

目次

2018~2020年北京市大气PM<sub>2.5</sub>污染特征及改善原因 ..... 刘保献, 李倩, 孙瑞雯, 董瑞, 王书肖, 郝吉明 (2409)

京津冀城市群冬季二次PM<sub>2.5</sub>的时空分布特征 ..... 姚青, 杨旭, 唐颖潇, 樊文雁, 蔡子颖, 韩素芹 (2421)

COVID-19管控前后不同污染阶段PM<sub>2.5</sub>中二次无机离子变化特征 ..... 姜楠, 郝雪新, 郝祺, 魏云飞, 张瑜, 吕政卿, 张瑞芹 (2430)

基于在线观测的太原市冬季PM<sub>2.5</sub>中金属元素污染水平及来源解析 ..... 崔阳, 郭利利, 李宏艳, 李永麒, 李滨, 何秋生, 王新明 (2441)

青藏高原东缘黑碳气溶胶变化特征及其来源 ..... 王红磊, 刘思晗, 赵天良, 卢文, 夏俊荣, 施双双 (2450)

湛江市夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析 ..... 庞晓蝶, 高博, 陈来国, 刘明, 陆海涛, 王硕, 赵伟, 梁小明, 郭送军 (2461)

2021年夏季新乡市区臭氧超标日污染特征及敏感性 ..... 侯墨, 蒋小梅, 赵文鹏, 马琳, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启 (2472)

台风“浪卡”过程对海南岛臭氧污染的影响分析 ..... 符传博, 丹利, 徐金鹤, 徐文帅 (2481)

天津市空气污染的健康影响分析 ..... 华琨, 罗忠伟, 贾斌, 薛倩倩, 李亚菲, 肖致美, 吴建会, 张裕芬, 冯银厂 (2492)

2002~2020年中国河流环境质量演变及驱动因子分析 ..... 杨传玺, 薛岩, 高畅, 万孜恒, 王小宁, 刘永林, 刘琳, 刘长青, 王炜亮 (2502)

1990~2020年黄河流域典型生态区生态环境质量时空格局及驱动力分析 ..... 王芳, 李文慧, 林妍敏, 南雄雄, 胡志瑞 (2518)

长江上游小型水库枯水期水质对景观组成、配置和水库特征的响应 ..... 钟泳林, 冉娇娇, 文雯, 张名瑶, 吕明权, 吴胜军 (2528)

宁夏入黄排水沟中典型内分泌干扰物的污染特征与风险评价 ..... 李凌云, 高礼, 郑兰香, 李富娟, 陶红, 马兰 (2539)

微塑料及金属在黄浦江地表水环境的赋存特征及与金属抗性基因的相关性分析 ..... 陆嘉玮, 徐晨辉, 胡纯, 刘树仁, 李方 (2551)

黄河兰州段城市河道表层沉积物重金属空间分布特征及来源解析 ..... 李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 臧飞, 毛满萱, 潘文惠, 米璇 (2562)

三峡库区支流库湾消落带土壤磷形态赋存特征及其释放风险 ..... 张雪, 朱波 (2574)

霍邱县城湖泊沉积物营养盐分布及污染评价 ..... 刘海, 赵国红 (2583)

基于贝叶斯网络的太湖叶绿素a影响因素分析 ..... 刘杰, 何云川, 邓建明, 汤祥明 (2592)

河北省顺平县地下水化学特征及其成因分析 ..... 刘元晴, 周乐, 吕琳, 李伟, 王新峰, 路小慧, 郑一迪, 孟顺祥 (2601)

饮用水处理过程中全氟化合物的分布、转化及去向 ..... 钟婷婷, 林涛, 刘威 (2613)

镍铁氧体@活性炭复合材料去除六价铬的表征、性能及机制 ..... 张华, 李荣华, 陈金雄, 曾鸿鹄, 黄海艺, Asfandyar Shahab (2622)

纳米核壳Co@NC催化剂活化过氧乙酸降解磺胺甲噁唑 ..... 郑婷露, 张龙龙, 陈家斌, 张亚雷, 周雪飞 (2635)

富里酸改性FeMnNi-LDH复合材料对水中砷镉的吸附性能与机制 ..... 何雅馨, 柯心怡, 魏世强, 蒋珍茂 (2646)

富含钙/铝的污泥生物炭复合材料对水溶液中磷酸盐的吸附机制 ..... 欧阳铸, 曹露, 王炳乾, 丁丽, 黄海明, 祝采莹, 邝晓彤 (2661)

污泥生物炭掺杂改性及其对水中1,2-二氯乙烷吸附行为和机制 ..... 周佳伟, 施维林, 许伟, 魏晨军, 吴建生, 孟宪荣 (2671)

森林生态系统对大气氮沉降降低的响应 ..... 谢丹妮, 仰东星, 段雷 (2681)

气候变化和人类活动对我国典型草原区植被恢复的影响 ..... 张良侠, 岳笑, 周德成, 樊江文, 李愈哲 (2694)

西南地区陆地植被生态系统NPP时空演变及驱动力分析 ..... 徐勇, 黄海艳, 戴强玉, 郭振东, 郑志威, 盘钰春 (2704)

不同碳输入对天山雪岭云杉林土壤化学计量特征的影响 ..... 马鑫钰, 贡璐, 朱海强, 张甜, 殷珂洁, 陆星宇 (2715)

氮磷添加对荒漠草原土壤养分含量及生态化学计量特征的影响 ..... 刘姝萱, 安慧, 张馨文, 邢彬彬, 文志林, 王波 (2724)

互花米草入侵对杭州湾滨海湿地土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响 ..... 李文琦, 项琦, 解雪峰, 吴涛, 蒋国俊, 张建珍, 濮励杰, 徐飞 (2735)

黄土旱塬24 a不同秸秆还田土壤碳、氮、磷和胞外酶计量特征 ..... 姚志霞, 周怀平, 解文艳, 杨振兴, 陈浩宁, 文永莉, 程曼 (2746)

黄土高原子午岭植被自然恢复下的固碳特征 ..... 许小明, 张晓萍, 王浩嘉, 贺洁, 王妙倩, 易海杰, 薛帆, 邹亚东, 田起隆, 何亮 (2756)

短期氮添加对黄土高原人工刺槐林土壤有机碳组分的影响 ..... 简俊楠, 刘伟超, 朱玉帆, 李佳欣, 温宇豪, 刘付和, 任成杰, 韩新辉 (2767)

福建省水田土壤有机碳积累对未来温度升高的响应 ..... 车燕, 邱龙霞, 吴凌云, 龙军, 毋亭, 李晶, 邢世和, 张黎明 (2775)

中国镉超富集植物的物种、生境特征和筛选建议 ..... 赵晓峰, 雷梅, 陈同斌 (2786)

基于地理探测器的土壤重金属空间分异及其影响因素分析研究进展 ..... 龚仓, 王顺祥, 陆海川, 陈勇, 刘玖芬 (2799)

河北省土壤化学元素的背景值与基准值 ..... 张丽婷, 成杭新, 谢伟明, 齐全强, 谢晓阳, 于文龙, 王俊达 (2817)

非粮化利用下耕地土壤重金属分布特征、生态风险和来源解析 ..... 邱乐丰, 祝锦霞, 潘艺, 党云晓, 吴绍华 (2829)

基于乡镇尺度的地质高背景区耕地土壤重金属来源分析与风险评价 ..... 余飞, 王佳彬, 王锐, 王宇, 宁墨奂, 张云逸, 苏黎明, 董金秀 (2838)

长株潭地区土壤Cd和Pb固液分配特征与环境风险 ..... 李钰滢, 彭驰, 刘乐乐, 张严, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元 (2849)

贵州铅锌矿区土壤和作物重金属生态风险与迁移特征 ..... 马宏宏, 张利, 郭飞, 杨峥, 王惠艳, 彭敏, 张富贵 (2856)

贵州省旱地土壤Hg污染状况与玉米安全生产评估 ..... 马丽钧, 周浪, 宋波, 王佛鹏, 张云霞, 吴勇 (2868)

山西野生连翘生长地土壤PAHs污染特征及风险评价 ..... 郭佳佳, 王琦, 康敏捷, 焦海华, 茹文明, 白志辉 (2879)

P对小麦Cd和As吸收与转运的影响 ..... 王云, 赵鹏, 李广鑫, 胡彩霞, 王俊, 刘红恩, 高巍, 秦世玉, 睢福庆, 李畅 (2889)

施硅对水稻铁膜砷固定和体内砷转运的影响 ..... 李林峰, 文伟发, 徐梓盛, 陈勇, 李奇, 李义纯 (2899)

广东海丰湿地生态恢复进程中不同生境的土壤微生物特征分析 ..... 马姣娇, 高常军, 易小青, 吴琰, 李佳鸿, 曾向武, 蔡坚 (2908)

五台山不同退化程度亚高山草甸土壤微生物群落分类与功能多样性特征 ..... 罗正明, 刘晋仙, 胡砚秋, 赫磊, 周妍英, 郑庆荣, 柴宝峰 (2918)

天然高寒草地转变为混播人工草地对土壤微生物群落特征的影响 ..... 于皓, 刘悦, 邓晔, 芦光新, 颜璋琳, 王英成 (2928)

紫云英还田与化肥减量配施对稻田土壤细菌群落组成和功能的影响 ..... 张济世, 刘春增, 郑春风, 张琳, 张香凝, 吕玉虎, 曹卫东, 张玉亭 (2936)

长期生草栽培对山核桃人工林土壤真菌群落和酶活性的影响 ..... 胡颖榭, 梁辰飞, 金锦, 王潇璇, 叶子豪, 吴家森 (2945)

高密度聚乙烯微塑料胁迫对棉花生长、枯萎病发生和根际细菌群落的影响 ..... 张浩, 孙洁, 杨慧颖, 董联政, 滑紫微, 韩辉, 陈兆进 (2955)

菌藻复合体系氮代谢性能及菌群特征 ..... 赵志瑞, 吴海森, 马超, 李书缘, 李晴, 袁凯倪, 孟祥源, 刘硕, 方晓峰 (2965)

中国碳排放及影响因素的市域尺度分析 ..... 吴健生, 晋雪茹, 王晗, 冯喆, 张丹妮, 李雪尘 (2974)

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 ..... 房琪, 李绍萍 (2983)

垃圾分类对碳减排的影响分析:以青岛市为例 ..... 陈纪宏, 卞荣星, 张昕雪, 高晨琦, 孙英杰, 李卫华, 张国栋, 占美丽 (2995)

1950~2019年中国季节平均最高气温时空演变特征及其大气环流影响定量分析 ..... 苏越, 路春燕, 黄雨菲, 苏艳琳, 王自立, 雷依凡 (3003)

《环境科学》征订启事(2480) 《环境科学》征稿简则(2538) 信息(2766, 2798, 2927)

# 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

房琪, 李绍萍\*

(东北石油大学经济管理学院, 大庆 163318)

**摘要:** 当前, 在中国奋力实现“碳达峰”“碳中和”目标的背景下, 不仅给碳排放量相对较高的工业企业带来较大环境治理压力, 同时也给其在经济增长方面带来较大冲击. 对其随着碳交易政策的提出, 是否能够产生“减碳促经”效果展开深入研究. 基于 2005~2019 年 30 个省市数据, 通过双重差分方法和多重中介效应模型对碳交易政策与工业碳生产率的影响效果和作用路径展开深入分析. 结果表明, 碳交易政策能够明显提升工业碳生产率水平; 同时该种作用效果会随着试点区域的不同存在明显差异; 该政策能够产生显著的环境规制、结构优化、技术和能源结构优化效应. 建议通过加速完善环境规制层面法律制度、加快构建环保产业发展新体系、加强绿色技术创新研发力度和加速优化能源结构方面促进中国工业经济向低碳化发展转型.

