

目次

中国城市碳排放强度的时空演变、动态跃迁及收敛趋势 ..... 杨清可, 王磊, 朱高立, 李颖, 范业婷, 王雅竹 (1869)

交通运输业碳排放效率时空演变及趋势预测 ..... 郑琰, 蒋雪梅, 肖玉杰 (1879)

基于扩展STIRPAT模型LMDI分解的碳排放脱钩因素 ..... 张江艳 (1888)

基于LEAP模型的工业园区碳达峰路径:以南京某国家级开发区为例 ..... 李慧鹏, 李荔, 殷茵, 何文大, 宿杰, 赵秋月 (1898)

高校碳排放核算与分析:以北京A高校为例 ..... 曹睿, 封莉, 张立秋 (1907)

北京市制造业减排降碳协同效应分析和驱动因素 ..... 俞珊, 韩玉花, 牟洁, 张双, 张增杰 (1917)

碳排放权交易价格与全要素生产率:来自中国的证据 ..... 吴雪萍 (1926)

中国城市PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>时空分布特征和影响因素分析 ..... 李江苏, 段良荣, 张天娇 (1938)

2017~2021年苏皖鲁豫交界区域PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>时空变化特征及影响因素 ..... 陈伟, 徐学哲, 刘文清 (1950)

疫情管控期西安PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>污染特征及成因分析 ..... 原晓红, 张强, 李琦, 谢文豪, 刘跃廷, 樊亭亭, 姜旭朋 (1963)

苏南五市秋冬季PM<sub>2.5</sub>化学组成特征和空间差异 ..... 冯蔚, 丁峰, 尚玥, 谢鸣捷 (1975)

湖北咸宁细颗粒物PM<sub>2.5</sub>来源 ..... 罗怡, 朱宽广, 陈璞琬, 田军, 谢旻, 战杨志豪, 赵润琪 (1983)

邢台氨减排对京津冀PM<sub>2.5</sub>改善的溢出效益 ..... 边泽君, 闻超玉, 郎建垒, 范晓茜, 夏祥晨, 周颖 (1994)

聊城市冬季PM<sub>2.5</sub>载带金属元素污染特征、风险评价及来源分析 ..... 张敬巧, 朱瑶, 曹婷, 燕丽, 王淑兰, 刘铮 (2003)

高原城市拉萨典型VOCs排放源成分谱特征 ..... 郭淑政, 叶春翔, 林伟立, 陈熠, 曾立民, 尹晴晴, 刘雪莉 (2011)

北京市工业园区VOCs污染特征及健康风险评估案例:高新技术产业的环境影响 ..... 王洁, 姚震, 王敏燕, 陈速敏, 龙腾, 王海滨, 李红, 郭秀锐, 郝江虹, 聂磊 (2019)

高温极端天气影响下的成都平原一次典型臭氧污染过程分析 ..... 雷丽娟, 张懿, 罗伊娜, 张潇, 冯森 (2028)

水环境中抗病毒毒物的存在、行为与风险 ..... 葛林科, 李璇艳, 曹胜凯, 郑金帅, 张蓬, 朱超, 马宏瑞 (2039)

黄河小浪底水库地表水中重金属的时空变化与概率健康风险 ..... 王亮, 邓雪娇, 王潇磊, 李明, 刘奕尧, 姜亚敏, 涂响, 张坤锋 (2054)

藏东多曲河流域总富集水化学特征及控制因素 ..... 李敬杰, 连晟, 王明国, 张智印, 张涛 (2067)

西北内陆区降水稳定同位素时空分布特征及其水汽来源 ..... 张炎炎, 辛存林, 郭小燕, 张博, 陈宁, 史延飞 (2080)

基于水化学和氢氧同位素的泰安城区岩溶地下水补给来源及演化过程 ..... 孟令华 (2096)

丹江流域山区地表水-地下水水化学特征及其影响因素 ..... 张子燕, 伏永朋, 王宁涛, 谭建民, 刘亚磊 (2107)

金塔盆地鸳鸯池灌区地下水水化学特征及控制因素 ..... 王晓燕, 韩双宝, 张梦南, 尹德超, 吴玺, 安永会 (2118)

德阳市平原区浅层地下水水化学特征与健康风险评价 ..... 刘楠, 陈盟, 高东东, 吴勇, 王橦橦 (2129)

典型城市河网沉积物微塑料时空分布特征 ..... 许万璐, 范一凡, 钱新 (2142)

抚仙湖流域尺度氮排放清单构建及关键源解析 ..... 王延杰, 梁启斌, 王艳霞, 侯磊, 陈奇伯, 王伟, 李晓琳, 高俊淑 (2150)

过氧化钙/海泡石海藻酸钠缓释凝胶复合材料的制备及其对内源磷的控制性能 ..... 曲思彤, 单苏洁, 王崇铭, 吴玲子, 李大鹏, 黄勇 (2160)

矿物超细颗粒的形成机制、结构特征及其环境行为和效应 ..... 刘振海, 张展华, 袁语欣, 朱盼盼, 陈威, 张彤 (2171)

生物炭固定化菌复合材料在环境修复中的应用研究进展 ..... 孙淑玉, 黄梦鑫, 孔强, 张焕新, 刘继伟 (2185)

微塑料对沸石吸附水体氨氮的影响及其机制 ..... 练建军, 谢诗婷, 吴培, 孟冠军, 陈波 (2195)

紫外老化作用对纳米生物炭吸附环丙沙星的影响机制 ..... 马锋锋, 薛之一, 赵保卫 (2203)

土地利用影响下永定河流域浮游植物群落与环境因子响应 ..... 郭善嵩, 胡思, 丁一桐, 张嘉渭, 孙长顺, 卢悦, 潘保柱 (2211)

鄱阳湖湿地细菌群落多样性和可培养细菌功能基因丰度 ..... 喻江, 王淳, 龙永, 刘贵花, 李春杰, 范国权, 于镇华 (2223)

典农河沉积物细菌群落结构特征及其与重金属的关系 ..... 刘双羽, 蒙俊杰, 邱小琼, 周瑞娟, 李霖 (2233)

污水处理厂尾水排放对受纳河流细菌和真菌微生物群落的影响 ..... 郭有顺, 余仲, 郝文彬, 孟凡刚 (2246)

宏基因组学分析深度处理阶段污水中细菌的赋存特征及其功能 ..... 胡健双, 王燕, 周政, 汪雅琴, 王秉政, 李激 (2259)

大别山区生境质量时空特征及自然-人为因素驱动机制 ..... 郑亚平, 张俊华, 田惠文, 朱航成, 刘舒, 丁亚鹏 (2268)

基于连续小波变换、SHAP和XGBoost的土壤有机质含量高光谱反演 ..... 叶森, 朱琳, 刘旭东, 黄勇, 陈蓓蓓, 李欢 (2280)

秸秆还田、覆膜和施氮对旱地麦田土壤质量的影响 ..... 叶子壮, 王松燕, 陆潇, 史多鹏, 吕慎强, 李嘉, 杨泽宇, 王林科 (2292)

长期施用有机肥对土壤微塑料赋存及迁移特征的影响 ..... 王长远, 马啸驰, 郭德杰, 刘新红, 马艳, 罗佳 (2304)

土壤盐分变化对N<sub>2</sub>O排放影响:基于Meta分析 ..... 黄艺华, 余冬立, 史祯琦, 胡磊, 潘永春 (2313)

基于土地利用/覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量评价与预测 ..... 郑慧玲, 郑辉峰 (2321)

基于InVEST模型的伏牛山地区生态系统碳储量时空变化模拟 ..... 张哲, 时振钦, 朱文博, 孙梓欣, 赵体侠, 邓文萍, 刘志强 (2332)

防护林建设过程中土壤微生物养分限制与有机碳组分之间的关系 ..... 徐凤璟, 黄懿梅, 黄倩, 申继凯 (2342)

长期秸秆还田褐土有机碳矿化特征及其驱动力 ..... 赵宇航, 殷浩凯, 胡雪纯, 解文艳, 刘志平, 周怀平, 杨振兴 (2353)

冬绿肥覆盖对土壤团聚体及有机碳和AMF多样性的影响 ..... 鲁泽让, 陈佳钰, 李智贤, 李永梅, 罗志章, 杨锐, 田明洋, 赵吉霞, 范茂攀 (2363)

辽河流域氮素时空分布及其对土地利用和降雨的响应 ..... 周波, 李晓光, 童思陈, 吕旭波, 郭朝臣, 雷坤 (2373)

高强度农业种植区不同景观池塘氧化亚氮排放特征 ..... 张欣悦, 肖启涛, 谢晖, 刘臻婧, 邱银国, 罗菊花, 徐向华, 段洪涛 (2385)

生物炭与不同类型氮肥施肥对菜地土壤反硝化细菌群落的影响 ..... 柳晓婉, 刘杏认, 高尚洁, 李贵春 (2394)

大岳山不同林龄人工油松林土壤微生物特征 ..... 马义淑, 曹亚鑫, 牛敏, 张明昱, 程曼, 文永莉 (2406)

基于稀疏样点的土壤重金属含量模拟方法 ..... 张佳琦, 潘瑜春, 高世臣, 赵亚楠, 景胜强, 周艳兵, 郇允兵 (2417)

基于特定源-风险评估模型的兰州黄河风情线绿地土壤重金属污染优先控制源分析 ..... 李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 台喜生, 臧飞, 陈伟, 脱新颖 (2428)

西南不同类型紫色土pH变化、重金属累积与潜在生态风险评估 ..... 张海琳, 张雨, 王顶, 谢军, 张跃强, 张宇亭, 王洁, 石孝均 (2440)

重庆某铁矿周边耕地土壤重金属污染评价及来源解析 ..... 廖泽源, 李杰芹, 沈智杰, 李彩霞, 罗程钟, 梅楠, 张成, 王定勇 (2450)

金属矿区周边农田土壤与农作物重金属健康风险评估 ..... 魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思 (2461)

赤泥基纳米零价铁对多金属污染土壤修复效果 ..... 刘龙宇, 杨世利, 赵黄诗雨, 常凯威, 余江 (2473)

施锌对碱性土壤-小麦幼苗体系累积镉的影响 ..... 张瑶, 王天齐, 牛硕, 杨阳, 陈卫平 (2479)

# 碳排放权交易价格与全要素生产率：来自中国的证据

吴雪萍

(福建江夏学院经济贸易学院, 福州 350108)

**摘要:** 碳排放权交易价格对全要素生产率(TFP)的影响是当前有待检验的重要课题. 基于2008~2019年中国省际面板数据, 采用双重差分法, 估计中国碳排放权交易中碳价对TFP的影响. 结果发现, 碳价与TFP之间存在持续显著的正因果关系. 具体地, 碳价每提高100元, 试点省份TFP将上升约3.2%. 据粗略估计, 如果碳价达到与欧盟相同的水平, 中国省份的TFP将增长约12.12%. 该结论在进行一系列稳健性检验后依然成立. 最重要的是, 机制分析表明, 促进产业结构高级化和能源结构低碳化、加大技术创新以及加强政府政策支持, 是提高TFP的有效途径. 特别地, 当试点地区的碳排放水平更高、环境规制强度更强和绩效考核体系更合理时, 碳价对TFP的促进作用更大. 因此, 政府应从碳价的角度探索激活市场激励型环境规制工具的方法, 以更好地完善全国统一的碳排放权交易市场.

