

目次

气候变化对中国夏季臭氧影响	胡安琪, 谢晓栋, 龚康佳, 侯宇晖, 胡建林 (1801)
基于 EOF 分解和 KZ 滤波的 2019~2021 年中国臭氧时空变化及驱动因素分析	王浩琪, 张裕芬, 罗忠伟, 王艳阳, 戴启立, 毕晓辉, 吴建会, 冯银厂 (1811)
华北工业城市夏季大气臭氧生成机制及减排策略	郑镇森, 姜建平, 张国涛, 李丽明, 徐勃, 杨文, 白志鹏 (1821)
2015~2020 年中国城市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染时空演变特征	牛笑笑, 钟艳梅, 杨璐, 易嘉慧, 慕航, 吴倩, 洪松, 何超 (1830)
2015~2021 年京津冀及周边地区 PM _{2.5} 和臭氧复合污染时空特征分析	宋小涵, 燕丽, 刘伟, 贺晋瑜, 王亚晨, 黄同林, 李园园, 陈敏, 孟静静, 侯战方 (1841)
2000~2020 年中国典型经济区 PM _{2.5} 时空变化及其与植被景观格局的关系	徐勇, 李欣怡, 黄雯婷, 郭振东, 盘钰春, 郑志威, 戴强玉 (1852)
北京市核心区冬春季大气离子沉降量特征及来源解析	赵宇, 李贝贝, 黄玉虎, 梁静, 杨洪玲, 秦建平, 朱玲 (1865)
南京近郊农田大气颗粒物及金属干沉降输入特征	刘翠英, 靳浩, 樊建凌 (1873)
西安冬季 PM _{2.5} 中不同极性水溶性有机物的污染特征及氧化潜势	罗玉, 黄沙沙, 张甜, 孙健, 沈振兴 (1882)
机动车源和民用燃料源颗粒物中有机碳和元素碳的排放特征	王红磊, 刘思略, 孙杰娟, 刘煥武, 赵天良, 裴宇僊, 可玥, 武自豪, 刘诗云 (1890)
伊犁河谷核心区春季 PM _{2.5} 组分特征及来源解析	谷超, 徐涛, 马超, 伊布提哈尔·加帕尔, 郭丽瑶, 李新琪, 杨文 (1899)
基于高分辨率网格的郑州市城镇居民 PM _{2.5} 暴露浓度与健康风险变化评估	李媛, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 王申博, 王克, 张瑞芹 (1911)
基于多源数据融合的河南省建材行业排放清单	刘晓, 胡京南, 王红梅, 杨丽, 张皓 (1924)
开封市城区冬季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	施雨其, 郑凯允, 丁玮婷, 刘金平, 陈洪光, 高光, 王玲玲, 王楠, 马双良, 郑瑶, 谢绍东 (1933)
2020 年和 2021 年南京城区臭氧生成敏感性和 VOCs 来源变化分析	陆晓波, 王鸣, 丁峰, 喻义勇, 张哲海, 胡崑 (1943)
北京市城区夏季大气 VOCs 变化特征及臭氧生成潜势	张蕊, 孙雪松, 王裕, 王飞, 罗志云 (1954)
青岛市臭氧污染与非污染期间 VOCs 化学特征及来源解析	贾智海, 顾瑶, 孔翠丽, 宋江邦, 孟赫, 石来元, 吴建会, 刘保双 (1962)
基于总过氧自由基观测研究合肥市西郊夏季 O ₃ 生成特征	俞辉, 韦娜娜, 徐学哲, 刘芊芊, 姚易辰, 赵卫雄, 张为俊 (1974)
“大气十条”政策的节能降碳效果评估与创新中介效应	李少林, 王齐齐 (1985)
北京市减污降碳协同控制情景模拟和效应评估	俞珊, 张双, 张增杰, 翟艳芝, 刘桐坤 (1998)
基于不同排放清单的长三角人为 CO ₂ 排放模拟	马心怡, 黄文晶, 胡凝, 肖薇, 胡诚, 张弥, 曹畅, 赵佳玉 (2009)
武汉汉江水源水质变化趋势及风险分析	卓海华, 姜保峰, 徐杰, 陈洁, 陈杰, 兰秀薇, 范文重, 欧阳雪姣, 兰静 (2022)
长江武汉段水源地典型抗生素及抗性基因污染特征与生态风险评价	李柏林, 张贺, 王俊, 沙雪妮, 陈晓飞, 卓海华 (2032)
陕北矿区典型河流多环芳烃的赋存特征、来源及毒性风险分析	吴喜军, 董颖, 赵健, 刘静, 张亚宁 (2040)
典型湖泊有机聚集体时空特征及驱动因子	谢贵娟, 龚伊, 朱富成, 刘昌利, 卢宝伟, 邓辉, 汤祥明 (2052)
桂林市不同功能型公园水体微塑料的分布特征及风险评估	李沛钊, 吴莉, 黄菲菲, 林才霞, 舒小华, 张倩 (2062)
长江流域浮游植物群落的环境驱动及生态评价	张静, 胡愈圻, 胡圣, 黄杰 (2072)
环境异质性对三峡库区支流香溪河附石硅藻群落的影响及驱动作用	纪璐璐, 赵璐, 欧阳添, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李玉鑫, 李佳欣, 施军琼, 吴忠兴 (2083)
武汉市 3 种类型湖泊浮游植物群落特点及关键影响因素	张浩坤, 闵奋力, 崔慧荣, 彭雪, 张心怡, 张淑烟, 李竹栖, 葛芳杰, 张璐, 吴振斌, 刘碧云 (2093)
重金属污染对不同生境中微生物群落结构的影响	何一凡, 肖新宗, 王佳文 (2103)
毫清河水体细菌群落的结构和分布特征	王森, 陈建文, 张红, 李君剑 (2113)
微塑料暴露对小棒短指软珊瑚 (<i>Sinularia microclavata</i>) 共生细菌群落结构和功能的影响	刘敏, 车文学, 曾映旭, 边伟杰, 吕淑果, 穆军 (2122)
上海市从源头到龙头的饮用水新型污染物分布特征及健康风险评价	严棋 (2136)
铝改性生物炭对水体低浓度氟的吸附特性	刘艳芳, 高玮, 刘蕊, 尹思婕, 张妙雨, 刘晓帅, 李再兴 (2147)
典型雌激素在微塑料上的吸附特征及位点能量分布	刘姜艳, 郑密密, 胡嘉梧, 柳玉荣, 贺德春, 潘杰 (2158)
面向工业园区废水臭氧氧化深度处理性能评价的模型污染物选择与评估	辛勃, 单超, 吕路 (2168)
基于地理探测器和多源数据的耕地土壤重金属来源驱动因子及其交互作用识别	张宏泽, 崔文刚, 刘绥华, 崔瀚文, 黄月美 (2177)
基于 APCS-MLR 和 PMF 模型的煤矸山周边耕地土壤重金属污染特征及源解析	马杰, 沈智杰, 张萍萍, 刘萍, 刘今朝, 孙静, 王玲灵 (2192)
基于蒙特卡罗模拟的铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属健康风险评估	黄剑波, 姜登登, 温冰, 王磊, 石佳奇, 周艳 (2204)
基于 BP 神经网络预测北京市加油站周边土壤多环芳烃含量	马赛炎, 魏海英, 马瑾, 刘奇缘, 吴颐杭, 屈雅静, 田雨欣, 赵文浩 (2215)
石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素时空分布及其风险评估	赵鑫宇, 陈慧, 赵波, 宋圆梦, 卢梦淇, 崔建升, 张璐璐, 李双江 (2223)
典型黑色岩系地质高背景区土壤和农产品重金属富集特征与污染风险	邓帅, 段佳辉, 宁墨兔, 谭林, 蒲刚, 陈际行, 齐小兵, 蒋尚智, 谢桃园, 刘意章 (2234)
岩溶区不同母质土壤 Cd 地球化学特征及玉米籽实 Cd 含量预测	戴亮亮, 徐宏根, 巩浩, 彭志刚, 肖凯琦, 吴欢欢, 许青阳, 郭军, 汤媛媛, 张俊 (2243)
龙岩市不同利用类型土壤及农作物 Pb、Cd 和 As 污染风险与贡献分析	王蕊, 陈楠, 张二喜 (2252)
小麦籽粒镉含量影响因素 Meta 分析和决策树分析	刘娜, 张少斌, 郭欣宇, 宁瑞艳 (2265)
黄土高原次生林演替过程土壤有机碳库及其化学组成响应特征	刘涵宇, 刘颖异, 张琦, 封伦, 高起乾, 任成杰, 韩新辉 (2275)
短期氮磷添加对祁连山亚高山草地土壤呼吸组分的影响	江原, 甘小玲, 曹丰丰, 赵传燕, 李伟斌 (2283)
黄河源区斑块退化高寒草甸土壤微生物多样性对长期封育的响应	杨鹏年, 李希来, 李成一, 段成伟 (2293)
不同海拔箭筈锦鸡儿根际和非根际土壤细菌群落多样性及 PICRUSt 功能预测	李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏庐璐, 马飞 (2304)
模拟酸雨及氮沉降对马尾松林土壤细菌群落结构及其多样性的影响	王楠, 钱少郁, 潘小承, 陈一磊, 白尚斌, 徐飞 (2315)
磷石膏和碱蓬对盐渍化土壤水盐及细菌群落结构的影响	刘月, 杨树青, 张万峰, 姜帅 (2325)
菌渣与化肥肥施对稻田土壤微生物群落组成及多样性的影响	耿和田, 王旭东, 石思博, 叶正钱, 周文晶 (2338)
增氧对不同秸秆还田稻田田面水养分动态及温室气体排放的影响	胡锦涛, 薛利红, 钱聪, 魏利祥, 曹帅 (2348)
外源褪黑素对胁迫下水稻幼苗生长和抗氧化系统的影响	储玉檀, 李颜, 黄益宗, 保琼莉, 孙红羽, 黄永春 (2356)
面向 2035 的节能与新能源汽车全生命周期碳排放预测评价	付佩, 兰利波, 陈颖, 郝卓, 邢云翔, 蔡旭, 张春梅, 陈轶嵩 (2365)
农田土壤微塑料分布、来源和行为特征	薄录吉, 李冰, 张凯, 马荣辉, 李彦, 王艳芹, 孙斌, 刘月岩 (2375)
农田土壤除草剂污染的修复技术研究进展	胡芳雨, 安婧, 王宝玉, 徐明恺, 张惠文, 魏树和 (2384)
我国黑土地农田土壤除草剂残留特征研究及展望	李睿, 吴秋梅, 赵归梅, 胡文友, 田康, 黄标, 吴祥为, 刘峰, 赵玉国, 赵永存 (2395)
《环境科学》征订启事(1910)	《环境科学》征稿简则(1984)
信息	(2167, 2191, 2324)

