

中国碳市场发展的减排效应及作用机制研究

谢超群

杭州电子科技大学经济学院, 浙江 杭州

收稿日期: 2023年12月1日; 录用日期: 2023年12月13日; 发布日期: 2024年2月5日

摘要

为了客观评价我国碳市场发展水平以及检验碳市场的发展是否能有效发挥碳减排效应, 本文在考虑碳配额交易市场自身特征的基础上, 将碳金融市场发展纳入碳市场发展评价体系, 从多维度测度了我国碳市场发展水平。在此基础上, 运用连续型双重差分法实证检验碳市场发展的碳减排效应和影响机制。研究表明, 碳市场的发展能够有效实现碳减排效应, 表现为碳市场的发展水平每提高1%, 会使试点地区碳排放量和碳排放强度分别下降0.304%和0.345%。进一步的机制分析发现, 能源消费效率提高和能源消费结构转型都是碳市场发展实现碳减排效应的有效途径, 并且贡献分解结果表明, 两种途径均在促进碳减排过程中发挥了较大的作用。

关键词

碳市场发展水平, 碳减排效应, 能源消费效率, 能源消费结构

Study on the Emission Reduction Effect and Role Mechanism of Carbon Market Development in China

Chaoqun Xie

College of Economics, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou Zhejiang

Received: Dec. 1st, 2023; accepted: Dec. 13th, 2023; published: Feb. 5th, 2024

Abstract

In order to objectively evaluate the development level of China's carbon market and test whether the development of the carbon market can effectively play the carbon emission reduction effect, this paper, on the basis of considering the characteristics of the carbon quota trading market itself, incorporates the development of the carbon financial market into the evaluation system of carbon market development, and measures the level of development of China's carbon market

from a multi-dimensional perspective. On this basis, the continuous double difference method is used to empirically test the carbon emission reduction effect and influence mechanism of carbon market development. The study shows that the development of carbon market can effectively achieve the carbon emission reduction effect, which is manifested in the fact that every 1% increase in the development level of carbon market will lead to a decrease of 0.304% and 0.345% in carbon emission and carbon emission intensity in the pilot area, respectively. Further analysis of the mechanism reveals that improving the efficiency of energy consumption and transforming the energy consumption structure are both effective ways to achieve the carbon emission reduction effect of carbon market development, and the results of the contribution decomposition show that both ways play a greater role in promoting the process of carbon emission reduction.

Keywords

Carbon Market Development Level, Carbon Emission Reduction Effect, Energy Consumption Efficiency, Energy Consumption Structure

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

自上世纪 90 年代以来,人与自然深层次的矛盾日益显现,气候变化问题毫无疑问已成为当今世界各国高度重视的一项重大议题。目前科学界普遍认同的观点是:过度的温室气体(主要是二氧化碳)排放导致了温度上升,从而引起种种极端气候问题。因此,为了应对气候变化带来的挑战,中国将加速绿色低碳转型,力争在 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和(简称“双碳”目标)。

碳排放问题同其他环境污染问题类似,存在着鲜明的负外部性特征。为应对此类问题,世界各国尤其是美欧日等发达经济体已经进行了大规模的实践,主要有两种方式:一是以荷兰、美国、日本等为代表的价格政策,通过征收碳税、对行业企业进行补贴等政策手段使得个人边际成本等于社会边际成本,将碳排放量交由市场决定。二是以欧盟碳排放交易体系(EU-ETS)为代表的基于市场的数量政策手段,由主管部门设置碳排放总量,碳价则在充分的市场竞争中确定。

在中国应采用何种减排工具这个问题上,众多学者持有不同观点。吴茵茵等(2021) [1]认为,碳排放权交易市场不仅能应对碳排放跨时空的负外部性特征所带来的问题,还同时兼顾了“减排”和“发展”,在降低碳减排成本方面具有显著优势。Tong 等(2022) [2]则认为碳税在抑制碳排放方面更为有效。但总体来说,碳税政策的施行作用于碳减排效应存在较大的不确定性,还可能会影响到企业利润和行业竞争力,而免费分配碳排放配额的方式更易于被企业接受。

有鉴于此,本文基于 2000~2019 年我国 30 个省市自治区(考虑到数据的可获得性与一致性,将深圳试点归并到广东省,同时剔除西藏和港澳台地区)的面板数据,在构建起碳市场发展水平评价体系的基础上,进一步对碳市场发展的碳减排效应及影响机制进行实证检验。本文可能的边际贡献如下:(1) 选取碳市场试点交易规模、市场波动、金融服务可得性等多项指标,利用变异系数法和层次分析法对 2014~2019 年各碳市场试点的发展水平进行综合全面的测度。(2) 将碳市场试点的发展水平作为连续变量,利用连续型双重差分法研究碳市场发展对碳减排效应的影响,这能够有效弥补双重差分法“差异化”程度不足的缺点,增强结论的可信度。(3) 在逐步回归检验法的基础上,进一步利用非参数 Bootstrap 法对碳市场发展实现碳减排效应的途径进行研究。

2. 文献回顾

回顾中国生态文明建设的进程可以发现, 中国政府从简单地选择命令型环境规制手段, 逐渐过渡到重视命令控制型手段和市场交易型工具的有机结合。在借鉴国际实践经验以及参与全球减排项目合作的基础之上, 中国于 2011 年启动碳排放权交易市场的建设工作。当年 10 月, 按照“十二五”规划纲要的要求, 中国在北京、天津、上海、重庆、湖北、广东和深圳 7 个省市地区先后启动碳排放权交易试点建设工作。2021 年 7 月 16 日, 全国碳排放权交易市场启动上线交易, 全国电力行业超过 2000 家企业被纳入首批重点排放单位。自 2011 年碳市场试点建设规划的提出至 2021 年全国碳市场上线交易, 碳市场在中国已发展近 10 年。在此期间, 众多学者以先后启动的碳市场试点为契机, 广泛深入地研究了碳市场的制度设计(张希良等, 2021) [3]、风险测度和溢出效应(Guo 等, 2021) [4]以及碳市场试点政策这一准自然实验对经济社会及环境的影响等(廖文龙等, 2020) [5]。

在碳减排效应方面, Shi 等(2022) [6]基于双重差分法, 发现碳市场政策实施不仅降低了地区碳排放量, 而且抑制了人均二氧化碳排放量, 具有长期效应。在前人研究的基础上, 张婕等(2022) [7]将倾向得分法与双重差分法进行结合, 基于中国上市公司的面板数据, 发现碳市场政策可以实现微观企业层面的市场化减排效应, 但未对所有试点企业形成约束力。李响等(2022) [8]利用合成控制法模拟出省级层面的“反事实组”, 并将其与现实情况进行对比来验证碳市场政策的节能减排效果, 同样证明了碳市场政策能够显著推动试点地区的节能减排进程。