**关键词:** 碳排放权交易(ETS); 碳价; 全要素生产率(TFP); 市场激励型环境规制; 碳达峰碳中和

**中图分类号:** X24 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2024)04-1926-12 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.202304197

## Carbon Emissions Trading Prices and Total Factor Productivity: Evidence from China

WU Xue-ping

(School of Economics and Trade, Fujian Jiangxia University, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** The influence of carbon prices in the carbon emissions trading schemes (ETS) on total factor productivity (TFP) is an important issue that has yet to be demonstrated. Based on inter-provincial panel data from 2008 to 2019, this study estimated the impact of the carbon price in China's ETS on TFP by adopting a difference-in-differences model. The results showed that there was a significant and sustained positive causal relationship between carbon prices and TFP. Specifically, for pilot provinces, TFP would increase by approximately 3.2% for every 100 yuan increase in carbon price. Rough estimates suggested that if Chinese provinces were to reach the same level of carbon price as that of the European Union, their TFP would increase by approximately 12.12%. This conclusion remained valid even after conducting a series of robustness tests. Importantly, mechanism analyses revealed that promoting industrial structural upgrading and low-carbon energy structures, increasing technological innovation, and strengthening government policy support were effective ways to improve TFP. It is noted that the positive effects of carbon prices on TFP were more pronounced in pilot areas with higher carbon emissions, stronger environmental regulations, and more reasonable performance assessment systems. Therefore, the government should explore methods to activate market-based environmental regulation tools from the perspective of carbon prices to better enhance the national unified ETS market.

**Key words:** carbon emissions trading schemes (ETS); carbon price; total factor productivity (TFP); market-based environmental regulation; carbon peak and carbon neutral

气候变化已成为全人类面临的共同挑战<sup>[1]</sup>. 根据国际能源署发布的《全球能源回顾: 2021碳排放》报告, 2021年, 中国的碳排放量同比增长5%, 约为119亿t, 约占全球碳排放量的32.78%. 为了应对气候变化, 全球有178个缔约方在2016年签署了《巴黎协定》, 预计将使全球变暖保持在2.0°C(3.6°F)以下, 具体要求到2030年将碳排放量减半, 到2050年实现碳中和<sup>[2]</sup>. 为了响应《巴黎协定》约定, 中国于2020年在第75届联合国大会上宣布力争在2030年前二氧化碳排放达到峰值, 2060年前实现碳中和目标<sup>[3]</sup>. 在一系列环境法规中, 碳排放权交易政策(“碳交易”)被认为是通过市场和价格机制应对气候变化的有效工具之一<sup>[4]</sup>. 中国对碳交易的应用较晚, 2011~2016年期间, 中国有7个省份和1个城市陆续筹划并开展了碳交易试点. 2021年7月, 全国碳交易市场开市. 在地方级试点向全国统一碳市场实施的过渡阶段, 对过去碳交易试点中碳价对TFP的影响进行后评估具有重要意义, 能够为探索激活市场激励型环境规制工具提供借鉴, 以更好地完善全国

统一的碳交易市场, 同时也能够为中国实现碳达峰和碳中和的目标提供经验证据.

现有关于碳交易的研究很丰富. 根据碳交易的发展历程, 学者们的研究主要围绕碳交易的前期制度设计和后期效应评估. 在碳交易准备前期, 绝大多数的研究围绕碳交易的属性特征<sup>[5]</sup>、设计<sup>[6]</sup>、配额<sup>[7]</sup>、碳泄漏<sup>[8]</sup>、定价机制<sup>[9]</sup>和评价<sup>[10,11]</sup>等主题展开, 讨论应对气候变化的战略方针与政策设计. 自碳交易开始上线交易之后, 学者们不再局限于采用理论模型推导或者模拟预测的方法研究碳交易, 而是开始基于碳交易的市场表现, 采用计量经济学的方法分析碳交易的环境、经济与社会影响<sup>[12-16]</sup>. 在早期, 学者们主要关注碳交易的减排效果<sup>[17]</sup>. 随着研究的深入, 碳交易在实施过程中可能引发的经济问题成为学者们热议的焦点<sup>[18,19]</sup>, 特别是碳交易对

收稿日期: 2023-04-23; 修订日期: 2023-06-25

基金项目: 国家社会科学基金青年项目(22CGL043)

作者简介: 吴雪萍(1990~), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为能源与环境经济学, E-mail: 348036104@qq.com

TFP的影响得到广泛关注<sup>[20]</sup>.学者们普遍认为碳交易能有效减少碳排放<sup>[21,22]</sup>,然而,碳交易对TFP的影响至今却仍有很大分歧<sup>[23]</sup>.有研究认为碳交易对TFP有积极的影响,波特假说的“创新补偿效应”为该观点提供了理论支撑<sup>[24,25]</sup>.根据“创新补偿效应”理论,环境规制带来了先发优势,可能激励企业技术创新和扩散,以补偿企业的环境成本,并提高企业的TFP<sup>[26]</sup>.具体到碳交易,边际减排成本低的企业,碳排放限额较多,可以通过碳交易降低生产经营成本,获得额外的减排收入.边际减排成本高的企业,需要增加排放限额保持原有生产技术不变,无论是减少总产量还是购买碳排放权,经营利润都会受到损害<sup>[27]</sup>.为了降低生产成本,边际减排成本高的企业加强了创新生产技术的动力<sup>[28]</sup>.技术创新的潜在好处可以用来抵消不断增加的非生产性投入<sup>[29]</sup>.另一些研究认为碳交易对TFP的影响是负向的、无作用的亦或是异质性的,其理论支撑主要是遵从成本假说<sup>[30,31]</sup>.遵从成本假说认为由于碳交易的交易需求可能不确定,而且低碳创新对其他研发投资存在挤出效应<sup>[32]</sup>,企业无法获得足够的利润抵消生产成本,因此,受碳交易规制的企业缺乏低碳技术创新的动力,进而影响碳交易的市场功能,无法提高TFP<sup>[33]</sup>.

现有研究为本研究提供了重要启示.然而,现有研究在两个方面有待改进:一是在研究碳交易的有效性时,大多数现有研究以笼统的二值变量代理碳交易,得到的只是试点地区结果变量平均值的变化,可能会高估或低估碳交易的有效性.实际上,碳交易市场最大的特点是金融市场属性,即碳交易实质上是通过碳价直接影响受规制企业的经济活动和生产经营决策,最终影响试点地区的结果变量.但是,少有学者研究碳交易中碳价的有效性,因而也未能清楚回答碳价的作用机制是什么,而对于政策制定者来说,了解碳价背后的机制至关重要.二是部分研究将中国的碳交易政策试点时间以2011年作为统一试点时间节点,但是2011年仅仅是试点政策颁布的时间节点,而非启动线上交易的时间节点,因此,既可能低估碳交易的真实影响,也忽视了不同省份试点时间的差异.

在碳交易中,碳价的变化很大,这使本研究能够识别碳价的影响.如图1所示,2013~2022年期间,北京市的年均碳价最高,均价在50~90元·t<sup>-1</sup>之间,平均碳价约为60.60元·t<sup>-1</sup>.上海市的年均碳价居全国第二,约为33.59元·t<sup>-1</sup>.深圳市的年均碳价变化区间最大,区间跨度为10~75元·t<sup>-1</sup>,平均碳价约为33.54元·t<sup>-1</sup>.广东省的年均碳价整体呈U型变动趋势,

平均碳价与深圳相差无几,约为33.20元·t<sup>-1</sup>.重庆市的年均碳价约为20.22元·t<sup>-1</sup>,在2019年之前,其与深圳市的年均碳价变化趋势相似,都呈波动下降趋势;2019年之后,两个地区的碳价有所上升,并相交于2020年,随后深圳市的年均碳价大幅下降,而重庆市年均碳价则大幅上升.天津市和福建省的年均碳价变化区间最小,区间跨度均为10~30元·t<sup>-1</sup>,二者的平均碳价均在20元·t<sup>-1</sup>左右.

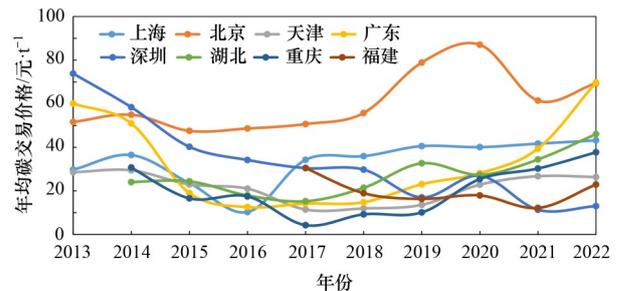


图1 2013~2022年中国碳交易的年均交易价格  
Fig. 1 Annual average transaction prices of carbon emissions trading in China from 2013 to 2022

由于不同碳市场的碳价表现出异质性,而且碳价的上涨势必会给试点地区企业的成本造成负担,而全要素生产率(total factor productivity, TFP)是经济增长研究中的核心概念,因此,有必要研究碳价的上涨对TFP有何影响?碳价又是通过哪些可能的渠道影响TFP的?碳交易试点的经验对中国和其他发展中国家的低碳经济转型和碳交易体系建设具有重要的现实意义.本文试图从碳交易的边际成本角度评估碳价对TFP的影响并找出内在作用机制,以期为决策者提供政策参考.

本文可能的边际贡献主要体现在:一是运用多期双重差分法(difference-in-differences, DID)从碳价角度系统地考察碳交易中碳价对TFP的影响,有助于厘清关于碳交易与TFP关系的争论,同时也是对现有市场激励型环境规制工具的有效性评估研究的进一步补充.二是解释了碳价对TFP影响的作用机制.三是实证检验了碳价对TFP影响的异质性效应.本研究扩展了碳交易有效性的研究视角,有助于增强对环境制度相对薄弱的发展中国家实施市场激励型环境规制效果的理解,同时,也为全国统一碳市场的运行打下坚实的理论基础.

## 1 理论分析与研究假设

TFP是经济增长研究中的核心问题.新古典经济学增长模型强调技术创新对经济增长的作用,而碳交易作为一种环境政策,也可以被看作是一种技术进步.碳价可以反映碳交易市场的深度和有效性<sup>[34]</sup>.