“大气十条”政策的节能降碳效果评估与创新中介效应

李少林, 王齐齐

(东北财经大学产业组织与企业组织研究中心, 大连 116025)

摘要: 为评估《大气污染防治行动计划》(“大气十条”政策)的节能降碳效果与作用机制,在测度 2003 ~ 2017 年 281 个地级和以上城市单位地区生产总值能耗和 CO₂ 排放量的基础上,运用双重差分模型探究了“大气十条”政策对节能降碳的影响、创新中介效应和城市异质性。结果表明:①“大气十条”政策促进全样本城市能耗强度显著下降 17.60%,碳排放强度显著下降 19.99%,在通过平行趋势检验、克服内生性和安慰剂、动态时间窗和反事实、三重差分法和 PSM-DID 估计等一系列稳健性检验基础上,上述结论依然成立。②机制分析表明,“大气十条”政策通过绿色发明型专利为载体的直接创新中介效应实现节能降碳效果,创新引致的产业结构升级效应的间接创新中介效应实现节能效果。③异质性分析表明,“大气十条”政策对煤炭消费大省的节能降碳幅度分别大于非煤炭消费大省 0.86% 和 3.25%;对老工业基地城市的降碳幅度大于非老工业基地 36.43%,但节能效果小于非老工业基地 8.93%;对非资源型城市的节能降碳幅度分别大于资源型城市 31.30% 和 74.95%。④结果显示,须强化煤炭消费大省、老工业基地城市和资源型城市等重点地区的创新投入和产业结构升级力度,以充分发挥“大气十条”政策的节能降碳效果。

关键词: “大气十条”政策;节能降碳;创新中介效应;绿色发展;双重差分模型

中图分类号: X24 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2023)04-1985-13 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.202205122

Evaluation of Energy Saving and Carbon Reduction Effect of Air Pollution Prevention and Control Action Plan and Innovation Intermediary Effect

LI Shao-lin, WANG Qi-qi

(Center for Industrial and Business Organization, Dongbei University of Finance and Economics, Dalian 116025, China)

Abstract: In order to evaluate the effect and mechanism of energy saving and carbon reduction of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan (the Policy), on the basis of measuring the energy consumption and CO₂ emissions of GDP per unit area in 281 prefecture-level cities and above from 2003 to 2017, the influence, intermediary effect of innovation, and urban heterogeneity of the Policy on energy saving and carbon reduction were explored by using a difference-in-difference model. The results showed that: ① the Policy promoted a significant reduction of 17.60% in the energy consumption intensity and 19.99% in the carbon emission intensity in the whole sample city. Based on a series of robustness tests, such as the parallel trend test, overcame endogenous and placebo, dynamic time window and counterfactual, difference-in-difference-in-differences, and PSM-DID estimation, the above conclusions were still valid. ② Mechanism analysis showed that the Policy achieved energy saving and carbon reduction through the direct innovation intermediary effect of green invention patents as the carrier, and the indirect innovation mediation effect of the industrial structure upgrading effect caused by innovation achieved an energy-saving effect. ③ Heterogeneity analysis showed that the energy saving and carbon reduction rate of the Policy for coal-consuming provinces was 0.86% and 3.25% higher than that of non-coal-consuming provinces. The carbon reduction in the old industrial base city was 36.43% higher than that in the non-old industrial base, but the energy saving effect was 8.93% lower than that of the non-old industrial base. The range of energy saving and carbon reduction in non-resource-based cities was 31.30% and 74.95% higher than that in resource-based cities, respectively. ④ The results showed that it was necessary to strengthen the innovation investment and industrial structure upgrading in key areas such as big coal-consumption provinces, old industrial base cities, and resource-based cities, so as to give full play to the energy saving and carbon reduction effect of the Policy.

Key words: Air Pollution Prevention and Control Action Plan; energy saving and carbon reduction; intermediary effect of innovation; green development; difference-in-difference model

BP 世界能源统计年鉴 2021 数据显示,2020 年中国排放 98.99 亿 t CO₂, 占全球 CO₂ 排放总量的比重为 30.7%, CO₂ 排放量持续增长。2012 年中国煤炭消费占世界比重为 50.2%^[1], 2020 年中国国民经济和社会发展统计公报显示,中国能源消费总量 49.80 亿 t 标准煤,总体上中国节能降碳形势依旧严峻。从 1982 年中国发布《大气环境质量标准》(GB 3095-1982)到《2030 年前碳达峰行动方案》等政策文件的出台,大气污染防治工作一直在进行。2012 年末至 2013 年初,中国雾、霾天气频发,空气质量进一步恶化,为治理空气污染,促进经济绿色发展,中国发布史上最严的大气污染防治政策即《大气污染

防治行动计划》(“大气十条”政策)。重点关注京津冀、长三角和珠三角等重污染地区,各省市在此基础上出台大气治理细则,“大气十条”政策成为中国大气治理的重要命令型环境规制工具。

大气污染主要来源于工业化与化石燃料燃烧^[2]、单一要素煤的利用、能源消费^[3]、电力行业

收稿日期: 2022-05-10; 修订日期: 2022-07-19

基金项目: 国家社会科学基金重大项目(18ZDA042); 国家自然科学基金青年项目(71403041); 教育部人文社会科学规划基金项目(19YJA790042); 辽宁省社会科学规划基金青年项目(L19CJY008); 辽宁省教育厅新型智库项目(LN2020X08)

作者简介: 李少林(1986 ~), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为能源经济与低碳绿色发展, E-mail: lishao1in0506@163.com

副产品^[4,5]和交通^[6,7]。产业发展带动经济发展的同时副产品碳排放如影随形^[8],同时能源结构也影响着环境治理^[9,10]。基于现有的技术水平如何减少碳排放与降低能源消耗面临着严峻挑战。大幅度的绿色创新活动可以实现降碳,但与此同时须注意碳回弹效应^[11]。通过技术效率提升可以减少能源消耗从而达到节能降碳的效果^[12]。基于环境规制的压力,企业减排成本上升,为了利润最大化,通过创新与产业结构升级的方式应对规制。以上碳排放与能源消耗的研究,大多数从碳减排或能源消耗单一视角研究节能减排,忽视整体性。大气治理影响经济,关系民生。国外通过全国空气污染控制政策^[13],引入氮氧化物排放市场^[14]和排污权交易市场^[15]等命令型与市场型环境规制政策减少污染性气体排放改善空气质量,并认为政策配合使用效果更佳^[16,17]。中国关于大气治理政策的研究集中于绩效评估^[18~20]、区域联合治理^[21]和公众健康^[22]等角度。

已有关于“大气十条”政策实施效果的 DID 研究仅采取了反事实分析和增加控制变量的方法验证了“大气十条”政策具有降低各类空气污染物指标效果的结论^[23],一方面,并未抓住“大气十条”政策对关键的能耗和碳排放指标的影响,另一方面,“大气十条”政策实施期间国内又出台多种具有节能降碳效果的政策,已有研究并未对 DID 回归的内生性问题和干扰政策进行有效解决或排除,导致结论并不具有较好的稳健性。区别于已有研究,本文创新点主要体现在:①在测度单位 GDP 能耗和碳排放数据的基础上,通过理论分析和研究假说的提出,从选题上弥补了已有文献缺乏“大气十条”政策对节能降碳的影响研究;②基于“大气十条”政策诱发创新和产业结构升级的影响机制,首次剖析了“大气十条”政策促进节能降碳的直接与间接创新中介效应;③在实证研究部分,选取了适宜的工具变量、一系列稳健性检验和丰富的异质性分析对政策效果进行全方位的评价,凸显了本文关于 DID 研究对象的热点聚焦、研究方法的高度稳健和研究结论的针对性。

1 理论分析与研究假说

“大气十条”政策硬性约束减少污染物排放、严格控制能源消耗、加快调整能源结构、强化节能环保指标和加大排污费征收力度。软性激励节能环保产业发展和加大支持企业绿色创新活动力度。“大气十条”政策在节能与降碳两个方面对大气治理方面做出约束,这些硬性约束和软性激励相结合使得“大气十条”政策着力点覆盖面更广,为实现节能降碳目标打下坚实基础^[24],同时为实现“能源双控”与

“减排目标”提供指导。

假说 1:“大气十条”政策能够显著促进节能降碳。

“大气十条”政策强化科技研发推广治污新技术,并大力调整能源结构,增加清洁能源供应。波特假说认为,合适且严格的环境规制能够促进企业创新和降低环境治理成本^[25]。“大气十条”政策诱发绿色发明型专利增长为主的绿色创新活动。并作为命令型环境规制控制污染物排放,企业面临污染物的减排压力与能源利用效率的双重压力,倒逼其创新达成节能降碳效果;并通过增加传统企业技术改造投入或转向蕴含新技术的新兴产业,所引起的两类企业行为引发传统产业改造和新兴产业提升增量,间接对产业结构产生明显的影响,可直接对能源消耗产生影响,但是产业结构升级存在滞后性,降碳效果不显著。

假说 2:“大气十条”政策通过以专利申请授权占比为载体的直接创新中介效应产生显著的节能降碳效果,以创新引致的产业结构升级效应的间接创新中介效应产生显著的节能效果。