除了碳市场政策的减排效果以外, 学者们还关心碳减排效应的实现途径。从能源技术的角度出发, 张婕等(2022) [7]认为在碳市场政策主要通过促进低碳技术创新, 提高单位能源利用效率来降低企业碳排放量。而 Chen 等(2020) [9]在双重差分模型和平行多重中介模型的基础上, 进一步提出包含技术效应、构成效应和配置效应的系统框架, 发现仅高质量的创新在碳市场促进碳减排的过程中发挥了有效的中介作用。相较于能源技术进步带来的减排效应, 白雪洁等(2021) [10]认为能源结构转型是碳市场政策实现节能减排的主要动力。亦有学者研究发现, 优化产业结构(Wang 等, 2022) [11]和增加规模以上工业企业流动性约束(曾诗鸿等, 2022) [12]同样是碳市场政策实现碳减排效应的有效途径。

总体而言, 多数学者对碳市场政策实施的效果持肯定态度, 现有文献也对碳交易机制的政策效应进行了广泛的讨论并取得了丰富的研究成果, 但仍存在一些扩展空间。从研究视角来看, 已有研究多是单纯聚焦于碳市场政策这一准自然实验对碳排放的影响, 少数学者如曾诗鸿(2022) [12]等将交易规模、市场活跃度等碳市场的发展状态纳入研究范围, 但鲜有文献从多维度量化不同试点地区碳市场的发展水平, 并基于此研究碳市场发展的碳减排效应。从研究方法来看, 多数学者利用双重差分法或合成控制法开展研究, 前者仅能从“有”和“无”的角度出发比较试点地区与非试点地区的碳减排差异, 不能体现不同处理组之间的区别, 后者通过将现实情况与拟合出的“反事实”合成组进行比较研究来检验碳市场的碳减排效应, 但中国地区之间较大的发展差异可能会影响拟合效果(刘传明等, 2019) [13]。从研究内容来看, 多数学者仅通过因果逐步回归检验法验证了能源消费效率、能源消费结构、技术水平以及绿色创新等中介传导途径在碳市场政策促进碳减排过程中的有效性, 而较少对不同中介传导路径的差异进行探究。

3. 理论机制分析与假说提出

概括来说, 碳排放权交易制度的体系如下: 各试点地区政府通过综合考虑国务院核定的地区碳强度下降目标以及经济发展的需要, 合理确定年度碳排放权配额(简称“碳配额”或“配额”)总量, 并将配额全部免费或部分拍卖给控排企业。免费发放配额所依据的方法主要是基准线法和历史法, 部分试点地区会将两种方法结合使用。控排企业会依据所得碳配额来合理安排生产行为, 如若因技术水平创新不足或生产扩大等原因导致碳排放量超过自身所拥有的配额量, 则需要从其他控排企业手中购买碳配额来弥

补差值, 否则将会受到监管部门的惩罚。同理, 控排企业也可以将自己富余的碳配额拿到碳市场中出售, 从而成为碳市场中的供给者。通过以上方式就实现了碳配额的商品化, 并由市场机制来确定碳配额的价格和流动。在这种市场机制的作用下, 控排企业需要衡量自身的碳减排成本、超额碳排放成本、碳配额交易的成本以及超配额生产带来的收益, 从而作出相应的决策来实现自身利润最大化。随着碳市场的不断发展, 被纳入控排范围的企业数量会不断增加, 个人及机构投资者的参与度也会不断提升, 碳排放权配额的价格会更接近全市场真实的碳减排成本和边际收益, 使得“优胜劣汰”现象愈发显著(Melitz, 2003) [14], 这会持续刺激控排企业的碳减排积极性。企业为了实现在市场中的竞争优势, 会不断增加碳减排技术的研发投入或转向更为清洁的能源, 从而对碳减排效应产生正向激励。基于此, 本文提出理论假设 1。

假设 1: 碳排放权交易市场的发展能够促进碳减排效应。

本文在现有文献的基础上, 进一步研究碳市场发展促进碳减排效应的中介传导路径。

在理论层面, “波特假说”认为企业在适当的环境规制下, 会增加创新投入来提高企业生产力, 从而尽可能抵消环境保护所带来的成本。因此, 碳市场政策作为一种市场型环境规制手段, 势必会形成对企业的刚性约束, 刺激企业的技术进步和绿色创新行为, 从而使得企业加大对低碳技术的研发投入力度, 以此来降低边际减排成本。另外, 在碳配额的约束下, 考虑到企业的经营风险, 企业前期大规模的低碳技术研发投入能够在一定程度上规避碳配额交易价格波动的风险(张婕等, 2022) [7], 同时还可以通过卖出多余配额来获得收益。因此, 随着碳市场的发展, 逐渐成熟的市场交易机制和碳配额定价机制会不断促使企业优化资源配置, 使得企业的单位产出所消耗的能源数量持续降低, 即企业通过提高能源效率的方式降低了碳排放。基于此, 本文提出理论假设 2。

假设 2: 碳排放权交易市场的发展可以通过提高能源消费效率促进碳减排效应。

我国能源消耗以煤炭等化石燃料为主, 而二氧化碳的排放与化石能源的消费密切相关, 在碳市场政策实施之前, 企业会倾向于成本较低的煤炭、焦炭等高碳能源。但在碳配额约束下以及高度市场化的“优胜劣汰”机制中, 过度依赖低成本高碳能源的“劣后”企业将不能再享受时代发展红利, 逐渐失去其竞争力, 这会促使企业的能源消费逐渐转向低碳能源和清洁可再生能源, 直接导致能源消费结构的改变(董直庆等, 2021) [15]。随着碳市场的发展, 这种“优胜劣汰”的机制会在无形中增加清洁产业的利润空间, 推动社会资源再分配, 加速产业结构优化, 进而促进地区的能源消费结构转型(柳亚琴等, 2022) [16], 以此来实现地区的碳减排效应。基于此, 本文提出理论假设 3。

假设 3: 碳排放权交易市场的发展可以通过推动能源消费结构转型促进碳减排效应。

4. 研究设计

4.1. 我国碳市场发展水平测度

4.1.1. 碳市场发展水平评价指标体系构建

本文借鉴陈智颖等(2020) [17]的做法, 结合我国的实际情况以及数据的可得性和准确度, 构建了包括碳配额交易和碳金融两个市场的评价指标体系。具体评价指标体系如表 1 所示。评价指标体系中碳配额交易市场相关数据来源于各试点地区发改委以及碳排放权交易所, 经处理计算后得到。碳金融市场相关数据来源于 Wind 数据库以及中国人民银行发布的《中国区域金融运行报告》。