因此, 碳价对 TFP 有重要影响。

理论上, 碳价是企业成本的重要组成部分, 碳价的上涨可能对 TFP 产生负面影响。这种负面影响的作用机制主要有以下两点: 首先, 碳价的上涨会导致企业成本的增加。这里的企业生产成本, 包括生产过程中所需的能源成本、物资成本、设备维护和更新成本等。以上成本的增加将对企业的 TFP 产生直接的负面影响。其次, 碳价的上涨会影响企业的市场竞争力。碳价的上涨, 将会使企业在选择生产方案时增加环境成本的考虑。如果企业不能够降低成本并提高生产效率, 那么企业的产品价格将难以与其他企业进行公平竞争。这将直接影响企业未来的市场份额和利润水平, 从而降低 TFP。

碳价的上涨不仅会对 TFP 造成负面影响, 同时也会带来一定的正向影响。在回顾现有研究后, 本文探讨了 4 个最有可能的传导渠道, 即技术创新、产业结构、能源结构和政策支持<sup>[1, 35-37]</sup>。

首先, 从“创新补偿效应”理论角度来看, 碳价的上涨改变了传统的竞争环境, 给企业施加了技术改进的压力, 减少了环保投入的不确定性, 并指明了技术改进的方向<sup>[24]</sup>。此外, 碳价的上涨还可以催生新兴市场, 推动技术创新和经济增长。碳交易系统的建立和碳价上涨可以吸引更多的投资和社会资源流入环保产业, 从而鼓励企业和科研机构开展低碳技术创新, 有助于提高 TFP。

其次, 碳价上涨将激励企业调整产业结构和资源配置<sup>[38]</sup>, 以追求更高效率和更具可持续性的生产方式。例如, 企业可能会减少高碳排放的生产, 同时增加低碳领域的生产。这样的转型有助于优化产业结构, 从而提高 TFP。此外, 产业结构变动主要受到自然资源、要素禀赋、人口结构、技术水平和环境承载能力等供给因素与消费、投资和国际贸易等需求因素的共同作用。碳价上涨可以被视为一种环境承载能力的改变, 因此将对供给因素产生影响, 驱使企业调整产业结构, 以降低碳排放并满足市场需求。以上调整可能包括改变产品组合、采用更加环保的生产工艺和引入低碳技术等。通过以上产业结构变动, 企业可以提高生产效率, 从而促进 TFP 的提高<sup>[39]</sup>。

再次, 碳交易可以为企业的清洁生产发挥特殊贷款的作用, 特别是碳排放最密集型和传统能源使用领域, 即工业、建筑、运输和电力<sup>[35]</sup>。在高碳价的环境下, 传统的高碳能源如煤炭和石油等的采购和消费成本将会上升。相反, 清洁和低碳的能源, 例如太阳能、风能和水电等, 由于其低碳排放和可再生特性, 将更加有竞争力。因此, 在碳价上涨的

背景下, 排放企业在成本压力和市场激励的双重刺激下, 倾向于将旧的化石能源转向低碳能源和可再生能源<sup>[40]</sup>。这样, 低碳能源资源需求的演变带动了能源消费结构的深刻而持久的转变, 促进了能源消费结构低碳化, 提高了能源投入的效率, 进而提升了 TFP。

最后, 碳价的上涨可以促进政府加强对环保领域的政策支持。当碳价上涨时, 企业的生产成本会逐渐上升, 从而迫使企业更加高效地使用资源和能源, 减少碳排放。这种情况下, 政府往往会采取一系列政策措施来鼓励企业在环境保护和节能减排等方面做出更多的投入<sup>[41]</sup>。例如, 在碳市场中, 政府可以设置碳税来对企业的温室气体排放进行征税。政府可以将征收的碳税用于环境保护和节能领域, 让资金回流到节能环保产业, 从而达到可持续发展的目标。此外, 政府还可以针对低碳和绿色的产品给予税收优惠或者减免以促进企业在技术创新和产品开发方面更加注重绿色低碳发展<sup>[1]</sup>。另外, 政府还可以通过补贴政策来支持低碳和绿色技术的发展和推广, 促进新能源的推广和应用。政府的政策支持有利于促进环保、节能减排和可持续发展等领域的发展和进步, 从而提高 TFP。

从碳交易试点情况看, 目前中国的碳价仍远低于其他国家。例如, 欧盟等国际碳交易市场的碳价最近已超过 50 欧元·t<sup>-1</sup>, 约中国碳价的 10 倍。《世界银行: 2021 年碳定价的状态和趋势》指出, 中国碳价的潜力还没有得到充分利用<sup>[42]</sup>。这意味着, 由于没有负担或收益, 中国企业可以视而不见陷入困境的低碳价, 这可能导致中国的碳价产生无效的结果。因此, 只有在确保碳价能长期上涨时, 才能促使企业做出减排决策, 从而使碳价的作用机制发挥作用。基于以上分析, 本文提出以下研究假设, H1: 碳交易试点中碳价的提高, 有利于提升 TFP; H2a: 碳价通过技术创新提升 TFP; H2b: 碳价通过产业结构优化提升 TFP; H2c: 碳价通过能源结构低碳化提升 TFP; H2d: 碳价通过政府政策支持提升 TFP。

不同地区由于资源禀赋、碳排放水平和环境政策制度等具有差异性<sup>[43, 44]</sup>, 因此, 碳价对 TFP 的影响可能具有地区异质性<sup>[31]</sup>。

对于高碳排放水平的地区而言, 由于环保和能源消耗限制政策不够严格, 企业可以更加随意地排放温室气体, 进而导致企业的碳排放成本较低。而当碳价上涨时, 企业的碳排放成本也会随之增加, 从而迫使企业采取更多的节能减排措施来降低其碳排放量。这样, 企业在逐渐实现低碳、绿色和可持续的生产模式的过程中, 也促进了 TFP 的提升。此

外, 以上地区的企业可能面临着较大的外部压力, 例如国际贸易限制和环境监管等方面的压力. 以上压力通常要求企业采用更加环保、清洁和低碳的生产方式, 以避免对环境造成过大的影响. 在这种情况下, 碳价的上涨可以鼓励企业进一步减少碳排放, 进行清洁生产, 使企业更加符合环保要求, 也有利于提高其 TFP. 而低碳排放地区的情况与之相反, 因而碳价对 TFP 的促进作用可能较小.

地区既有的环境规制水平也是引起异质性的因素之一. 环境规制强度反映了地区政府对于环保和治理污染的重视程度. 环境规制强度较大地区通常拥有更严格的环保和能源消耗限制政策. 在这种情况下, 企业需要采取更多的节能减排措施才能达到官方对其环保和能源消耗的要求. 企业在实现清洁生产模式的同时, 也提升了 TFP. 此外, 以上地区企业的生产过程可能较少依赖化石能源<sup>[45]</sup>. 因此, 碳价的上涨能够激励企业更加积极地采用清洁能源或其他环保技术, 进而提高其 TFP. 与之相反, 环境规制强度比较小的地区对碳价上涨的反应可能相对不敏感, 因而对 TFP 的促进作用较弱.

另一个关键因素是地区的政绩考核体系合理程度. 首先, 政绩考核体系合理的地区通常会将碳排放和环境污染排放等指标列入政绩考核指标中. 这意味着政府部门或者企业需要通过采取相关措施来达到以上指标, 否则就可能受到政绩考核方面的惩罚<sup>[46]</sup>. 在这种情况下, 碳价的上涨可以提供低碳减排的成本优势, 企业更加愿意采取节能减排等环保措施以满足政府部门或企业的考核指标, 实现最大化的利益, 从而促进了 TFP 的提升. 其次, 在政绩考核体系合理的地区, 政府部门和企业更加注重环境保护和可持续发展. 他们可能采取更多的措施来鼓励低碳经济的发展和应对气候变化等问题, 从而使得碳价的作用更加显著. 相反, 政绩考核体系不合理的地区可能存在一些问题, 例如政绩考核指标不合理和考核方式过于简单粗暴等. 在这种情况下, 碳价的上涨可能无法促进企业采取更加绿色化的生产方式, 因为政府和企业可能更多地关注政绩考核的具体指标和结果, 而不是考虑更加长期、环保和可持续发展的目标.

基于上述分析, 本文提出以下假设, H3a: 碳排放水平更高的地区, 碳价对 TFP 的促进作用更大; H3b: 环境规制强度更大的地区, 碳价对 TFP 的促进作用更大; H3c: 政绩考核体系更合理的地区, 碳价对 TFP 的促进作用更大.

## 2 材料与方法

### 2.1 模型设定

为估计碳价对试点省份 TFP 的影响, 直观的方法是比较试点省份在碳交易试点前后的 TFP 差异. 然而, 该差异既可能是由碳交易试点带来的, 也可能是由同期实施的其他政策或环境冲击带来的. 为排除其他共识性因素的干扰, 本文运用 DID 估计量进行检验. 本文将在 2008 ~ 2019 年期间内试点碳交易的省份作为处理组, 将在整个样本期间内未试点碳交易的省份作为控制组. 如果碳交易试点是影响两组时间趋势一致性的唯一外生变量, 即共同趋势假设条件成立, 那么, 同期内碳交易未试点省份 TFP 的变化反映了除碳交易试点外其他共识性因素的影响, 从碳交易试点前后试点省份 TFP 差异中减去未试点省份 TFP 变化, 即能算出排除其他共识性因素影响后的碳交易试点净效果. 本文预期与控制组相比, 碳交易试点省份的 TFP 在试点实施后会额外上升. 具体回归方程如下:

$$\ln TFP_{it} = \alpha + \beta_1 price_{it} \times post_t + \theta Z_{it} + \gamma_t + \lambda_i + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

式中,  $i$  为省份;  $t$  为时间;  $\ln TFP_{it}$  为被解释变量 TFP 的对数;  $price_{it}$  为平均碳价;  $post_t$  为二值变量, 当时间  $t$  处于试点时点及之后时取 1, 否则取 0;  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\theta$  为回归系数;  $Z_{it}$  表示一系列随时间变化的省份特征变量;  $\gamma_t$  为时间固定效应, 用来衡量可能存在的对所有省份的年度冲击, 如经济周期;  $\lambda_i$  为省份固定效应, 用来控制所有不随时间变化的省份特征;  $\varepsilon_{it}$  为随机扰动项.

为了检验 H2a ~ H2d, 识别碳价的作用机制, 建造如下模型:

$$Mech_{it} = \alpha + \beta_1 price_{it} \times post_t + \theta Z_{it} + \gamma_t + \lambda_i + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

式中, 被解释变量  $Mech_{it}$  分别为技术创新、产业结构、能源结构和政策支持这 4 个机制变量.

### 2.2 关键变量

被解释变量为 TFP, 以 TFP 的对数 ( $\ln TFP$ ) 代理. 本文借鉴 Lyu 等<sup>[47]</sup>的做法, 采用 Malmquist 生产率指数法, 利用 DEAP2.1 软件测算出各省 TFP. 投入和产出指标方面, 以资本、劳动和能源以上生产要素作为投入变量, 以实际 GDP 作为产出变量. 其中, 资本存量数据采用永续存盘法以 1978 为基期进行估算得到, 折旧率设为 10.96%, 劳动投入数据以各地区就业人数作为代理指标, 能源要素投入的指标以一次能源消费量代理.

解释变量为中国碳交易中碳价与试点时点的交乘项 ( $price \times post$ ). 本文重点关注其估计系数  $\beta_1$  的显

著性和方向.若 $\beta$ 的估计结果为正(负),则表示碳价使试点省份TFP增加(减少).由于碳排放交易网披露的是每日碳价和趋势.本文通过加权平均,求得年平均碳价,并将年平均碳价与政策试点时点进行交互来衡量碳价对TFP的影响.

