部性,则必然会对周边地区的绿色生产力造成负面影响。考虑到新质生产力是由产业、要素、技术三方面因素催生,本文尝试从产业布局效应、要素配置效应、技术创新效应出发,为碳交易制度对产业结构低碳化外部性的作用机制提供理论解释。

1. 产业布局效应

新质生产力的培育需要依靠现代化产业体系的构建,即通过改造传统产业、壮大新兴产业和布局未来产业,推动产业结构绿色化。然而,根据“污染天堂”假说,在碳交易试点制度的压力下,水泥、钢铁等高耗能企业会加快生产活动的空间调整。具体而言,碳交易试点制度在空间上可能通过产业布局效应加强试点地区高耗能企业的短期绿色转型压力和长期利润损失预期(Hsu et al., 2023),并同时提高周边地区高耗能行业的产业规模,抑制产业结构低碳转型。换句话说,为应对转型成本与收益的不对称性,试点地区的高耗能企业会将其部分生产活动分配到周边地区,从而更有效地平衡经济效益与合规成本,这与Gibson(2019)等学者观点相符。除了试点地区的生产活动溢出外,碳交易制度还可能通过改变周边地区重点控排行业的比较优势,间接加速周边地区高耗能产业集聚。根据赫希曼空间外部经济理论,相邻地区产业布局通常具有相似性与连续性,产业链分工呈现出空间耦合关联特征。这意味着,试点地区与周边地区的高耗能行业可能会形成竞争关系,碳交易制度的实施降低了试点地区重点控排行业的比较优势,从而相对提升了周边地区高耗能行业比较优势(欧阳晓灵等, 2022)。比较优势的增强容易使周边地区高耗能行业在市场竞争中地位提升,从而获取更多市场份额和发展机会。综上所述,碳交易试点制度可能会对周边地区造成“挤入现象”,加速高耗能行业的相对规模提升,不利于周边地区产业结构低碳化转型。由此,本文提出假说2:

H2:碳交易制度通过产业布局效应抑制周边地区产业结构低碳化转型。

2. 要素配置效应

生产力各要素的高效率配置是实现生产力跃迁、形成新质生产力的必要条件。与传统环境规制不同的是,碳交易制度的显著特点在于实现了碳要素成本的内部化(贾智杰等, 2023),这就意味着碳交易试点制度在推动当地绿色低碳发展的同时,可能通过改变周边地区的低碳要素配置效率影响其产业结构低碳转型。这一过程的核心机制在于要素价格与相对成本的调整。碳交易制度使试点地区企业碳排放成本被内部化,提高碳要素的使用成本减排成本,相比之下,未纳入碳交易试点的周边地区则缺乏此类约束,导致碳要素在相对价格上反而更具优势。根据要素替代理论(史丹和王俊杰, 2016),当某种生产要素的相对成本下降时,企业会提高该要素在生产中的投入比例。由此,在价格优势作用下,周边地区可能加大碳密集型的生产活动,导致碳排放增加。在此背景下,依赖生态价值

形成的绿色低碳竞争力难以充分发挥,节能减排产业对资本、劳动等要素的吸引力下降,导致周边地区资源配置进一步偏离低碳导向。要素配置效率不仅体现在资源是否流向生产率更高的部门,还体现在低碳效率较高行业能否得到充分的资本和劳动要素份额。低碳要素配置效率的下降意味着低碳全要素生产率较高的行业获得较少的资本或劳动投入,导致节能减排等绿色低碳行业在竞争中被“边缘化”。这种要素配置效率损失会削弱要素从低效高碳部门向高效低碳部门的转移动力(陈创练等,2016),在产业演进过程中呈现出“挤出现象”,即绿色低碳行业的发展空间被碳密集型生产活动所占据,进而抑制周边地区整体产业结构的低碳化进程。鉴于此,本文提出假说3:

H3:碳交易制度可能会降低周边地区的低碳要素配置效率,进而阻碍其产业结构低碳化。

3.技术创新效应

技术创新是发展新质生产力的核心要素,能够催生新产业、新模式、新动能,支撑和推动经济高质量发展。理论上,碳交易试点制度能够带动周边地区技术创新,而这种技术创新效应可能是缓解产业结构低碳化负外部性的关键机制。一方面,碳交易制度为二氧化碳排放权赋予商品属性,通过市场交易给企业传递明确的碳减排激励信号。基于利润最大化动机,企业在碳交易的激励下,可能加大技术研发投入,通过工艺流程改进、低碳技术应用和能源结构优化等方式降低碳排放,最终提升碳交易试点地区的技术创新水平(Zhu et al., 2019)。另一方面,由于技术在产业链上下游之间高度关联的属性,技术创新会通过产业链供应链以及商品贸易、知识扩散和碳价信号的传导机制溢出至周边地区,形成区域性的技术进步效应(Venmans et al., 2020)。从熊彼特的“创造性破坏”理论视角来看,生产要素与生产条件在技术创新前提下的持续迭代与重组是经济转型发展的关键机制(张可云和李晨,2019)。在碳中和的背景下,技术创新既是企业在节能减排约束下生存与发展的必要条件,更是实现区域产业结构升级的重要力量。首先,技术创新有利于新旧动能转换,在产业调整过程中加速高排放、低效率行业的退出,为绿色低碳行业的发展释放空间(王海等,2025)。其次,企业依托技术创新通过清洁能源利用、智能化管理和数字化转型等路径显著降低能源消耗强度(Lin & Chen, 2020),提高传统行业碳排放效率(Zheng et al., 2022)。理论上,碳交易制度的技术创新效应不仅能缓解其对周边地区产业结构低碳化的负外部性影响,还有利于行业整体的碳排放效率提升。基于上述分析,本文提出假说4a和4b:

H4a:碳交易制度带动周边地区技术创新,技术创新效应有利于产业结构低碳化。

H4b:碳交易制度发挥技术创新效应,促进周边地区相关行业的碳排放效率提升。

三、指标构建与模型设定

(一)指标构建

本文以绿色低碳产业与高碳排放产业的产值之比衡量区县层面产业结构低碳化水平。由于《中国县域统计年鉴》未披露详细的绿色低碳行业与高碳排放行业产值规模数据,本文基于中国税收调查数据库提供的微观企业信息构建产业结构低碳化指标。具体步骤如下:首先,测算区县绿色低碳产业规模。根据中国《绿色低碳转型产业指导目录(2024年版)》,绿色低碳产业包括节能降碳产业、环境保护产业、资源循环利用产业等7类一级产业、31类二级产业、246类三级产业。将中国税收调查数据库与上述产业分类信息进行匹配,识别出绿色低碳行业企业。^①加总绿色低碳行业企业规模,得到区县绿色低碳产业规模。公式如下:

$$Hb_u = \sum_j Indusize_{ij} = \sum_j \sum_m size_{ijmt} \quad (1)$$

式(1)中, j 为绿色低碳行业, i 为区县, t 为时期, m 表示企业, $size_{ijmt}$ 表示 i 区县 t 时期 j 行业 m 企业

^① 因篇幅有限,绿色低碳行业代码与名称详见本刊网站登载的附表1。

的总产值, $Indusize_{ijt}$ 为 i 区县 t 时期 j 行业的总产值, Hb_{it} 为 i 区县 t 时期绿色低碳产业规模。绿色低碳产业规模反映了新质生产力发展中的绿色生产力内涵。