**关键词:** 碳交易政策; 工业碳生产率; 双重差分模型; 多重中介效应模型; 碳达峰; 碳中和

中图分类号: X24 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)05-2983-12 DOI: 10.13227/j.hjkk.202206126

## How Do Carbon Trading Policies Affect Industrial Carbon Productivity: Quasi-natural Experiments from Chinese Provincial Data

FANG Qi, LI Shao-ping\*

(School of Economics and Management, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)

**Abstract:** At present, China's efforts to achieve a “carbon peak” and “carbon neutrality” not only put great pressure on environmental governance to industrial enterprises with relatively high carbon emissions but also bring great pressure to their economic growth. However, with the proposal of a carbon trading policy, in-depth research was carried out to explore whether it can produce the effect of “carbon reduction and economic promotion.” Based on the data of 30 provinces and cities from 2005 to 2019, this study conducted an in-depth analysis on the impact and path of carbon trading policies and industrial carbon productivity through methods such as double difference and multiple mediation effect models. The results showed that the carbon trading policy could significantly improve the level of industrial carbon productivity; at the same time, the effect will vary significantly with different pilot regions; the policy can produce significant effects of environmental regulation, structural optimization, technology, and energy structure optimization. It is suggested to promote the transformation of China's industrial economy to low-carbon development by accelerating the improvement of the legal system at the environmental regulation level, accelerating the construction of a new development system for the environmental protection industry, strengthening the innovation and research and development of green technology and accelerating the optimization of the energy structure.

**Key words:** carbon trading policy; industrial carbon productivity; double-difference model; multiple mediation effect model; carbon peak; carbon neutrality

当前, 全球环境形势日渐严峻, 中国为不断提升自身国际影响力, 积极承担大国使命, 在 2020 年提出“碳达峰”“碳中和”(双碳)目标<sup>[1]</sup>. 在此之前, 中国为应对环境问题, 已在北京和天津等 7 个省市作为试点实施碳交易政策<sup>[2]</sup>. 然而, 随着双碳目标的提出, 无疑给高能耗、高排放的企业和城市带来较大减排压力. 因此, 作为在中国碳排放量输出最多的工业行业<sup>[3]</sup>, 全面实现节能减排和奋力实现“降碳促经”, 从而稳步提升中国工业碳生产率是亟待解决的首要问题.

国内外学者鉴于工业行业自身特殊属性, 将工业增加值与 CO<sub>2</sub> 排放量的比值作为工业碳生产率指标<sup>[4]</sup>. 当前, 学者们主要集中在空间格局、指标计算和作用因素等层面对碳生产率展开深入研究<sup>[5-7]</sup>. 但对于碳交易政策与工业碳生产率之间的影响研究相对较少, 对两者之间的影响机制研究观

点也各不相同. 因此科学高效探究碳交易政策对中国工业碳生产率的作用机制和提升路径显得尤为必要.

当前, 国内外学者针对碳交易政策对工业碳生产率的作用效果进行不同程度的分析, 其中前沿的相关研究主要围绕: 第一, 减碳效应. Zhang 等<sup>[8]</sup>认为在实施碳交易政策前后的试点地区的碳强度没有明显变化, 然而碳排放总量却呈显著下降态势. 涂正革等<sup>[9]</sup>则通过对区域环境和政策实施力度的差异分析, 认为该政策的减碳效应在短期内不显著, 然而随着时间的推移, 减碳效应得到进一步验证. 第二, 促经效应. 一方面, 碳交易政策对中国低碳经济发展

收稿日期: 2022-06-11; 修订日期: 2022-08-03

基金项目: 黑龙江省哲学社会科学规划项目(19JYE257); 教育部人文社会科学研究项目(22YJC790086)

作者简介: 房琪(1997~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为能源和环境经济学, E-mail: frenchfang@126.com

\* 通信作者, E-mail: daqinglishaoping@126.com

发挥着至关重要的作用,同时对于西部地区经济的促进作用相比于其他地区更加显著<sup>[10]</sup>.另一方面,该政策对中国城市低碳绿色创新的步伐发挥着明显的助推作用,在此过程中,企业和城市不断投入创新人才与创新资金,积极营造创新环境,从而倒逼碳市场对低碳经济发展的牵引作用<sup>[11]</sup>.最后,减碳促经效应. Yang 等<sup>[12]</sup>通过研究发现,碳交易政策对社会就业率的提升和碳排放总量的减少发挥着不同程度的作用. Yu 等<sup>[13]</sup>则认为该政策能够显著促进产业经济和环境发展. 范秋芳等<sup>[14]</sup>通过研究发现,该政策能够实现“减碳促经”效应,同时可以正向促进碳生产率的提升,而且长期的作用效果相比短期来说更加显著. 然而,胡玉凤等<sup>[15]</sup>则从企业角度出发,通过探究该政策与企业全要素和绿色全要素生产率之间的关系发现,该政策会在一定程度上阻碍上述两项生产率的提升.

上述研究存在以下不足:首先,围绕碳交易政策与中国工业碳生产率之间的关系研究存在较大提升空间;其次,对两者之间的作用机制研究缺少系统理论分析框架,未能将“环境规制效应”、“结构优化效应”、“技术效应”和“能源结构优化效应”有机结合起来,从而进行系统分析;再次,针对碳交易政策对不同试点地区的影响效果缺乏理论分析;最后,在探究碳交易政策作用机制和方法方面提升空间较大,对于复杂作用机制的研究可以通过采用链式中介效应模型展开分析. 基于此,本文探究碳交易政策对工业碳生产率的作用效果主要从环境规制、结构优化、技术和能源结构优化角度出发,构建并行和链式中介效应模型对其展开系统研究,同时对不同试点地区政策制度设计进行横向比较,从而提出能够高效提升工业碳生产率的作用路径,这不仅能够在一定程度上为工业主体缓解“双碳”目标带来的减碳压力,同时还可以为碳交易政策推向全国打下坚实理论基础.

## 1 碳交易政策传导机制解析

碳交易政策实质上是指 CO<sub>2</sub> 排放权在碳市场上进行交易的政策. 一方面,碳市场能够把环境问题向内部成本进行转化,促使减排成本相对较低的企业超额减排,同时将剩余的碳排放许可证进行交易,此外,减排成本相对较高的企业会购买超出自身配额的排放许可,从而实现减排目标. 另一方面,碳交易政策通过市场手段,并以减排为目标构建优化互动平台,促进全社会低碳可持续发展. 可见,中国碳交易政策能够有效实现“减碳促经”,同时也表明该政策是通过市场手段降低温室气体排放的一项重大

制度创新工程.

### 1.1 环境规制效应

在构建碳市场的过程中,政府环保支出的作用在于有效推进环境保护和经济增长的协调发展<sup>[16]</sup>. 一方面,环保支出能够有效提升环境质量. 李启庚等<sup>[17]</sup>认为政府环保支出具有明显的环境规制效应,不仅能够明显降低全社会能源消耗量,还可以在在一定程度上抑制污染物排放强度. 另一方面,环保支出能够为社会资本的流向提供指引. 田淑英等<sup>[18]</sup>通过对中国省际工业污染数据进行分析发现,环保支出对社会环境规制具有明显的正向促进作用,同时在一定程度上引导社会资本流向.

政府环保支出一方面可以直接影响中国环境保护和经济增长的步伐,从而逐步提升工业碳生产率水平. 另一方面,政府环保支出还可以借助多种链式作用途径对工业碳生产率发挥间接作用. 首先,政府环保投入能够在一定程度上促进工业生产效率从低到高流转,逐步加大工业资源利用,从而刺激工业碳生产率的大幅提高<sup>[19]</sup>. 其次,环保支出在提高环境规制强度的同时,使得企业环境污染治理成本和环保投入随之增加,通过倒逼绿色工艺和技术的升级则有助于技术创新水平的提升,然而在政府生态环保政策的大力扶持下,使得企业所获取的政策支持在一定程度上缓解了技术创新资金短缺的问题. 张毅等<sup>[20]</sup>认为环境规制在经济发展的调节作用下能够在一定程度上推进省域节能减排技术创新的发展步伐. 最后,环境规制能够在一定程度上正向影响能源结构优化进程,这种正向影响主要通过限制能源消耗和有偏选择两种途径展开. 通过实施约束工业污染排放和资源配置等措施进一步限制能源消耗;通过对能源消耗方式的倒逼改良导致市场准入和工业环境向优化能源利用效率方向改进的过程即为有偏选择. 此外,环境规制能够通过显著提升技术创新水平,逐步实现更加节能的工业生产方式,以此推动能源结构优化进程,从而实现全社会整体工业碳生产率的大幅提升.

### 1.2 结构优化效应

随着碳交易政策的提出,能够在一定程度上促进产业结构加速转型,从而使得工业经济实现向绿色、健康发展. 碳交易政策的提出初期会给高耗能产业的节能减排工作带来较大压力,然而高新技术产业和节能环保产业在此过程中则呈现迅猛发展态势,能够有效刺激产业结构逐步向低碳和节能方向转型,进而提高工业碳生产率<sup>[21]</sup>.