机制变量有4个:①技术创新,参考文献[48,49],将技术创新指标分为创新投入(rd)指标和创新产出(lnpatent)指标,分别以研发投入占GDP的比重和专利申请授权量的对数加以代理;②产业结构(is\_adv),采用付凌晖<sup>[50]</sup>的做法构建产业结构高级化指数来代理;③能源结构(es),通过计算各能源消费的占比构建能源消费结构低碳化指数作为代理变量;④政策支持(policy),以历年《中国绿色发展指数报告》中的政府政策支持度指数作为代理指标.

### 2.3 数据来源

本文数据主要有3个来源,一是碳排放交易网(www.tanpaifang.com).二是《中国统计年鉴》(2009~2020年)、《中国能源统计年鉴》(2009~2020年)和历年《中国绿色发展指数报告》《中国分省份市场化指数报告》.三是中国地级市政府工作报告.考虑到直到2013年部分试点省份开始实施碳交易线上交易,2020年正式启动全国碳市场第一个履约周期,本文以2008~2019年中国30个省、直辖市和自治区的面板数据为样本(西藏和港澳台地区资料暂缺).

### 2.4 有效性检验

一个潜在的担忧是,当处理组和控制组分组非随机时,就会出现实施碳交易试点的省份非随机,即处理组与对照组的TFP在试点前就具有不同的时间趋势,事后两组存在的差异可能是由这种事前差异引起的,由此导致估计存在偏误.为保证DID的有效性,参照Beck等<sup>[51]</sup>的事件研究法,在经验研究之前,本文先做平行趋势检验.本文通过在标准回归中加入一系列虚拟变量来检验平行趋势,以追踪碳交易试点对TFP的年影响,具体公式如下:

$$\ln TFP_{i,t} = \alpha + \beta_1 T_{i,t}^{-5} + \beta_2 T_{i,t}^{-4} + \dots + \beta_{11} T_{i,t}^{+6} + \varepsilon_{i,t} \quad (3)$$

式中, $T$ 为碳交易试点的虚拟变量.当试点省份在试点之前的第 $j$ 年时, $T^j$ 等于1;而当试点省份在试点之后的第 $j$ 年时, $T^j$ 等于1.

本文排除了碳交易试点刚开始的年份,估计了碳交易试点相对于其余碳交易试点的年份对未来TFP的动态影响.在对试点年份(第0年)的去趋势和集中估计后,图2绘制了估计结果和95%置信区间.本文考虑一个11a的窗口期,从碳交易试点前的5a到碳交易试点后的6a.虚线表示95%的置信区间.

图2说明了两个关键点:一是碳交易对TFP的

影响并没有先于碳交易试点,二是碳交易试点对TFP的影响很快就产生了.如图2所示,在碳交易试点之前,碳交易试点虚拟变量的系数与零没有显著差异,在碳交易试点之前没有TFP显著上升的趋势.接下来请注意,TFP在碳交易试点后立即上升.例如, $T^1$ 的系数在5%的水平上是正的和显著的.可见,将碳交易试点与TFP联系起来特殊机制和渠道开始迅速采取行动.碳交易试点对TFP的影响在中国的碳交易试点后大约4年里不断增长,但到第5年,其作用变得不明显.图2的结果支持了本文DID估计方法的有效性.

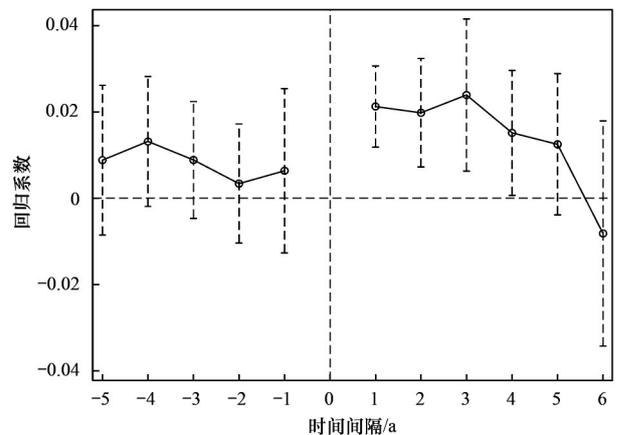


图2 碳交易试点对TFP对数的动态影响

Fig. 2 Dynamic effects of carbon emissions trading pilot on the logarithm of TFP

为保证DID有效性,其次,本文参照Gentzkow<sup>[52]</sup>的做法,以省份是否试点碳交易为被解释变量,找出可能影响省份试点与否的事前决定因素:城市化水平(urb)、FDI(fdi)、实际地区生产总值(gdp)、政府对绿色发展的关注度的对数(lngreen)、市场化程度(market)、数字化水平(indigita)和研发投入(rd).以上变量均采用2008年的数据.表1中A列的结果显示,影响试点省份试点的事前变量 $Z_i$ 为:城市化水平、市场化程度和数字化水平.为了检验碳交易与TFP是否存在反向因果关系,本文在回归模型中加入TFP的对数这个结果变量,回归结果见表1中B列.从结果中可以发现,TFP对试点省份的选择没有显著影响,说明试点省份选择与TFP无严重的反向因果问题.最后,为了试图控制试点省份的选择偏误问题,本文把 $Z_i$ 作为控制变量放入式(1)和式(2)中.

为再次验证DID的有效性,本文将采用分解年度处理效应的方法进一步检验省份在试点前预期到碳交易试点进而调整其策略的可能性.本文根据陈勇兵等<sup>[53]</sup>的方法构建了一个安慰剂检验,使用试点启动前但非正式交易的样本(2008~2012年),分别

表1 省份是否试点碳交易的事前决定因素<sup>1)</sup>

Table 1 Ex ante determinants of whether provinces pilot carbon emissions trading

决定因素	A	B
urb	0.279** (0.142)	0.266* (0.144)
fdi	-0.022 (0.020)	-0.023 (0.016)
gdp	0.342 (1.668)	0.074 (1.487)
lngreen	1.163 (6.700)	1.313 (7.466)
market	1.215* (0.657)	1.322** (0.650)
lndigita	10.570* (5.508)	11.414* (6.093)
rd	-7.786 (13.189)	-6.446 (9.784)
lnTFP		12.937 (18.826)
观测值	30	30

1)\*\*\*、\*\*和\*分别表示参数估计值在1%、5%和10%的统计水平上显著,括号内数值为稳健性标准误,下同

以2012年、2011年、2010年和2009年作为假设的政策冲击事件.由于真正的线上碳交易并没有在以上假设的样本区间内开展,因此在假设的政策冲击时间下,处理组与对照组之间任何显著的差异均说明可能具有预期效应.从表2中可以看到,全部回归系数均不显著,说明在碳交易试点前,处理组与对照组依然可以进行比较,由此可以表明预期效应是不存在的.

表2 预期效应检验<sup>1)</sup>

Table 2 Test of expected effect

参数	A	B	C	D
price × post <sub>-2012</sub>	-0.016 (0.021)			
price × post <sub>-2011</sub>		-0.014 (0.018)		
price × post <sub>-2010</sub>			-0.013 (0.019)	
price × post <sub>-2009</sub>				0.010 (0.021)
事前决定因素	Y	Y	Y	Y
省份固定效应	Y	Y	Y	Y
年份固定效应	Y	Y	Y	Y
观测值	150	150	150	150
adj.R <sup>2</sup>	0.284	0.284	0.283	0.282

1)Y表示加入各项参数情况,下同

### 3 结果与讨论

#### 3.1 碳价对TFP的影响分析

##### 3.1.1 基准回归

本文估计了碳价对TFP的影响,结果如表3所

示,其中,A列报告了未加入控制变量和事前决定因素,但有引入年份和省份固定效应的回归结果;B列进一步加入事前决定因素,以控制以上重要试点决定因素产生的TFP的灵活时间趋势;在C列中,本文又添加了一些时变的省份特征,以上特征可能与结果变量和本文感兴趣的回归变量 price × post 相关.具体来说,本文用第二产业增加值来衡量工业化程度,用工业污染治理投资额衡量环保投入,用地区总人口衡量人口规模,用地方财政一般预算支出占中央财政支出的比重衡量财政分权程度,以上经济、社会和政治等因素可能影响TFP,另一方面可能影响碳价.显然,在控制以上额外因素后结果依然是稳健的.

表3 基准回归<sup>1)</sup>

Table 3 Baseline regression

参数	A	B	C
price × post	0.022* (0.011)	0.042** (0.017)	0.032 (0.016)
fd			0.387*** (0.091)
lnpop			-0.004* (0.002)
lnei			0.005 (0.003)
ind			-1.75e-06*** (6.03e-07)
事前决定因素	N	Y	Y
省份固定效应	Y	Y	Y
年份固定效应	Y	Y	Y
观测值	360	360	360
adj.R <sup>2</sup>	0.320	0.339	0.391

1)N表示未加入各项参数情况,下同

如表3所示,本文的兴趣回归变量 price × post 的估计系数持续为正数且显著.受控制变量的影响,调整后的拟合优度从A列的0.320上升到C列的0.391.这说明碳交易试点政策对试点省份来说是一种外源性冲击,因此可以自信地得出一个结论:碳价与省份的TFP之间存在显著的正相关因果关系.在C列中,price × post 的估计系数为0.032,且在10%水平上显著.这意味着,虽然碳价的覆盖面和水平仍然较低,但已经出现了鲜明的和积极的迹象.与非试点省份相比,碳价每提高100元,将刺激试点省份的TFP上升约3.2%.由此可见,碳价的上涨并不会抑制TFP,相反,碳价的上涨反而会促进TFP的增长,H1得到验证.这说明即使在环境制度相对薄弱的发展中国家,市场激励型环境规制的实施也可以提高TFP.该结论与陆春华等<sup>[54]</sup>的结论类似,都证实了“强波特

假说”在中国是存在的,但本文进一步从碳价角度对这一结论进行延伸.事实上,市场激励型环境规制的核心依赖于价格体系,也就是说,碳交易试点发挥促进 TFP 作用的主要前提是具备完善的碳市场价格机制<sup>[35]</sup>.

表3的研究结果为反事实推理提供了新信息.有研究指出,要达到中国2030年的碳排放峰值,碳交易的碳价预计将达到175元·t<sup>-1</sup><sup>[55]</sup>.考虑到反事实的价格,粗略估计,中国各省的平均TFP可以增加约5.485%.如果价格将上升到欧盟碳交易中记录的最高碳价,即60欧元·t<sup>-1</sup>(约457.63元·t<sup>-1</sup>),中国的TFP将相应增加12.12%.

其他变量为进一步了解情况提供了更多信息.其中,fd的回归系数在1%的水平下显著为正,说明财政分权对TFP提升是有效的;lnpop和ind的回归系数均显著为负,说明人口规模和工业化程度与TFP有显著的负相关关系,这可能是由于随着人口规模和工业化程度的增加,环境压力也相应增加,进而可能导致资源的浪费以及污染物的排放增加,

从而造成TFP下降;lnel的回归系数不显著,说明环保投入与TFP没有相关关系,这可能是由于单纯增加环保投入并不能直接提高技术创新和效率,以及企业可能仅是为了符合环保要求而进行一些简单的改变,而非真正的环境友好型操作.