Table 1. Carbon market development level evaluation indicator system

表 1. 碳市场发展水平评价指标体系

目标层	基准层	维度	评价因子	性质
碳市场发展水平	碳配额市场	深度	碳配额成交量/配额企业数量	正向
			碳配额成交额/控排企业数量	正向

续表

碳市场发展水平	碳配额市场	活跃度	碳配额交易量集中度 ¹	负向
			有效交易日比例 ²	正向
		波动性	碳配额价格离散程度	负向
	碳金融市场	关联度	成交量与碳配额价格变动的相关系数	适度
		深度	低碳经济相关金融工具规模 ³ / 控排企业数量	正向
		金融服务可得性	金融机构总数 ⁴ /控排企业数量	正向
	金融服务成本	人民币加权贷款利率	负向	

4.1.2. 碳市场发展水平测度

我国第一批碳市场试点在 2013~2014 年间依次启动, 考虑到数据的一致性和可比性, 本文将深圳归入广东省, 相应数据进行合并处理。同时为了保证数据的完整性, 本文最终确定样本区间为 2014~2019 年, 涵盖北京、天津、上海、广东、湖北和重庆 6 个省市地区。在测度之前, 本文首先采用极值化处理方法将各评价因子进行无量纲化处理, 以便能在统一标准下进行比较。在指标无量纲化后, 需要确定各层对其上层指标的权重。本文借鉴郭峰等(2020) [18]测算数字普惠金融指数的方法, 结合层次分析法与变异系数法来测算碳市场发展水平。最后, 采用算术加权平均法从下至上逐层计算, 最终得到碳市场发展水平指数。

4.1.3. 碳市场发展水平测度结果分析

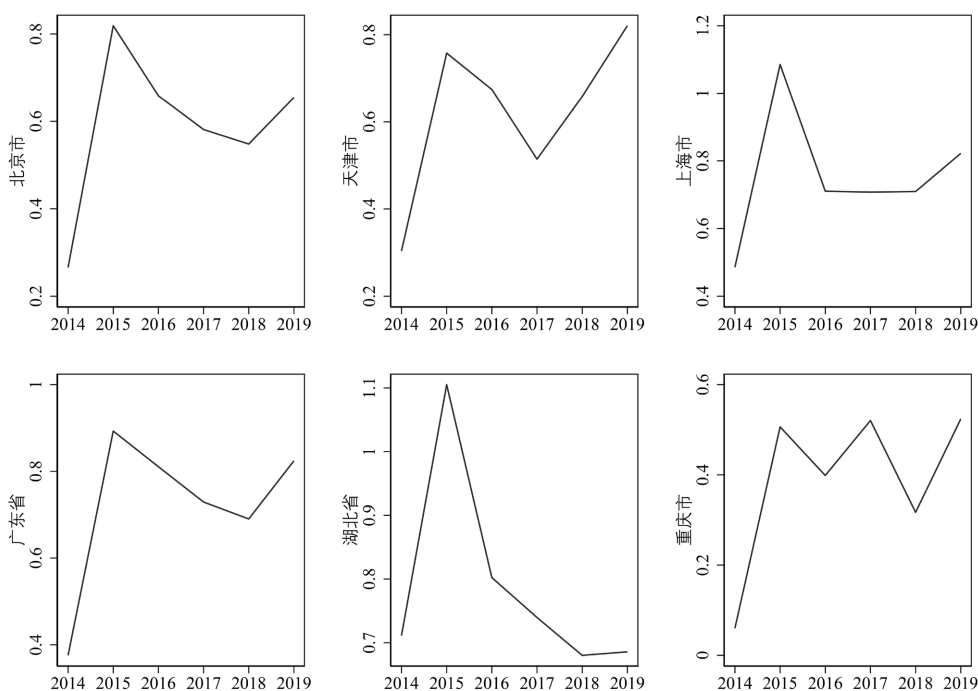


Figure 1. China's six carbon market pilot development level chart

图 1. 中国六大碳市场试点发展水平走势图

¹将每年单日成交量降序排列, 计算排名在前 20% 交易日的碳配额成交总量与全年总成交量之比, 以此来衡量碳配额交易量集中度。

²有效交易日比例指每年有交易天数占比。

³低碳经济相关的金融工具是指与与低碳经济相关的股票、基金和债券的发行总量。

⁴金融机构总数是指总部设在试点地区的银行、证券、基金、期货和保险公司数量之和。

图 1 展示了中国 6 大碳市场 2014~2019 年间发展水平, 可以发现: ① 各试点地区的碳市场发展水平最大值为 1.105, 最小值为 0.060, 碳市场的整体发展水平平均值为 0.643, 说明我国碳市场的发展仍存在较大的进步空间。② 从折线图的特征可以看出, 碳市场试点的发展经历了上升下降再上升的过程, 碳市场试点启动的前两年发展水平波动较大, 此后逐年平稳, 由此可见我国碳排放试点的发展在经历前两年的摸索后进入稳步发展阶段。③ 比较各试点地区发展水平的均值, 发现湖北 > 上海 > 广东 > 天津 > 北京 > 重庆, 这与经济体量的差别较大, 若按地区生产总值排名, 应该是广东 > 湖北 > 上海 > 北京 > 重庆 > 天津, 说明碳市场的发展不仅与地区本身经济特征相关联, 而是涉及到多方面的因素。同时这也说明经济体量相对落后的地区也有机会实现碳市场的高水平发展。

4.2. 模型设定

本文借鉴 Nunn 和 Qian (2011) [19]的做法, 构建连续型双重差分模型, 用测度出的碳市场发展水平代替普通双重差分法的 0~1 变量。具体计量模型如下:

$$Y_{it} = \beta_0 + \beta_1 Index_{it} \times Period_{it} + \beta_2 Control_{it} + \mu_i + v_t + \gamma_{it} + \varepsilon_{it}$$

式中, i 、 t 分别代表地区和年份; Y_{it} 是因变量, 包括碳排放量和碳排放强度; $Index_{it}$ 是碳市场发展水平指数, 也是本文的核心解释变量; $Period_{it}$ 代表政策实施时间, 当 i 代表北京、天津、上海、广东、湖北和重庆且 $t \geq 2014$ 时, $Period_{it}$ 取值为 1, 其余情况取值为 0; $Control_{it}$ 代表控制变量; μ_i 代表省市固定效应, 控制了影响自变量且不随时间变化的个体因素; v_t 代表时间固定效应, 控制了随时间变化且会影响自变量和所有省市地区的时间因素; 同时为控制随区域(东部、东北部、中部和西部四大区域)和随时间变化的区域时变因素, 本文借鉴吴茵茵等(2021) [1]的做法, 引入了代表区域和年份的交互效应 γ_{it} ; ε_{it} 表示误差项。本文为避免潜在的序列相关和异方差问题, 所有报告均是以省份聚类的稳健标准误。