此外,产业结构的高效转型能够为产业技术研发提供外部创新环境,从而实现区域产业加速向绿

色、健康和创新发展<sup>[22]</sup>。随着碳交易政策的提出,使得高耗能产业逐渐被环保技术型产业取代,并在此过程中逐渐发展为具有低碳、环保和绿色等属性的产业格局。碳交易还可以在提升能源利用效率的同时焕发区域经济新机制,逐步增强产业创新潜力<sup>[23]</sup>。

### 1.3 技术效应

碳交易政策在当前通过政策、人才和技术全方位保障的背景下,可以显著提高城市创新水平,从而实现工业碳生产率的大幅提升<sup>[24]</sup>。首先,中国碳市场的合理发展推动各个企业主体对于创新知识和创新成果方面的交流更加密切,此外,各主体间为节约企业环境治理成本,不断加强节能减排工作的合作力度,此种做法在一定程度上充分调动创新驱动要素的流转,对于促进企业创新水平的提升和助益工业碳生产率发挥着关键作用。其次,研发投入的大幅增加充分激发了区域创新积极性<sup>[25]</sup>,令区域内创新成果数量持续攀升,同时为加快区域绿色发展进程激发新的活力。最后,技术创新摒弃了试点区域原来的经济增长模式,在治理环境污染的同时,实现了经济可持续发展,也为试点区域高质量发展指明一条新的发展方向<sup>[26]</sup>。例如,在双碳背景约束下,作为高耗能的煤化工行业将主要采取技术革新来实现节能降碳目标<sup>[27]</sup>。

此外,技术效应能够在一定程度上对优化能源结构产生影响。一方面技术创新能够将工业能源消费形式与结构逐渐向低碳、节能等方向转化;另一方面碳交易政策是政府采用市场手段对工业碳排放量进行约束,若工业企业通过提升自身技术创新水平等方式逐步提高能源利用效率,实现降碳的目的,则该工业企业可以将剩余的排放许可投入市场进行交易,实现其经济意义。此种做法对于激励企业技术创新、激发企业提高能源利用效率并加速工业能源结构优化步伐均具有明显促进作用。殷秀清等<sup>[28]</sup>研究认为,环境规制能够有效推进企业技术创新发展水平,与此同时,技术创新在一定程度上能够优化工业企业能源结构和模式,从而实现提升中国工业碳生产率的目的。

### 1.4 能源结构优化效应

随着碳交易政策的提出,工业企业逐渐受到碳排放量的约束,其能源消耗边际成本随之大幅提升,因此该政策能够通过倒逼工业企业加快改进能源消费模式、提升能源效率等措施,实现降低碳排放的目的。白雪洁等<sup>[29]</sup>研究认为,碳交易政策主要通过能源结构转型逐步实现工业企业节能减排的目标,然而能源效率的提升并未对其产生明显影响。这表

明碳交易政策对工业碳生产率发挥一定程度上正向积极作用的同时,逐步激发工业企业能源结构优化效应,从而实现工业碳生产率的加速提高。鉴于此,碳交易政策具体传导机制如图 1 所示。

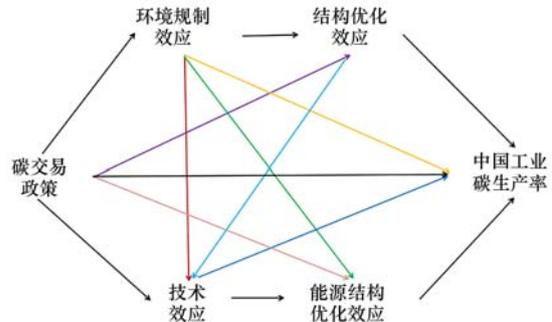


图 1 碳交易政策传导机制

Fig. 1 Carbon trading policy transmission mechanism

基于此,本文提出以下假设。H1:碳交易政策能够有效提升中国工业碳生产率;H2:环境规制效应在碳交易政策与工业碳生产率间不仅可能发挥并行中介作用,还可能引导结构优化效应、技术效应和能源结构优化效应发挥链式中介作用;H3:结构优化效应在碳交易政策与工业碳生产率间不仅可能发挥并行中介作用,还可能引导技术效应发挥链式中介作用;H4:技术效应在碳交易政策与工业碳生产率间不仅可能发挥并行中介作用,还可能引导能源结构优化效应发挥链式中介作用;H5:能源结构优化效应可能在碳交易政策与工业碳生产率间发挥并行中介作用。

## 2 材料与方法

### 2.1 变量设计

#### 2.1.1 被解释变量

本文通过 GDP 与 CO<sub>2</sub> 排放量的比值作为工业碳生产率指标。由于当前未公布碳排放等信息,因此通过 IPCC 的 CO<sub>2</sub> 计算方法对其进行测算<sup>[30,31]</sup>。如式(1)和式(2)所示。

$$CP_{it} = GDP_{it} / CO_2 \quad (1)$$

$$CO_2 = \sum_{i=1}^7 CO_{2n} = \sum_{i=1}^7 E_n \times NCV_n \times CEF_n \times COF_n \times (44/12) \quad (2)$$

式中,CP<sub>it</sub>为*i*省市第*t*年的工业碳生产率。GDP<sub>it</sub>为实际工业增加值。CO<sub>2</sub>为工业碳排放量。*n*为7种能源消费种类。NCV<sub>n</sub>为平均低热值。CEF<sub>n</sub>为单位热值碳排放系数。COF<sub>n</sub>为碳氧化率。相关参数和CO<sub>2</sub>排放系数如表1所示。

#### 2.1.2 解释变量

解释变量为交叉项 treat × time,同时选择时间节点为2012年,认定2012年及以后 treat × time = 1,

表 1 主要能源的相关参数及 CO<sub>2</sub> 排放系数<sup>1)</sup>Table 1 Relevant parameters of main energy sources and CO<sub>2</sub> emission coefficient

能源种类	平均低位发热量 /kJ·kg <sup>-1</sup> 或 kJ·m <sup>-3</sup>	单位热值含碳量 /kg·(10 <sup>6</sup> kJ) <sup>-1</sup>	碳氧化率 × 10 <sup>4</sup> /%	CO <sub>2</sub> 排放系数 × 10 <sup>4</sup> /t·(10 <sup>4</sup> t) <sup>-1</sup> 或 t·(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup>
煤炭	20 908	26.37	91.60	1.851 8
焦炭	28 425	29.50	92.80	2.854 3
汽油	43 070	18.90	98.00	2.925 1
煤油	43 070	19.50	98.60	3.036 4
柴油	42 652	20.20	98.20	3.102 2
燃料油	41 816	21.10	98.50	3.202 8
天然气	38 931	15.30	99.00	21.621 9

1) kJ·m<sup>-3</sup>和 t·(10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>)<sup>-1</sup>为天然气计量单位

否则  $treat \times time = 0$ .

### 2.1.3 控制变量

选取经济发展水平 (lnPGDP): 人均 GDP 对数值; 人口规模 (lnPOP): 年初年末平均人口数对数值; 对外开放程度 (FDI): 各省外商直接投资占 GDP 的比例; 对外贸易水平 (EIT): 进出口总额占 GDP 的比例; 城镇化水平 (URB): 城镇人口占总人口的比例; 工业经济水平 (IEL): 各省工业增加值占工业从业年均人数的比例; 工业化率 (IDR): 工业增加值占 GDP 的比例等指标作为控制变量<sup>[32]</sup>.

### 2.1.4 中介变量

选取环境规制效应、技术效应和能源结构优化效应作为中介变量<sup>[33-34]</sup>. 环境规制效应 (ER): 节能

环保支出额占 GDP 的比例; 结构优化效应 (SOE): 第二产业产值与第三产业产值比值; 技术效应 (TE): 各省市 R&D 经费占 GDP 的比例; 能源结构优化效应 (ES): 煤炭消费占能源消费总量的比例.

### 2.2 数据来源

本文选取 2005 ~ 2019 年中国 30 个省市 (不包括中国香港、澳门、台湾和西藏地区) 的面板数据为研究样本, 其中各类能源消费量数据来自历年中国能源统计年鉴; 年初年末常住人口数据和工业从业人数数据来自中国国家统计局年度数据; 节能环保支出额和各省工业增加值等数据来自中国统计年鉴; 各省市 R&D 经费支出和进出口总额等数据来自 CSMAR 数据库, 描述性统计结果如表 2 所示.

表 2 描述性统计结果

Table 2 Descriptive statistics results

变量	含义	全样本		实验组		对照组	
		均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
工业碳生产率 (CP)	lg(GDP/工业碳排放量)	10.557	0.632	11.032	0.652	10.241	0.600
人均工业碳生产率 (CPP)	工业碳生产率与年末人口数的比值/元·(t·万人) <sup>-1</sup>	14.011	18.992	32.236	34.208	9.901	11.012
环境规制效应 (ER)	节能环保支出额占 GDP 比例/%	0.765	0.550	0.528	0.356	0.876	0.609
结构优化效应 (SOE)	第二产业产值与第三产业产值的比值/%	0.433	0.080	0.677	0.091	0.339	0.078
技术效应 (TE)	R&D 经费占 GDP 比例/%	1.212	0.515	1.789	0.433	0.892	0.502
能源结构优化效应 (ES)	煤炭消费占能源消费总量比例/%	0.899	0.655	0.679	0.532	9.996	0.528
经济发展水平 (lnPGDP)	lg(人均 GDP)	10.419	0.669	11.012	0.602	10.259	0.576
人口规模 (lnPOP)	lg(年初年末平均人口数)	8.182	0.763	8.056	0.701	8.214	0.783
对外开放程度 (FDI)	各省外商直接投资占 GDP 比例/%	1.740	1.183	2.390	1.015	1.562	1.149
对外贸易水平 (EIT)	进出口总额占 GDP 比例/%	15.012	22.980	42.076	36.093	8.013	11.903
城镇化水平 (URB)	城镇人口占总人口比例/%	54.477	13.289	71.349	14.069	50.300	9.090
工业经济水平 (IEL)	各省工业增加值占工业从业年均人数比例/%	30.011	11.217	46.011	22.129	16.726	10.238
工业化率 (IDR)	工业增加值与 GDP 的比值/%	30.053	7.129	29.011	6.239	36.992	8.127
	样本量	450		90		360	

## 2.3 计算模型

### 2.3.1 双重差分模型

本文通过双重差分法进行实证研究, 同时将碳交易试点省市作为实验组, 非试点省市作为对照组, 公式如下:

$$CP_{it} = \alpha_0 + \alpha(treat_i \times time_t) + \sum Control_{it} + \mu_i + v_t + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