### 3.1.2 稳健性检验

为检验基准回归结果的稳健性,本文借鉴陈勇兵等<sup>[56]</sup>的做法,从替换度量指标、控制其他政策改革和安慰剂检验等7个方面做一系列的稳健性检验,检验结果如表4所示.

(1)改变试点指标 在基准回归中,本文为考察碳价对TFP的影响,选取的解释变量是碳价与试点年份的交乘项.为检验基准回归结果是否稳健,这里以一个二值变量(treat × post)作为解释变量进行重新估计,得到试点省份TFP平均值的变化.从表4的A列可知,解释变量price × post改为treat × post后,碳交易试点对试点省份的TFP有显著的正向影响,说明碳交易的TFP效应仍然存在,这一结果与基准回归结果接近.

表4 稳健性回归  
Table 4 Robust regression

参数	A (改变试点指标)	B (改变TFP的测算方式)	C (改变TFP的函数形式)	D (控制其他政策的影响)	E (附加控制变量)	F (剔除离群值)	G (安慰剂检验1)
treat × post	0.011* (0.006)						
price × post		0.180** (0.087)	0.023* (0.011)	0.035** (0.016)	0.035** (0.016)	0.029* (0.016)	
interv					-0.003 (0.037)		
price							-0.044 (0.043)
控制变量	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
事前决定因素	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
省份固定效应	N	Y	Y	Y	Y	Y	Y
时间固定效应	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
观测值	360	360	360	360	360	354	317
adj.R <sup>2</sup>	0.200	0.906	0.295	0.396	0.394	0.435	0.450

(2)改变TFP的测度方式 在表4的B列中,本文根据Wu等<sup>[57]</sup>的做法,在数据包络分析框架下考虑非期望产出的TFP,采用基于松弛的方向性距离函数测度出中国各省的绿色TFP,再对绿色TFP取对数.投入方面与前文一致,产出指标方面,以实际GDP作为期望产出,以碳排放量作为非期望产出.结果发现,改变TFP的测度方式后,碳价对试点省份的TFP仍有显著的正向影响,表明本文结论稳健.

(3)改变TFP的函数形式 参照Liu等<sup>[58]</sup>的方

法,本文将被解释变量由lnTFP = ln(TFP)改为lnTFP' = ln[TFP+(1+TFP<sup>2</sup>)<sup>0.5</sup>]重新回归,以考察本文结论对模型设定的敏感性.从表4中C列的结果可以发现,碳价对试点省份TFP的正向影响依然显著存在,说明估计结果可信.

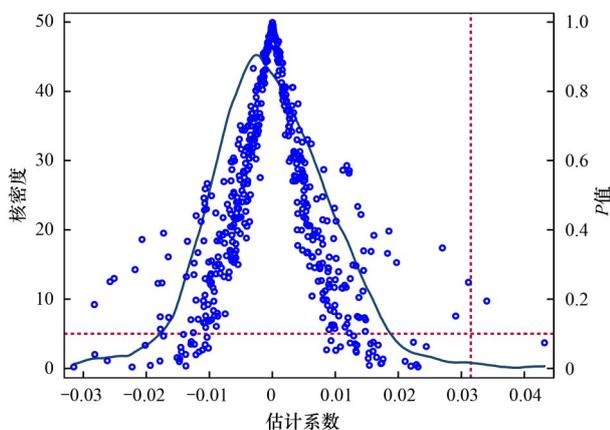
(4)控制其他政策改革 为了控制样本期间内正在进行的其他政策改革(用能权试点和一些经济政策),本文在表4的D列增加了用能权试点政策作为控制变量,在表4中E列同时增加了用能权试点政策和经济干预(即国有控股企业资产在规模以上

工业企业资产的占比)作为控制变量. 本文的主要发现对以上额外的控制仍然很有效.

(5)剔除离群值 鉴于 DID 估计可能会因为离群值的存在而造成偏误, 本文根据事前 TFP 的对数为排除条件, 剔除了低于 1 百分位或高于 99 百分位的样本, 具体结果如表 4 的 F 列所示. 不难发现, 剔除离群值后的估计结果和基准回归相似, 意味着样本中的离群值不会影响本文的主要结果.

(6)安慰剂检验 I 本文遵循 Topalova<sup>[59]</sup>的做法, 观察试点当年的碳价在试点前时期对 TFP 的影响. 该检验通过的前提是, 由于在这期间碳价没有变化, 本文不应该期待结果有较大的变化, 否则, 这可能表明存在一些潜在的混杂因素. 如表 4 中 G 列所示, 本文确实发现, 在试点前的时期, 碳价对 TFP 几乎没有影响, 表明基准结果稳健.

(7)安慰剂检验 II 本文基于省份是否实施碳交易试点这一特征事实对控制组和处理组进行分组, 由于受到碳交易试点的影响, 处理组的时间趋势与控制组不同. 若本文的分组依据是随机的, 而不是根据是否进行碳交易试点, 那么理论上应该没有处理效应. 因此, 本文在这里把两组混合, 运用随机抽样法得到虚假的两组样本, 再根据式(1)进行回归. 这个过程重复 500 次, 得到的虚假估计系数与相关  $P$  值的概率密度分布如图 3 所示. 从中可知, 随机分配的虚假估计系数分布都集中在零点附近, 大多数估计值的  $P$  值大于 0.1. 同时, 本文  $price \times post$  的真实估计系数(红色垂直虚线位置)在安慰剂测试中是明显的异常值. 这一检验结果表明, 碳价对处理组 TFP 的显著影响仅出现于真实碳交易试点冲击发生以后, 据此进一步排除本文估计结果受其他未观测到的因素影响的可能. 因此, 有理由认为本文的 DID 识别设置是合理有效的, 结果是稳健的.



红色垂直虚线表示  $price \times post$  的真实估计值 0.032;  
红色水平虚线表示  $P$  值为 0.1

图3 安慰剂检验 II  
Fig. 3 Placebo test II

### 3.2 作用机制分析

碳价对 TFP 影响的潜在机制是另一个值得探究的重要问题. 下面本文通过考察碳价如何影响试点省份 TFP, 以及试点省份特征在 TFP 中的异质性作用, 探究碳价影响 TFP 的传导机制与异质性效应.

#### 3.2.1 机制检验

(1)技术创新 为了检验这一机制, 根据式(2), 本文估计了碳价对技术创新的影响, 结果如表 5 中 A 列和 B 列所示. 很显然, 碳价对研发强度和专利申请授权量都有正向且统计上显著的影响, 表明试点省份相对于非试点省份, 碳价上涨之后研发强度和专利申请授权量都显著增加. 因此, 通过加大研发专利和研发资金的投资, 是碳价提高 TFP 的途径, H2a 通过检验. 该结论与梁军等<sup>[60]</sup>得出的碳交易促进了技术创新总体水平的结论一致. 碳价的上涨并没有使企业因为成本压力而挤出技术创新投资, 相反, 能够促使企业推动技术创新, 进而提高 TFP.

(2)产业结构 表 5 中 C 列为产业结构机制的检验结果. 可以发现, 碳价对产业结构高级化指数的影响在 1% 水平上显著为正, 表明碳价通过产业结构高级化起到促进 TFP 的作用, H2b 成立, 即产业结构高级化是碳价促进 TFP 的贡献者. 这可能由于对石化、化工、建材、钢铁、有色金属、造纸和电力等高碳排放行业而言, 碳价的上涨给他们带来的限制和压力更大, 以上产业的盈利空间受到挤压, 而更加清洁和低碳的新兴产业则更具有发展优势, 从而有利于推动引导资本和劳动力等要素资源向低能耗和低碳产业转化<sup>[61]</sup>, 实现 TFP 提升.

表 5 机制检验结果

Table 5 Mechanism test results

参数	A (rd)	B (lnpatent)	C (is_adv)	D (es)	E (policy)
$price \times post$	0.022** (0.010)	0.411** (0.165)	0.367*** (0.101)	0.255*** (0.074)	0.043** (0.017)
控制变量	Y	Y	Y	Y	Y
事前决定因素	Y	Y	Y	Y	Y
观测值	360	360	360	360	360
adj. $R^2$	0.712	0.978	0.815	0.928	0.757

(3)能源消费结构低碳化 表 5 中 D 列为碳价的能源消费结构低碳化机制检验结果. 可以看出, 能源消费结构低碳化在碳交易试点后显著增长, 证实了碳价会促进能源消费结构低碳化. 因此, 能源消费结构低碳化是碳价影响 TFP 的重要渠道之一, H2c 成立. 市场激励型环境规制依赖于理性的价格体系, 碳价的上涨不仅是成本压力, 而且是市场激励. 在这种情况下, 碳交易试点地区的企业倾向于采用新

能源和非化石能源,而不是传统的能源和化石能源<sup>[35]</sup>.最终,在碳交易价格机制的指导下,由于受规制企业能源结构的低碳化,区域TFP将得到提升.

(4)政府政策支持 表5中E列从政府政策支持识别碳价提升TFP的机制,发现碳价上涨之后政府政策支持有更显著的提升.这表明随着碳价的上涨,政府会更加积极地支持碳交易和低碳发展,H2d基本成立.例如,上海市政府发布了《上海市碳排放权管理办法》,明确了碳交易市场的基本框架和监管机制,为市场发展提供了保障.北京市政府在碳交易试点中建设了碳排放权交易信息平台,提供数据查询和在线交易等功能,为市场提供便利.广东省政府推出了碳金融试点项目,鼓励银行和保险等金融机构参与碳交易市场,为市场提供金融支持.

表6 异质性效应

Table 6 Heterogeneity effects

参数	A (低碳排放)	B (高碳排放)	C (低环境规制强度)	D (高环境规制强度)	E (政绩考核体系不完善)	F (政绩考核体系完善)
price × post	0.024 (0.021)	0.035* (0.019)	0.029 (0.020)	0.028* (0.016)	-0.048 (0.056)	0.040* (0.018)
控制变量	Y	Y	Y	Y	Y	Y
事前决定因素	Y	Y	Y	Y	Y	Y
观测值	180	180	180	180	180	180
adj. R <sup>2</sup>	0.209	0.167	0.205	0.192	0.571	0.333

(2)强环境规制和弱环境规制 依据地区环境规制强度的大小,本文将样本分为强环境规制地区和弱环境规制地区.参考Wu等<sup>[57]</sup>的做法,这里的环境规制强度以综合指标体系来衡量.表6中C列利用环境规制强度低于50百分位的子样本进行回归,结果发现,弱环境规制地区的碳价回归系数不显著,表明对于弱环境规制地区,碳价对TFP的影响不显著.表6中D列采用环境规制强度高于或等于50百分位的子样本估计处理效应,结果发现,在试点后,试点省份的TFP显著上升.这说明碳价的TFP促进效应主要发生在强环境规制地区,H3b基本成立.