各个城市因其地理位置属性和发展情况有着不同的特征,煤炭作为中国重要的能源消耗品,为经济发展做出贡献的同时不可避免地带来环境污染问题^[26],并且中国能源碳排放效率区域间差异显著^[27]。煤炭消费视角下“大气十条”政策的节能降碳效应的异质性体现在:大量的煤炭消费,代表拥有相对完整的工业体系,在“大气十条”政策支持下积极探索产业转型与正向促进技术进步实现节能降碳,致使煤炭消费大省节能降碳效果好于非煤炭消费大省。

假说 3:“大气十条”政策对煤炭消费大省的节能降碳效果大于非煤炭消费大省。

工业结构特征影响着城市的生态与经济发展^[28,29],老工业基地城市重工业发达,节能降碳形势严峻;非老工业基地第三产业占比较高,现代化程度高,能源利用率高。老工业基地承担着全国主要的工业产品生产,能源消耗强度与碳排放强度显著高于非老工业基地,“大气十条”政策实施后,政策倾斜和财政支持,且对老工业基地更多的要求,推动其向节能环保方面转型升级,使得老工业基地焕发新活力,降碳效果好于非老工业基地,但是老工业基地高能耗形势短时间内无法扭转,节能效果小于非老工业基地。

假说 4:“大气十条”政策对老工业基地降碳效果高于非老工业基地,但节能效果小于非老工业基地。

资源的丰裕与否直接关乎生态环境^[30]。城市资源与治污困难程度间的关系,直接影响碳排放^[31]与能源消耗^[32],从而影响“大气十条”政策的实施效果。“大气十条”政策作用下资源型城市因其丰富的资源和其庞大的工业体系治污困难;非资源型城市因其资源属性更注重环境保护,发展绿色生态,技术水平与能源效率可能高于资源型城市。因此,非资源型城市的节能降碳效果好于资源型城市。

假说 5:“大气十条”政策对非资源型城市的节能降碳效果高于资源型城市。

2 材料与方法

2.1 模型设定

本文采用双重差分法(DID)评估“大气十条”政策的节能降碳效果,双重差分模型如下:

$$Y_{i,t} = \beta_0 + \beta_1 (\text{treat}_{i,t} \times \text{post}_{i,t}) + \beta_2 \text{control}_{i,t} + \eta_i + \theta_i + \text{province}_j \times \text{year}_t + \varepsilon_{i,t} \quad (1)$$

式中, i 、 t 和 j 表示地级市、年份和省份; Y 表示因变量,包括单位地区 GDP 碳排放(碳排放强度)和单位地区 GDP 能源消耗(能源消耗强度); $\text{treat} \times \text{post}$ 表示核心解释变量, treat 表示是否为处理组,如果是京津冀、长三角和珠三角重点关注区域则赋值为 1,否则赋值为 0; post 表示政策实施时间,2003 ~ 2012 年赋值为 0,2013 ~ 2017 年赋值为 1; control 表示影响节能降碳且随着 i 和 t 变化而变化的控制变量; η 表示时间固定效应; θ 表示控制节能降碳且不随时间变化的城市固定效应; $\text{province} \times \text{year}$ 表示省份时间效应; ε 表示随机误差项。主要通过 $\text{treat} \times \text{post}$ 交互项系数反映“大气十条”政策与节能降碳之间的因果关系。

2.2 数据选取与变量设计

数据选取。2013 年,“大气十条”政策正式颁布,其中重点关注北京、天津、河北、上海、江苏、

浙江、安徽和广东等大气污染严重区域,至此“大气十条”政策成为中国大气治理的风向标,开启中国大气治理的又一里程碑式的阶段。本文以 2003 ~ 2017 年中国 281 个城市组成的面板数据评估“大气十条”政策的节能降碳效应。2013 年为政策实施基准年,2003 ~ 2012 年为政策出台前时期,2014 ~ 2017 年为政策出台后的时期。在处理组与控制组的划分上,北京、天津、河北、上海、江苏、浙江、安徽和广东所下辖的 74 个地级市作为处理组,其余省份所下辖的地级市作为控制组。碳排放数据来源于中国统计局最新能源数据修订版(2015)和中国碳排放核算数据库。各省能源消耗数据来源于历年的中国能源统计年鉴,夜间灯光数据来自美国国家海洋和大气管理局,参考吴健生等^[33]和史丹等^[34]的做法,将中国各地级市夜间灯光数据占本省比例和省级能源消耗数据相匹配得到地级市能源消耗数据。绿色申请发明专利数和绿色授权发明专利数据来源于国家知识产权局官网。地形起伏度数据参考文献^[35]计算所得。其余数据来源于历年的中国城市统计年鉴。

因变量与自变量。本文的因变量为地级市和以上城市碳排放强度和能源消耗强度(lngdpCO_2 和 lngdpenergy),地区实际生产总值以 2003 年不变价格为基期进行平减得到。自变量是 $\text{treat} \times \text{post}$ 交互项表示 DID 变量。

控制变量(表 1)。碳排放强度相关控制变量选取^[36]年末地区从业人数对数值($\text{ln}cyrs$)、城市人口总数对数值($\text{ln}people$)、地区第二产业占城市产业的比值(industry2)、地区生产总值对数值(lngdp)、城市固定资产对数值(lngdzc)、工企数对数值($\text{ln}qy$)、城镇私营与个体从业者占城镇期末从业者比重(strsq)、地区财政收入与地区生产总值比重(strpub)和限额以上工业总产值占地区生产总值比

表 1 主要变量描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of main variables						
变量	观测值	平均值	标准差	最小值	中位数	最大值
lngdpCO ₂	4 215	-3.689 2	0.628 7	-6.366 2	-3.690 0	-1.530 3
lngdpenergy	4 215	0.174 3	0.839 3	-1.806 8	0.128 3	4.137 4
lncyrs	4 214	3.491 8	0.811 5	1.398 7	3.414 4	6.894 5
lnpeople	4 209	5.864 9	0.691 2	2.795 4	5.916 0	8.129 2
industry2	4 210	0.486 4	0.108 8	0.026 6	0.489 1	0.909 7
lngdp	4 215	6.591 8	1.048 7	3.446 7	6.524 4	9.970 0
lngdzc	4 215	16.195 8	1.393 8	12.062 2	16.317 7	20.080 0
lnqy	4 206	6.453 5	1.118 4	2.995 7	6.398 6	9.841 2
strsq	4 145	0.942 7	0.660 5	0.030 8	0.792 8	17.141 2
strpub	4 207	0.074 2	0.056 8	0.010 7	0.062 2	1.705 0
lnindgdp	4 215	0.315 6	0.671 0	-4.003 0	0.418 9	3.206 7
lnpeoplemidu	4 210	5.707 8	0.891 9	1.680 9	5.832 7	7.888 7
lnpgdp	4 215	8.461 6	0.750 9	6.066 7	8.464 9	13.822 8

重对数值($\ln \text{indgdp}$)。能源消耗相关的控制变量选取如下:人口密度对数值($\ln \text{peoplemidu}$)、第二产业占比(industry2)和人均地区生产总值对数值($\ln \text{pgdp}$)。主要变量描述性统计如表1所示,碳排放强度最大值为-1.5303,最小值为-6.3662,平均值为-3.6892。能源消耗强度最大值为4.1374,最小值为-1.8608,平均值为0.1743。统计结果显示在研究区间内各地区的碳排放强度与能耗强度有着显著性差异,为接下来研究“大气十条”政策的节能降碳效应提供客观基础。

3 实证结果与稳健性检验

3.1 碳排放强度与能源消耗强度时间趋势图分析

本文绘制了“大气十条”政策处理组与控制组碳排放强度与能源消耗强度的时间趋势,以此分析“大气十条”政策的有效性,如图1和图2所示。图1所示碳排放强度的处理组与控制组呈现下降趋势,且处理组处于控制组下方。2003~2012年,处理组与控制组之间趋势相同,且两者之间的差值基本保持一致。2013年政策实施之后,处理组下降趋势明显,控制组下降趋势不明显,在2015年之后还有小幅度上升,可能是政策实施之后监督不到位,导致减排力度下降,两者在2015年之后差距明显。能源消耗强度趋势图与碳排放强度趋势图类似,不同的是在2013年政策实施之后能源消耗强度的处理组与控制组之间的差距呈现扩大的趋势,控制组下降趋势不明显,可能是由于“大气十条”政策倾斜导致处理组下降更显著。在2016年处理组下降更显著但两者之间仍然保持很大的差距,可能因为在2017年需要对“大气十条”政策结果进行评估,所以2016年能耗强度下降得更大。通过时间趋势图分析,初步推测碳排放强度与能源消耗强度的下降是“大气十条”政策发挥作用的结果。

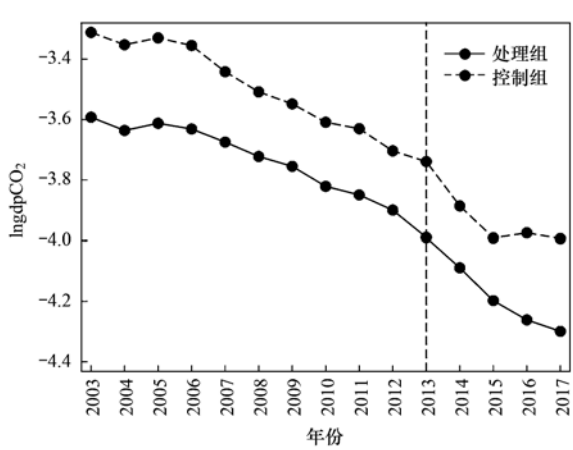


图1 碳排放强度时间趋势

Fig. 1 Time trend of carbon emission intensity

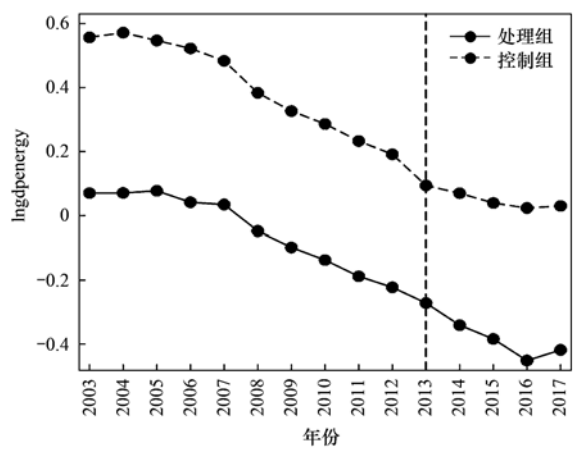


图2 能源消耗强度时间趋势

Fig. 2 Time trend of energy consumption intensity

3.2 DID 模型回归结果

时间趋势图分析得出“大气十条”政策使处理组与控制组之间存在显著差异,利用基准回归进一步验证结果,得到平均处理效应,同时为了检验政策对节能降碳的历年冲击效应,引入了动态效应,更加严谨地分析“大气十条”政策对碳排放强度与能源消耗强度的动态影响,结果如表2所示。