式中,  $CP_{it}$  为工业碳生产率.  $treat_i \times time_t$  为交互项, 即  $treat_i$  为某省市是否受到碳排放交易政策影响, 若该省是试点区域, 则  $treat_i = 1$ , 反之  $treat_i = 0$ ;  $time_t$  为时间虚拟变量, 若  $t \geq 2012$ , 则  $time_t = 1$ , 若  $t < 2012$ , 则  $time_t = 0$ .  $\alpha_0$  为常数项系数.  $\alpha$  描述了碳排放交易政策试点与非试点区域的工业碳生产率在政策实施前后的平均差异, 若  $\alpha > 0$ , 则表示碳排放交

易政策能够提高工业碳生产率。Control<sub>it</sub> 为控制变量。μ<sub>i</sub> 为地区固定效应。v<sub>t</sub> 为时间固定效应。ε<sub>it</sub> 为随机误差项。

2.3.2 动态效应模型

本文通过构建如下动态效应模型,以此分析碳交易政策对碳生产率影响的动态效应。

$$CP_{it} = \beta_0 + \sum_{t=2006}^{t=2019} \beta_t (\text{treat}_i \times \text{time}_t) + \sum \text{Control}_{it} + \mu_i + v_t + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

式中, time<sub>t</sub> 为年份虚拟变量 (t = 2006, 2007, ..., 2019), 研究第 t 年时, 则 time = 1, 其余年份均为 0。基准年为 2005 年, 系数 β<sub>t</sub> 为动态影响效果。

2.3.3 三重差分模型

本文在双重差分模型基础上通过引入区域虚拟变量 area<sub>j</sub>, 同时与 treat<sub>i</sub> × time<sub>t</sub> 的乘积形成交互项, 从而分析由于试点区域的不同而对碳交易政策反应程度的差异化程度。当对某试点区域展开分析时, j = 1, 否则 j = 0。e<sub>0</sub> 为常数项, e<sub>1</sub> 为该政策对试点区域工业碳生产率的净效应。构建如下模型:

$$CP_{ijt} = e_0 + e_1 (\text{treat}_i \times \text{time}_t \times \text{area}_j) + \sum \text{Control}_{ijt} + \mu_i + v_t + \varepsilon_{ijt} \quad (5)$$

2.3.4 多重中介效应模型

为分析环境规制效应 (ER<sub>it</sub>)、结构优化效应 (SOE<sub>it</sub>)、技术效应 (TE<sub>it</sub>) 和能源结构优化效应 (ES<sub>it</sub>) 在碳交易政策与工业碳生产率之间是否能够发挥并行及链式影响。作用路径如图 2 所示。构建如下模型:

$$ER_{it} = \alpha_0 + a_1 (\text{treat}_i \times \text{time}_t) + \sum \text{Control}_{it} + \mu_i + v_t + \varepsilon_{it} \quad (6)$$

$$SOE_{it} = \alpha_0 + a_2 (\text{treat}_i \times \text{time}_t) + d_1 ER_{it} + \sum \text{Control}_{it} + \mu_i + v_t + \varepsilon_{it} \quad (7)$$

$$TE_{it} = \alpha_0 + a_3 (\text{treat}_i \times \text{time}_t) + d_2 ER_{it} + d_4 SOE_{it} + \sum \text{Control}_{it} + \mu_i + v_t + \varepsilon_{it} \quad (8)$$

$$ES_{it} = \alpha_0 + a_4 (\text{treat}_i \times \text{time}_t) + d_3 ER_{it} + d_5 TE_{it} + \sum \text{Control}_{it} + \mu_i + v_t + \varepsilon_{it} \quad (9)$$

$$CP_{it} = \alpha_0 + \alpha' (\text{treat}_i \times \text{time}_t) + b_1 ER_{it} + b_2 SOE_{it} + b_3 TE_{it} + b_4 ES_{it} + \sum \text{Control}_{it} + \mu_i + v_t + \varepsilon_{it} \quad (10)$$

式中, α' 为碳交易政策对工业碳生产率的直接效应。α 为总效应, 即 α 等于 α' 与间接效应 (中介效应) 之和。此外, 多重中介效应主要有并行、链式中介效应两种。其中并行中介效应作用途径: a<sub>1</sub> × b<sub>1</sub>、a<sub>2</sub> × b<sub>2</sub>、a<sub>3</sub> × b<sub>3</sub> 和 a<sub>4</sub> × b<sub>4</sub>。链式中介效应作用途径: a<sub>1</sub> × d<sub>1</sub> × d<sub>4</sub> × d<sub>5</sub> × b<sub>4</sub>、a<sub>1</sub> × d<sub>1</sub> × b<sub>2</sub>、a<sub>1</sub> × d<sub>1</sub> × d<sub>4</sub> × b<sub>3</sub>、

a<sub>1</sub> × d<sub>2</sub> × b<sub>3</sub>、a<sub>1</sub> × d<sub>2</sub> × d<sub>5</sub> × b<sub>4</sub>、a<sub>1</sub> × d<sub>3</sub> × b<sub>4</sub>、a<sub>2</sub> × d<sub>4</sub> × d<sub>5</sub> × b<sub>4</sub>、a<sub>2</sub> × d<sub>4</sub> × b<sub>3</sub> 和 a<sub>3</sub> × d<sub>5</sub> × b<sub>4</sub>, 其余变量含义与上述模型保持一致。

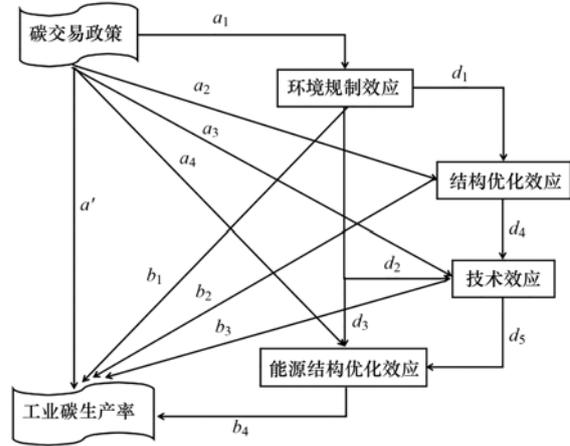


图 2 碳交易政策作用路径

Fig. 2 Role path of carbon trading policy

3 结果与讨论

3.1 碳交易政策对工业碳生产率的影响分析

3.1.1 平均效应检验

本文依据式(3)进行平均效应检验, 结果由表 3 所示: a 和 b 两列结果数据说明在控制个体和时间固定效应的前提下, 交互项的系数均显著为正, 与是否考虑控制变量对结果无显著影响, 这表明碳交易政策能够有效正向促进工业碳生产率水平。同时 b 列结果表明, 试点区域在该政策作用前后的碳生产率存在显著差异, 受该政策作用后的碳生产率水平大幅提升 154.3%, 这也说明该政策能够对工业碳生产率的提升产生较为明显的作用效果。即假设 H1 成立, c 和 d 两列则将碳生产率由人均碳生产率进行替代, 交互项的系数在 1% 的水平下仍为正值, 且显著, 这也进一步说明该政策对工业碳生产率的提升作用比较合理。

3.1.2 动态效应检验

动态效应检验的目的是为了在考虑时间因素的影响下, 碳交易政策对工业碳生产率体现何种作用效果。检验结果如表 4 可知, 无论 a 列还是 b 列在 2012 年以前, 交互项的系数正向居多。但均不显著 (a 列未考虑控制变量的影响)。相反, 在 2012 年和之后年份, 其系数均表现为正向显著影响, 并随着时间的推移这种正向影响逐渐增强。可能的原因: 在构建碳市场初期, 许多基础设施和规章条例并未得到有效支撑碳市场的发展建设进程, 但随着时间的推移, 相关保障措施均得到大幅提升, 从而使得碳市场能够稳步高效推进, 因此该政策便可以有效提升工业碳生产率水平。

表 3 平均效应检验结果<sup>1)</sup>

Table 3 Average effect test results

参数	CP		CPP	
	a	b	c	d
treat <sub><i>t</i></sub> × time <sub><i>t</i></sub>	2.351 *** (0.005)	1.543 *** (0.042)	12.191 *** (0.006)	7.968 *** (0.043)
控制变量		Y		Y
个体固定效应	Y	Y	Y	Y
时间固定效应	Y	Y	Y	Y
常数项	2.678 *** (0.021)	-39.128 ** (0.032)	6.008 *** (0.017)	-189.917 *** (0.027)
R <sup>2</sup>	0.497	0.672	0.388	0.496
N	450	450	450	450

1) Y 表示加入各项参数情况, N 表示样本量, 括号内为聚类稳健标准误, \*, \*\* 和 \*\*\* 分别表示在 1%、5% 和 10% 的临界值水平上显著, 下同

表 4 动态效应检验结果

Table 4 Dynamic effect test results

参数	a		b	
	系数	t 值	系数	t 值
treat × time <sub>2006</sub>	0.167 (0.013)	0.35	0.142 (0.006)	0.33
treat × time <sub>2007</sub>	0.278 (0.016)	0.56	0.207 (0.015)	0.45
treat × time <sub>2008</sub>	0.489 (0.021)	0.83	0.367 (0.027)	0.68
treat × time <sub>2009</sub>	0.519 (0.005)	1.25	-0.151 (0.018)	-0.53
treat × time <sub>2010</sub>	0.582 (0.002)	1.43	0.275 (0.029)	0.97
treat × time <sub>2011</sub>	0.873 (0.004)	1.89	0.721 (0.024)	1.51
treat × time <sub>2012</sub>	1.008 *** (0.043)	3.02	0.837 *** (0.005)	2.02
treat × time <sub>2013</sub>	1.573 *** (0.033)	3.45	1.384 *** (0.067)	2.98
treat × time <sub>2014</sub>	1.815 *** (0.001)	3.98	1.476 *** (0.018)	4.05
treat × time <sub>2015</sub>	2.229 *** (0.021)	4.92	1.429 *** (0.005)	2.01
treat × time <sub>2016</sub>	2.830 *** (0.014)	5.56	1.835 *** (0.002)	3.98
treat × time <sub>2017</sub>	3.341 *** (0.066)	6.71	2.352 *** (0.007)	4.01
treat × time <sub>2018</sub>	3.891 *** (0.037)	7.03	2.938 *** (0.031)	5.13
treat × time <sub>2019</sub>	4.112 *** (0.002)	8.02	2.996 *** (0.016)	6.99
控制变量			Y	
个体固定效应	Y		Y	
时间固定效应	Y		Y	
常数项	2.191 *** (0.016)	9.019	-20.133 (0.022)	-1.321
R <sup>2</sup>	0.651	0.651	0.669	0.669
N	450	450	450	450

### 3.1.3 异质性检验

为探究碳交易政策产生的政策影响是否存在异质性, 引入区域变量对其进行异质性研究显得尤为必要. 从表 5 可知, 在加入控制变量、个体和时间固定效应的影响之后, 该政策在各试点区域发展情况存在显著差异的情况下, 对工业碳生产率的作用效果也存在明显不同. 其中, 该政策能够正向促进除广东和重庆之外的其他地区工业碳生产率水平的提升, 但各试点区域之间存在显著差异, 造成此种差异的原因诸多, 例如: 试点区域自身经济状况、产业结构类型、政府制度制定和执行能力等因素. 具体差异如表 6 所示, 北京地区相较于其他试点地区在政策实施范围、政策门槛设定和碳价格水平、金融支持力度方面均存在较大优势, 因此, 碳交易政策对北京地区的碳生产率水平提升作用显著. 此外, 造成广东和重庆等地的影响不显著的原因

主要有: 广东由于之前发布过于严苛的节能减排政策, 导致边际减排成本逐步提升, 因此该政策的降碳促经作用并不明显; 重庆在构建碳市场初期阶段对本区域内企业的碳排放许可配额较高, 使得该政策未能发挥作用.