(3)合理的政绩考核体系和不合理的政绩考核体系 依据地区政绩考核体系的合理程度,本文将样本分为政绩考核体系合理地区和政绩考核体系不合理地区.政绩考核指标的测度主要借鉴邓慧慧等<sup>[46]</sup>的方法,构建一个包括环境绩效和经济绩效的综合政绩考核指标体系.表6中E和F列分别报告了两组子样本的回归结果.可以发现,碳价的TFP促进效应仅在政绩考核体系合理的地区显著,验证了H3c.

#### 4 建议

(1)在制定碳交易规则时,决策者应限制碳排

以上政策的实施将有助于推进中国低碳经济转型升级,进而提升TFP.

#### 3.2.2 异质性检验

为了检验H3a~H3c,本文接下来对不同碳排放水平、环境规制强度和政绩考核体系的省份进行分组检验.表6报告了异质性检验结果.

(1)高碳排放和低碳排放 本文将省份按碳排放量的高低进行分组,将碳排放量高于或等于50百分位的省份定义为高碳排放省份,把碳排放量在50百分位以下的省份定义为低碳排放省份.高碳排放和低碳排放子样本的回归结果如表6中A列和B列所示.可以发现,在高碳排放地区,碳价能显著促进TFP的提升.与之相反,在低碳排放地区,碳价对TFP的影响不显著,H3a得到验证.

放配额,以保证碳价有一定的上升趋势,进而激发企业参与碳交易的驱动力,提高碳交易的活跃程度,更好地发挥碳价的潜力.事实上,与全球现有的碳交易市场相比,中国碳交易的碳价仍处于较低水平,低迷的碳价可能会使企业完全漠视其功能,因此,只有期望碳价长期上涨,才能形成有效的价格传导作用,引导企业将减排纳入其决策,激励企业开展节能减排活动.此外,政府应扩大行业和家庭参与碳交易市场的范围,提高交易品种和市场活动,这有利于逐步完善价格机制,特别是进一步明确边际成本和碳减排效益.

(2)政府可以通过以下4个方面实现碳价对TFP的提升作用:第一,加大技术创新.政府可以加大对环保和节能减排领域的科技创新投入,形成一批核心竞争力强的环保技术创新企业,通过媒介宣传和政策引导等方式,带动相关行业技术水平的提升.第二,促进产业结构高级化.政府可以加大对新兴产业的扶持力度,通过设立科技专项资金和制定税收优惠政策等方式,鼓励企业加强科技创新和研发投入,引导传统产业向低碳、高附加值和高技术含量等方向发展.第三,推进能源结构低碳化.政府可以制定逐步减少传统能源使用的时间表,并加大对清洁能源的支持力度,推广利用可再生能源技

术, 加速推进能源结构转型, 实现能源消费方式的可持续发展. 第四, 加强政府政策支持. 政府可以建立完善的碳交易体系, 制定相应政策配套措施, 加大对企业的财税支持力度, 降低碳交易门槛和成本, 引导企业积极参与碳交易.

(3) 政府应根据当地情况实施差异化政策, 而不是机械地实施“一刀切”政策. 对于低碳排放水平的地区, 政府可以加大技术创新支持力度, 鼓励企业加强技术投入和创新, 利用新技术、新装备和新工艺降低碳排放, 促进经济发展和环境保护. 对于环境规制弱的地区, 政府应当进一步加强环保法律法规实施, 从源头防控污染, 对违法违规行为依法严肃查处, 有效地推动企业加强环保治污. 同时, 政府可以加强环境监测力度, 及时了解环境质量状况和污染源情况, 采取相应监管措施, 确保环境合规. 对于政绩考核评价体系不合理的地区, 政府可以通过深化行政体制改革, 调整考核评价指标, 将环保指标纳入考核体系, 鼓励企业加强环保建设和经营管理. 同时, 政府也应当通过透明公开政绩考核结果, 引导企业践行社会责任.

## 5 结论

(1) 碳价与 TFP 之间存在持续显著的正因果关系, 即试点碳交易的地区相对于没有试点碳交易的地区, 碳价上涨之后 TFP 显著增长. 具体地, 碳价每上涨 100 元, 试点省份 TFP 将上升约 3.2%. 据粗略估计, 如果碳价达到与欧盟相同的水平, 中国省份的 TFP 将增长约 12.12%. 在进行一系列稳健性检验后, 结果依然稳健. 本文从碳价角度证实了即使在环境规制制度相对薄弱的发展中国家, 市场激励型环境规制工具也能够促进 TFP 的增长.

(2) 研究机制发现, 碳价能够通过多种作用路径对 TFP 的提升产生显著影响. 在碳交易试点后, 随着碳价的上涨, 来自试点省份的技术创新、产业结构高级化、能源结构低碳化和政府政策支持显著增长, 即促进产业结构高级化和能源结构低碳化、加大技术创新以及加强政府政策支持, 是碳价提高 TFP 的有效途径.

(3) 碳价对 TFP 的作用效果会因试点地区的差异存在显著的异质性. 对于具有高碳排放水平、高环境规制强度和较合理政绩考核评价体系的地区, 碳价对 TFP 的促进效应更加明显.

### 参考文献:

[ 1 ] Guo S H. Exploring low-carbon pilot city policy implementation: evidence from China[J]. *Climate Policy*, 2023, **23**(8):1045-1057.  
[ 2 ] Wu Q Y, Wang Y Y. How does carbon emission price stimulate enterprises' total factor productivity? Insights from China's

emission trading scheme pilots[J]. *Energy Economics*, 2022, **109**, doi:10.1016/j.eneco.2022.105990.

- [ 3 ] 习近平. 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话 [EB/OL]. [http://www.gov.cn/xinwen/2020-09/22/content\\_5546169.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2020-09/22/content_5546169.htm), 2020-09-22.
- [ 4 ] 房琪, 李绍萍. 碳交易政策如何影响工业碳生产率: 来自中国省级数据的准自然实验[J]. *环境科学*, 2023, **44**(5): 2983-2994.  
Fang Q, Li S P. How do carbon trading policies affect industrial carbon productivity: quasi-natural experiments from Chinese provincial data[J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(5): 2983-2994.
- [ 5 ] Zhang M S, Wang M J, Jin W, et al. Managing energy efficiency of buildings in China: a survey of energy performance contracting (EPC) in building sector[J]. *Energy Policy*, 2018, **114**: 13-21.
- [ 6 ] Liu X J, An H Z, Wang L J, et al. An integrated approach to optimize moving average rules in the EUA futures market based on particle swarm optimization and genetic algorithms [J]. *Applied Energy*, 2017, **185**: 1778-1787.
- [ 7 ] Jin Y N, Liu X R, Chen X, et al. Allowance allocation matters in China's carbon emissions trading system [J]. *Energy Economics*, 2020, **92**, doi: 10.1016/j.eneco.2020.105012.
- [ 8 ] Yu P, Cai Z F, Sun Y P. Does the emissions trading system in developing countries accelerate carbon leakage through OFDI? Evidence from China[J]. *Energy Economics*, 2021, **101**, doi: 10.1016/j.eneco.2021.105397.
- [ 9 ] Tang L, Shi J R, Bao Q. Designing an emissions trading scheme for China with a dynamic computable general equilibrium model [J]. *Energy Policy*, 2016, **97**: 507-520.
- [ 10 ] Lin B Q, Jia Z J. Impact of quota decline scheme of emission trading in China: a dynamic recursive CGE model [J]. *Energy*, 2018, **149**: 190-203.
- [ 11 ] 刘楠峰, 范莉莉, 李树良, 等. 碳交易制度对企业碳减排绩效影响[J]. *系统工程*, 2022, **40**(3): 13-23.  
Liu N F, Fan L L, Li S L, et al. The influence of the carbon trading system on the enterprise' carbon emission reduction performance [J]. *Systems Engineering*, 2022, **40**(3): 13-23.
- [ 12 ] Peng H R, Qi S Z, Cui J B. The environmental and economic effects of the carbon emissions trading scheme in China: the role of alternative allowance allocation [J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2021, **28**: 105-115.
- [ 13 ] 曾诗鸿, 李璠, 翁智雄, 等. 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.  
Zeng S H, Li F, Weng Z X, et al. Study on the emission reduction effect of China's carbon trading pilot policy and regional differences [J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(4): 1922-1933.
- [ 14 ] 李晖. 碳排放权交易能促进企业创新吗? ——基于中国碳交易试点覆盖企业的检验[J]. *系统工程*, 2022, **40**(6): 11-22.  
Li H. Does carbon emissions trading promote enterprise innovation? - Evidence based on China's carbon trading companies [J]. *Systems Engineering*, 2022, **40**(6): 11-22.
- [ 15 ] 叶强, 高超越, 姜广鑫. 大数据环境下我国未来区块链碳市场体系设计[J]. *管理世界*, 2022, **38**(1): 229-240.  
Ye Q, Gao C Y, Jiang G X. The structure design of China blockchain carbon market for the future big data environment [J]. *Management World*, 2022, **38**(1): 229-240.
- [ 16 ] 苏丽娟, 田丹. 环境权益交易市场能否诱发重污染企业更好的 ESG 表现——基于碳排放权交易的经验证据[J]. *西北师大学报(社会科学版)*, 2023, **60**(3): 134-144.  
Su L J, Tian D. Can the environmental rights trading market induce