表2 DID 模型回归结果¹⁾

Table 2 DID model regression results

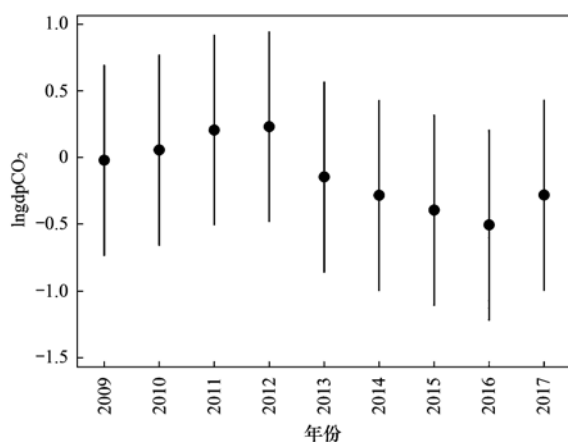
项目	平均处理效应		动态效应	
	$\ln \text{gdpCO}_2$	$\ln \text{gdpenergy}$	$\ln \text{gdpCO}_2$	$\ln \text{gdpenergy}$
treat × post	-0.199 9 *** (0.025 7)	-0.176 0 *** (0.062 2)		
treat × year2013			-0.335 4 *** (0.005 0)	0.039 0 (0.032 3)
treat × year2014			-0.320 9 *** (0.009 4)	-0.105 2 ** (0.048 4)
treat × year2015			-0.348 6 *** (0.013 9)	-0.131 1 * (0.071 8)
treat × year2016			-0.358 9 *** (0.020 7)	-0.235 2 *** (0.063 0)
treat × year2017			-0.199 9 *** (0.025 7)	-0.176 0 *** (0.062 2)
常数项	0.457 3 (0.465 5)	3.638 5 *** (0.794 2)	0.456 7 (0.465 5)	3.638 5 *** (0.794 2)
控制变量	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是
城市固定效应	是	是	是	是
省份时间效应	是	是	是	是
样本量	4 128	4 205	4 128	4 205
R ²	0.985 3	0.826 1	0.985 3	0.821 0

1) *** 表示 $P < 0.01$, ** 表示 $P < 0.05$, * 表示 $P < 0.1$, treat × year2013~2017 表示政策实施后每一年的动态效应,括号内表示省份聚类标准误,下同

表2为式(1)的基准回归结果,平均处理效应结果显示,在政策执行前后比较碳排放强度与能源消耗强度,“大气十条”政策在1%的水平上显著降低了碳排放强度19.99%与能源消耗强度17.60%。动态效应处理进一步验证假设,动态效应结果显示碳排放强度与能源消耗强度都显著为负,假说1得到验证。系数绝对值逐渐增加,显示政策效果越来越好。但在2016~2017年,碳排放强度与能源消耗强度的下降趋势有所减缓,可能是由于政策效果达到预期目标,节能降碳力度有所下降。

3.3 平行趋势检验

处理组与控制组满足平行趋势检验是双重差分法使用的前提条件。即在没有其他政策干扰的情形下,处理组与控制组之间的趋势不变。虽然经过前面时间趋势图分析可知,在政策颁布之前处理组与控制组的趋势基本保持一致,但为使结果更严谨和有说服力,在此基础上进行平行趋势检验。碳排放强度的回归结果如图3显示,政策执行的前4a和以上年份,treat $\times$ post的系数不显著且在0值附近。能源消耗强度的回归结果如图4显示,政策执行的前4a和以上年份,有一年系数显著,其余年份系数不显著且在0值附近。通过以上分析可得在政策执行之前处理组与控制组基本上满足平行趋势检验。通过平行趋势图进一步分析可知,政策执行之后的4a,碳排放强度与能源消耗强度的回归系数迅速由正值转为负值且呈下降趋势,说明“大气十条”政策对碳排放强度和能源消耗强度有着显著的负向影响且影响效果愈来愈强,在节能降碳方面发挥着不可替代的作用。



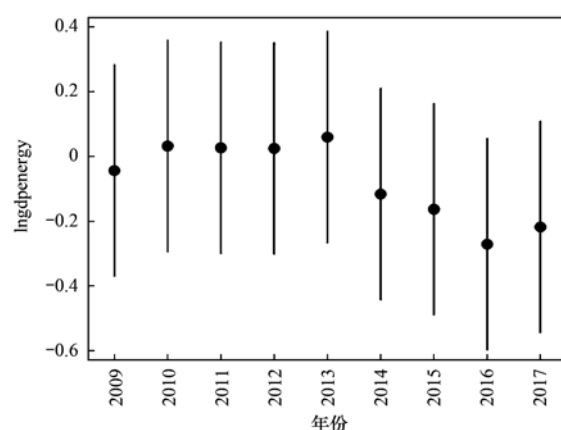
2009 表示 2009 年和以前的年份

图3 碳排放强度平行趋势检验

Fig. 3 Parallel trend test of carbon emission intensity

3.4 安慰剂检验

为了排除其他因素对样本选择的干扰,进一步做安慰剂检验。双重差分进行多年数据分析容易导

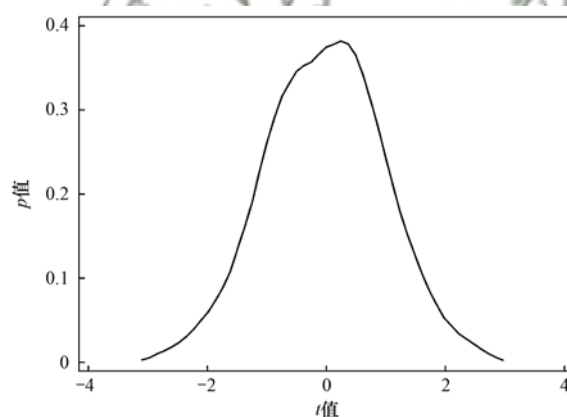


2009 表示 2009 年和以前的年份

图4 能源消耗强度平行趋势检验

Fig. 4 Parallel trend test of energy consumption intensity

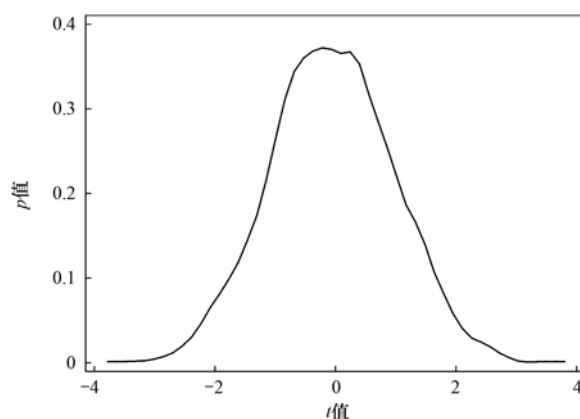
致误差问题发生,安慰剂检验可以解决以上问题。安慰剂检验是通过随机挑选处理组虚拟变量进行同式(1)一致的回归分析,随机选取74个市作为虚拟处理组,其余的市作为虚拟控制组,并对此过程重复进行1000次。抽样1000次结果如图5和图6所示,其中横轴表示1000次随机抽取74个样本城市中,



带宽=0.2224

图5 碳排放强度安慰剂检验

Fig. 5 Placebo test of carbon emission intensity



带宽=0.2282

图6 能源消耗强度安慰剂检验

Fig. 6 Placebo test of energy consumption intensity

部分城市作为虚拟实验组后所得 $treat \times post$ 系数的 t 值,表示回归系数的显著性检验系数,纵轴为对应 p 值表示概率,曲线表示核密度估计的 t 值分布. 系数估计值的 t 值的绝对值绝大部分在 2 以内, p 值绝大多数大于 0.1,说明“大气十条”政策在 1 000 次抽样中没有显著效果,排除其他因素干扰样本选择,因此通过安慰剂检验.

3.5 内生性检验

使用双重差分模型估计“大气十条”政策的节能降碳成效,模型实验最佳状态是试点地区为随机选择,但是由于各地区经济发展水平、能源消耗情况等因素的不同,“大气十条”政策实施所选择的试点地区无法排除受以上其他因素影响所产生,则可能存在其他因素同时影响节能减排成效,从而产生内生性问题. 解决内生性问题的检验方法之一为工具变量法. 关于工具变量的选择必须要遵循以下两个必要前提条件,一是相关性,即工具变量必须与内生解释变量相关;二是外生性,即工具变量的选择必须与误差项无关,也就是说,工具变量只能通过与其相关的内生解释变量解释被解释变量. 只有同时满足这两个前提条件,才能保证选择的工具变量在解释“大气十条”政策的同时,确保不能通过其他直接或间接途径影响节能降碳效应.