4.3. 变量说明与数据来源

(1) 被解释变量。① 二氧化碳排放量($\ln CO_2$): 由于中国官方统计机构没有直接公布各省市地区的二氧化碳排放量数据, 国内学者普遍采用 shan 等(2018) [20]和 chen 等(2020) [21]估算的二氧化碳排放数据。本文选择前者作为被解释变量, 将后者用于稳健性检验。② 二氧化碳排放强度($\ln CI$): 即单位地区生产总值的二氧化碳排放量, 在计算过程中所用的地区生产总值为根据 2000 年不变价计算的地区生产总值。

(2) 中介变量。① 能源消费效率($\ln ECE$): 本文用地区生产总值与能源消费总量的比值来衡量能源消费效率, 该比值越高, 则意味着消耗单位能源所创造的地区生产总值越多。② 能源消费结构(ECS): 本文选择煤炭和焦炭消费量占能源消费总量的比值来衡量地区能源消费结构。

(3) 控制变量。参考现有研究, 本文选取了一些变量来控制其他因素可能对碳排放造成的影响, 主要包括环境规制强度、所有制结构、禀赋结构、研发水平、财政依存度、产业结构合理化程度。

(4) 数据来源。本文使用 2000~2019 年我国 30 个省市自治区的面板数据来评估碳市场试点发展水平的碳减排效应。其中, 二氧化碳排放量数据来源于中国碳排放核算数据库(CEADs); 其他相关原始数据来源于 Wind 数据库、中国统计局、历年中国统计年鉴、各省统计年鉴等。对于少量缺失数据, 本文结合数据特征, 采用前后两年均值或线性插值法进行处理。

5. 实证结果与稳健性检验

5.1. 基准回归结果

表 2 报告了碳市场发展水平对碳减排效应的基准回归结果, 其中, 列(1)、(2)为碳市场发展水平对碳排放量的回归结果, 列(3)、(4)为碳市场发展水平对碳排放强度的回归结果。可以发现, 在未加入控制变

量时，核心解释变量 $Index \times Period$ 在 1% 的水平显著为负。而在加入控制变量后，核心解释变量 $Index \times Period$ 的系数值分别为 -0.304 和 -0.345，均在 1% 的水平显著为负。上述结果说明，碳市场发展水平的提高能够促进碳减排效应，地区的碳市场发展水平每提升 1%，会使得碳排放量下降 0.304%，碳排放强度下降 0.345%，假设 1 得证。

在控制变量中，环境规制强度对碳排放量和碳排放强度的回归系数均在 5% 水平显著为正，表明常规的环境规制手段在对环境污染进行控制的同时并没有考虑到碳排放问题，环境规制手段的增强和投入的增加甚至会促进碳排放效应，这意味着政府和企业在进行环境污染治理评估时需要把治理手段潜在的碳排放量纳入评价标准。禀赋结构对碳排放量和碳排放强度的回归系数分别在 5% 和 10% 水平显著为负，表明相对于劳动密集型行业，资本密集型行业更有利于促进碳减排效应。财政依存度对碳排放量和碳排放强度的回归系数均在 10% 水平显著为正，这意味着地区政府的财政状况越好，地区碳减排效应反而越差，说明地区政府的财政状况可能受益于碳排放量较多的行业企业。在“双碳”目标的背景下，地区政府更需要提高治理能力，权衡好经济效益与碳减排之间的关系。所有制结构对碳排放量的回归系数在 5% 水平显著为负，但对碳排放强度不显著，而产业结构对碳排放强度的回归系数在 5% 水平显著为正，但对碳排放量不显著。这一结果表明，我国工业化的发展仍处于较为粗放的发展阶段，企业在发展中仍以效益为先，对碳减排的重视不足，同时国有企业在促进碳减排过程中承担了更多的社会责任。与此同时，在基准回归结果中，研发水平对碳排放量和碳排放强度的回归系数均不显著，表明地区当前技术研发可能存在路径依赖，对绿色技术创新研发投入不足，导致地区技术研发优势尚未对碳减排效应产生直接作用。

Table 2. Benchmark regression results

表 2. 基准回归结果

	lnCO ₂		lnCI	
	(1)	(2)	(3)	(4)
<i>Index × Period</i>	-0.374 ^{***} (0.101)	-0.304 ^{***} (0.085)	-0.402 ^{***} (0.094)	-0.345 ^{***} (0.095)
ERI		8.068 ^{**} (3.855)		6.487 ^{**} (3.066)
OS		-0.371 ^{**} (0.172)		-0.130 (0.241)
KL		-3.073 ^{**} (1.201)		-2.366 [*] (1.229)
R&D		2.580 (6.970)		-4.988 (7.721)
FD		2.054 [*] (1.086)		1.760 [*] (1.038)
IS		1.220 (0.837)		2.281 ^{**} (0.950)
_cons	4.453 ^{***} (0.104)	4.685 ^{***} (0.197)	1.253 ^{***} (0.105)	1.221 ^{***} (0.230)
年份固定效应	是	是	是	是
省市固定效应	是	是	是	是
区域与年份交互效应	是	是	是	是
样本数	600	600	600	600
R ²	0.912	0.927	0.741	0.774

注：括号内的数值是以省份聚类的稳健标准误，*、**、*** 反别表示 10%、5%、1% 的显著性水平。以下各表同。

5.2. 稳健性检验

5.2.1. 平行趋势检验

双重差分法估计结果满足一致性的重要前提假设是政策实施之前，实验组和对照组符合平行趋势假设，不存在系统性差异。因此本文运用事件分析法进行平行趋势检验，具体而言，本文将 2005~2019 年的年份虚拟变量与对应政策虚拟变量的交乘项纳入模型：

$$Y_{it} = \rho_0 + \sum_{t=2005}^{2019} \rho_t Treated_t \times v_t + \beta Control_{it} + \mu_i + v_t + \gamma_{it} + \varepsilon_{it}$$

式中， ρ_t 表示 2005~2019 年中 t 年的估计系数； $Treated_t$ 表示政策虚拟变量；其他字符含义同前文。此外，本文以碳市场试点建设启动的 2011 年作为基准年，因此模型中不存在 ρ_{2011} 。