其次, 测算区县高碳排放产业规模。借鉴胡鞍钢等(2015), 根据中国六大高耗能产业识别高碳排放行业,^① 进而基于中国税收调查数据库测算出各区县高碳排放产业规模, 公式如下:

$$Hec_{it} = \sum_q Indusize_{iqt} = \sum_q \sum_m size_{iqmt} \quad (2)$$

其中, q 为高碳排放行业, $size_{iqmt}$ 表示 m 企业总产值, $Indusize_{iqt}$ 为 q 行业总产值, Hec_{it} 为 i 区县 t 时期高碳排放产业规模。

最后, 测算区县产业结构低碳化指标。基于区县绿色低碳产业规模 Hb_{it} 与高碳排放产业规模 Hec_{it} 比值构建产业结构低碳化指标 LCS_{it} , 公式如下:

$$LCS_{it} = Hb_{it}/Hec_{it} = \sum_j \sum_m size_{ijmt} / \sum_q \sum_m size_{iqmt} \quad (3)$$

指标值越高, 表明产业结构低碳化表现越优。绿色低碳产业与高碳排放产业的相对规模变化反映了产业结构低碳化的动态演进过程, 符合碳交易制度下产业结构转型升级的规律。

(二) 模型设定

自2011年中国确定碳交易试点制度起, 相关地区就已感知政策压力, 并开始加速生产模式转变与低碳经济转型(Hu et al., 2020)。因此, 本文以2011年为碳交易试点制度的政策冲击点(Cui et al., 2021), 使用单时点双重差分方法, 估计碳交易试点制度对周边地区产业结构低碳化产生的外部性效应。借鉴张国建等(2019)关于政策溢出效应估计的研究设计思路, 选取碳交易试点地区相邻非试点省份(周边地区)辖区内的区县(包括市辖区、县、县级市、旗、自治县)作为处理组, 将剔除碳交易试点地区后的其他样本作为对照组。^② 具体来说, 根据地理信息筛选出首批碳交易试点地区空间相邻省份内的区县, 并与中国税收调查数据库进行匹配, 识别处理组区县与对照组区县样本, 构建双重差分模型如式(4)所示:

$$\ln LCS_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 Treat_i \times Post_t + \alpha_2 X_{it} + \lambda_t + \mu_i + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

其中, i 表示区县, t 为年份, $\ln LCS_{it}$ 为被解释变量, 即地区产业结构低碳化指标对数值, 主要解释变量为处理组变量 $Treat_i$ 和政策时点变量 $Post_t$ 的交乘项, 即“区县当年是否位于周边地区”。当样本 i 为碳交易试点地区周边省份辖区内的区县, $Treat_i$ 取值为1, 否则为0。当年份在2011年及以后, $Post_t$ 取值为1, 反之为0。 X_{it} 表示控制变量, μ_i 表示个体固定效应, λ_t 为时间固定效应, ε_{it} 为误差项。使用双向固定效应方法(TWFE)对基准模型进行估计。考虑到异方差和序列相关等造成的影响, 采用区县层面聚类稳健标准误。考虑到影响产业结构转型的潜在因素可能包括经济发展、工业化水平、财政支出、投资规模等社会经济变量, 本文将以下变量作为控制变量: 地区生产总值及其二次项、年末总人口数、规模以上工业企业数量、工业总产值占生产总值比重、财政一般预算支出占生产总值比重、固定资产投资总额占生产总值比例。本文将所有控制变量进行对数化处理, 从而缓解异常值和异方差的影响。^③

双重差分模型估计结果的可靠性建立在平行趋势假设上, 即对照组与处理组的被解释变量需在事前保持平行变化趋势。本文通过指标测算结果的比较分析发现, 处理组与对照组的产业结构低碳化指标平均值的变化趋势在碳交易制度发生前并无明显差异, 但在碳交易制度建立后, 处理组产业结构低碳化水平相对降低, 初步说明处理组产业结构低碳化与对照组在事前具有相同的变化

^① 因篇幅所限, 高碳排放行业代码与名称详见本刊网站登载的附表2。

^② 首批碳交易试点地区包括: 北京、天津、上海、重庆、湖北、广东(已涵盖深圳试点); 周边地区包括: 河北、江苏、浙江、安徽、江西、河南、湖南、广西、陕西、四川、贵州。

^③ 因篇幅所限, 本文主要变量定义详见本刊网站登载的附表3。

趋势。^①进一步地,本文采用事件研究法进行平行趋势假设评估与动态效应检验,模型如下:

$$\ln LCS_{it} = \beta_0 + \sum_{f=-4}^5 \varphi_f D_{if} + \beta_1 X_{it} + \lambda_t + \mu_i + \varepsilon_{it} \quad (5)$$

其中, φ_f 的含义为处理组与对照组产业结构低碳化的差异。 f 为碳交易试点制度实施期数, $f \in [-4, 5]$,当 f 取负数时, D_{if} 表示制度实施前第 f 期的哑变量; f 取正数时, D_{if} 表示正式实施后的第 f 期的哑变量; D_{i0} 表示碳交易制度发生当年的哑变量。本文参考孙传旺和魏晓楠(2022)的做法,将政策发生前最早一期($f = -4$)作为基期进行回归分析。若 φ_f 在政策冲击前不显著异于零,则表明无法拒绝平行趋势假设。

(三)数据说明

本文使用2007—2016年中国税收调查数据库提供的微观企业信息测算区县产业结构低碳化指标。中国税收调查数据库提供了中国各地区、各行业、各类型企业的基本信息、财务、税收、生产经营等信息,涵盖企业数量众多,能够较好地反映行业的整体情况,具有权威性和代表性(申广军等,2016)。在对中国税收调查数据库初始样本进行数据清洗后(剔除企业总产值等关键变量数据缺失或小于零、以及公共管理、社会保障和社会组织等行业的样本)得到涵盖2844个区县、62.57万个企业、412.69万个观测值(年份—企业)的非平衡面板数据集。^②

四、基准回归结果

(一)碳交易试点制度外部性效应的识别

本文基于双重差分模型检验碳交易试点制度对周边地区产业结构低碳化的外部性。以产业结构低碳化指标 LCS_{it} 对数值作为基准模型的被解释变量进行双重差分估计。回归结果见表1,列(1)(2)分别汇报了未加入和加入控制变量的估计结果。以列(2)结果为参考,碳交易试点制度使得周边地区的产业结构低碳化水平相较于对照组降低了11%,这表明碳交易制度具有产业结构低碳转型负外部性,验证了本文假说1的理论分析结论。作为一种提升碳排放要素配置效率的生产关系,碳交易试点制度实施后虽有利于试点地区本身低碳转型,促进其绿色生产力发展,但对于周边地区的产业结构低碳化造成负外部性影响。本文的研究结论支持了当前致力于突破行政边界、“由试点推广到全国”的碳交易制度改革符合生产关系适应生产力发展的科学规律。

表1 碳交易制度对周边地区产业结构低碳化的影响

变量	产业结构低碳化	
	(1)	(2)
区县当年是否位于周边地区	-0.101*** (0.036)	-0.110*** (0.038)
控制变量	否	是
县域固定效应	是	是
时间固定效应	是	是
观测值	18408	18408
R ²	0.373	0.375