参考选择地理变量河流距离作为工具变量的研究思想^[37]选取地理变量地形起伏度(qfd)作为是否纳入重点关注地区的工具变量^[38],这是因为地形起伏度能够同时满足工具变量选择的两个前提条件. 首先,现有研究表明,地形起伏度与大气污染呈负相关关系,地形起伏度越小,大气污染情况越严重,并且地形起伏度负向影响人口密度和经济聚集^[37,39,40]. 因此,地形起伏度不仅会影响大气污染治理与能源消耗情况,还会影响针对大气污染防治的“大气十条”政策试点选择,碳排放量与能源消耗量大,被选为重点关注地区的可能性就大,地形起伏度与试点选取呈负相关关系,满足相关性条件. 其次,关于地形起伏度与误差项相关性,但是地形起伏度为自然现象,是客观存在的现象,无法直接或间接影响节能降碳情况,满足排他性条件. 因此,本文选择地形起伏度作为工具变量. 其结果如表 3 所示,第一阶段回归中,工具变量与时间虚拟变量的交互项在 1% 的水平上显著为负,且检验弱工具变量的 F 检验的系数值满足要求. 第二阶段回归中的回归系数显著为负,与表 2 中基准回归结果相比,“大气十条”政策的节能降碳效果有所减弱,但仍显著为负. 说明“大气十条”政策能够促进节能降碳这一结论依旧稳健.

表 3 工具变量检验

项目	Table 3 Instrumental variable tests			
	第一阶段		第二阶段	
	$treat \times post$	$treat \times post$	$lngdpCO_2$	$lngdpenergy$
$qfd \times post$	-0.181 8 *** (0.008 8)	-0.190 2 *** (0.009 0)		
$treat \times post$			-0.159 4 *** (0.022 7)	-0.058 5 ** (0.033 1)
常数项	0.548 4 (1.023 4)	-0.680 8 (0.990 5)		
控制变量	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是
城市固定效应	是	是	是	是
省份时间效应	4 128	4 205	4 128	4 205
F	430.32	447.41		
R^2	0.419 4	0.354 0		

3.6 稳健性检验

3.6.1 排除其他政策干扰

2007 年国家发展和改革委员会批复 11 省份开展排污权交易,排污权交易合理合法利用市场机制分配污染排放权,最终实现社会面的节能减排. 因此,在研究“大气十条”政策的节能降碳效应时应剔除排污权交易的影响. 具体做法是剔除排污权交易的 11 个省份的试点城市,重新对剩下的城市进行如式(1)的基准回归分析,回归结果显示核心解释变量在 1% 的水平上显著为负. 2011 年财政部、国家发展和改革委员会印发了《关于开展节能减排财政政策综合示范工作的通知》,节能减排财政政策的

出台,加大对节能减排行动的支持力度,有利于企业创新实现政府节能减排目标. 节能减排财政政策的工作重心与“大气十条”政策重合,可以说“大气十条”政策部分来源于节能减排财政政策. 为了剥离政策的干扰,剔除节能减排财政政策试点城市,表 4 显示的两个被解释变量的回归系数显著为负. 节能减排财政政策的出台是专门针对节能减排,对“大气十条”政策的节能降碳效果评估产生影响相对较大,但是以上两个政策都有利于节能减排的实现,都对评估“大气十条”政策的节能降碳效应产生影响. 剔除以上两个政策干扰,“大气十条”政策的节能降碳效应依旧显著,证明是在“大气十条”政策作用下

表 4 剔除其他政策干扰

Table 4 Excluding other policy interference

项目	剔除排污权交易		剔除节能减排财政政策	
	lngdpCO ₂	lngdpenergy	lngdpCO ₂	lngdpenergy
treat × post	-0.198 9 *** (0.027 1)	-0.170 8 *** (0.063 4)	-0.200 4 *** (0.025 7)	-0.168 5 *** (0.067 1)
常数项	0.520 3 (0.447 5)	3.956 6 *** (0.806 3)	-0.031 6 (0.555 3)	3.667 8 *** (0.966 8)
控制变量	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是
城市固定效应	是	是	是	是
省份时间效应	是	是	是	是
样本量	2 529	2 587	3 717	3 787
R ²	0.983 7	0.802 7	0.985 3	0.826 2

实现节能降碳。

3.6.2 三重差分法(DDD)

通过 3.6.1 节排除其他政策干扰并不能排除所有的干扰政策,同时期还有其他政策干扰基准回归结果,为了进一步剔除同期其他政策的干扰,例如国家发展和改革委员会于 2010 年在北京、上海和石家庄等城市开展的低碳城市试点,2011 年在北京、天津和上海等重点城市开展碳市场交易,这些都能起到和“大气十条”政策类似的效果,为保证基准回归结果的可靠性,采用三重差分法^[41]。将“大气十条”政策重点关注城市的老工业城市、资源型城市和省会城市等赋予成新的 DDD 变量,2013 年和以后的年份赋值为 1,之前的年份赋值为 0。从而进一步剔除之前未剔除的可能影响结果的政策,得到“大气十条”政策的净影响效果。表 5 的回归结果显示,核心解释变量在 5% 的水平上显著为负,剔除其他政策之后“大气十条”政策的节能降碳效果依旧稳健。

3.6.3 反事实分析与动态时间窗检验

采用反事实分析的方法检验在满足平行趋势检验的情形下,处理组与控制组之间的可比性,即将政策发生时间提前,假设政策发生在 2010 年或者

2011 年,检测“大气十条”政策是否对节能降碳有显著作用,最终两个被解释变量的回归结果(如表 6 所示)不显著,说明 2013 出台的“大气十条”政策对之前的年份没有影响,表 2 的回归结果依旧稳健。动态时间窗检验。表 2 的动态效应只是政策出台之后每一年的结果,并未与政策出台前做充分比较,为了结果更加准确,对“大气十条”政策做动态时间窗检验。具体做法是以 2013 年为基准年,并选取 1、2、3 和 4 a 为窗宽进行动态时间窗检验。动态时间窗检验结果参见表 6,窗宽的变化并没有改变“大气十条”政策对节能降碳的负向影响,且随着窗宽的变大,负向影响逐渐加深,并在 3 a 和 4 a 过渡时稍有上升趋势,与基准回归结果保持一致。

表 5 三重差分模型估计结果

Table 5 Difference-in-difference-in-differences model estimation results

项目	lngdpCO ₂	lngdpenergy
DDD	-0.020 7 ** (0.010 0)	-0.051 8 ** (0.026 2)
常数项	0.531 5 (0.473 3)	3.658 3 *** (0.769 1)
控制变量	是	是
年份固定效应	是	是
城市固定效应	是	是
省份时间效应	是	是
样本量	4 128	4 205
R ²	0.985 3	0.826 6

表 6 反事实分析与动态时间窗检验

Table 6 Counterfactual analysis and dynamic time window test

项目	反事实检验		动态时间窗检验			
	2010 年	2011 年	1 a	2 a	3 a	4 a
lngdpCO ₂	0.028 5 (0.032 0)	0.024 1 (0.038 1)	-0.322 9 *** (0.010 4)	-0.346 3 *** (0.013 2)	-0.369 1 *** (0.020 8)	-0.214 0 *** (0.022 6)
样本量	2 805	2 805	829	1 373	1 916	2 459
lngdpenergy	0.094 4 (0.062 0)	0.092 9 (0.070 7)	-0.077 8 ** (0.031 4)	-0.115 1 ** (0.044 9)	-0.219 3 *** (0.042 1)	-0.190 3 *** (0.048 5)
样本量	2 805	2 805	843	1 405	1 967	2 524

3.6.4 PSM-DID 模型估计

通过安慰剂检验与工具变量法检验了样本选择性问题的,但大样本匹配依旧无法确保处理组与控制组之间有完全相同的个体特征。鉴于样本综合全国的 281 个城市,样本差异性大,为了结果更加可靠,利用倾向得分匹配(PSM)对处理组

和控制组的个体进行匹配,最后结合 DID 的方法进行回归分析。使用半径匹配、近邻匹配和核匹配这 3 种方法对样本进行匹配,PSM-DID 回归结果如表 7 所示,“大气十条”政策能够显著降低碳排放强度与能源消耗强度,回归结果依旧稳健。

表 7 PSM-DID 模型估计结果
Table 7 PSM-DID model estimation results

项目	lngdpCO ₂			lngdpenegy		
	半径匹配	近邻匹配	核匹配	半径匹配	近邻匹配	核匹配
treat × post	-0.200 2 *** (0.025 6)	-0.199 9 *** (0.025 7)	-0.206 4 *** (0.025 1)	-0.176 0 *** (0.062 2)	-0.214 1 ** (0.095 0)	-0.214 1 ** (0.095 0)
常数项	0.533 1 (0.496 6)	0.457 3 (0.465 5)	0.731 1 (0.470 9)	3.638 5 *** (0.794 2)	3.249 6 *** (0.751 3)	3.249 6 *** (0.751 3)
控制变量	是	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是	是
城市固定效应	是	是	是	是	是	是
省份时间效应	是	是	是	是	是	是
样本量	4 098	4 128	3 851	4 205	3 926	3 926
R ²	0.985 3	0.985 3	0.987 4	0.826 1	0.843 0	0.843 0

4 创新中介效应与异质性分析

4.1 创新中介效应

经上述基准回归和一系列稳健性检验表明,“大气十条”政策切实起到降低碳排放强度与能源消耗强度效果.除此之外,关于“大气十条”政策所带来的创新中介效应的分析,“大气十条”中直接涉及创新发展的有“加快企业技术改造,提高科技创新能力”,技术创新影响未来企业绿色转型的动力强度,技术方面的绿色创新能够促进企业有效节能减排,实现整体能耗的下降,带动企业节能减排意识的提高,以及通过产品质量提升与企业发展观念转变影响整个消费群体的节能减排生活观念,实现整体的有效节能减排.因此,技术创新能够构成“大气十条”的创新中介效应.除此之外,“大气十条”中提到的“调整优化产业结构,推动产业转型升级”,“大气十条”政策引导技术向低碳减排方向转变,到达一定程度之后能够引起产业结构升级,而产业结构升级对不同碳排放强度部门影响程度存在不同^[42,43].