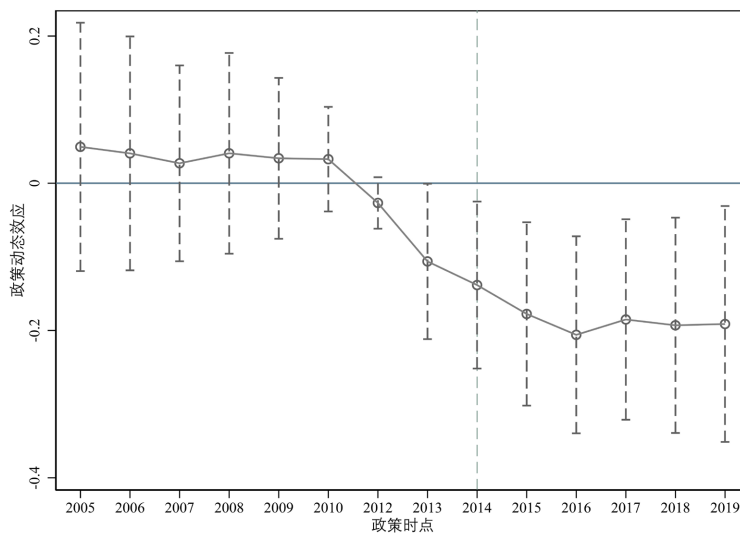


Figure 2. Double-difference dynamic effects on carbon emissions

图 2. 碳排放量双重差分动态效应

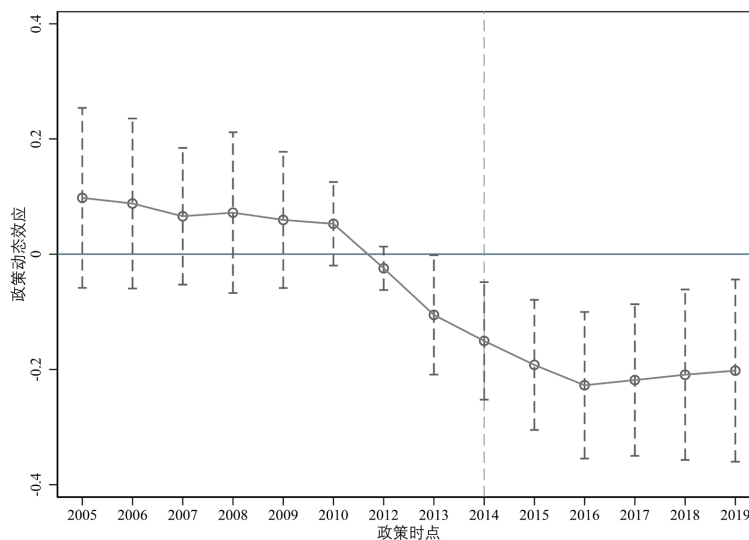


Figure 3. Double-difference dynamic effects on carbon intensity

图 3. 碳排放强度双重差分动态效应

图2和图3报告了95%置信区间下 ρ_t 的估计值,结果显示,碳排放量和碳排放强度在2005~2013年均未通过5%水平显著性检验,说明处理组和控制组在2005~2013年的碳减排效应变动趋势满足平行趋势假设,证明基准回归结果具有稳健性。同时我们发现,2013年的对应系数在10%水平上显著为负,2012年的对应系数虽不显著,但同样为负,这说明从2012年开始已有一定的碳减排效应趋势。

5.2.2. 安慰剂检验

利用双重差分法处理面板数据时,可能存在序列相关问题导致回归结果过度拒绝零假设。为此本文通过非参置换方式进行安慰剂检验。图4和图5分别报告了随机抽样分配后的结果,图中垂直虚线代表本文基准回归结果,水平虚线代表p值等于0.1的位置。由图可以发现,随机抽样分配后估计系数分布在0附近,基准回归结果位于估计系数的低尾位置,且p值基本都位于0.1水平线以上,说明基准回归结果通过了安慰剂检验。

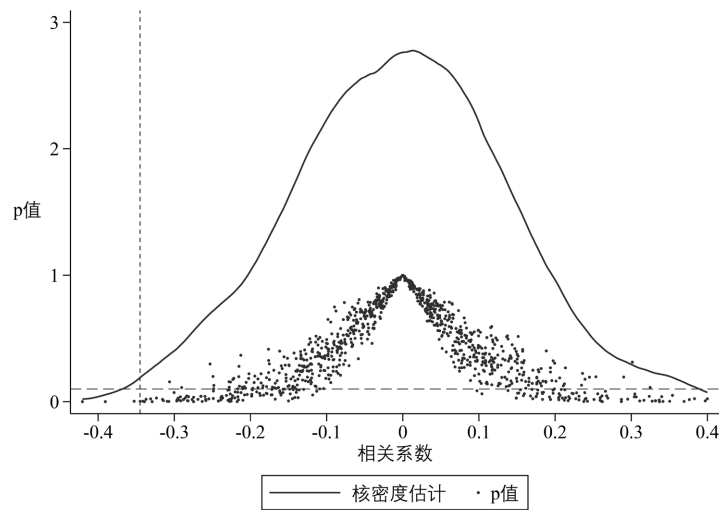


Figure 4. Placebo test results (carbon emissions)

图4. 安慰剂检验结果(碳排放量)

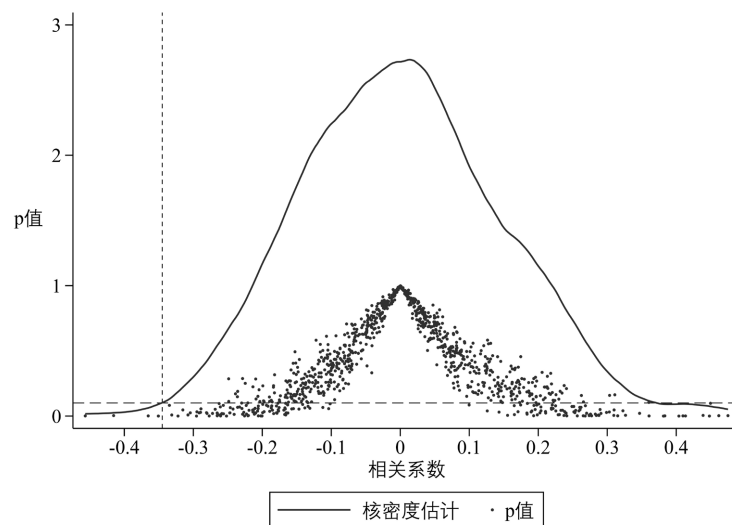


Figure 5. Placebo test results (carbon intensity)