注:***、**和*分别表示在1%、5%和10%的水平上显著,表1中汇报了剔除试点地区后的估计结果。因此,样本观测值与描述性统计中存在差异。

(二)平行趋势假设评估与动态效应分析

基准回归结果表明,碳交易制度对于周边地区区县产业结构低碳化转型具有负外部性。与对

① 因篇幅所限,处理组与对照组的产业结构低碳化指标变化趋势详见本刊网站登载的附图1。

② 因篇幅所限,主要变量的描述性统计详见本刊网站登载的附表4。

照组相比,周边地区的区县产业结构低碳化在制度发生后显著降低。然而,基准模型估计结果成立的前提是对照组与处理组的被解释变量需保持平行变化趋势。为此,本文以政策发生前最早一期($f=-4$)作为基期,基于模型(5)进行平行趋势假设评估。结果表明,时间虚拟变量估计系数在政策发生前均不显著,无法拒绝平行趋势假设。然而,估计系数在事后的第1期开始显著为负,从第3期起估计系数显著性水平和绝对值明显提高,这说明,碳交易试点制度对于处理组的产业结构低碳化表现出负外部性影响。为了避免基期选择对平行趋势检验结果的干扰,本文又参考龚斌磊(2024),将碳交易制度发生前1期($f=-1$)作为基期进行检验。结果同样表明周边地区产业结构低碳化水平在碳交易试点制度发生前与对照组并未有显著差异,无法拒绝平行趋势假设。^①

(三)稳健性检验

为了排除某些未观测因素对于双重差分估计结果的影响,本文将从模型设定、工具变量法、指标构造和潜在干扰因素四个维度展开稳健性检验。(1)模型设定。由于首批碳交易试点地区正式启动交易的时间不一致,因此,本文构建多时点双重差分模型进行稳健性检验,并借鉴 Callaway & Sant'Anna(2021)提供的方法,得到考虑异质性处理效应后稳健的多时点双重差分估计值。(2)工具变量法。为了避免碳交易试点制度可能产生的内生性问题,本文参考陈诗一和陈登科(2018)、孙传旺等(2019)关于工具变量的构建思想,用各地区2011年之前空气流动系数的平均值 Air 与时间变量 $year$ 交互项 $Air \times year$ 为工具变量进行分析。(3)指标构建。本文替换了在基准回归中关于被解释变量的指标构建方法,以碳排放水平在25%分位数以下行业的总产值与碳排放水平处于75%分位数以上行业的总产值之比作为产业结构低碳化指标,进行稳健性检验。(4)潜在因素干扰。考虑到基准回归估计结果可能受到与碳交易制度相关的政策,以及影响碳交易制度实施的经济社会变量自发趋势的干扰,本文在模型中控制了各地区强制性减排约束与低碳城市试点等相关政策和事前趋势的影响。稳健性检验结果均表明,基准回归结论保持稳健。^②

(四)关于碳交易制度外部性效果的探讨

考虑到产业、要素、技术等因素的溢出具有就近特征(金刚和沈坤荣,2018),碳交易试点制度对周边地区产生的外部性影响可能会随距离的增加而衰减。因此,本文进一步探讨碳交易制度的产业结构低碳化外部性效果在地理空间上是否表现出距离衰减特征。具体地,本文通过地理信息系统筛选,将处理组范围从试点地区相邻省份辖区内所有的区县,缩小到直接与试点地区接壤的区县,进而构建双重差分变量“区县当年是否为碳交易试点接壤地区”,重新评估碳交易试点政策的产业结构低碳化外部性。相较于基准模型的设定,该做法调整了处理组的区域范围,有利于更精准地在区县层面上捕捉与试点地区的接壤关系,强调了地理距离差异对结果可能产生的影响。通过对研究设计中接壤关系颗粒度的调整,能够更突出地在空间尺度上反映碳交易试点制度带来的外部性效果,有助于进一步评估外部性效应的空间地理特征。

表2列(1)回归结果表明,相较于基准回归结果,碳交易试点制度对于接壤地区产业结构低碳化的外部性效应有所加强。外部性加剧的原因可能在于,碳交易试点制度对直接接壤区县的产业布局效应和低碳要素配置效应更为显著。此外,本文又参考余典范等(2023)的做法,基于直接接壤区县的虚拟变量“是否接壤”(当区县直接与碳交易试点接壤时,变量取1,否则取0),引入交互项变量“区县当年是否位于周边地区 \times 是否接壤”进行实证考察。表2列(2)结果说明,交互项变量的估计系数在10%水平上显著为负,这也说明了直接接壤地区的产业结构低碳化水平受到碳交易制度的外部性影响更加明显。

^① 因篇幅所限,平行趋势假设评估结果详见本刊网站登载的附图2。

^② 因篇幅所限,稳健性检验结果详见本刊网站登载的附表5至附表8。

表2 碳交易制度外部性效应的范围探讨

变量	直接接壤区县(<i>near1</i>)		50公里内区县(<i>near2</i>)	
	(1)产业结构低碳化	(2)产业结构低碳化	(3)产业结构低碳化	(4)产业结构低碳化
区县当年是否为碳交易试点接壤地区	-0.131** (0.054)			
区县当年是否位于周边地区×是否接壤		-0.095* (0.055)		
区县当年是否位于试点地区外围50公里内			-0.176*** (0.051)	
区县当年是否位于周边地区×外围50公里内				-0.138*** (0.053)
区县当年是否位于周边地区		-0.101*** (0.039)		-0.102*** (0.039)
控制变量	是	是	是	是
区县固定效应	是	是	是	是
时间固定效应	是	是	是	是
观测值	18408	18408	18408	18408
R ²	0.376	0.375	0.375	0.376

进一步地,本文以地理距离范围划分处理组,考察碳交易试点制度外部性效应的距离衰减特征。由于污染产业集聚现象往往集中在行政边界50公里附近(徐志伟和刘晨诗,2020)。本文根据千分位的经纬度信息,测算各区县距离相邻碳交易试点省份边界的球面距离,进而以外围50公里以内区县为处理组,构造双重差分变量“区县当年是否位于试点地区外围50公里内”进行估计。^①此外,本文还构造了虚拟变量“外围50公里内”(当区县处在碳交易试点地区周边50公里以内时,变量取1,否则取0),引入交互项变量“区县当年是否位于周边地区×外围50公里内”对外部性效应的距离衰减特征进行考察。表2结果表明,列(3)中双重差分变量“区县当年是否位于碳交易试点地区外围50公里内”和列(4)中交互项变量“区县当年是否位于周边地区×外围50公里内”估计系数均在1%水平上显著为负,且前者系数绝对值大于基准回归中的结果。这说明,碳交易试点制度对外围50公里以内区县的产业结构低碳化影响更明显,外部性效应具有距离衰减特征。

五、碳交易试点制度外部性的机制检验

(一)外部性的作用机制分析

基准回归以及多种稳健性检验验证了碳交易试点制度对周边地区产业结构低碳化的外部性效应,那么形成该外部性效应的作用机制又有哪些?理论分析表明,产业布局效应、要素配置效应以及技术创新效应是碳交易制度影响周边地区产业结构低碳化的不同渠道。接下来,本文将承接理论分析逻辑,通过实证模型进行检验。

1.产业布局效应

本文借鉴 Dechezleprêtre et al.(2022),构建识别周边地区在碳交易试点制度实施前后产业布局变化情况的指数 $Transf_{it}$ 。首先,根据 i 区县在 t 年份碳交易制度控排行业规模^②占全国份额 q_{it} ,以及区县经济规模占全国份额 g_{it} ,测算出剔除经济发展水平后的产业相对规模 q_{it}/g_{it} ;其次,基于2011年

① 除了以50公里为临界值外,对于以100公里、150公里、200公里为临界值划分处理组的实证结果同样表明,碳交易制度的外部性效应呈现出距离衰减特征。

② 涵盖火电、热力、水泥、石化、钢铁、建筑等高耗能行业。对企业规模按行业进行加总,从而得到行业规模。

前 i 区县 q_{it} 的平均值 \bar{q}_i 和 g_{it} 的平均值 \bar{g}_i ，测算得到 \bar{q}_i/\bar{g}_i ；最后，以 q_{it}/g_{it} 和 \bar{q}_i/\bar{g}_i 的差值得到产业布局指数，即 $Transf_{it} = q_{it}/g_{it} - \bar{q}_i/\bar{g}_i$ 。该指数的构造是以 2011 年前平均值作为对照，既可以在一定程度上缓解事前趋势干扰，又能够捕捉制度发生前后行业规模相对变化情况。 $Transf_{it}$ 值越大，表明 i 区县 t 年份控排行业集聚程度越高。