因此,根据创新通过大气十条发挥作用路径的直接性和间接性,将“大气十条”政策通过技术创新倒逼企业创新行为的创新中介效应称为直接创新中介效应,将“大气十条”政策通过企业引入新技术或改造现有技术等行为,引导产业结构向更为节能减排类型的创新产业结构方向变动的创新中介效应称为间接创新中介效应.相比于直接创新中介效应,由产业结构引导的间接创新效应的发挥不仅具有时滞性,更是存在绿色转型推进低效率等问题,很可能存在目前节能降碳效果不显著情形^[42].

本文基于“大气十条”政策验证环境规制是否诱发波特效应,“大气十条”政策通过技术创新的直接途径和产业结构升级的间接途径实现节能降碳.为验证这一传导机制,本文以绿色发明型专利申请数量占比和绿色发明型专利授权数量占比分别作为技术创新代理变量,以此分析直接创新中介效应;以

第二产业占比作为产业结构升级代理变量,借以分析间接创新中介效应.创新中介效应模型如下:

$$Y_{i,t} = \beta_0 + \beta_1 (\text{treat}_{i,t} \times \text{post}_{i,t} \times \text{Moderator}_{i,t}) + \beta_2 (\text{treat}_{i,t} \times \text{post}_{i,t}) + \beta_3 \text{Moderator}_{i,t} + \beta_4 \text{control}_{i,t} + \eta_t + \theta_i + \text{province}_j \times \text{year}_t + \varepsilon_{i,t} \quad (2)$$

式中,Y表示碳减排强度与能源消耗强度,Moderator表示直接创新中介变量和间接创新中介变量,具体为绿色发明型专利申请数量占比、绿色发明型专利授权数量占比和第二产业占比,其他变量如式(1),现主要关注三次项系数,其表示以上中介变量是否起到降低碳排放强度与能源消耗强度的作用.

“大气十条”政策的直接创新中介效应如表8所示,以绿色发明型专利申请数量占比和绿色发明型专利授权数量占比作为技术创新代理变量,能够以5%的显著性水平上降低碳排放强度,并分别在1%、5%显著性水平上显著降低能源消耗强度,这表明利用绿色发明型专利申请数量占比和绿色发明型专利授权数量占比分别作为技术创新代理变量,核心解释变量的显著性水平和系数对碳排放强度与能源消耗强度影响差异不大,显著性水平依旧稳健.因此,“大气十条”能够通过技术创新发挥直接创新中介效应,有效减低碳排放强度与能源消耗强度,促进节能降碳.

“大气十条”政策的间接创新中介效应如表8所示,以第二产业占比作为产业结构升级类型的间接创新中介效应目前尚未发挥最佳节能降碳状态,虽然“大气十条”政策可以在5%显著性水平上降低能源消耗强度,但是在降低CO₂排放这一方面尚未显现积极的正向效应,其核心系数虽然为负,但并不显著,这说明在“大气十条”通过产业结构升级降低碳排放量这一途径上,即使产业结构有所变动,但是整体碳排放并未真正下降,产业结构向着绿色低碳方面的道路转变存在低效率等问题,导致整体节能降碳效果不理想.因此,在“大气十条”政策中,通过

技术创新所导致的直接创新中介效应需要进一步维持与发展,而通过产业结构升级所导致的间接创新中介效应还需进一步理清发展障碍,激发节能降碳动力。

表 8 创新中介效应

项目	lngdpCO ₂			lngdpenergy		
	绿色发明型专利申请数量占比	绿色发明型专利授权数量占比	产业结构升级	绿色发明型专利申请数量占比	绿色发明型专利授权数量占比	产业结构升级
treat × post × Moderator _i	-0.503 0 ** (0.251 0)	-0.636 1 ** (0.301 3)	-0.023 9 (0.097 0)	-0.177 0 *** (0.009 7)	-0.243 6 ** (0.117 4)	-0.533 3 ** (0.216 7)
Moderator _i	-0.028 7 (0.034 9)	0.017 1 (0.038 0)	-1.567 5 *** (0.007 0)	0.008 3 (0.016 3)	0.006 8 (0.020 4)	-0.396 3 ** (0.172 3)
常数项	-3.470 5 (0.121 1)	-3.441 4 *** (0.393 3)	-2.669 6 *** (0.103 9)	0.404 3 *** (0.047 5)	0.418 9 *** (0.035 0)	0.664 6 *** (0.119 3)
控制变量	否	否	否	否	否	否
年份固定效应	是	是	否	是	是	是
城市固定效应	是	是	否	是	是	是
省份时间效应	是	是	否	是	是	是
样本量	4 129	4 054	4 210	4 129	4 054	4 210
R ²	0.575 9	0.575 3	0.511 5	0.821 1	0.823 2	0.813 5

4.2 异质性分析

4.2.1 煤炭消费大省与非煤炭消费大省视角

将煤炭消费大省位于“大气十条”政策重点关注地区的 45 个城市作为处理组,不在重点关注地区的 80 个城市作为控制组,进行准自然实验。同时将非煤炭消费大省位于重点关注区域的 29 个城市作为处理组,不在重点关注区域的 127 个城市作为控制组,得出“大气十条”政策对煤炭消费大省与非煤炭消费大省的碳减排强度和能源消耗强度的影响。

从表 9 可以得出,“大气十条”政策对煤炭消费

大省在 1% 的水平上显著降低碳排放强度,对非煤炭消费大省在 5% 水平上显著降低碳减排强度,降低强度高于非煤炭消费大省 3.25%;“大气十条”政策对煤炭消费大省在 1% 的水平上降低能源消耗强度,对非煤炭消费大省的能源消耗强度无显著影响。至此,假说 3 得到验证。可能原因是用煤大省工业体系发达,能源消耗较大,为满足环境需求,在“大气十条”政策支持下,这些城市积极探索第二产业升级,设备升级改造,显著降低了碳排放强度与能源消耗强度。

表 9 煤炭消费异质性

项目	煤炭消费大省		非煤炭消费大省	
	lngdpCO ₂	lngdpenergy	lngdpCO ₂	lngdpenergy
treat × post	-0.107 3 *** (0.014 6)	-0.058 0 *** (0.009 4)	-0.074 8 ** (0.030 0)	-0.049 4 (0.085 1)
常数项	0.471 6 (0.676 9)	4.739 0 ** (1.490 2)	0.090 8 (0.367 0)	2.955 2 *** (0.900 2)
控制变量	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是
城市固定效应	是	是	是	是
省份时间效应	是	是	是	是
样本量	1 834	1 872	2 294	2 333
R ²	0.983 9	0.826 7	0.986 3	0.828 1

4.2.2 老工业基地与非老工业基地视角

2013 年全国规划 120 个全国老工业基地^[44]。对于降低具有高耗能高污染特征的老工业基地的碳排放强度与能源消耗强度面临较大挑战,“大气十条”政策能否实现老工业基地的节能降碳作用值得关注。将老工业基地城市位于“大气十条”政策重点关注地区的 17 个城市作为处理组,不在重点关注地区的 78 个城市作为控制组,得出“大气十条”政策对老工业基地碳减排强度与能源消耗强度的影响。同时将非老工业基地位于重点关注区域的 57 个城市作为处理组,不在重点关注区域的 129 个城市作

为控制组,得出“大气十条”政策对非老工业基地碳减排强度与能源消耗强度的影响。

碳排放强度方面估计结果参见表 10,“大气十条”政策降低老工业基地的碳排放效果最好。在 1% 的水平上显著核心解释系数为 -0.429 0,对降低非老工业基地的碳排放在 10% 的水平上显著核心解释系数为 -0.064 7。老工业基地降碳幅度大于非老工业基地 36.43%。可能原因是在“大气十条”政策作用下,老工业基地有较大的财政支持,创新强度较高,设备升级改造容易使得碳排放强度大幅下降。能源消耗强度方面,“大气十条”政策在 1% 的

水平上显著降低老工业基地与非老工业基地的能源消耗强度。但老工业基地能源消耗幅度小于非老工业基地 8.93%。可能原因是老工业基地高能耗形势短时间内无法扭转,在“大气十条”政策作用下非老工业基地降低能源消耗强度方面较为容易。至此,假说 4 得到验证。

表 10 工业基地异质性
Table 10 Heterogeneity of industrial base

项目	老工业基地		非工业基地	
	lngdpCO ₂	lngdpenergy	lngdpCO ₂	lngdpenergy
treat × post	-0.429 0 *** (0.012 6)	-0.216 6 *** (0.016 2)	-0.064 7 * (0.033 3)	-0.305 9 *** (0.067 0)
常数项	0.836 1 *** (0.273 0)	4.386 7 *** (0.644 3)	0.033 2 (0.488 3)	3.100 3 *** (0.951 5)
控制变量	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是
城市固定效应	是	是	是	是
省份时间效应	是	是	是	是
样本量	1 408	1 422	2 720	2 783
R ²	0.993 2	0.911 5	0.984 6	0.804 8

4.2.3 资源型城市与非资源型城市视角

2013 年国家确立 262 个资源型城市^[45],首次将这些城市作为维护能源资源安全的保障地,“大气十条”政策对资源型城市高质量发展是否起到作用值得关注。将资源型城市位于“大气十条”政策重点关注地区的 19 个城市作为处理组,不在重点关注地区的 93 个城市作为控制组,得出“大气十条”政策对资源型城市碳减排强度与能源消耗强度的影响。同时将非资源型城市位于重点关注区域的 55 个城市作为处理组,不在重点关注区域的 114 个城市作为控制组,得出“大气十条”政策对非资源型城市碳减排强度与能源消耗强度的影响。

本研究结果如表 11 所示,“大气十条”政策在 5% 的水平上显著降低资源型城市的碳排放强度,在 1% 的水平上显著降低非资源型城市的碳排放强度且降低程度小于资源型城市 74.95%。“大气十条”政策在 1% 的水平上显著降低资源型城市与非资源型城市的能源消耗强度,但资源型城市降低能源消耗强度比非资源型城市小 31.30%。可能原因是非资源型城市大多为经济发达地区,对环境诉求比较多,同时更容易实现技术创新与产业结构优化调整。最后在“大气十条”政策作用下,非资源城市的碳排放强度与能源消耗强度下降得更快。至此,假说 5 得到验证。