- better ESG performance of heavy polluting enterprises—an empirical evidence based on carbon emission trading[J]. *Journal of Northwest Normal University (Social Sciences)*, 2023, **60**(3): 134-144.
- [17] Keohane N O. Cap and trade, rehabilitated: using tradable permits to control U. S. greenhouse gases [J]. *Review of Environmental Economics and Policy*, 2009, **3**(1): 42-62.
- [18] Wu X P, Gao M, Guo S H, *et al.* Environmental and economic effects of sulfur dioxide emissions trading pilot scheme in China: a quasi-experiment [J]. *Energy & Environment*, 2019, **30** (7) : 1255-1274.
- [19] 胡玉凤, 丁友强. 碳排放权交易机制能否兼顾企业效益与绿色效率?[J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, **30**(3): 56-64.  
Hu Y F, Ding Y Q. Can carbon emission permit trade mechanism bring both business benefits and green efficiency? [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2020, **30**(3): 56-64.
- [20] 王凤荣, 李安然, 高维妍. 碳金融是否促进了绿色创新水平?——基于碳排放权交易政策的准自然实验[J]. *兰州大学学报(社会科学版)*, 2022, **50**(6): 59-71.  
Wang Y R, Li A R, Gao W Y. Whether carbon finance promotes the green innovation: quasi-natural experiment based on carbon emission trading policy [J]. *Journal of Lanzhou University (Social Sciences)*, 2022, **50**(6): 59-71.
- [21] 周迪, 刘奕淳. 中国碳交易试点政策对城市碳排放绩效的影响及机制[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(1): 453-464.  
Zhou D, Liu Y C. Impact of China's carbon emission trading policy on the performance of urban carbon emission and its mechanism [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(1): 453-464.
- [22] 于向宇, 陈会英, 李跃. 基于合成控制法的碳交易机制对碳绩效的影响[J]. *中国人口·资源与环境*, 2021, **31**(4): 51-61.  
Yu X Y, Chen H Y, Li Y. Impact of carbon emission trading mechanism on carbon performance based on synthetic control method [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2021, **31**(4): 51-61.
- [23] Andreou P C, Kellard N M. Corporate environmental proactivity: evidence from the European Union's emissions trading system [J]. *British Journal of Management*, 2021, **32**(3): 630-647.
- [24] Porter M E, Van der Linde C. Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship [J]. *Journal of Economic Perspectives*, 1995, **9**(4): 97-118.
- [25] 陈弘, 谢子涵, 王馨瑶. 碳交易政策的实施对企业研发的影响——基于多时点双重差分模型的实证研究[J]. *社会科学家*, 2022, (9): 75-82.  
Chen H, Xie Z H, Xin Y. The impact of the implementation of carbon trading policy on enterprises' research and development——an empirical study based on the multi-time-point difference-in-differences model [J]. *Social Scientist*, 2022, (9): 75-82.
- [26] 何彦妮. 碳交易市场对企业创新策略的影响及作用机制[J]. *中国人口·资源与环境*, 2022, **32**(7): 37-48.  
He Y N. Impact and mechanism of carbon trading market on firms' innovation strategies [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2022, **32**(7): 37-48.
- [27] Pan X F, Pu C X, Yuan S, *et al.* Effect of Chinese pilots carbon emission trading scheme on enterprises' total factor productivity: the moderating role of government participation and carbon trading market efficiency [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, **316**, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.115228.
- [28] 姚星, 陈灵杉, 张永忠. 碳交易机制与企业绿色创新: 基于三重差分模型[J]. *科研管理*, 2022, **43**(6): 43-52.  
Yao X, Chen L S, Zhang Y Z. The carbon trading mechanism and corporate green innovation in China: a study based on the DDD model [J]. *Science Research Management*, 2022, **43**(6): 43-52.
- [29] Lanoie P, Patry M, Lajeunesse R. Environmental regulation and productivity: testing the porter hypothesis [J]. *Journal of Productivity Analysis*, 2008, **30**(2): 121-128.
- [30] Yenipazarli A. Incentives for environmental research and development: consumer preferences, competitive pressure and emissions taxation [J]. *European Journal of Operational Research*, 2019, **276**(2): 757-769.
- [31] 贾智杰, 林伯强, 温师燕. 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[J]. *经济学动态*, 2023, (3): 66-86.  
Jia Z J, Lin B Q. Carbon trading pilots and total factor productivity—with discussions on Porter hypothesis, technology diffusion and pollution paradise [J]. *Economic Perspectives*, 2023, (3): 66-86.
- [32] Yuan B L, Xiang Q L. Environmental regulation, industrial innovation and green development of Chinese manufacturing: based on an extended CDM model [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, **176**: 895-908.
- [33] Stoeber J, Weche J P. Environmental regulation and sustainable competitiveness: evaluating the role of firm-level green investments in the context of the Porter hypothesis [J]. *Environmental and Resource Economics*, 2018, **70**(2): 429-455.
- [34] Hintermayer M. A carbon price floor in the reformed EU ETS: design matters [J]. *Energy Policy*, 2020, **147**, doi: 10.1016/j.enpol.2020.111905.
- [35] Wu Q Y. Price and scale effects of China's carbon emission trading system pilots on emission reduction [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, **314**, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.115054.
- [36] Shen X B, Lin B Q. Does industrial structure distortion impact the energy intensity in China? [J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2021, **25**: 551-562.
- [37] Nippa M, Patnaik S, Taussig M. MNE responses to carbon pricing regulations: theory and evidence [J]. *Journal of International Business Studies*, 2021, **52**(5): 904-929.
- [38] Zhang H J, Duan M S, Deng Z. Have China's pilot emissions trading schemes promoted carbon emission reductions? - The evidence from industrial sub-sectors at the provincial level [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **234**: 912-924.
- [39] Zang J N, Wan L, Li Z J, *et al.* Does emission trading scheme have spillover effect on industrial structure upgrading? Evidence from the EU based on a PSM-DID approach [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, **27**(11): 12345-12357.
- [40] Tan X J, Sun Q, Wang M J, *et al.* Assessing the effects of emissions trading systems on energy consumption and energy mix [J]. *Applied Energy*, 2022, **310**, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.118583.
- [41] Tang P C, Yang S W, Shen J, *et al.* Does China's low-carbon pilot programme really take off? Evidence from land transfer of energy-intensive industry [J]. *Energy Policy*, 2018, **114**: 482-491.
- [42] Luo Y J, Li X Y, Qi X L, *et al.* The impact of emission trading schemes on firm competitiveness: evidence of the mediating effects of firm behaviors from the Guangdong ETS [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, **290**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112633.
- [43] 宋苑震, 曾坚, 王森, 等. 中国县域碳排放时空演变与异质性 [J]. *环境科学*, 2023, **44**(1): 549-559.  
Song Y Z, Zeng J, Wang S, *et al.* Spatial-temporal evolution and heterogeneity of carbon emissions at county-level in China [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(1): 549-559.

- [44] 杨柏, 秦广鹏, 邹钦. “双碳”目标下中国省域碳排放核算分析[J]. 环境科学, 2022, **43**(12): 5840-5849.  
Yang B, Qin G P, Wu Q. Analysis of provincial CO<sub>2</sub> emission accounting in China under the carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. Environmental Science, 2022, **43**(12): 5840-5849.
- [45] 王珍愚, 曹瑜, 林善浪. 环境规制对企业绿色技术创新的影响特征与异质性——基于中国上市公司绿色专利数据[J]. 科学学研究, 2021, **39**(5): 909-919, 929.  
Wang Z Y, Cao Y, Lin S L. The characteristics and heterogeneity of environmental regulation's impact on enterprises' green technology innovation——based on green patent data of listed firms in China[J]. Studies in Science of Science, 2021, **39**(5): 909-919, 929.
- [46] 邓慧慧, 杨露鑫. 雾霾治理、地方竞争与工业绿色转型[J]. 中国工业经济, 2019, (10): 118-136.  
Deng H H, Yang L X. Haze governance, local competition and Industrial green transformation [J]. China Industrial Economics, 2019, (10): 118-136.
- [47] Lyu Y P, Lin H L, Ho C C, *et al.* Assembly trade and technological catch-up: evidence from electronics firms in China [J]. Journal of Asian Economics, 2019, **62**: 65-77.
- [48] Kong D M, Tao Y Q, Wang Y N. China's anti-corruption campaign and firm productivity: evidence from a quasi-natural experiment [J]. China Economic Review, 2020, **63**, doi: 10.1016/j.chieco.2020.101535.
- [49] 任晓松, 马茜, 刘宇佳, 等. 碳交易政策对高污染工业企业经济绩效的影响——基于多重中介效应模型的实证分析[J]. 资源科学, 2020, **42**(9): 1750-1763.  
Ren X S, Ma Q, Liu Y J, *et al.* The impact of carbon trading policy on the economic performance of highly polluting industrial enterprises Empirical analysis based on multiple mediating effect model [J]. Resources Science, 2020, **42**(9): 1750-1763.
- [50] 付凌晖. 我国产业结构高级化与经济增长关系的实证研究[J]. 统计研究, 2010, **27**(8): 79-81.  
Fu L H. An empirical research on industry structure and economic growth [J]. Statistical Research, 2010, **27**(8): 79-81.
- [51] Beck T, Levine R, Levkov A. Big bad banks? The winners and losers from bank deregulation in the United States [J]. The Journal of Finance, 2010, **65**(5): 1637-1667.
- [52] Gentzkow M. Television and voter turnout [J]. The Quarterly Journal of Economics, 2006, **121**(3): 931-972.
- [53] 陈勇兵, 王进宇, 潘夏梦. 对外反倾销与贸易转移: 来自中国的证据[J]. 世界经济, 2020, **43**(9): 73-96.  
Chen Y B, Wang J Y, Pan X M. Anti-dumping investigations and trade diversion: evidence from China [J]. The Journal of World Economy, 2020, **43**(9): 73-96.
- [54] 陆春华, 李虹. 碳试点政策、绿色创新和企业生产效率[J]. 经济问题探索, 2023, (4): 38-60.  
Lu C H, Li H. Carbon pilot policy, green innovation and enterprise production efficiency [J]. Inquiry into Economic Issues, 2023, (4): 38-60.
- [55] Cao H J, Wang B Z, Li K. Regulatory policy and misallocation: a new perspective based on the productivity effect of cleaner production standards in China's energy firms [J]. Energy Policy, 2021, **152**, doi: 10.1016/j.enpol.2021.112231.
- [56] 陈勇兵, 刘佳祺, 徐丽鹤. 房价与出口: 不可贸易部门对可贸易部门的挤出效应[J]. 经济研究, 2021, **56**(3): 186-203.  
Chen Y B, Liu J Q, Xu L H. Housing price and export: the crowding-out effect of non-tradable sector on tradable sector [J]. Economic Research Journal, 2021, **56**(3): 186-203.
- [57] Wu X P, Gao M, Guo S H, *et al.* Effects of environmental regulation on air pollution control in China: a spatial Durbin econometric analysis [J]. Journal of Regulatory Economics, 2019, **55**(3): 307-333.
- [58] Liu Q, Qiu L D. Intermediate input imports and innovations: evidence from Chinese firms' patent filings [J]. Journal of International Economics, 2016, **103**: 166-183.
- [59] Topalova P. Factor immobility and regional impacts of trade liberalization: evidence on poverty from India [J]. American Economic Journal: Applied Economics, 2010, **2**(4): 1-41.
- [60] 梁军, 李佳艺. 碳交易是否提升了城市绿色全要素生产率? [J]. 上海经济研究, 2023, (3): 97-114.  
Liang J, Li J Y. Does a carbon trading contribute to urban green total factor productivity? [J]. Shanghai Journal of Economics, 2023, (3): 97-114.
- [61] Zheng Q Q, Wan L, Wang S Y, *et al.* Does ecological compensation have a spillover effect on industrial structure upgrading? Evidence from China based on a multi-stage dynamic DID approach [J]. Journal of Environmental Management, 2021, **294**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112934.