实证回归结果见表 3 Panel A 列 (1)，双重差分变量“区县当年是否位于周边地区”在 5% 水平上显著为正。这意味着，碳交易试点制度提升了周边地区重点控排行业的集聚程度。在此基础上，本文借鉴郭俊杰等 (2024) 的做法，采用分组回归方法检验产业布局效应对产业结构低碳化的作用机制，验证逻辑在于：若碳交易制度通过产业布局效应抑制周边地区产业结构低碳化，那么对于碳交易制度实施后产业布局指数值大于政策发生前的样本，其产业结构低碳化受到的负外部性影响可能会更明显。具体而言，根据政策实施后 $Transf_{it}$ 指标均值与政策发生前指标均值的相对大小，将样本分为产业布局指数提高组 (事后均值 > 事前均值) 和产业布局指数未提高组 (事后均值 ≤ 事前均值)，对基准回归模型进行分组检验。表 3 Panel A 列 (2)(3) 结果表明，碳交易制度对于周边地区产业结构低碳化的负外部性仅存在于产业布局指数提高组，但在未提高组并不显著。表 3 Panel A 结果说明产业布局效应是碳交易制度阻碍周边地区产业结构低碳化的机制因素。^①

2. 要素配置效应

根据前文理论分析结论，要素配置效应是碳交易试点制度产生外部性的作用机制。试点制度的实施可能加剧周边地区的要素价格扭曲，降低低碳要素配置效率，进而阻碍产业结构绿色低碳转型。鉴于此，本文参考并改进 Bartelsman et al. (2013) 的做法，根据企业低碳全要素生产率和要素份额，采用 OP 协方差法测算区县低碳要素配置效率指标 ($GEfficient_{it}$)，构建过程如下：首先，测算区县一行业层面的低碳要素配置效率 GE_{ijt} ，如式 (6) 所示：

$$GE_{ijt} = \sum_f (\theta_{ijt} - \bar{\theta}_{ijt}) \times (GP_{ijt} - \bar{P}_{ijt}) \quad (6)$$

其中， θ_{ijt} 为 i 区县 j 行业 f 企业 t 年的资本要素规模占 i 区县 j 行业的份额， GP_{ijt} 为 i 区县 j 行业 f 企业 t 年的低碳全要素生产率^②， \bar{P}_{ijt} 和 $\bar{\theta}_{ijt}$ 分别为 GP_{ijt} 和 θ_{ijt} 在 i 区县 j 行业 t 年的简单算术平均值。其次，以 i 区县 t 年内各行业劳动力占该区县劳动力总量份额 (Θ_{ijt}) 为权重，将区县一行业层面低碳要素配置效率 GE_{ijt} 加总，得到区县层面低碳要素配置效率指标 $GEfficient_{it}$ ，见式 (7)：

$$GEfficient_{it} = \sum_j \Theta_{ijt} \times GE_{ijt} \quad (7)$$

指标值越大，表明低碳要素配置状态越优。

本文基于 $GEfficient_{it}$ 指标，实证考察碳交易制度的要素配置效应。根据表 3 Panel B 列 (1) 结果，双重差分变量“区县当年是否位于周边地区”估计系数在 1% 水平上为负。说明碳交易制度降低了周边地区的低碳要素配置效率。同时，本文根据 $GEfficient_{it}$ 指标在制度实施前后的变化情况，将样本分为要素配置效率降低组和要素配置效率未降低组 (事后均值 ≥ 事前均值) 进行分组回归分析，检验要素配置效率对周边地区产业结构低碳化的机制作用。理论上，要素配置效率降低组的产业结构低碳化受到的外部性影响更为显著。表 3 Panel B 列 (2)(3) 结果表明，在要素配置效率降低组中，“区县当年是否位于周边地区”估计系数在 5% 水平上显著为负，而在要素配置效率未降低组中，“区县当年是否位于周边地区”估计系数不显著。该结果说明，碳交易制度降低了周边地区要素配置效率，进而阻碍产业结构低碳化转型。

^① 本文也通过实证检验发现，碳交易制度未影响试点地区规制行业企业数量，说明产业布局效应并非由地区间的产业转移而产生。

^② 将企业碳排放、劳动、资本三种要素同时作为生产投入，采用 OP 法估计企业低碳全要素生产率 GP_{ijt} 。

表3 作用机制检验

Panel A : 产业布局效应检验			
变量	产业布局效应	产业结构低碳化	
		产业布局指数提高组	产业布局指数未提高组
	(1)	(2)	(3)
区县当年是否位于 周边地区	0.252** (0.106)	-0.161** (0.069)	-0.041 (0.046)
观测值	18408	7770	10638
R ²	0.293	0.418	0.345
Panel B : 要素配置效应检验			
变量	低碳要素配置效率	产业结构低碳化	
		要素配置效率降低组	要素配置效率未降低组
	(1)	(2)	(3)
区县当年是否位于 周边地区	-0.116*** (0.029)	-0.184** (0.073)	-0.056 (0.045)
观测值	18408	6380	12028
R ²	0.298	0.414	0.353
Panel C : 技术创新效应检验			
变量	技术创新	产业结构低碳化	
		技术创新水平提高组	技术创新水平未提高组
	(1)	(2)	(3)
区县当年是否位于 周边地区	0.440*** (0.055)	-0.049 (0.047)	-0.176*** (0.066)
观测值	15354	12386	6022
R ²	0.464	0.308	0.452
控制变量	是	是	是
区县固定效应	是	是	是
时间固定效应	是	是	是

注:(1)表3中所有回归模型均加入了控制变量、区县固定效应与时间固定效应;(2)由于技术创新效应的变量含义为专利对数增长率,因此,表3 Panel C 汇报的样本观测值小于基准回归结果。

3. 技术创新效应

根据本文假说4a,碳交易制度的技术创新效应可以缓解其对周边地区产业结构低碳化转型的负外部性效应。碳交易制度促进试点地区的技术创新(Aghion et al., 2016),而知识和技术会随着人员往来、网络信息交流等途径外溢至邻近地区(Wu & Liu, 2021),影响周边地区产业结构(郭凯明和罗敏, 2021),推动绿色低碳行业对传统高碳行业的逐步替代。

因此,本文从技术创新视角考察碳交易试点制度对周边地区产业结构低碳化的影响机制。借鉴Buerger et al.(2012),以区县层面专利数量对数增长率衡量地区技术创新水平。表3 Panel C列(1)结果表明,“区县当年是否位于周边地区”回归系数在1%水平上表现为正,碳交易制度对周边地区产生技术创新效应。进一步地,根据碳交易制度实施后与发生前技术创新水平的相对大小,将全样本分为技术创新水平提高组(事后均值>事前均值)和技术创新水平未提高组(事后均值≤事前均值),进行分组回归分析。在表3 Panel C列(2)中,“区县当年是否位于周边地区”估计系数未通过10%水平的显著性检验,列(3)中,“区县当年是否位于周边地区”估计系数显著为负,这说明碳交易制度仅对技术创新水平未提高组的产业结构低碳化产生负外部性影响。表3 Panel C验证了碳交易制度的技术创新效应有利于缓解对周边地区产业结构低碳化的负外部性,假说4a得到支持。值得注意的是,技术