表 11 资源异质性
Table 11 Heterogeneity of resources

项目	资源型城市		非资源型城市	
	lngdpCO ₂	lngdpenergy	lngdpCO ₂	lngdpenergy
treat × post	-0.089 5 ** (0.039 7)	-0.171 7 *** (0.055 3)	-0.839 0 *** (0.025 0)	-0.484 7 *** (0.068 1)
常数项	-0.639 4 (0.883 1)	3.362 0 *** (0.852 3)	0.114 6 (0.494 2)	3.096 2 *** (1.015 4)
控制变量	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是
城市固定效应	是	是	是	是
省份时间效应	是	是	是	是
样本量	1 645	1 676	2 483	2 529
R ²	0.986 5	0.841 0	0.988 2	0.851 7

5 政策建议

(1)充分发挥“大气十条”政策的支持鼓励作用,支持企业自主创新,形成企业绿色研发创新体系。针对企业不同特性,合理调整产业布局,减少产业升级滞后时间,早日实现节能效果。“大气十条”政策的导向不同。针对研发能力强的企业,激励企业重点研发清洁能源技术,提高自身能源利用效率,督促生产节能环保产品;对高污染高排放行业的企

业重点约束污染排放,支持企业设备改造升级,摆脱高能耗,实现节能降碳。
(2)在“大气十条”政策合理调控之下,针对煤炭消费为主的省份,政策倾斜鼓励支持因地制宜开发清洁能源,提高可再生能源的占比,减少对一次性高污染能源的依赖。同时发挥“大气十条”政策的约束作用,提高煤炭等一次性能源的利用效率,大力发展低能耗低污染等第三产业,实现“大气十条”政策的节能减排目标。

(3)着重将“大气十条”政策的内容贯穿于老工业基地改造中,深入改造高污染、高排放的工业企业,实现老工业基地新发展。发挥“大气十条”政策的法律约束作用,对老工业基地进行企业重组,深入推进国有企业改革。“大气十条”政策重点支持民营企业高质量发展,大力发展现代高新技术,合理优化产业结构,积极引导清洁技术发展。

(4)“大气十条”政策应针对不同的城市资源禀赋,进行有侧重的改造升级。在正确评估资源型城市基础上进行合理的政策调整优化,强化“大气十条”政策对资源型城市的创新支持力度,减少对资源的依赖程度,加大对资源型城市的产业升级力度。

6 结论

(1)碳排放强度与能源消耗强度时间趋势图表明“大气十条”政策切实起到降低碳排放强度与能源消耗强度的作用,然后通过 DID 基准回归分析证实猜想,最后经过平行趋势检验、工具变量、剔除其他政策、三重差分和 PSM-DID 等稳健性检验证实研究结论的可靠性。

(2)“大气十条”政策通过绿色发明型专利申请量占比与绿色发明型专利授权量占比作为代理变量的直接创新中介效应的节能降碳效果显著,同时以第二产业结构占比作为产业结构升级的间接创新中介效应减少能源消耗强度。

(3)“大气十条”政策降低煤炭消费大省的碳排放强度与能源消耗强度程度高于非煤炭消费大省;“大气十条”政策有利于老工业基地地区碳排放强度降低,有利于非老工业基地能源消耗强度降低;“大气十条”政策降低非资源型城市的碳排放强度与能源消耗强度效果更显著。

参考文献:

- [1] Zheng S Q, Kahn M E. A new era of pollution progress in urban China? [J]. *Journal of Economic Perspectives*, 2017, **31**(1): 71-92.
- [2] Usmani R S A, Saeed A, Abdullahi A M, *et al.* Air pollution and its health impacts in Malaysia: a review [J]. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2020, **13**(9): 1093-1118.
- [3] Wang X C, Kleme J J, Dong X B, *et al.* Air pollution terrain nexus: a review considering energy generation and consumption [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, **105**: 71-85.
- [4] Jaramillo P, Muller N Z. Air pollution emissions and damages from energy production in the U. S.: 2002-2011 [J]. *Energy Policy*, 2016, **90**: 202-211.
- [5] 姜洪殿, 杨倩如, 董康银. 中国电力行业低碳转型政策的经济-能源-环境影响 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2022, **32**(6): 30-40.
- [6] Jiang H D, Yang Q R, Dong K Y. Socio-economic, energy, and environmental effects of low-carbon transition policies on China's power industry [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2022, **32**(6): 30-40.
- [7] 蒋自然, 金环环, 王成金, 等. 长江经济带交通碳排放测度及其效率格局 (1985 ~ 2016 年) [J]. *环境科学*, 2020, **41**(6): 2972-2980.
- [8] Jiang Z R, Jin H H, Wang C J, *et al.* Measurement of traffic carbon emissions and pattern of efficiency in the Yangtze River economic belt (1985-2016) [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(6): 2972-2980.
- [9] 陈天增, 葛艳丽, 刘永春, 等. 我国机动车排放 VOCs 及其大气环境影响 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(2): 478-492.
- [10] Chen T Z, Ge Y L, Liu Y C, *et al.* VOCs emission from motor vehicles in China and its impact on the atmospheric environment [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 478-492.
- [11] 余壮雄, 陈婕, 董洁妙. 通往低碳经济之路: 产业规划的视角 [J]. *经济研究*, 2020, **55**(5): 116-132.
- [12] Yu Z X, Chen J, Dong J M. The road to a low-carbon economy: the perspective of industrial plans [J]. *Economic Research Journal*, 2020, **55**(5): 116-132.
- [13] 马丽梅, 张晓. 中国雾霾污染的空间效应及经济、能源结构影响 [J]. *中国工业经济*, 2014, (4): 19-31.
- [14] Ma L M, Zhang X. The spatial effect of China's haze pollution and the impact from economic change and energy structure [J]. *China Industrial Economics*, 2014, (4): 19-31.
- [15] 李辉, 庞博, 朱法华, 等. 碳减排背景下我国与世界主要能源消费国能源消费结构与模式对比 [J]. *环境科学*, 2022, **43**(11): 5294-5304.
- [16] Li H, Pang B, Zhu F H, *et al.* Comparative energy consumption structure and mode between China and major energy consuming countries under the background of carbon emission reduction [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(11): 5294-5304.
- [17] 杨莉莎, 朱俊鹏, 贾智杰. 中国碳减排实现的影响因素和当前挑战——基于技术进步的视角 [J]. *经济研究*, 2019, **54**(11): 118-132.
- [18] Yang L S, Zhu J P, Jia Z J. Influencing factors and current challenges of CO₂ emission reduction in China: a perspective based on technological progress [J]. *Economic Research Journal*, 2019, **54**(11): 118-132.
- [19] 张宁. 碳全要素生产率、低碳技术创新和节能减排效率追赶——来自中国火力发电企业的证据 [J]. *经济研究*, 2022, **57**(2): 158-174.
- [20] Zhang N. Carbon total factor productivity, low carbon technology innovation and energy efficiency catch-up: evidence from Chinese thermal power enterprises [J]. *Economic Research Journal*, 2022, **57**(2): 158-174.
- [21] Lee S, Yoo H, Nam M. Impact of the clean air act on air pollution and infant health: evidence from South Korea [J]. *Economics Letters*, 2018, **168**: 98-101.
- [22] Deschênes O, Greenstone M, Shapiro J S. Defensive investments and the demand for air quality: evidence from the NO_x budget program [J]. *American Economic Review*, 2017, **107**(10): 2958-2989.
- [23] Byrom S, Bongers G D, Dargusch P, *et al.* A case study of Australia's emissions reduction policies-an electricity planner's perspective [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, **276**, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111323.
- [24] Fried S. Climate policy and innovation: a quantitative macroeconomic analysis [J]. *American Economic Journal: Macroeconomics*, 2018, **10**(1): 90-118.
- [25] Naqvi A. Decoupling trends of emissions across EU regions and the role of environmental policies [J]. *Journal of Cleaner*