### 3.1.4 稳健性检验

#### (1) 倾向得分匹配-双重差分方法 (PSM-DID)

本文通过将控制变量作为匹配特征变量对实验组、对照组进行匹配, 结果如表 7 所示. 从中可知, 匹配特征变量的标准差存在下降态势, 同时 *t* 值无论是在匹配之前还是匹配之后均不显著. 这说明该匹配方法相对合理. 此外, 对匹配后的数据进行 DID 估计. 估计结果由表 8 可知, 碳交易政策对 CP 和 CPP 均存在显著正向促进作用, 无论是否考虑控制变量的情况下此种作用并未发生改变. 这表明假设 H1 成立.

(2)反事实检验 本文在全部样本数据内随机选择6个地区样本作为假定试点区域,构建反事实检验.此外,为了排除选择误差影响,选择6组试点

区域进行实证分析.重组的样本重新通过式(3)进行计算,结果如表9所示,交互项系数均不显著,这表明假设H1成立.

表5 三重差分估计结果

Table 5 Triple-difference estimation results

参数	北京	上海	天津	湖北	广东	重庆
	a	b	c	d	e	f
$treat_i \times time_t \times area_j$	0.716*** (0.012)	0.217*** (0.015)	0.319*** (0.003)	0.243*** (0.007)	0.071 (0.024)	-0.002 (0.035)
控制变量	Y	Y	Y	Y	Y	Y
个体固定效应	Y	Y	Y	Y	Y	Y
时间固定效应	Y	Y	Y	Y	Y	Y
常数项	8.898*** (0.001)	2.272 (0.025)	4.191 (0.327)	2.654 (0.013)	2.382 (0.287)	2.519 (0.256)
$R^2$	0.517	0.645	0.609	0.612	0.614	0.613
N	450	450	450	450	450	450

表6 试点地区碳交易政策制度差异比较<sup>1)</sup>

Table 6 Comparison of differences in carbon trading policies and systems in pilot areas

试点地区	北京	上海	天津	湖北	广东	深圳	重庆
实施范围	电力和化工等8个行业	航运和铁路等19个行业	钢铁和石油等9个行业	钢铁和纺织等17个行业	水泥和航空等6个行业	制造业和水等9个行业	烧碱和钢铁等6个行业
实施对象	以CO <sub>2</sub> 计,5 kt·a <sup>-1</sup> 以上;以标准煤计,2 kt·a <sup>-1</sup> 以上	分行业,例:建筑以CO <sub>2</sub> 计,10 kt·a <sup>-1</sup> 以上;以标准煤计,5 kt·a <sup>-1</sup> 以上	以CO <sub>2</sub> 计,20 kt·a <sup>-1</sup> 以上	以标准煤计,10 kt·a <sup>-1</sup> 以上	以CO <sub>2</sub> 计,20 kt·a <sup>-1</sup> 以上;以标准煤计,10 kt·a <sup>-1</sup> 以上	分行业,例:企业以CO <sub>2</sub> 计,3 kt·a <sup>-1</sup> 以上	以CO <sub>2</sub> 计,20 kt·a <sup>-1</sup> 以上;以标准煤计,10 kt·a <sup>-1</sup> 以上
对象数量(截止2018年)	903	381	113	338	242	766	195
碳价格均值	56	31	25	22	21	34	9
金融政策支持机构个数	4	4	0	5	1	3	0

1)金融政策支持机构来自文献[35]

表7 平衡性检验结果

Table 7 Balance test results

变量		均值		误差率 /%	误差变动率 /%	T检验	
		对照组	实验组			t值	P >  t
lnPGDP	匹配前	10.259	11.012	101.92	66.8	7.97	0.000
	匹配后	10.050	12.109	47.16		0.03	0.107
lnPOP	匹配前	8.214	8.056	-20.018	67.9	-1.69	0.000
	匹配后	8.109	8.397	22.198		0.15	0.929
FDI	匹配前	1.562	2.390	31.01	78.3	6.89	0.000
	匹配后	1.429	2.288	11.71		0.87	0.287
EIT	匹配前	8.013	42.076	127.34	98.2	8.29	0.000
	匹配后	8.172	43.892	29.983		1.21	0.615
URB	匹配前	50.300	71.349	20.917	97.5	15.79	0.000
	匹配后	49.976	70.352	10.762		2.16	0.709
IS	匹配前	47.021	41.086	-19.219	96.3	-2.38	0.000
	匹配后	46.349	40.769	-3.17		-0.03	0.419
AIS	匹配前	1.338	2.151	22.198	74.3	10.46	0.000
	匹配后	1.432	2.501	10.267		1.05	0.116
IEL	匹配前	16.726	46.011	39.287	69.3	7.36	0.000
	匹配后	17.019	45.742	9.173		0.24	0.418
IDR	匹配前	36.992	29.011	-20.863	71.3	-7.46	0.000
	匹配后	35.894	30.237	-3.219		-0.35	0.511

表 8 基准回归结果

Table 8 Benchmark regression results

参数	CP		CPP	
	a	b	c	d
treat <sub>i</sub> × time <sub>t</sub>	2.017*** (0.021)	1.433*** (0.023)	11.042*** (0.096)	6.521*** (0.003)
控制变量		Y		Y
个体固定效应	Y	Y	Y	Y
时间固定效应	Y	Y	Y	Y
常数项	1.776*** (0.678)	-28.372*** (0.342)	7.568*** (0.135)	-119.283*** (0.089)
R <sup>2</sup>	0.254	0.293	0.576	0.433
N	330	330	330	330

表 9 反事实检验结果

Table 9 Counterfactual test results

参数	a	b	c	d	e	f
treat <sub>i</sub> × time <sub>t</sub>	0.019(0.013)	0.027(0.046)	0.036(0.089)	0.028(0.071)	0.049(0.013)	0.039(0.055)
控制变量	Y	Y	Y	Y	Y	Y
个体固定效应	Y	Y	Y	Y	Y	Y
时间固定效应	Y	Y	Y	Y	Y	Y
常数项	3.935*** (0.005)	2.727*** (0.008)	2.996*** (0.003)	3.982*** (0.003)	2.975*** (0.015)	2.698*** (0.001)
R <sup>2</sup>	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63
N	450	450	450	450	450	450

(3) 证伪检验 本文通过设定虚拟碳交易政策实施时间,即 2006~2011 年,此外删除真实政策设定年份和之后时间的所有数据进行证伪检验.结果如表

10 所示,交互项系数在 6 组实验中均不显著.这进一步证实碳交易政策的作用时间是从 2012 年开始,且该种作用未受到其他年份的其他政策变量干扰.

表 10 证伪检验结果

Table 10 Falsification test results

参数	a	b	c	d	e	f
treat <sub>i</sub> × time <sub>t</sub>	-0.035(0.001)	0.038(0.019)	0.049(0.033)	0.037(0.092)	0.045(0.075)	0.052(0.032)
控制变量	Y	Y	Y	Y	Y	Y
个体固定效应	Y	Y	Y	Y	Y	Y
时间固定效应	Y	Y	Y	Y	Y	Y
常数项	3.112*** (0.001)	2.679*** (0.022)	2.393*** (0.076)	2.313*** (0.036)	3.796*** (0.052)	3.546*** (0.002)
R <sup>2</sup>	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
N	210	210	210	210	210	210

### 3.2 作用机制研究

本文通过双重差分法对中国 2005~2019 年 30 个地区的面板数据进行多重中介效应检验,同时设定环境规制、结构优化、技术和能源结构优化效应作为本研究的中介变量.

#### 3.2.1 逐步检验法

根据表 11 结果,式(6)~(9)中的交互项系数为正,均显著.这说明该政策会形成环境规制、结构优化、技术和能源结构优化效应,同时也证实碳交易政策在对中国该政策试点区域工业碳生产率的提升过程中可能存在中介效应.式(10)表明该政策对 CP 和 CPP 的提升作用存在明显的直接效应.式(3)则表明该政策对 CP 和 CPP 的提升作用存在明显的正向总效应.此外,由表中可知相比于直接效应,总效应系数绝对值更大,这表明该政策对工业碳生产

率的影响存在部分中介效应.

#### 3.2.2 Bootstrap 方法

本文通过采用 Bootstrap 法进一步证实碳交易政策产生的中介作用<sup>[36]</sup>.检验结果如表 12 所示,该政策的作用机制主要通过以下 4 种途径展开.