创新效应部分抵消了由产业布局集聚和要素配置效率下降带来的负外部性,但不足以完全消解或逆转前述效应,因此碳交易试点制度对周边地区产业结构低碳化的净效应整体上表现为负向外溢。

(二)外部性的调节机制分析

碳价水平的提高可能加剧碳交易试点制度的产业结构低碳化负外部性。随着碳价上升,试点地区企业面临的减排压力和合规成本不断增加,部分高耗能企业会加快将高碳排放的生产环节布局至周边地区。换句话说,碳交易试点地区碳价越高,周边地区因碳交易试点制度而形成的高耗能行业产业布局效应就有可能越明显,受产业结构低碳化外部性的影响程度也会越突出。此外,加强周边地区环境规制力度可以缓解产业结构低碳化负外部性。当周边地区环境规制较强时,高碳排放企业难以延续原有的粗放式生产模式,在要素市场中对资本、劳动等生产要素的资源吸附能力相对较弱,从而能够减轻对绿色低碳行业发展的潜在冲击。换言之,周边地区环境规制力度可能是缓解碳交易试点制度产业结构低碳化负外部性的有效调节机制。鉴于此,本文构建实证模型如式(8)和式(9)进行回归分析。

$$\ln LCS_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 Treat_{it} \times Post_t \times Price_{it} + \alpha_2 Treat_{it} \times Post_t + \alpha_3 Price_{it} + \alpha_4 X_{it} + \lambda_t + \mu_i + \varepsilon_{it} \quad (8)$$

$$\ln LCS_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 Treat_{it} \times Post_t \times Aim_{it} + \alpha_2 Treat_{it} \times Post_t + \alpha_3 Aim_{it} + \alpha_4 X_{it} + \lambda_t + \mu_i + \varepsilon_{it} \quad (9)$$

$Price_{it}$ 为*i*地区*t*年份相邻试点地区碳市场平均碳价(简称为碳价格),数据来源于中国碳排放权交易网; Aim_{it} 为*i*地区*t*年份环境规制力度(简称为规制力度),参考王红建等(2017),以各地区“十一五”“十二五”“十三五”期间节能减排目标的平均值作为环境规制力度代理变量。变量“区县当年是否位于周边地区×碳价格”和变量“区县当年是否位于周边地区×规制力度”为本文重点关注的交互项变量,以期分析碳价格和环境规制力度对外部性效应的调节机制。回归结果见表4。

表4 调节机制分析结果

变量	相邻试点地区碳市场平均碳价水平		周边地区环境规制力度	
	(1) 产业结构低碳化	(2) 产业结构低碳化	(3) 产业结构低碳化	(4) 产业结构低碳化
区县当年是否位于周边地区×碳价格	-0.0275** (0.0125)	-0.0292** (0.0125)		
区县当年是否位于周边地区×规制力度			0.190** (0.0766)	0.214** (0.0847)
区县当年是否位于周边地区	-0.0590 (0.0368)	-0.0485 (0.0372)	-1.0943*** (0.412)	-1.215*** (0.456)
常数项	-0.215 (0.737)	257.174 (246.282)	-1.0265 (0.960)	485.558 (390.792)
控制变量	是	是	是	是
前定变量	否	是	否	是
区县固定效应	是	是	是	是
时间固定效应	是	是	是	是
观测值	18408	18408	15921	15921
R ²	0.375	0.376	0.371	0.372

表4列(1)(2)分别汇报了模型(8)的估计结果,以列(2)结果为参考,交互项变量“区县当年是否位于周边地区×碳价格”估计系数在5%水平上显著为负,表明试点地区碳价越高,碳交易机制对周边地区产业结构低碳化的外部性作用越明显。模型(9)回归结果见列(3)(4),以列(4)加入前定控制变量后的结果为参考。其中,变量“区县当年是否位于周边地区×规制力度”估计系数在5%水平上显著为正,这说明提升周边地区环境规制力度可以降低碳交易制度对其产业结构低碳化负外部性影响。

六、进一步研究

(一) 碳交易制度对于产业低碳效率的外部性影响

基准回归结果从产业结构层面验证了碳交易试点制度对产业绿色转型存在显著外部性,而机制分析进一步揭示了这种外部性主要通过产业布局、要素配置和技术创新三条路径发挥作用。尤其在技术创新效应方面,碳交易试点制度带来周边地区技术创新水平提升后,理论上能够有效降低企业能源消费强度,进而提升行业整体的碳排放效率。这表明,碳交易试点制度可能通过技术扩散效应和技术示范效应,提高周边地区行业内部单位碳排放的经济产出,即优化了碳排放要素生产效率(简称“碳排放效率”)。基于碳排放效率的角度对碳交易制度外部性效应进行考察,不仅有助于深化对其跨区域影响机制的理解,而且有利于从行业层面为碳交易制度深化改革提供更加细致和准确的依据。为了实证检验碳交易试点制度对周边行业碳排放效率的影响效应,本文首先测算了区县行业层面(四位代码行业)的产业低碳效率指标 LCE ,然后建立三重差分模型进行实证考察,模型如下:

$$\ln LCE_{ijt} = \alpha_0 + \alpha_1 Treat_i \times Post_t \times Cind_j + \alpha_2 Treat_i \times Post_t + \alpha_3 Post_t \times Cind_j + \alpha_4 Treat_i \times Cind_j + \alpha_5 Post_t + \alpha_6 Treat_i + \alpha_7 Cind_j + \alpha_8 X + \lambda_t + \delta_j + \mu_i + \varepsilon_{ijt} \quad (10)$$

其中, LCE_{ijt} 为产业低碳效率指标, i 为地区, j 为行业, t 为年份, $Treat_i \times Post_t \times Cind_j$ 是三重差分变量(即“区县当年是否位于周边地区×控排行业”), $Cind_j$ 为各碳交易试点地区的重点控排行业(即“控排行业”)。 $Post_t$ 为碳交易政策时间虚拟变量, $Treat_i$ 是处理组(周边区县)虚拟变量, λ_t 、 δ_j 、 μ_i 分别为时间、行业、区县固定效应, X 为控制变量向量,包括区县层面控制变量和行业层面控制变量(生产规模、存货规模、资产规模、税收补贴等)。产业低碳效率指标 LCE_{ijt} 的构建过程如下:

首先,计算企业碳排放生产率 CE_{ijmt} ,见式(11)。其中, Y_{ijmt} 为企业 m 的总产值, C_{ijmt} 表示企业 m 碳排放总量, CE_{ijmt} 越高表明企业单位碳排放的产出越高;企业碳排放根据中国税收调查数据库中披露的企业能源消费数据(即煤炭、石油、天然气、电力消费量),结合相应的能源碳排放系数进行测算。

$$CE_{ijmt} = Y_{ijmt} / C_{ijmt} \quad (11)$$

其次,根据企业 m 相对于所在区县行业总产值的比重,计算权重 w_{ijmt} ,见式(12),作为从企业层面加总测算行业层面碳排放效率指标的权重,从而考虑企业规模对于指标测度结果的影响。最后,以 w_{ijmt} 为权重,测算 i 区县 j 行业 t 年份的企业碳排放效率加权平均值,得到产业低碳效率指标 LCE_{ijt} ,见式(13)。实际上, LCE_{ijt} 反映了 i 区县 j 行业 t 年份的碳排放生产效率水平,指标越高表明该行业碳排放生产效率越高。

$$w_{ijmt} = Y_{ijmt} / \sum_m Y_{ijmt} \quad (12)$$

$$LCE_{ijt} = \sum_m w_{ijmt} \times CE_{ijmt} \quad (13)$$

回归结果见表5列(1),变量“区县当年是否位于周边地区×控排行业”的估计系数在10%水平上为正,这表明相比于非控排行业,碳交易试点制度对周边地区控排行业的产业低碳效率水平具有正向作用。^①虽然碳交易制度在区县层面对产业结构低碳化产生了负外部性,但在行业层面对控排行业碳排放效率表现出积极影响。