## CONTENTS

Spatio-temporal Evolution, Dynamic Transition, and Convergence Trend of Urban Carbon Emission Intensity in China .....	YANG Qing-ke, WANG Lei, ZHU Gao-li, <i>et al.</i> (1869)
Spatio-temporal Evolution and Trend Prediction of Transport Carbon Emission Efficiency .....	ZHENG Yan, JIANG Xue-mei, XIAO Yu-jie (1879)
Research on Carbon Emission Decoupling Factors Based on STIRPAT Model and LMDI Decomposition .....	ZHANG Jiang-yan (1888)
Carbon Peak Pathways of Industrial Parks Based on the LEAP Model: A Case Study of a National Development Zone in Nanjing .....	LI Hui-peng, LI Li, YIN Yin, <i>et al.</i> (1898)
Accounting and Analysis of Carbon Emissions in Universities: A Case Study of Beijing A University .....	CAO Rui, FENG Li, ZHANG Li-qiu (1907)
Synergy Effects and Driving Factors of Pollution and Carbon Emission Reduction in Manufacturing Industry in Beijing .....	YU Shan, HAN Yu-hua, MU Jie, <i>et al.</i> (1917)
Carbon Emissions Trading Prices and Total Factor Productivity: Evidence from China .....	WU Xue-ping (1926)
Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM <sub>2.5</sub> and PM <sub>10</sub> in Chinese Cities .....	LI Jiang-su, DUAN Liang-rong, ZHANG Tian-jiao (1938)
Spatial-temporal Characteristics and Influencing Factors of PM <sub>2.5</sub> and Ozone in the Border Area of Jiangsu, Anhui, Shandong, and Henan from 2017 to 2021 .....	CHEN Wei, XU Xue-zhe, LIU Wen-qing (1950)
Analysis of the Characteristics and Causes of PM <sub>2.5</sub> and O <sub>3</sub> Pollution in Xi'an During the Epidemic Lockdown Period .....	YUAN Xiao-hong, ZHANG Qiang, LI Qi, <i>et al.</i> (1963)
PM <sub>2.5</sub> Chemical Composition and Spatial Variability in the Five Cities of Southern Jiangsu During Fall and Winter .....	FENG Wei, DING Feng, SHANG Yue, <i>et al.</i> (1975)
Source Apportionment of Fine Particles in Xianning, Hubei .....	LUO Yi, ZHU Kuan-guang, CHEN Pu-long, <i>et al.</i> (1983)
Spillover Benefits of Ammonia Emission Reduction in Xingtai Area to the Improvement of Atmospheric PM <sub>2.5</sub> Concentration in the Beijing-Tianjin-Hebei Region .....	BIAN Ze-jun, WEN Chao-yu, LANG Jian-lei, <i>et al.</i> (1994)
Characteristics, Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM <sub>2.5</sub> During Winter in Liaocheng City .....	ZHANG Jing-qiao, ZHU Yao, CAO Ting, <i>et al.</i> (2003)
Composition Characteristics of Typical VOCs Sources in the Highland City of Lhasa .....	GUO Shu-zheng, YE Chun-xiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i> (2011)
VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment in Typical Industrial Parks in Beijing: Environmental Impact of High and New Technology Industries .....	WANG Jie, YAO Zhen, WANG Min-yan, <i>et al.</i> (2019)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in the Chengdu Plain Under the Influence of High Temperature Extremes .....	LEI Li-juan, ZHANG Yi, LUO Yi-na, <i>et al.</i> (2028)
Presence, Behavior, and Risk of Antiviral Drugs in the Aqueous Environment .....	GE Lin-ke, LI Xuan-yan, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (2039)
Spatio-temporal Variation and Probability Health Risk of Heavy Metals in Surface Water of Xiaolangdi Reservoir in the Yellow River .....	WANG Liang, DENG Xue-jiao, WANG Xiao-lei, <i>et al.</i> (2054)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Strontium Enrichment of the Duoqu River Basin in Eastern Xizang .....	LI Jing-jie, LIAN Sheng, WANG Ming-guo, <i>et al.</i> (2067)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Its Moisture Sources in the Inland Regions of Northwest China .....	ZHANG Yan-yan, XIN Cun-lin, GUO Xiao-yan, <i>et al.</i> (2080)
Recharge Source and Evolution Process of Karst Groundwater in Tai'an Urban Area Based on Hydrochemistry and Hydrogen and Oxygen Isotopes .....	MENG Ling-hua (2096)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors of Surface Water and Groundwater in the Mountainous Area of Danjiang River Basin .....	ZHANG Zi-yan, FU Yong-peng, WANG Ning-tao, <i>et al.</i> (2107)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Yuanyangchi Irrigation Area, Jinta Basin .....	WANG Xiao-yan, HAN Shuang-bao, ZHANG Meng-nan, <i>et al.</i> (2118)
Hydrochemical Characteristics and Health Risk Assessment of Shallow Groundwater in the Plain Zone of Deyang City .....	LIU Nan, CHEN Meng, GAO Dong-dong, <i>et al.</i> (2129)
Spatial and Temporal Distribution of Microplastics in the Sediments of Typical Urban River Network .....	XU Wan-lu, FAN Yi-fan, QIAN Xin (2142)
Construction of Nitrogen Emission Inventory at Sub-basin Scale and Analysis of Key Sources in Fuxian Lake Watershed .....	WANG Yan-jie, LIANG Qi-bin, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (2150)
Preparation of Lanthanum Crosslinked Calcium Peroxide/Sepiolite/Sodium Alginate Composite Hydrogels and Their Elimination Performance for Endogenous Phosphorus .....	QU Si-tong, SHAN Su-jie, WANG Chong-ming, <i>et al.</i> (2160)
Formation Mechanism, Structural Characteristics of Ultrafine Mineral Particles, and Their Environmental Effects .....	LIU Zhen-hai, ZHANG Zhan-hua, YUAN Yu-xin, <i>et al.</i> (2171)
Research Progress in Application of Biochar-immobilized Bacteria Composites in Environmental Remediation .....	SUN Shu-yu, HUANG Meng-xin, KONG Qiang, <i>et al.</i> (2185)
Effect of Microplastics on Ammonia Nitrogen Adsorption by Zeolite in Water and Its Mechanism .....	LIAN Jian-jun, XIE Shi-ting, WU Pei, <i>et al.</i> (2195)
Mechanism of Ultraviolet Aging Effect on the Adsorption of Ciprofloxacin by Nano-biochar .....	MA Feng-feng, XUE Zhi-yi, ZHAO Bao-wei (2203)
Response of Phytoplankton Communities and Environmental Factors Under the Influence of Land Use in the Wuding River Basin .....	GUO Shan-song, HU En, DING Yi-tong, <i>et al.</i> (2211)
Bacterial Community Diversity and Functional Gene Abundance of Culturable Bacteria in the Wetland of Poyang Lake .....	YU Jiang, WANG Chun, LONG Yong, <i>et al.</i> (2223)
Bacterial Community Structure and Its Relationship with Heavy Metals in Sediments of Diannong River .....	LIU Shuang-yu, MENG Jun-jie, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i> (2233)
Impacts of Treated Wastewater on Bacterial and Fungal Microbial Communities in Receiving Rivers .....	GUO You-shun, YU Zhong, HAO Wen-bin, <i>et al.</i> (2246)
Metagenomics Reveals the Characteristics and Functions of Bacterial Community in the Advanced Wastewater Treatment Process .....	HU Jian-shuang, WANG Yan, ZHOU Zheng, <i>et al.</i> (2259)
Spatio-temporal Characteristics of Habitat Quality and Natural-human Driven Mechanism in Dabie Mountain Area .....	ZHENG Ya-ping, ZHANG Jun-hua, TIAN Hui-wen, <i>et al.</i> (2268)
Hyperspectral Inversion of Soil Organic Matter Content Based on Continuous Wavelet Transform, SHAP, and XGBoost .....	YE Miao, ZHU Lin, LIU Xu-dong, <i>et al.</i> (2280)
Effects of Straw Retention, Film Mulching, and Nitrogen Input on Soil Quality in Dryland Wheat Field .....	YE Zi-zhuang, WANG Song-yan, LU Xiao, <i>et al.</i> (2292)
Effects of Long-term Application of Organic Fertilizer on the Occurrence and Migration Characteristics of Soil Microplastics .....	WANG Chang-yuan, MA Xiao-chi, GUO De-jie, <i>et al.</i> (2304)
Effect of Different Soil Salinities on N <sub>2</sub> O Emission: A Meta-analysis .....	HUANG Yi-hua, SHE Dong-li, SHI Zhen-qi, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Prediction of Carbon Storage Based on Land Use/Land Cover Dynamics in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area .....	ZHENG Hui-ling, ZHENG Hui-feng (2321)
Simulation of Temporal and Spatial Changes in Ecosystem Carbon Storage in Funiu Mountains Based on InVEST Model .....	ZHANG Zhe, SHI Zhen-qin, ZHU Wen-bo, <i>et al.</i> (2332)
Relationship Between Microbial Nutrient Limitation and Soil Organic Carbon Fraction During Shelterbelts Construction .....	XU Feng-jing, HUANG Yi-mei, HUANG Qian, <i>et al.</i> (2342)
Characteristics and Driving Forces of Organic Carbon Mineralization in Brown Soil with Long-term Straw Returning .....	ZHAO Yu-hang, YIN Hao-kai, HU Xue-chun, <i>et al.</i> (2353)
Effects of Winter Green Manure Mulching on Soil Aggregates, Organic Carbon, and AMF Diversity .....	LU Ze-rang, CHEN Jia-yan, LI Zhi-xian, <i>et al.</i> (2363)
Spatial and Temporal Distribution of Nitrogen in the Liaohe River Basin and Its Responses to Land Use and Rainfall .....	ZHOU Bo, LI Xiao-guang, TONG Si-chen, <i>et al.</i> (2373)
Nitrous Oxide Emissions from Ponds in Typical Agricultural Catchment with Intensive Agricultural Activity .....	ZHANG Xin-yue, XIAO Qi-tao, XIE Hui, <i>et al.</i> (2385)
Effects of Biochar Combined with Different Types of Nitrogen Fertilizers on Denitrification Bacteria Community in Vegetable Soil .....	LIU Xiao-wan, LIU Xing-ren, GAO Shang-jie, <i>et al.</i> (2394)
Investigation of Soil Microbial Characteristics During Stand Development in <i>Pinus tabulaeformis</i> Forest in Taiyue Mountain .....	MA Yi-shu, CAO Ya-xin, NIU Min, <i>et al.</i> (2406)
Simulation of Heavy Metal Content in Soil Based on Sparse Sample Sites .....	ZHANG Jia-qi, PAN Yu-chun, GAO Shi-chen, <i>et al.</i> (2417)
Identification Priority Source of Heavy Metal Pollution in Greenspace Soils Based on Source-specific Ecological and Human Health Risk Analysis in the Yellow River Custom Tourist Line of Lanzhou .....	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (2428)
Heavy Metal Accumulation and Assessment of Potential Ecological Risk Caused by Soil pH Changes in Different Types of Purple Soils in Southwest China .....	ZHANG Hai-lin, ZHANG Yu, WANG Ding, <i>et al.</i> (2440)
Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Arable Land Around an Iron Ore Mining Area in Chongqing .....	LIAO Ze-yuan, LI Jie-qin, SHEN Zhi-jie, <i>et al.</i> (2450)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around Metal Mines .....	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (2461)
Effect of Red Mud-based Nano Zero-valent Iron on Remediation of Polymetallic Contaminated Soil .....	LIU Long-yu, YANG Shi-li, ZHAO Huang-shi-yu, <i>et al.</i> (2474)
Effects of Zinc Application on Cadmium Accumulation in Alkaline Soil-Wheat Seedling Systems .....	ZHANG Yao, WANG Tian-qi, NIU Shuo, <i>et al.</i> (2480)