(1) 环境规制效应 该政策在有效提升工业碳生产率的过程中发挥明显的环境规制中介效应.其中,包括并行中介效应:碳交易政策 → 环境规制效应 → 工业碳生产率(0.145,中介效应系数,下同);链式中介效应 6 条:①碳交易政策 → 环境规制效应 → 结构优化效应 → 技术效应 → 能源结构优化效应 → 工业碳生产率(0.003),②碳交易政策 → 环境规制效应 → 结构优化效应 → 工业碳生产率(0.006),③碳交易政策 → 环境规制效应 → 结构优化效应 → 技术效应 → 工业碳生产率(0.005),

表 11 作用机制检验

Table 11 Mechanism of action test

参数	式(3)		式(10)		式(6)	式(7)	式(8)	式(9)
	CP	CPP	CP	CPP	环境规制效应	结构优化效应	技术效应	能源结构优化效应
$treat_i \times time_t$	1.543 *** (0.003)	7.968 *** (0.005)	1.523 *** (0.001)	6.802 *** (0.012)	0.443 *** (0.033)	0.607 *** (0.052)	0.568 *** (0.006)	0.672 *** (0.018)
ER			0.972 *** (0.021)	9.310 *** (0.042)		0.226 *** (0.033)	-0.209 (0.034)	-0.293 *** (0.079)
SOE			0.738 *** (0.009)	13.915 *** (0.011)			0.116 *** (0.016)	
TE			0.032 (0.005)	-6.228 *** (0.039)				-0.126 (0.025)
ES			-0.745 (0.039)	15.209 *** (0.003)				
控制变量	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
个体固定效应	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
时间固定效应	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
常数项	-39.128 ** (0.009)	-189.917 *** (0.016)	-30.883 *** (0.056)	-179.012 *** (0.023)	3.989 (0.043)	2.993 (0.036)	4.679 *** (0.001)	10.983 *** (0.006)
$R^2$	0.672	0.496	0.068	0.357	0.003	0.056	0.048	0.107
$N$	450	450	450	450	450	450	450	450

表 12 多重中介效应机制检验<sup>1)</sup>

Table 12 Test of multiple mediating effects mechanism

参数	CP
总体中介效应	$(a_1b_1 + a_1d_1d_4d_5b_4 + a_1d_1b_2 + a_1d_1d_4b_3 + a_1d_2b_3 + a_1d_2d_5b_4 + a_1d_3b_4 + a_2b_2 + a_2d_4d_5b_4 + a_2d_4b_3 + a_3b_3 + a_3d_5b_4 + a_4b_4)$ 0.672 *** [0.435, 0.909]
环境规制效应	ER( $a_1b_1$ ) 0.145 ** [0.043, 0.259]
	ER → SOE → TE → ES( $a_1d_1d_4d_5b_4$ ) 0.003 ** [0.001, 0.005]
	ER → SOE( $a_1d_1b_2$ ) 0.006 ** [0.001, 0.008]
	ER → SOE → TE( $a_1d_1d_4b_3$ ) 0.005 ** [0.001, 0.007]
	ER → TE( $a_1d_2b_3$ ) 0.005 ** [0.001, 0.010]
	ER → TE → ES( $a_1d_2d_5b_4$ ) 0.006 ** [0.001, 0.012]
结构优化效应	ER → ES( $a_1d_3b_4$ ) -0.002 ** [-0.010, -0.001]
	SOE( $a_2b_2$ ) 0.015 ** [0.001, 0.030]
	SOE → TE → ES( $a_2d_4d_5b_4$ ) 0.005 ** [0.001, 0.010]
技术效应	SOE → TE( $a_2d_4b_3$ ) 0.001 ** [0.0001, 0.001]
	TE( $a_3b_3$ ) 0.093 ** [0.067, 0.118]
能源结构优化效应	TE → ES( $a_3d_5b_4$ ) -0.008 ** [-0.023, -0.001]
	ES( $a_4b_4$ ) 0.398 *** [0.167, 0.629]

1) 括号内数字为中介效应置信区间

④碳交易政策 → 环境规制效应 → 技术效应 → 工业碳生产率(0.005), ⑤碳交易政策 → 环境规制效应 → 技术效应 → 能源结构优化效应 → 工业碳生产率(0.006), ⑥碳交易政策 → 环境规制效应 → 能源结构优化效应(-0.002). 此外, 该效应的累积中介作用达到 0.168, 并占总效应的比例为 25.00%. 这表明该效应能够显著促进“减碳促经”水平, 从而实现工业碳生产率的加速提升. 然而第⑥条作用路径表现为负, 可能是由于当前政府环保支出未能有效实现能源机构优化, 特别是对环保节能产业的发展提升作用不明显, 因而在提高工业碳生产率作用方面呈遮掩效果.

(2) 结构优化效应 该政策在有效提升工业碳生产率的过程中发挥着明显的结构优化效应. 其中, 包括并行中介效应: 碳交易政策 → 结构优化效应 → 工业碳生产率(0.015); 链式中介效应两条: ①碳交易政策 → 结构优化效应 → 技术效应 → 能源结构优化效应 → 工业碳生产率(0.005), ②碳交易政策 → 结构优化效应 → 技术效应 → 工业碳生产率(0.001). 此外, 该效应的累积中介效应达到 0.021, 并占总效应的比例为 3.1%. 这表明该效应能够在一定程度上提升碳交易政策“减碳促经”水平.

(3) 技术效应 该政策在有效提升工业碳生产

率的过程中发挥明显的技术中介效应。其中：并行中介效应，碳交易政策 → 技术效应 → 工业碳生产率(0.093)；链式中介效应，碳交易政策 → 技术效应 → 能源结构优化效应 → 工业碳生产率(-0.008)。此外，该效应的累积中介作用达到0.085，并占总效应的比例为12.60%。这表明该效应能够达到显著提升工业碳生产率水平的目的。然而第2条作用路径表现为负的原因可能为对于碳排放量相对较高的企业，其创新水平和创新成果的转化对自身节能减排行动未能实现有效推进的目的，因而对这类企业的低碳转型影响并不显著。

(4) 能源结构优化效应 该效应在提升工业碳生产率的作用路径中发挥并行中介作用为0.398，其作用路径为：碳交易政策 → 能源结构优化效应 → 工业碳生产率。同时占总效应的比例为59.2%。这表明，由碳交易政策引致的能源结构优化效应能够显著正向促进工业碳生产率的提高。

#### 4 建议

(1) 加速完善环境规制层面法律制度。当前，我国碳交易试点实施对象企业未能按时履约的情况屡次出现，除北京地区以外，其他碳交易试点地区履约率波动幅度较大，因此试点地区当地政府应加速完善环境规制层面相关立法制度，应构建一套从严、从高水平的政策制度，提升对碳交易市场监管强度，严格保障碳交易市场有效运行。此外，其他试点地区应精细划分各个行业碳排放门槛，同时通过调节碳配额和碳价格等方式刺激当地企业主体“减碳促经”能动性。

(2) 加快构建环保产业新发展体系。主要从以下两点展开：一方面政府政策的制定应针对绿色技术创新研发服务企业存在一定程度的政策倾斜。由于此类企业在绿色技术创新领域、关键技术攻关和绿色成果转化等方面均存在明显优势，因此在为其他工业企业提供相关服务的过程中会对产业分工的合理化、专业化和系统化产生一定程度上的推动作用。这些作用主要表现在：第一，工业制造企业能够将自身创新要素投入到企业产品发展的各个方面，主要有：提高产品质量、拓展产品种类和升级产品定位等方面。第二，通过绿色技术创新研发服务企业的加入，可以将工业制造企业自身环保科技研发等方面的工作进行重新分工，达到环境保护和经济发展两手抓的目的。另一方面，政府应逐步减少碳排放指标的分配额度，约束供给端，从而达到刺激需求的目的，这种做法会将碳价格控制在相对平稳的范围内，倒逼企业进行绿色技术创新活动。另外，政府还

需在环保产业项目上投入更多资金支持，促使创新科技向更高更快发展，在一定程度上减少低端技术的建设成本，从而促使资本要素不断向能源要素方向发展。

(3) 加强绿色技术创新研发力度。在当前提出“双碳”目标的背景下，加强绿色技术创新研发力度显得十分必要。创新是高质量发展的关键驱动要素，因此政府和工业企业更应加强自身科技创新能力，加大创新资本、创新人才和创新环境投入力度，逐步推进科技进步成效由外部向内部转化。此外，应通过技术创新水平的提高逐步提升工业企业自身产品结构、能源结构升级，从而助力高质量发展新旧动能的加速转换。与此同时，应逐步优化科学技术创新研发体制机制改革，加速实现由市场引导的绿色技术创新体系建设，不断激发研发人员的积极性，提升工业企业创新吸收能力，从而提高创新成果转化率、应用率。

(4) 加速优化能源结构。加速优化能源结构，实现能源消费从总量优化逐步向结构优化的转变。当前，在中国不断颁布关于约束能源强度的政策背景下，由于现有技术条件限制，环保优化空间受到严重挤压，然而，在改善能源结构和提高能源利用率等方面存在较大程度的提升空间。全国各地区建议利用自身自然禀赋特点和经济发展属性，建立差异化能源结构转型发展对策。例如：在中国东西部地区利用自身地域优势，加大力度对风能和太阳能等新能源的开发力度；针对东部经济发展相对成熟的地区，应在能源消费结构方面寻找出路，加速“煤改油、气、电”工程项目实施进度。因此，只有加速做好能源结构优化进程，才能够有效实现“双碳”目标。然而鉴于当前煤炭资源作为中国发电工程的主力军，化石能源成本相对于清洁能源来说相对较低是主要原因之一。此外，在利用清洁能源的过程中对于基础设施的要求相对较高，基础设施建设无形之中给企业和政府带来较大的经济压力。因此，一方面企业层面应加强能源结构优化力度，另一方面政府应对碳排放较高的企业进行适当的政策激励与引导。

#### 5 结论

(1) 平均效应和动态效应结果显示，碳交易政策能够显著促进工业碳生产率水平的提升，同时稳健性检验结果表明，该结论仍成立。

(2) 碳交易政策对工业碳生产率的作用效果会根据试点区域的差异存在明显不同。该政策能够显著正向促进除广东、重庆之外试点区域的工业碳生产率水平，其中对北京地区的碳生产率提升作用最

为明显。

(3) 碳交易政策能够通过多种作用路径对工业碳生产率的提升产生显著影响。其中, 环境规制效应、结构优化效应、技术效应和能源结构优化效应占总效应的比例分别为 25.00%、3.10%、12.60% 和 59.20%。在 4 种间接效应中能源结构优化效应在碳交易政策对工业碳生产率的提升作用中发挥的效用最大。