(二) 高技术行业的产业低碳效率

前文的实证分析表明,碳交易制度促进周边地区控排行业的产业低碳效率提升,这可能与技术

^① 本文也针对不同的碳交易制度重点控排行业进行异质性检验,结果表明,周边地区化学原料和化学制品制造业、非金属矿物制品业、通用设备制造业、专用设备制造业、计算机、通信和其他电子设备制造业等行业低碳效率水平因碳交易制度而显著提升,但石油和天然气开采业、农副食品加工业等行业碳排放效率则显著降低。此外,本文还构建三重差分模型验证了碳交易制度对试点地区未纳入碳交易市场控排企业的碳排放效率也表现出显著的正向溢出效应。

创新效应有关。为验证这一猜想,本文进一步实证讨论周边地区高技术行业与一般行业由碳交易制度导致的产业低碳效率的变化,间接考察技术创新的作用。具体来说,选择碳交易控排行业中的通用设备制造业、专用设备制造业、汽车制造业、铁路、船舶、航空航天和其他运输设备制造业等作为高技术控排行业,其他行业为一般控排行业。引入虚拟变量“高技术行业”(当样本属于高技术控排行业时,变量取1,否则为0)和“一般行业”(当样本属于一般控排行业时,变量取1,反之取0),替换模型(10)中的“控排行业”变量进行三重差分检验。表5汇报了回归检验结果,变量“区县当年是否位于周边地区×高技术行业”的估计系数在5%水平上显著为正,这说明碳交易政策促进了高技术行业的产业低碳效率。但变量“区县当年是否位于周边地区×一般行业”的估计系数未通过10%的显著性检验,碳交易制度对一般行业的产业低碳效率没有发挥明显的作用。技术创新水平越高,碳交易制度对产业低碳效率的正外部性效应越为明显,假说4b得到验证。

表5 三重差分结果

变量	(1)	(2)	(3)
	产业低碳效率	产业低碳效率	产业低碳效率
区县当年是否位于周边地区×控排行业	0.057* (0.029)		
区县当年是否位于周边地区×高技术行业		0.067** (0.034)	
区县当年是否位于周边地区×一般行业			0.003 (0.033)
区县当年是否位于周边地区	0.132*** (0.030)	0.132*** (0.028)	0.149*** (0.029)
区县控制变量	是	是	是
行业控制变量	是	是	是
区县固定效应	是	是	是
行业固定效应	是	是	是
时间固定效应	是	是	是
观测值	426166	426166	426166
R ²	0.267	0.266	0.267

本文研究发现,碳交易试点制度能够通过技术创新效应提升高技术控排行业的碳排放生产效率,但在一般控排行业中并不显著。该结果说明,在碳交易制度的作用下,高技术控排行业具有更突出的低碳转型表现。这意味着,在稳步扩大碳市场覆盖范围和交易主体规模的过程中,应充分考虑行业间的异质性,特别要重视高技术行业(尤其是数据中心等数字基础设施行业)的有序纳入,从而发挥技术创新效应对整体行业碳排放生产效率的优化作用。

七、结论与政策建议

党的二十届三中全会强调“要完善生态文明基础体制,健全生态环境治理体系,健全绿色低碳发展机制”。中共中央、国务院《印发的关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见》(中发〔2024〕24号)明确提出“健全资源环境要素市场化配置体系”“推进全国碳排放权交易市场和温室气体自愿减排交易市场建设”。2025年8月,中共中央办公厅、国务院办公厅发布《关于推进绿色低碳转型加强全国碳市场建设的意见》,明确指出碳市场是利用市场机制积极应对气候变化、加快经济社会发展全面绿色转型的重要政策工具。中国碳交易制度正处于“从试点到全国”的过渡阶段,试点碳

市场与全国碳市场并行。探究试点碳市场对全国范围尤其是周边地区产业绿色转型的外部性效应不仅有助于为我国碳交易制度的深化改革提供理论支持,也能够为其他类型的资源环境要素市场建设贡献政策参考。

本文研究表明,中国的碳交易试点制度对于周边地区产业结构低碳化转型产生了负外部性效应。碳交易试点制度导致周边地区的区县产业结构低碳化水平降低了11%。究其原因,碳交易试点制度推动了周边地区重点规制行业的相对规模扩张,并削弱了区域低碳要素配置效率,即通过“产业布局效应”和“要素配置效应”两种作用机制,阻碍周边非试点地区产业结构低碳转型。然而,碳交易试点制度也可以在一定程度上激发周边地区的技术创新活力,提高企业的科技创新水平,从而通过“技术创新效应”缓解产业结构低碳化的负外部性影响。值得一提的是,强化周边地区环境规制力度有助于减少碳交易制度负外部性的不利影响,而试点地区碳价水平的上升则可能加剧负外部性效应。进一步研究发现,与其他行业相比,碳交易试点制度会提高周边地区高技术行业碳排放效率。

研究结论验证了碳交易试点制度在周边地区产业结构低碳化转型中的负外部性效应和内在机制,发现了区域间因制度实施而产生的低碳转型不平衡问题,并揭示出跨区域制度协同与生态要素流动的体制瓶颈,为进一步打破生态要素市场分割、推动全国统一大市场建设贡献了新的学理智慧。同时,本文研究也为新型生产关系如何适应新质生产力的发展提供了机制证据。具体而言,新质生产力的形成离不开技术、资本和资源环境等生产要素的优化配置。碳交易试点制度外部性所揭示的产业布局效应和要素配置效应,本质上反映了生产要素在不同区域流动过程中的体制壁垒与市场分割。如果碳交易试点体系未能向全国统一碳市场过渡的话,则会产生政策洼地,对非试点地区的绿色低碳转型形成负外部性,最终可能阻碍新质生产力的形成与发展。基于主要研究结论,本文提出以下三点政策建议。

第一,打破要素市场区域壁垒,推动资源环境要素市场化改革。2023年7月,全国生态环境保护大会提出,要推动有效市场和有为政府更好结合,把碳排放权、用能权、用水权、排污权等资源环境要素一体纳入要素市场化配置改革总盘子。碳排放权交易试点制度是我国在资源环境要素市场化配置改革中先行先试的良好实践,可以为全国统一碳市场建设探索经验。然而,本文研究结论表明,碳交易试点制度不利于周边地区的产业结构低碳化转型,这种外部性效应反映制度摩擦导致的要素市场分割及其带来的区域绿色发展不平衡问题(刘志彪和孔令池,2021)。我国在推动“由点及面”的资源环境要素市场化改革过程中,应该充分重视区域市场交易试点制度的潜在外部性影响,并重点识别各类要素市场中存在的行政区域制度性分割(马草原等,2023)。具体而言,可以借鉴碳交易制度的实践经验(加快从区域试点探索过渡到全国统一运行),厘清各地区资源环境要素的市场现状,以统一健全的规则体系与制度安排推进资源环境要素的市场化改革,避免在绿色低碳转型领域由于要素分割产生的空间负外部性。因此,建议中央政府通过合理的制度设计(如统一的市场交易规则、绿色政绩考核约束和环境信息披露),处理好“央—地”间的委托代理关系,加大对碳排放权、用能权、用水权、排污权等资源环境要素市场割裂现象的监管和处罚力度,激发地区间绿色低碳转型的内生增长动力。