图5. 安慰剂检验结果(碳排放强度)

5.2.3. 动态时间窗检验

本文借鉴白雪洁等(2021) [10]的思路,通过改变碳市场试点政策实施前后的时间宽度进行稳健性检验。回归结果如表3所示,可以发现,时间窗口宽度取1年时,核心解释变量 $Index \times Period$ 的系数不显著,考虑到部分碳市场试点于2013年就已正式启动,再结合前文平行趋势检验的结果,本文认为该回归结果符合逻辑。时间窗口取2、3、4、5年时,核心解释变量 $Index \times Period$ 的系数在1%水平显著为负,且系数值随着窗口宽度的增加不断减少,这再次证明基准回归通过了稳健性检验,碳市场的发展对碳减排效应的影响显著且随着时间宽度的增加逐步增强。

Table 3. Robustness test regression results based on dynamic time window widths

表 3. 基于动态时间窗口宽度的稳健性检验回归结果

变量		动态时间窗检验				
		1年	2年	3年	4年	5年
lnCO ₂	$Index \times Period$	-0.035 (0.029)	-0.122*** (0.033)	-0.184*** (0.048)	-0.217*** (0.062)	-0.228*** (0.071)
	R ²	0.351	0.353	0.445	0.561	0.683
lnCI	$Index \times Period$	-0.038 (0.026)	-0.130*** (0.032)	-0.195*** (0.0459)	-0.230** (0.062)	-0.242*** (0.071)
	R ²	0.908	0.893	0.886	0.864	0.853
控制变量		是	是	是	是	是
年份固定效应		是	是	是	是	是
省市固定效应		是	是	是	是	是
区域与年份交互效应		是	是	是	是	是
样本数		90	150	210	270	330

6. 机制检验及贡献分解

上文基准回归和稳健性检验的结果表明,碳市场的发展能够有效降低地区碳排放量和碳排放强度。那么碳市场政策是通过何种途径实现碳减排效应?据统计资料显示,二氧化碳等温室气体的来源较广,其中化石能源燃烧所产生的温室气体最多,占到总排放的70%以上。对于控排企业来说,在碳配额的约束下,企业最直接的反应分为两种:一是保持现有的生产经营方式,仅在履约期结束时依据自身碳排放量情况在碳市场进行交易,这属于事后控制手段,容易因受到碳价波动的影响造成损失,同时不利于企业长期经营发展。二是进行事前控制,主要表现为通过提高低碳技术水平来降低单位产出的碳排放量,以及寻求更为清洁的可再生能源,这有助于企业降低能源投入依赖,增强碳配额刚性约束下的市场竞争力。因此,本文立足于能源消费,从能源消费效率(lnECE)和能源消费结构(ECS)角度探究碳市场发展实现减排效应的传导途径。

6.1. 影响机制检验

为探究能源消费效率和消费结构是否在碳市场的发展影响地区碳排放过程中发挥中介作用,本文建立如下模型:

$$M_{it} = \eta_0 + \eta_1 Index_{it} \times Period_{it} + \omega Control_{it} + \mu_i + v_t + \gamma_{it} + \varepsilon_{it}$$

$$Y_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 M_{it} + \beta Control_{it} + \mu_i + \nu_t + \gamma_{it} + \varepsilon_{it}$$

$$Y_{it} = \varphi_0 + \varphi_1 Index_{it} \times Period_{it} + \varphi_2 M_{it} + \lambda Control_{it} + \mu_i + \nu_t + \gamma_{it} + \varepsilon_{it}$$

式中, M_{it} 代表中介变量能源消费效率(lnECE)和能源消费结构(ECS); 其他符号含义同前文。基准回归结果已经证明, 碳市场发展水平对试点地区碳减排效应的估计系数在 1% 水平上显著为负, 在此基础上, 本文需要关注模型中的回归系数 α_1 、 η_1 和 ϕ_2 是否显著。如果三者均显著, 则说明存在中介效应。

表 4 为基于能源消费效率的影响机制检验结果。列(1)结果表明碳市场发展水平对能源消费效率的回归系数在 5% 水平显著为正, 意味着碳市场的发展能够显著提高能源消费效率。列(2)和列(4)结果表明, 能源消费效率对碳排放量和碳排放强度的回归系数在 1% 水平显著为负, 意味着能源消费效率的提高显著促进了碳减排效应。列(3)和列(5)结果表明, 将碳市场发展水平和能源消费效率同时纳入模型时, 能源消费效率对碳排放量和碳排放强度的回归系数均在 1% 水平显著为负。结合列(1)、列(2)和列(3)可知, 碳市场发展可以通过提升能源消费效率降低碳排放量。结合列(1)、列(4)和列(5)可知, 碳市场发展可以通过提升能源消费效率降低碳排放强度。这一实证结果与假设相符, 随着碳市场的发展, 碳排放的刚性约束会促使控排企业不断优化资源配置, 推动降低单位产出所消耗的能源量, 使得碳排放量和碳排放强度同时降低。综上, 碳市场发展可以通过提高能源消费效率促进碳减排效应, 假设 2 得证。

Table 4. Impact mechanism test results (I)

表 4. 影响机制检验结果(一)

	lnECE	lnCO ₂		lnCI	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
<i>Index × Period</i>	0.163** (0.073)		-0.185*** (0.770)		-0.206** (0.059)
lnECE		-0.762*** (0.137)	-0.728*** (0.138)	-0.890*** (0.136)	-0.853*** (0.134)
控制变量	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是
省市固定效应	是	是	是	是	是
区域与年份交互效应	是	是	是	是	是
样本数	600	600	600	600	600
R ²	0.851	0.953	0.9550	0.884	0.892

表 5 为基于能源消费结构的影响机制检验结果。列(1)结果表明碳市场发展水平对能源消费结构的回归系数在 5% 水平显著为负, 意味着碳市场发展水平的提高显著推动了能源消费结构转型。列(2)和列(4)结果表明, 能源消费结构对碳排放量和碳排放强度的回归系数在 1% 水平显著为正, 意味着能源消费结构的转型显著促进了碳减排效应。列(3)和列(5)表明, 将碳市场发展水平和能源消费结构同时纳入模型时, 能源消费效率对碳排放量和碳排放强度的回归系数均在 1% 水平显著为正。结合列(1)、列(2)和列(3)可知, 碳市场发展可以通过推动能源消费结构转型降低碳排放量。结合列(1)、列(4)和列(5)可知, 碳市场发展可以通过推动能源消费结构转型降低碳排放强度。这一实证结果与预期相符, 随着碳市场的发展, 碳排放的刚性约束会使得过度依赖高碳能源的企业逐渐失去竞争力, 同时在无形中增加清洁产业的利润空间, 加速产业结构优化, 推动能源消费结构转型, 使得碳排放量和碳排放强度同时降低。综上, 碳市场发展可以通过推动能源消费结构转型促进碳减排效应, 假设 3 得证。