#### 参考文献:

- [1] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话 [N]. 人民日报, 2020-09-23.
- [2] 范丹, 王维国, 梁佩凤. 中国碳排放交易权机制的政策效果分析——基于双重差分模型的估计 [J]. 中国环境科学, 2017, **37**(6): 2383-2392.  
Fan D, Wang W G, Liang P F. Analysis of the performance of carbon emissions trading right in China—the evaluation based on the difference-in-difference model [J]. China Environmental Science, 2017, **37**(6): 2383-2392.
- [3] Hou J, Teo T S H, Zhou F L, et al. Does industrial green transformation successfully facilitate a decrease in carbon intensity in China? An environmental regulation perspective [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, **184**: 1060-1071.
- [4] Hu W, Wang D. How does environmental regulation influence China's carbon productivity? an empirical analysis based on the spatial spillover effect [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, **257**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120484.
- [5] Long R Y, Shao T X, Chen H. Spatial econometric analysis of China's province-level industrial carbon productivity and its influencing factors [J]. Applied Energy, 2016, **166**: 210-219.
- [6] Bai C Q, Du K R, Yu Y, et al. Understanding the trend of total factor carbon productivity in the world: insights from convergence analysis [J]. Energy Economics, 2019, **81**: 698-708.
- [7] Pan X F, Li M N, Wang M Y, et al. The effects of outward foreign direct investment and reverse technology spillover on China's carbon productivity [J]. Energy Policy, 2020, **145**, doi: 10.1016/j.enpol.2020.111730.
- [8] Zhang H J, Duan M S, Zhang P. Analysis of the impact of China's emissions trading scheme on reducing carbon emissions [J]. Energy Procedia, 2019, **158**: 3596-3601.
- [9] 涂正革, 谌仁俊. 排污权交易机制在中国能否实现波特效应? [J]. 经济研究, 2015, **50**(7): 160-173.  
Tu Z G, Shen R J. Can emissions trading scheme achieve the porter effect in China? [J]. Economic Research Journal, 2015, **50**(7): 160-173.
- [10] 周朝波, 覃云. 碳排放交易试点政策促进了中国低碳经济转型吗? ——基于双重差分模型的实证研究 [J]. 软科学, 2020, **34**(10): 36-42, 55.  
Zhou C B, Qin Y. The impact of a carbon trading pilot policy on the low-carbon economic transformation in China—an empirical analysis based on a DID model [J]. Soft Science, 2020, **34**(10): 36-42, 55.
- [11] 廖文龙, 董新凯, 翁鸣, 等. 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.  
Liao W L, Dong X K, Weng M, et al. Economic effect of market-oriented environmental regulation: carbon emission trading, green innovation and green economic growth [J]. China Soft Science, 2020, (6): 159-173.
- [12] Yang X Y, Jiang P, Pan Y. Does China's carbon emission trading policy have an employment double dividend and a Porter effect? [J]. Energy Policy, 2020, **142**, doi: 10.1016/j.enpol.2020.111492.
- [13] Yu Y N, Zhang W J, Zhang N. The potential gains from carbon emissions trading in China's industrial sectors [J]. Computational Economics, 2018, **52**(4): 1175-1194.
- [14] 范秋芳, 张园园. 碳排放权交易政策对碳生产率的影响研究 [J]. 工业技术经济, 2021, **40**(12): 113-121.  
Fan Q F, Zhang Y Y. Research on the impact of carbon emission trading policy on carbon productivity [J]. Journal of Industrial Technological Economics, 2021, **40**(12): 113-121.
- [15] 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.
- [16] 姜楠. 环保财政支出有助于实现经济和环境双赢吗? [J]. 中南财经政法大学学报, 2018, (1): 95-103.  
Jiang N. Does fiscal spending on environmental protection help achieve A win-win situation for both the economy and the environment? [J]. Journal of Zhongnan University of Economics and Law, 2018, (1): 95-103.
- [17] 李启庚, 冯艳婷, 余明阳. 环境规制对工业节能减排的影响研究——基于系统动力学仿真 [J]. 华东经济管理, 2020, **34**(5): 64-72.  
Li Q G, Feng Y T, Yu M Y. Research on the impact of environmental regulation on industrial energy conservation and emission reduction: based on system dynamics simulation [J]. East China Economic Management, 2020, **34**(5): 64-72.
- [18] 田淑英, 董玮, 许文立. 环保财政支出、政府环境偏好与政策效应——基于省际工业污染数据的实证分析 [J]. 经济问题探索, 2016, (7): 14-21.
- [19] 王淑英, 卫朝蓉, 寇晶晶. 产业结构调整与碳生产率的空间溢出效应——基于金融发展的调节作用研究 [J]. 工业技术经济, 2021, **40**(2): 138-145.  
Wang S Y, Wei Z R, Kou J J. Spillover effect of industrial structure adjustment and carbon productivity—study based on adjustment of financial development [J]. Industrial Technology & Economy, 2021, **40**(2): 138-145.
- [20] 张毅, 严星. 经济环境、环境规制类型与省域节能减排技术创新——基于异质性科研主体的实证分析 [J]. 科技进步与对策, 2021, **38**(8): 41-49.  
Zhang Y, Yan X. Economic environment, environmental regulation types and energy saving and emission-reduction technologies innovation: a empirical analysis based on different research subjects in the provinces [J]. Science & Technology Progress and Policy, 2021, **38**(8): 41-49.
- [21] 孙华平, 杜秀梅. 全球价值链嵌入程度及地位对产业碳生产率的影响 [J]. 中国人口·资源与环境, 2020, **30**(7): 27-37.  
Sun H P, Du X M. The impact of global value chains' participation degree and position on industrial carbon productivity [J]. China Population, Resources and Environment, 2020, **30**(7): 27-37.
- [22] 冯根福, 郑明波, 温军, 等. 究竟哪些因素决定了中国企业的技术创新——基于九大中文经济学权威期刊和 A 股上市公司数据的再实证 [J]. 中国工业经济, 2021(1): 17-35.  
Feng G F, Zheng M B, Wen J, et al. What determines the Chinese Firms' technological innovation—a Re-empirical

- investigation based on the previous empirical literature of Nine Chinese economics top journals and a-share listed company data [J]. *China Industrial Economics*, 2021(1): 17-35.
- [23] 王巧, 余硕, 曾婧婧. 国家高新区提升城市绿色创新效率的作用机制与效果识别——基于双重差分法的检验[J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(2): 129-137.  
Wang Q, She S, Zeng J J. The mechanism and effect identification of the impact of National High-tech Zones on urban green innovation; based on a DID test [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(2): 129-137.
- [24] 国家发展改革委办公厅. 国家发展改革委办公厅关于切实做好全国碳排放权交易市场启动重点工作的通知[J]. *风能产业*, 2016, (2): 54-57.
- [25] 徐红, 赵金伟. 研发投入的绿色技术进步效应——基于城市层面技术进步方向的视角[J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(2): 121-128.  
Xu H, Zhao J W. The green technology advancement effect of R&D investment; based on the perspective of technological progress at the city level [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(2): 121-128.
- [26] 孙振清, 李欢欢, 刘保留. 碳交易政策下区域减排潜力研究——产业结构调整与技术创新双重视角[J]. *科技进步与对策*, 2020, 37(15): 28-35.  
Sun Z Q, Li H H, Liu B L. Research on regional emission reduction potential under carbon trading policy—the perspective of industrial restructuring and technological innovation [J]. *Science & Technology Progress and Policy*, 2020, 37(15): 28-35.
- [27] 张鸿宇, 王媛, 郝成亮, 等. 双碳约束下煤化工行业节煤降碳减污协同[J]. *环境科学*, 2023, 44(2): 1120-1127.  
Zhang H Y, Wang Y, Hao C L, et al. Coal-carbon-pollutants coordinated control of coal chemical industry under carbon peak and carbon neutrality constraints [J]. *Environmental Science*, 2023, 44(2): 1120-1127.
- [28] 殷秀清, 张峰. 环境规制、技术创新与制造业能源消费结构均衡度演变[J]. *统计与决策*, 2019, 35(24): 114-118.  
Yin X Q, Zhang F. Environmental regulation, technological innovation and evolution of energy consumption structure balance in manufacturing industry [J]. *Statistics and Decision*, 2019, 35(24): 114-118.
- [29] 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.  
Bai X J, Song P, Wang B L. Energy saving and emission reduction path of carbon emission trading system: efficiency improvement or structural transformation? ——Quasi natural experiments based on provincial data in China [J]. *Journal of Business Economics*, 2021, (8): 70-85.
- [30] 熊萍萍, 曹书人, 杨卓. 华东地区碳排放量灰色关联度分析[J]. *大连理工大学学报(社会科学版)*, 2021, 42(1): 36-44.  
Xiong P P, Cao S R, Yang Z. Grey correlation analysis of carbon emissions in East China [J]. *Journal of Dalian University of Technology (Social Sciences)*, 2021, 42(1): 36-44.
- [31] Albrecht J, François D, Schoors K. A shapley decomposition of carbon emissions without residuals [J]. *Energy Policy*, 2002, 30(9): 727-736.
- [32] 孙慧, 向仙虹. 资源型产业转移、技术溢出与碳生产率——基于动态空间杜宾模型的分析[J]. *地域研究与开发*, 2021, 40(3): 14-19.  
Sun H, Xiang X H. Resource-based industrial transfer, technology spillover and carbon productivity; based on dynamic spatial dubin model [J]. *Areal Research and Development*, 2021, 40(3): 14-19.
- [33] 任晓松, 马茜, 刘宇佳, 等. 碳交易政策对工业碳生产率的影响及传导机制[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(11): 5427-5437.  
Ren X S, Ma Q, Liu Y J, et al. The impact of carbon trading policy on industrial carbon productivity and its transmission mechanism [J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(11): 5427-5437.
- [34] 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.  
Dong Z Q, Wang H. Validation of market-based environmental policies; empirical evidence from the perspective of carbon emission trading policies [J]. *Statistical Research*, 2021, 38(10): 48-61.
- [35] 盛春光. 中国碳金融市场发展机制研究[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [36] Preacher K J, Hayes A F. Asymptotic and resampling strategies for assessing and comparing indirect effects in multiple mediator models [J]. *Behavior Research Methods*, 2008, 40(3): 879-891.