第二,发挥技术创新作用,促进新质生产力发展。资源环境要素市场的体制摩擦与行政壁垒在短期内难以被完全消除,碳交易制度在区域层面的产业结构低碳化负外部性可能阻碍新质生产力的形成与发展。本文研究表明,技术创新是缓解碳交易制度负外部性的关键路径。当前,中国碳交易制度处于过渡阶段,全国统一市场与地方试点市场并行,导致试点政策对周边地区产业结构低碳化的负外部性仍存在。换言之,实现绿色低碳转型,需要依靠技术创新效应在产业链、供应链和价值链中发挥作用,从根本上提升重点行业的碳排放效率,推动绿色生产力发展。具体而言,建议政策制定部门加大对技术创新的制度化支持力度。一方面,应充分利用大数据、人工智能、物联网等现代信息技术,建立全国性技术创新与推广平台,推动绿色低碳技术在更大范围内实现共享和扩

散。通过加强与企业、行业协会和金融机构的合作,可以加快绿色技术创新成果在各类产业中的转化与应用。另一方面,应积极培育和扶持一批具有示范效应的低碳技术应用项目,以点带面,形成可复制、可推广的经验模式,吸引更多主体参与到绿色低碳转型中来,尤其是针对钢铁、化工、电力等低碳化难度较高的传统行业。同时,还应重视前瞻性绿色技术研发的战略引导,加大对可再生能源、碳捕集与封存、生态修复等绿色低碳领域的研发资金投入。通过税收优惠、绿色金融等政策工具增加企业创新活力,形成更加稳固的绿色技术研发生态。此外,还应鼓励跨区域、跨行业的技术协同创新,推动不同地区在技术研发与应用上的优势互补,打破区域间技术壁垒,从而在更大范围内提升整体低碳效率。依据《关于推进绿色低碳转型加强全国碳市场建设的意见》,有计划分步骤地扩大实施范围是当前碳市场的重要政策导向。随着信息技术和人工智能的广泛应用以及对算力资源的需求增长,近年来,数据中心等数字基础设施的能源消耗问题受到了社会各界的关注。未来,在扩大碳市场覆盖范围和交易主体的过程中,要特别重视对于高技术行业低碳转型的引导与监管,避免和其他行业形成“一刀切”的控排规则,加强碳交易市场有针对性的制度设计。

第三,加快全国碳市场建设,降低区域间制度性摩擦。本文研究表明,碳交易试点制度对周边地区产业结构低碳化产生了负外部性影响,并且区域间的产业布局效应和低碳要素配置效应是主要的作用机制。加快碳交易制度过渡到全国统一的碳市场,是解决试点型碳市场负外部性效应的有效途径。然而,地区间政府监管能力、经济发展程度的差异会使得碳交易制度的标准难以规范(郑云坚和吴施娟,2022),即便在全国碳市场制度下,也可能存在与试点型碳市场制度相似的外部性效应。制定统一的碳交易规则与标准、降低区域间制度性摩擦,是推动全国碳市场建设的关键环节。首先,建议基于国家层面制定统一的市场规则,减少地区间制度性差异。明确碳排放权的分配、交易、价格形成机制等关键内容,出台相关法律文件,从而确保全国碳市场制度的合法性、合规性与执行力,要求各地在执行过程中遵循统一的法律框架和规定,以保证全国市场的规则得到有效落实。其次,建议中央政府促进地区间碳市场的协调发展,以解决重点领域的实际问题。地方政府针对重点控排行业的生产布局、碳排放权交易的价格形成、绿色低碳技术的研发创新等方面,加强信息共享和协同合作,从而减少地区之间的政策冲突,形成有效的制度性探索与监督管理经验,避免地区间的不平衡发展所带来的空间外部性问题。最后,加快落实《关于推进绿色低碳转型加强全国碳市场建设的意见》的总体要求,有计划分步骤扩大实施范围、扩展参与主体,营造更加公平公开透明的市场环境,努力实现碳排放资源配置效率最优化和效益最大化,推动传统产业深度转型,培育发展新质生产力,激发全社会绿色低碳发展内生动力,为积极稳妥推进碳达峰碳中和、建设美丽中国提供重要支撑。

参考文献

- 陈诗一、陈登科,2018:《雾霾污染、政府治理与经济高质量发展》,《经济研究》第2期。
- 陈创练、庄泽海、林玉婷,2016:《金融发展对工业行业资本配置效率的影响》,《中国工业经济》,第11期。
- 董直庆、王辉,2019:《环境规制的“本地—邻地”绿色技术进步效应》,《中国工业经济》第1期。
- 方敏,2020:《基本经济制度是所有制关系、分配关系、交换关系的有机统一》,《政治经济学评论》第2期。
- 龚斌磊、张启正、袁菱苒、余泳泽,2024:《撤县设市、产业基础与县域农业发展》,《管理世界》第7期。
- 郭俊杰、方颖、郭晔,2024:《环境规制、短期失败容忍与企业绿色创新——来自绿色信贷政策实践的证据》,《经济研究》第3期。
- 郭凯明、罗敏,2021:《有偏技术进步,产业结构转型与工资收入差距》,《中国工业经济》第3期。
- 胡鞍钢、郑云峰、高宇宁,2015:《中国高耗能行业真实全要素生产率研究(1995—2010)——基于投入产出的视角》,《中国工业经济》第5期。
- 胡珺、黄楠、沈洪涛,2020:《市场激励型环境规制可以推动企业技术创新吗?——基于中国碳排放权交易机制的自然实验》,《金融研究》第1期。
- 黄群慧、盛方富,2024:《新质生产力系统:要素特质、结构承载与功能取向》,《改革》第2期。
- 金刚、沈坤荣,2018:《以邻为壑还是以邻为伴:环境规制执行互动与城市生产率增长》,《管理世界》第12期。