Table 5. Impact mechanism test results (II)
表 5. 影响机制检验结果(二)

	ECS	lnCO ₂	lnCO ₂	lnCI	lnCI
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
<i>Index × Period</i>	-0.194** (0.080)		-0.174*** (0.057)		-0.212*** (0.060)
ECS		0.709*** (0.129)	0.666*** (0.133)	0.737*** (0.152)	0.685*** (0.154)
控制变量	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是
省市固定效应	是	是	是	是	是
区域与年份交互效应	是	是	是	是	是
样本数	600	600	600	600	600
R2	0.855	0.945	0.947	0.831	0.839

6.2. 传导机制相对贡献分解

以上分析证明了碳市场发展可以通过提高能源消费效率以及推动能源消费结构转型来促进碳减排效应,为了进一步检验及探究中介传导途径在减碳进程中所起到的贡献,本文借鉴宋弘等(2019) [22]的方法,将逐步回归检验法的结果进行量化解,具体公式如下:

$$Contribution = \frac{\eta_{1,m} \times \phi_{2,m}}{\beta_1}$$

式中, $\eta_{1,m}$ 代表碳市场发展水平对中介变量的效应; $\phi_{2,m}$ 代表控制了碳市场发展水平的影响后,中介变量对碳排放效应的影响; β_1 代表碳市场发展水平的碳减排效应。测算后的结果如表 6 所示。结果表明,能源消费效率提高在碳市场发展促进碳排放量减少和碳排放强度下降中分别发挥了 39.0% 和 40.3% 的作用,能源结构转型分别发挥了 42.5% 和 38.5% 的作用。

本文传导机制贡献分解结果说明,提高能源消费效率和推动能源消费结构转型在促进碳减排过程中同时发挥了较大的作用,意味着能源消费转型是实现“双碳”目标的重要突破口。同时该结果也说明我国碳市场的发展仍处于较低水平,能源消费效率提高和能源消费结构转型的贡献度尚未表现出阶段性特征。依据张希良等(2022) [3]基于 C-GEM 等模型对能源经济转型路径进行量化评估的测算结果,在碳达峰前,减排量由能源效率提升主导,将贡献超过 60% 的减排量,而碳达峰后,能源替代将发挥更为重要的作用。因此,政府和企业需要重视对低碳技术的研发投入,持续降低企业单位产值的能耗水平,同时避免效率提升招致的更多能源需求,产生“反弹效应”。另外,政府和企业还需要共同努力,加快布局清洁能源产业建设,加大新能源产业和配套基础设施投入,推动降低清洁能源的成本,以充分发挥能源结构转型的巨大碳减排潜力。

Table 6. Decomposition of the contribution of intermediation effects
表 6. 中介效应贡献分解

中介变量 M	lnCO ₂				lnCI		
	η_1	ϕ_2	β_1	贡献率	ϕ_2	β_1	贡献率
lnECE	0.163**	-0.728***		0.390	-0.853***		0.403
ECS	-0.194**	0.666***	-0.304***	0.425	0.685***	-0.345***	0.385

6.3. 基于非参数 Bootstrap 法的验证检验

Bootstrap 法因其不需要分布假设且具有较高的统计效力受到学界的青睐(Taylor 等, 2008) [23], 因此本文利用该方法对能源消费效率提升和能源消费结构转型的中介作用进行再检验, 结果如表 7 所示。该结果表明, 在所有报告中, 95%置信区间内均不含 0, 即 $\eta_1 \times \Phi_2$ 的估计系数通过了 5%显著性检验, 说明中介传导机制成立。同时中介效应占比结果显示, 提高能源消费效率在降低碳排放量和碳排放强度中分别发挥了 39.1%和 40.3%的作用, 而推动能源消费结构转型则分别发挥了 42.6%和 38.6%的作用, 这一结果与前文传导机制相对贡献分解结果近似相同, 说明本文的中介传导机制检验结果具有一致性。

Table 7. Test results of Bootstrap method
表 7. Bootstrap 法检验结果

		lnCO ₂	lnCI
lnEE	间接效应	-0.119*** (0.041) [-0.198,-0.039]	-0.139*** (0.035) [-0.207,-0.070]
	直接效应	-0.185*** (0.034) [-0.251,-0.119]	-0.206*** (0.039) [-0.283,-0.129]
	中介效应占比	0.391	0.403
ECS	间接效应	-0.129*** (0.026) [-0.180,-0.079]	-0.133*** (0.0257) [-0.168,-0.098]
	直接效应	-0.174*** (0.022) [-0.218,-0.130]	-0.212*** (0.022) [-0.255,-0.169]
	中介效应占比	0.426	0.386
	控制变量	是	是
	年份固定效应	是	是
	省市固定效应	是	是
	区域与年份交互效应	是	是
	单次样本数	600	600
	抽样次数	500	500

注: 表中中括号内报告的是 95%显著性水平下的置信区间。

7. 结论与启示

在现有研究的基础上, 本文为了更准确的衡量我国碳市场试点的发展状况以及检验碳市场的发展是否能够有效实现碳减排效应, 基于 2014~2019 年 6 大碳市场试点的数据, 采用主观赋权和客观赋权结合的方法, 从多维度出发测度了碳市场发展水平指数。在此基础上, 运用连续型双重差分法、逐步回归检验和 Bootstrap 方法探究了碳市场发展促进碳减排的直接效应和中介传导机制。实证结果表明, 碳市场的发展能够有效实现碳减排效应, 碳市场的发展水平每提高 1%, 能促进碳排放量下降 0.304%, 碳排放强度下降 0.345%, 该结论通过了一系列稳健性检验。中介传导机制表明, 能源消费效率提高和能源消费结构转型都是碳市场发展实现碳减排效应的有效途径, 并且贡献分解结果表明, 两种途径均在促进碳减排过程中发挥了较大的作用。

本文的研究结论对完善碳市场建设, 推动实现“双碳”目标有如下启示:

第一，当前我国经济正处于由快速增长向高质量发展转型的关键阶段，如何处理好经济增长与实现“双碳”目标之间的关系是亟待解决的一大难题。本文的研究结果表明，碳排放权交易市场是兼顾“发展”与“减排”目标的有效手段。因此，应加快推进中国碳市场的建设，引入足够强的碳价信号，并进一步将碳市场试点与全国碳市场有序对接融合，以电力行业作为突破口，逐步扩大行业覆盖度，让更多的市场主体参与其中，不断扩大市场交易规模，增加交易品种，提高市场活跃度，充分发挥市场机制的定价和调节作用。同时继续完善碳市场的制度建设，如完善碳排放数据的统计、核查制度，碳配额的核算、分配制度等。另外，还应重视 CCER、森林碳汇等抵消市场的发展，并大力发展场外市场，鼓励金融机构开发碳金融产品与服务，建立起多层次的碳市场运行体系。

第二，在中国实现“双碳”目标的进程中，能源消费结构转型具有巨大的减碳潜力。若要充分发掘其潜力，不仅需要企业积极主动承担社会责任，同时还要求政府出台相应的政策发挥激励引导作用。一方面，要加大清洁能源产业及配套基础设施建设投入，推动可再生能源降本增效，鼓励引导能源消费结构向清洁能源转型。另一方面，要推动有效市场和有为政府更好结合，让劳动、资本等要素在市场中有序高效流动，降低地区企业转型压力，鼓励发展战略性新兴产业，推动科技革命成果与传统产业融合发展。

第三，发挥好金融在市场资源配置中的关键作用，积极发展绿色金融，让金融更好地服务于实体经济。利用绿色信贷、绿色债券等方式降低企业融资门槛，激励企业增加研发投入，不断提高技术水平和绿色创新能力，充分挖掘控排主体的减排潜力，引导实体经济朝碳减排方向不断发展。但同时也要注重绿色标准建设工作和绿色信息披露机制，让社会、市场来监督企业的行为，避免道德风险和逆向选择问题。

参考文献

- [1] 吴茵茵, 齐杰, 鲜琴, 陈建东. 中国碳市场的碳减排效应研究——基于市场机制与行政干预的协同作用视角[J]. 中国工业经济, 2021(8): 114-132.
- [2] Tong, J., Yue, T. and Xue, J. (2022) Carbon Taxes and a Guidance-Oriented Green Finance Approach in China: Path to Carbon Peak. *Journal of Cleaner Production*, **367**, Article 133050. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133050>
- [3] 张希良, 张达, 余润心. 中国特色全国碳市场设计理论与实践[J]. 管理世界, 2021, 37(8): 80-95.
- [4] Guo, L.Y. and Feng, C. (2021) Are There Spillovers among China's Pilots for Carbon Emission Allowances Trading? *Energy Economics*, **103**, Article 105574. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105574>
- [5] 廖文龙, 董新凯, 翁鸣, 陈晓毅. 市场型环境规制的经济效应:碳排放交易、绿色创新与绿色经济增长[J]. 中国软科学, 2020(6): 159-173.
- [6] Shi, B., Li, N., Gao, Q., et al. (2022) Market Incentives, Carbon Quota Allocation and Carbon Emission Reduction: Evidence from China's Carbon Trading Pilot Policy. *Journal of Environmental Management*, **319**, Article 115650. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115650>
- [7] 张婕, 王凯琪, 张云. 碳排放权交易机制的减排效果——基于低碳技术创新的中介效应[J]. 软科学, 2022, 36(5): 102-108.
- [8] 李响, 张楠, 宋培. 碳排放交易制度的节能减排效应及作用机制研究——基于合成控制法的经验证据[J]. 现代财经(天津财经大学学报), 2022, 42(4): 96-113.
- [9] Chen, S., Shi, A. and Wang, X. (2020) Carbon Emission Curbing Effects and Influencing Mechanisms of China's Emission Trading Scheme: The Mediating Roles of Technique Effect, Composition Effect and Allocation Effect. *Journal of Cleaner Production*, **264**, Article 121700. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121700>
- [10] 白雪洁, 宋培, 王宝璐. 碳排放交易制度的节能减排路径:效率提升还是结构转型?——来自中国省级数据的准自然实验[J]. 商业经济与管理, 2021(8): 70-85.
- [11] Wang, X., Huang, J. and Liu, H. (2022) Can China's Carbon Trading Policy Help Achieve Carbon Neutrality?—A Study of Policy Effects from the Five-Sphere Integrated Plan Perspective. *Journal of Environmental Management*, **305**, Article 114357. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114357>

-
- [12] 曾诗鸿, 李璠, 翁智雄, 钟震. 我国碳交易试点政策的减排效应及地区差异[J]. 中国环境科学, 2022, 42(4): 1922-1933.
- [13] 刘传明, 孙喆, 张瑾. 中国碳排放权交易试点的碳减排政策效应研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(11): 49-58.
- [14] Melitz, M.J. (2003) The Impact of Trade on Intra-Industry Reallocations and Aggregate Industry Productivity. *Econometrica*, **71**, 1695-1725. <https://doi.org/10.1111/1468-0262.00467>
- [15] 董直庆, 王辉. 市场型环境规制政策有效性检验——来自碳排放权交易政策视角的经验证据[J]. 统计研究, 2021, 38(10): 48-61.
- [16] 柳亚琴, 孙薇, 朱治双. 碳市场对能源结构低碳转型的影响及作用路径[J]. 中国环境科学, 2022, 42(9): 4369-4379.
- [17] 陈智颖, 许林, 钱崇秀. 中国碳金融发展水平测度及其动态演化[J]. 数量经济技术经济研究, 2020, 37(8): 62-82.
- [18] 郭峰, 王靖一, 王芳, 孔涛, 张勋, 程志云. 测度中国数字普惠金融发展: 指数编制与空间特征[J]. 经济学(季刊), 2020, 19(4): 1401-1418.
- [19] Nunn, N. and Qian, N. (2011) The Potato'S Contribution to Population and Urbanization: Evidence from a Historical Experiment. *The Quarterly Journal of Economics*, **126**, 593-650. <https://doi.org/10.1093/qje/qjr009>
- [20] Shan, Y., Guan, D., Zheng, H., et al. (2018) China CO₂ Emission Accounts 1997-2015. *Scientific Data*, **5**, 1-14. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.201>
- [21] Chen, J., Gao, M., Cheng, S., et al. (2020) County-Level CO₂ Emissions and Sequestration in China during 1997-2017. *Scientific Data*, **7**, Article 391. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00736-3>
- [22] 宋弘, 孙雅洁, 陈登科. 政府空气污染治理效应评估——来自中国“低碳城市”建设的经验研究[J]. 管理世界, 2019, 35(6): 95-108+195.
- [23] Taylor, A.B., MacKinnon, D.P. and Tein, J.Y. (2008) Tests of the Three-Path Mediated Effect. *Organizational Research Methods*, **11**, 241-269. <https://doi.org/10.1177/1094428107300344>