## CONTENTS

Pollution Characteristics and Factors Influencing the Reduction in Ambient PM <sub>2.5</sub> in Beijing from 2018 to 2020	LIU Bao-xian, LI Qian, SUN Rui-wen, <i>et al.</i>	(2409)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of Secondary Aerosol in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration in Winter	YAO Qing, YANG Xu, TANG Ying-xiao, <i>et al.</i>	(2421)
Changes in Secondary Inorganic Ions in PM <sub>2.5</sub> at Different Pollution Stages Before and After COVID-19 Control	JIANG Nan, HAO Xue-xin, HAO Qi, <i>et al.</i>	(2430)
On-line Measurement of Trace Elements in PM <sub>2.5</sub> in Winter in Urban Taiyuan, China; Levels and Source Apportionment	CUI Yang, GUO Li-li, LI Hong-yan, <i>et al.</i>	(2441)
Characteristics and Source Apportionment of Black Carbon Over the Eastern Tibetan Plateau	WANG Hong-lei, LIU Si-han, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i>	(2450)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Zhanjiang in Summer	PANG Xiao-die, GAO Bo, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i>	(2461)
Ozone Pollution Characteristics and Sensitivity During the Ozone Pollution Days in Summer 2021 of Xinxiang City	HOU Mo, JIANG Xiao-mei, ZHAO Wen-peng, <i>et al.</i>	(2472)
Influence of Typhoon Nangka Process on Ozone Pollution in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i>	(2481)
Health Impacts of Air Pollution in Tianjin	HUA Kun, LUO Zhong-wei, JIA Bin, <i>et al.</i>	(2492)
Analysis of Change and Driving Factors of River Environmental Quality in China from 2002 to 2020	YANG Chuan-xi, XUE Yan, GAO Chang, <i>et al.</i>	(2502)
Spatiotemporal Pattern and Driving Force Analysis of Ecological Environmental Quality in Typical Ecological Areas of the Yellow River Basin from 1990 to 2020	WANG Fang, LI Wen-hui, LIN Yan-min, <i>et al.</i>	(2518)
Response of Water Quality in Small Reservoirs to Landscape Composition, Landscape Configuration, and Reservoir Characteristics in the Upper Reaches of the Yangtze River During Dry Season	ZHONG Yong-lin, RAN Jiao-jiao, WEN Wen, <i>et al.</i>	(2528)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical Endocrine Disrupting Chemicals in Drains Flowing into the Yellow River of Ningxia	LI Ling-yun, GAO Li, ZHENG Lan-xiang, <i>et al.</i>	(2539)
Occurrence Characteristics of Microplastics and Metal Elements in the Surface Water of Huangpu River and Their Associations with Metal Resistance Genes	LU Jia-wei, XU Chen-ye, HU Chun, <i>et al.</i>	(2551)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Urban River Surface Sediments from the Lanzhou Reach of the Yellow River	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i>	(2562)
Distribution and Release Potential of Soil Phosphorus Fractions in Water-level Fluctuation Zone of the Tributary Bay, Three Gorges Reservoir	ZHANG Xue, ZHU Bo, <i>et al.</i>	(2574)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients in the Surface Sediments of Lake in Huoqiu County	LIU Hai, ZHAO Guo-hong, <i>et al.</i>	(2583)
Analysis of Influencing Factors of Chlorophyll-a in Lake Taihu Based on Bayesian Network	LIU Jie, HE Yun-chuan, DENG Jian-ming, <i>et al.</i>	(2592)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Shunping County, Hebei Province	LIU Yuan-qing, ZHOU Le, LÜ Lin, <i>et al.</i>	(2601)
Distribution, Transformation, and Fate of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Drinking Water Treatment	ZHONG Ting-ting, LIN Tao, LIU Wei, <i>et al.</i>	(2613)
Removal of Cr(VI) via a Nickel Ferrite@Activated Carbon Composite Under Batch Experiments; Study of Characterization, Performance, and Mechanism	ZHANG Hua, LI Rong-hua, CHEN Jin-xiong, <i>et al.</i>	(2622)
Degradation of SMX with Peracetic Acid Activated by Nano Core-shell Co@NC Catalyst	ZHENG Ting-lu, ZHANG Long-long, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i>	(2635)
Adsorption Characteristics of Arsenic and Cadmium by FeMnNi-LDH Composite Modified by Fulvic Acid and Its Mechanisms	HE Ya-xin, KE Xin-yi, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i>	(2646)
Adsorption Mechanism for Phosphate in Aqueous Solutions of Calcium/Aluminum-rich Sludge Biochar Composite	OUYANG Zhu, CAO Lu, WANG Bing-qian, <i>et al.</i>	(2661)
Sludge Biochar Modified by B-doped and Its Adsorption Behavior and Mechanism of 1,2-DCA in Water	ZHOU Jia-wei, SHI Wei-lin, XU Wei, <i>et al.</i>	(2671)
Response of Forest Ecosystems to Decreasing Atmospheric Nitrogen Deposition	XIE Dan-ni, YANG Dong-xing, DUAN Lei, <i>et al.</i>	(2681)
Impacts of Climate Change and Human Activities on Vegetation Restoration in Typical Grasslands of China	ZHANG Liang-xia, YUE Xiao, ZHOU De-cheng, <i>et al.</i>	(2694)
Spatial-temporal Variation in Net Primary Productivity in Terrestrial Vegetation Ecosystems and Its Driving Forces in Southwest China	XU Yong, HUANG Hai-yan, DAI Qiang-yu, <i>et al.</i>	(2704)
Effects of Different Carbon Inputs on Soil Stoichiometry in Tianshan Mountains	MA Xin-yu, GONG Lu, ZHU Hai-qiang, <i>et al.</i>	(2715)
Effects of Nitrogen and Phosphorus Addition on Soil Nutrient Content and Stoichiometry in Desert Grassland	LIU Shu-xuan, AN Hui, ZHANG Xin-wen, <i>et al.</i>	(2724)
Effect of <i>Spartina alterniflora</i> Invasion on Soil C:N:P Stoichiometry in Coastal Wetland of Hangzhou Bay	LI Wen-qi, XIANG Qi, XIE Xue-feng, <i>et al.</i>	(2735)
Effects of 24 Years Different Straw Return on Soil Carbon, Nitrogen, Phosphorus, and Extracellular Enzymatic Stoichiometry in Dryland of the Loess Plateau, China	YAO Zhi-xia, ZHOU Huai-ping, XIE Wen-yan, <i>et al.</i>	(2746)
Carbon Sequestration Characteristics Under Natural Vegetation Restoration in Ziwuling Area of the Loess Plateau	XU Xiao-ming, ZHANG Xiao-ping, WANG Hao-jia, <i>et al.</i>	(2756)
Effects of Short-term Nitrogen Addition on Soil Organic Carbon Components in <i>Robinia pseudoacacia</i> L. Plantation	JIAN Jun-nan, LIU Wei-chao, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i>	(2767)
Response of Soil Organic Carbon Accumulation in Paddy Fields in Fujian Province to Future Temperature Increases	CHE Yan, QIU Long-xia, WU Ling-yun, <i>et al.</i>	(2775)
Species, Habitat Characteristics, and Screening Suggestions of Cadmium Hyperaccumulators in China	ZHAO Xiao-feng, LEI Mei, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i>	(2786)
Research Progress on Spatial Differentiation and Influencing Factors of Soil Heavy Metals Based on Geographical Detector	GONG Cang, WANG Shun-xiang, LU Hai-qiang, <i>et al.</i>	(2799)
Geochemical Background and Baseline Value of Soil Chemical Elements in Hebei Province	ZHANG Li-ting, CHENG Hang-xin, XIE Wei-ming, <i>et al.</i>	(2817)
Distribution Characteristics, Ecological Risks, and Source Identification of Heavy Metals in Cultivated Land Under Non-grain Production	QIU Le-feng, ZHU Jin-xia, PAN Yi, <i>et al.</i>	(2829)
Source Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Arable Soil at the Geological High Background, Based on the Township Scale	YU Fei, WANG Jia-bin, WANG Rui, <i>et al.</i>	(2838)
Solid-solution Partitioning Coefficients and Environmental Risk of Cd and Pb in Soil in Chang-Zhu-Tan Area	LI Yu-ying, PENG Chi, LIU Le-le, <i>et al.</i>	(2849)
Ecological Risk and Migration Patterns of Heavy Metals in Soil and Crops in the Lead-Zinc Mining Area in Guizhou, China	MA Hong-hong, ZHANG Li, GUO Fei, <i>et al.</i>	(2856)
Mercury Pollution in Dryland Soil and Evaluation of Maize Safety Production in Guizhou Province	MA Li-jun, ZHOU Lang, SONG Bo, <i>et al.</i>	(2868)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PAHs in the Soil of Wild <i>Forsythia Suspensa</i> in Shanxi	GUO Jia-jia, WANG Qi, KANG Min-jie, <i>et al.</i>	(2879)
Effects of P on the Uptake and Transport of Cd and As in Wheat Seedlings	WANG Yun, ZHAO Peng, LI Guang-xin, <i>et al.</i>	(2889)
Effects of Silicon Application on Arsenic Sequestration in Iron Plaque and Arsenic Translocation in Rice	LI Lin-feng, WEN Wei-fa, XU Zi-sheng, <i>et al.</i>	(2899)
Characteristics of Soil Microbial Community in Different Habitats in the Process of Ecological Restoration of Haifeng Wetland in Guangdong	MA Jiao-jiao, GAO Chang-jun, YI Xiao-qing, <i>et al.</i>	(2908)
Taxonomic and Functional Diversity of Soil Microbial Communities in Subalpine Meadow with Different Degradation Degrees in Mount Wutai	LUO Zheng-ming, LIU Jin-xian, HU Yan-qiu, <i>et al.</i>	(2918)
Effects of the Transformation from Natural Alpine Grassland to Mixed Artificial Grassland on the Characteristics of Soil Microbial Community	YU Hao, LIU Yue, DENG Ye, <i>et al.</i>	(2928)
Effects of Chinese Milk Vetch Returning Incorporated with Chemical Fertilizer Reduction on the Composition and Function of Soil Bacterial Communities in Paddy Fields	ZHANG Ji-shi, LIU Chun-zeng, ZHENG Chun-feng, <i>et al.</i>	(2936)
Effects of Long-term Sod Cultivation on Chinese Hickory Plantation Soil Fungal Community and Enzyme Activities	HU Ying-bing, LIANG Chen-fei, JIN Jin, <i>et al.</i>	(2945)
Effects of Microplastic High-density Polyethylene on Cotton Growth, Occurrence of <i>Fusarium</i> wilt, and Rhizosphere Soil Bacterial Community	ZHANG Hao, SUN Jie, YANG Hui-ying, <i>et al.</i>	(2955)
Nitrogen Metabolism and Flora Characteristics of Bacteria Algae Complex System	ZHAO Zhi-rui, WU Hai-miao, MA Chao, <i>et al.</i>	(2965)
Analysis of Carbon Emissions and Influencing Factors in China Based on City Scale	WU Jian-sheng, JIN Xue-ru, WANG Han, <i>et al.</i>	(2974)
How Do Carbon Trading Policies Affect Industrial Carbon Productivity; Quasi-natural Experiments from Chinese Provincial Data	FANG Qi, LI Shao-ping, <i>et al.</i>	(2983)
Influence of the Classification of Municipal Solid Wastes on the Reduction of Greenhouse Gas Emissions; A Case Study of Qingdao City, China	CHEN Ji-hong, BIAN Rong-xing, ZHANG Ting-xue, <i>et al.</i>	(2995)
Quantitative Analysis of Spatio-temporal Evolution Characteristics of Seasonal Average Maximum Temperature and Its Influence by Atmospheric Circulation in China from 1950 to 2019	SU Yue, LU Chun-yan, HUANG Yu-fei, <i>et al.</i>	(3003)