- 贾智杰、林伯强、温师燕,2023:《碳排放权交易试点与全要素生产率——兼论波特假说、技术溢出与污染天堂》,《经济学动态》第6期。
- 刘志彪、孔令池,2021:《从分割走向整合:推进国内统一大市场建设的阻力与对策》,《中国工业经济》第8期。
- 刘满凤、程思佳,2022:《碳排放权交易促进地区产业结构优化升级了吗?》,《管理评论》第7期。
- 林伯强、孙传旺,2011:《如何在保障中国经济增长前提下完成碳减排目标》,《中国社会科学》第1期。
- 马草原、孙思洋、张昭,2023:《中国地区间要素市场分割的识别与影响因素分析》,《金融研究》第2期。
- 欧阳晓灵、张骏豪、杜刚,2022:《环境规制与城市绿色技术创新:影响机制与空间效应》,《中国管理科学》第12期。
- 申广军、陈斌开、杨汝岱,2016:《减税能否提振中国经济?——基于中国增值税改革的实证研究》,《经济研究》第11期。
- 史丹、王俊杰,2016:《基于生态足迹的中国生态压力与生态效率测度与评价》,《中国工业经济》第5期。
- 孙博文,2024:《面向中国式现代化的数字生态文明建设的三重逻辑》,《改革》第10期。
- 孙传旺、罗源、姚昕,2019:《交通基础设施与城市空气污染——来自中国的经验证据》,《经济研究》第8期。
- 孙传旺、魏晓楠,2022:《市场激励型环境规制、政府补贴与企业绩效》,《财政研究》第7期。
- 王红军、汤泰劫、宋献中,2017:《谁驱动了企业环境治理:官员任期考核还是五年规划目标考核》,《财贸经济》第11期。
- 王海、郭冠宇、尹俊雅,2025:《在转型中向“绿”而行:产业结构调整与企业绿色创新》,《数量经济技术经济研究》第1期。
- 徐志伟、刘晨诗,2020:《环境规制的“灰边”效应》,《财贸经济》第1期。
- 余典范、蒋耀辉、张昭文,2023:《中国碳排放权交易试点政策的创新溢出效应——基于生产网络的视角》,《数量经济技术经济研究》第3期。
- 于向宇、陈会英、李跃,2021:《基于合成控制法的碳交易机制对碳绩效的影响》,《中国人口·资源与环境》第4期。
- 袁航、朱承亮,2018:《国家高新区推动了中国产业结构转型升级吗?》,《中国工业经济》第8期。
- 张国建、佟孟华、李慧、陈飞,2019:《扶贫改革试验区的经济增长效应及政策有效性评估》,《中国工业经济》第8期。
- 张伟、朱启贵、高辉,2016:《产业结构升级、能源结构优化与产业体系低碳化发展》,《经济研究》第12期。
- 张可云、李晨,2019:《区域派生理论与经验研究进展》,《经济学动态》第12期。
- 郑云坚、吴施娟:《我国碳排放权交易管理沿革与发展探析》,《中国行政管理》,2022年第2期。
- Aghion, P., A. Dechezleprêtre, D. Hemous, R. Martin, and J. van Reenen, 2016, “Carbon Taxes, Path Dependency, and Directed Technical Change: Evidence from the Auto Industry”, *Journal of Political Economy*, 124(1), 1—51.
- Bartelsman, E., J. Haltiwanger, and S. Scarpetta, 2013, “Cross-Country Differences in Productivity: The Role of Allocation and Selection”, *American Economic Review*, 103(1), 305—334.
- Buerger, M., T. Broekel, and A. Coad, 2012, “Regional Dynamics of Innovation: Investigating the Co-evolution of Patents, Research and Development (R&D), and Employment”, *Regional Studies*, 46(5), 565—582.
- Callaway, B., and P. H. Sant’Anna, 2021, “Difference-in-Differences with Multiple Time Periods”, *Journal of Econometrics*, 225(2), 200—230.
- Cui, J., C. Wang, J. Zhang, and Y. Zheng, 2021, “The Effectiveness of China’s Regional Carbon Market Pilots in Reducing Firm Emissions”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(52), e2109912118.
- Dechezleprêtre, A., C. Gennaioli, R. Martin, M. Muûls, and T. Stoerk, 2022, “Searching for Carbon Leaks in Multinational Companies”, *Journal of Environmental Economics and Management*, 112(3), 102601.
- Gibson, M., 2019, “Regulation-Induced Pollution Substitution”, *Review of Economics and Statistics*, 101(5), 827—840.
- Hsu, P. H., K. Li, and C. Y. Tsou, 2023, “The Pollution Premium”, *Journal of Finance*, 78(3), 1343—1392.
- Hu, Y., S. Ren, Y. Wang, and X. Chen, 2020, “Can Carbon Emission Trading Scheme Achieve Energy Conservation and Emission Reduction? Evidence from the Industrial Sector in China”, *Energy Economics*, 85(1), 104590.
- Trantidis, A., 2024, “Government Externalities”, *Public Choice*, 201, (3—4) 1—19.
- Venmans, F., J. Ellis, and D. Nachtigall, 2020, “Carbon Pricing and Competitiveness: Are They at Odds?”, *Climate Policy*, 20(9), 1070—1091.
- Wu, N., and Z. K. Liu, 2021, “Higher Education Development, Technological Innovation and Industrial Structure Upgrade”, *Technological Forecasting and Social Change*, 162(1), 120400.
- Zhu, J., Y. Fan, X. Deng, and L. Xue, 2019, “Low-carbon Innovation Induced by Emissions Trading in China”, *Nature communications*, 10(1), 4088.
- Zheng, Y. M., Q. Lv, and Y. D. Wang, 2022, “Economic Development, Technological Progress, and Provincial Carbon Emissions Intensity: Empirical Research Based on the Threshold Panel Model”, *Applied Economics*, 54(30), 3495—3504.

Carbon Emissions Trading System , Industrial Green Transition and Externalities

SUN Chuanwang^{a,b}, CHEN Zhilong^a and SUN Bowen^c

(a: School of Economics, Xiamen University;

b: MOE Key Laboratory of Econometrics, Xiamen University;

c: Institute of Quantitative and Technological Economics, Chinese Academy of Social Sciences)

Summary: Green development constitutes the foundation of high-quality growth, and the green transformation of industrial structures is essential for fostering and advancing new quality productive forces. The carbon emissions trading system not only serves as an institutional guarantee for promoting green and low-carbon transition but also represents a new form of production relations which is aligned with the evolution of new quality productive forces. China's pilot carbon emissions trading program, launched in 2011, was designed to drive industrial green transformation. However, the externality effects of the carbon emissions trading system on regional industrial green transformation, particularly in non-pilot areas surrounding the pilots, as well as the underlying mechanisms, remain insufficiently explored both empirically and theoretically.

This paper, through the construction of original indicators and a novel empirical design, finds that the pilot carbon emissions trading system generates negative externalities for the low-carbon transformation of industrial structures in neighboring non-pilot areas. Drawing on the China Tax Survey Database, the study develops a county-level index of low-carbon industrial structure and applies a counterfactual difference-in-differences framework. The results indicate that the carbon emissions trading system significantly impedes the low-carbon transformation of industrial structures in counties located in adjacent provincial-level regions, with the strongest effects observed in those directly bordering pilot areas or within a 50-kilometer radius. Moreover, the magnitude of this negative effect is shaped by the regulatory intensity of surrounding regions and by carbon price levels in pilot markets.

Building on the development logic of new quality productive forces, the paper further uncovers three key mechanisms underlying these externalities: industrial layout adjustment, resource allocation efficiency, and technological innovation. To probe into the role of innovation, the study constructs low-carbon efficiency measures across industries and employs a triple-difference approach. The findings indicate that while the carbon emissions trading system enhances low-carbon efficiency in high-tech regulated industries, it produces no significant changes in other regulated sectors.

By focusing on the externalities of the carbon emissions trading system in driving industrial green transformation, this research provides both theoretical insights and empirical evidence to inform the expansion of China's carbon market from regional pilots to a nationwide system. It also offers valuable references for the construction of a unified national ecological market, the cultivation of new quality productive forces, and the acceleration of China's green transformation.

The marginal contributions and potential innovations of this paper lie in three main aspects. First, unlike existing literature that predominantly focuses on the local effects of carbon emissions trading pilots, this paper shifts attention to the externalities on the low-carbon transformation of industrial structures in neighboring counties. This paper constructs a low-carbon industrial structure index that incorporates both micro-level firm information and macro-level industrial evolution, thereby better capturing the substitution process of green and low-carbon industries for high-carbon ones. Second, the paper draws on the logic of production relations and new quality productive forces, proposing that the externalities of the pilot carbon emissions trading system emerge through three mechanisms: industrial layout, resource allocation, and technological innovation. The findings suggest that while the carbon emissions trading system leads to industrial agglomeration in regulated sectors and reduced factor allocation efficiency in neighboring counties, it simultaneously stimulates technological innovation. Third, this study introduces instrumental variables and optimizes the definition of "neighboring regions" to enhance the reliability and precision of the main conclusions. Moreover, based on industry-level low-carbon efficiency indicators, the results reveal that the pilot carbon emissions trading system significantly improves carbon emission efficiency in high-tech industries of neighboring regions, thereby confirming the role of technological innovation as a core driving force of new quality productive forces.

Keywords: New Quality Productive Forces; Carbon Emissions Trading System; Industrial Green Transformation; Externality Effects

JEL Classification: Q58, Q54, O44

(责任编辑:刘莹)(校对:曹帅)