- Production, 2021, **323**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129130.
- [18] 罗知, 李浩然. “大气十条”政策的实施对空气质量的影响[J]. 中国工业经济, 2018, (9): 136-154.
- Luo Z, Li H R. The impact of “Atmosphere Ten Articles” policy on air quality in China[J]. China Industrial Economics, 2018, (9): 136-154.
- [19] 唐倩, 郑博, 薛文博, 等. 京津冀及周边地区秋冬季大气污染物排放变化因素解析[J]. 环境科学, 2021, **42**(4): 1591-1599.
- Tang Q, Zheng B, Xue W B, *et al.* Contributors to air pollutant emission changes in autumn and winter in Beijing-Tianjin-Hebei and surrounding areas[J]. Environmental Science, 2021, **42**(4): 1591-1599.
- [20] 党莹, 张小玲, 饶晓琴, 等. 北京与成都大气污染特征及空气质量改善效果评估[J]. 环境科学, 2021, **42**(8): 3622-3632.
- Dang Y, Zhang X L, Rao X Q, *et al.* Evaluation of air pollution characteristics and air quality improvement effect in Beijing and Chengdu[J]. Environmental Science, 2021, **42**(8): 3622-3632.
- [21] 杨文涛, 黄慧坤, 魏东升, 等. 大气污染联合治理分区视角下的中国 PM_{2.5} 关联关系时空变异特征分析[J]. 环境科学, 2020, **41**(5): 2066-2074.
- Yang W T, Huang H K, Wei D S, *et al.* Spatio-temporal variation of PM_{2.5} related relationships in China from the perspective of air pollution regional linkage control and prevention[J]. Environmental Science, 2020, **41**(5): 2066-2074.
- [22] 马国霞, 於方, 张衍桑, 等. 《大气污染防治行动计划》实施效果评估及其对中国人均预期寿命的影响[J]. 环境科学研究, 2019, **32**(12): 1966-1972.
- Ma G X, Yu F, Zhang Y S, *et al.* Effect of implementation of the action plan on prevention and control of air pollution and its impact on life expectancy in China[J]. Research of Environmental Sciences, 2019, **32**(12): 1966-1972.
- [23] 杨斯悦, 王凤, 刘娜. 《大气污染防治行动计划》实施效果评估: 双重差分法[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, **30**(5): 110-117.
- Yang S Y, Wang F, Liu N. Assessment of the air pollution prevention and control action plan in China: a difference-in-difference analysis[J]. China Population, Resources and Environment, 2020, **30**(5): 110-117.
- [24] 陈林, 肖倩冰, 蓝淑菁. 基于产业结构门槛效应模型的环境政策治污效益评估——以《大气污染防治行动计划》为例[J]. 资源科学, 2021, **43**(2): 341-356.
- Chen L, Xiao Q B, Lan S J. Pollution control effects of environmental policies based on threshold effect model of industrial structure: taking the air pollution prevention and control action plan as an example[J]. Resources Science, 2021, **43**(2): 341-356.
- [25] Popp D, Newell R G, Jaffe A B. Energy, the environment, and technological change[J]. Handbook of the Economics of Innovation, 2010, **2**: 873-937.
- [26] 李虹, 邹庆. 环境规制、资源禀赋与城市产业转型研究——基于资源型城市与非资源型城市的对比分析[J]. 经济研究, 2018, **53**(11): 182-198.
- Li H, Zou Q. Environmental regulations, resource endowments and urban industry transformation: comparative analysis of resource-based and non-resource-based cities[J]. Economic Research Journal, 2018, **53**(11): 182-198.
- [27] 胡彦勇, 张瑞, 郗晓彤, 等. 全生命周期下中国煤炭资源能源碳排放效率评价[J]. 中国环境科学, 2022, **42**(6): 2942-2954.
- Hu Y Y, Zhang R, Qie X T, *et al.* Evaluation of China's coal resource energy carbon emission efficiency in the whole life cycle[J]. China Environmental Science, 2022, **42**(6): 2942-2954.
- [28] 李辉, 孙雪丽, 庞博, 等. 基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力[J]. 环境科学, 2021, **42**(12): 5563-5573.
- Li H, Sun X L, Pang B, *et al.* Emission reduction potential of air pollutants of thermal power industry based on carbon emission reduction target and emission standard constraint scenarios[J]. Environmental Science, 2021, **42**(12): 5563-5573.
- [29] 崔阳阳, 周震, 闫静, 等. 北京市电子工业 VOCs 排放特征及行业排放强度对比[J]. 环境科学研究, 2021, **34**(6): 1287-1294.
- Cui Y Y, Zhou Z, Yan J, *et al.* VOCs emission characteristics of electronics industry in Beijing and emission intensity comparison with industries[J]. Research of Environmental Sciences, 2021, **34**(6): 1287-1294.
- [30] 陈敏, 李振亮, 段林丰, 等. 成渝地区工业大气污染物排放的时空演化格局及关键驱动因素[J]. 环境科学研究, 2022, **35**(4): 1072-1081.
- Chen M, Li Z L, Duan L F, *et al.* Spatiotemporal patterns and key driving forces of industrial air pollutant discharge in Chengdu-Chongqing region[J]. Research of Environmental Sciences, 2022, **35**(4): 1072-1081.
- [31] 许士道, 郑洁. 创新能力与人力资本是否促进了资源型城市的发展?——基于规模扩张和效率提升视角的实证检验[J]. 南京财经大学学报, 2022, (1): 22-31.
- Xu S D, Zheng J. Do innovation capacity and human capital promote development of resource-based cities? Based on the perspective of scale expansion and efficiency promotion[J]. Journal of Nanjing University of Finance and Economics, 2022, (1): 22-31.
- [32] 张艳, 郑贺允, 葛力铭. 资源型城市可持续发展政策对碳排放的影响[J]. 财经研究, 2022, **48**(1): 49-63.
- Zhang Y, Zheng H Y, Ge L M. The impact of sustainable development policy of resource-based cities on carbon emissions[J]. Journal of Finance and Economics, 2022, **48**(1): 49-63.
- [33] 吴健生, 牛妍, 彭建, 等. 基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据的 1995-2009 年中国地级市能源消费动态[J]. 地理研究, 2014, **33**(4): 625-634.
- Wu J S, Niu Y, Peng J, *et al.* Research on energy consumption dynamic among prefecture-level cities in China based on DMSP/OLS nighttime light[J]. Geographical Research, 2014, **33**(4): 625-634.
- [34] 史丹, 李少林. 排污权交易制度与能源利用效率——对地级及以上城市的测度与实证[J]. 中国工业经济, 2020, (9): 5-23.
- Shi D, Li S L. Emissions trading system and energy use efficiency——measurements and empirical evidence for cities at and above the prefecture level[J]. China Industrial Economics, 2020, (9): 5-23.
- [35] 封志明, 唐焰, 杨艳昭, 等. 中国地形起伏度及其与人口分布的相关性[J]. 地理学报, 2007, **62**(10): 1073-1082.
- Feng Z M, Tang Y, Yang Y Z, *et al.* The relief degree of land surface in China and its correlation with population distribution[J]. Acta Geographica Sinica, 2007, **62**(10): 1073-1082.
- [36] 吴茵茵, 齐杰, 鲜琴, 等. 中国碳市场的碳减排效应研究——基于市场机制与行政干预的协同作用视角[J]. 中国工业经济, 2021, (8): 114-132.

- Wu Y Y, Qi J, Xian Q, *et al.* The carbon emission reduction effect of China's carbon market—from the perspective of the coordination between market mechanism and administrative intervention[J]. *China Industrial Economics*, 2021, (8): 114-132.
- [37] Chen T, Kung J K S, Ma C C. Long live *keju*! The persistent effects of China's civil examination system[J]. *The Economic Journal*, 2020, **130**(631): 2030-2064.
- [38] 林伯强, 谭睿鹏. 中国经济集聚与绿色经济效率[J]. *经济研究*, 2019, **54**(2): 119-132.
- Lin B Q, Tan R P. Economic agglomeration and green economy efficiency in China[J]. *Economic Research Journal*, 2019, **54**(2): 119-132.
- [39] 刘海猛, 方创琳, 黄解军, 等. 京津冀城市群大气污染的时空特征与影响因素解析[J]. *地理学报*, 2018, **73**(1): 177-191.
- Liu H M, Fang C L, Huang J J, *et al.* The spatial-temporal characteristics and influencing factors of air pollution in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, **73**(1): 177-191.
- [40] 刘传明, 马青山. 网络基础设施建设对全要素生产率增长的影响研究——基于“宽带中国”试点政策的准自然实验[J]. *中国人口科学*, 2020, (3): 75-88.
- Liu C M, Ma Q S. Research on the influence of network infrastructure construction on total factor productivity growth: a quasi-natural experiment of “broadband China” pilot policy[J]. *Chinese Journal of Population Science*, 2020, (3): 75-88.
- [41] 范子英, 彭飞. “营改增”的减税效应和分工效应: 基于产业互联的视角[J]. *经济研究*, 2017, **52**(2): 82-95.
- Fan Z Y, Peng F. The effects of “business tax replaced with VAT reform” on firms' tax cuts and industrial division: based on the perspective of industrial interconnection [J]. *Economic Research Journal*, 2017, **52**(2): 82-95.
- [42] 余硕, 王巧, 张阿城. 技术创新、产业结构与城市绿色全要素生产率——基于国家低碳城市试点的影响渠道检验[J]. *经济与管理研究*, 2020, **41**(8): 44-61.
- She S, Wang Q, Zhang A C. Technological innovation, industrial structure and urban GTFP—channel test based on national low-carbon city pilots[J]. *Research on Economics and Management*, 2020, **41**(8): 44-61.
- [43] 陈雪梅, 周斌. 产业结构升级对分部门碳排放的时变影响[J]. *技术经济与管理研究*, 2022, (6): 123-128.
- Chen X M, Zhou B. Time-varying effects of industrial structure upgrading on carbon emissions by sector[J]. *Journal of Technical Economics & Management*, 2022, (6): 123-128.
- [44] 国家发展改革委. 国家发展改革委关于印发全国老工业基地调整改造规划(2013-2022年)的通知[EB/OL]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201304/t20130402_964574.html, 2013-04-02.
- [45] 国务院. 国务院关于印发全国资源型城市可持续发展规划(2013-2020年)的通知[EB/OL]. http://www.gov.cn/zwgc/2013-12/03/content_2540070.htm, 2013-12-03.

CONTENTS

Impact of Climate Change on Summer Ozone in China	HU An-qi, XIE Xiao-dong, GONG Kang-jia, <i>et al.</i> (1801)
Spatial-temporal Variation and Driving Factors of Ozone in China from 2019 to 2021 Based on EOF Technique and KZ Filter	WANG Hao-qí, ZHANG Yu-fen, LUO Zhong-wei, <i>et al.</i> (1811)
Photochemical Mechanism and Control Strategy Optimization for Summertime Ozone Pollution in an Industrial City in the North China Plain	ZHENG Zhen-sen, DOU Jian-píng, ZHANG Guo-tao, <i>et al.</i> (1821)
Spatiotemporal Evolution Characteristics of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Chinese Cities from 2015 to 2020	NIU Xiao-xiao, ZHONG Yan-mei, YANG Lu, <i>et al.</i> (1830)
Spatiotemporal Distribution Characteristics of Co-pollution of PM _{2.5} and Ozone over BTH with Surrounding Area from 2015 to 2021	SONG Xiao-han, YAN Li, LIU Wei, <i>et al.</i> (1841)
Spatio-temporal Variation in PM _{2.5} Concentration and Its Relationship with Vegetation Landscape Patterns in Typical Economic Zones in China from 2000 to 2020	XU Yong, LI Xin-yi, HUANG Wen-ting, <i>et al.</i> (1852)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Ion Deposition During Winter and Spring in the Core Area of Beijing	ZHAO Yu, LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i> (1865)
Input Characteristics of Dry Deposition of Atmospheric Particulates and Metals in Farmland in the Suburb of Nanjing	LIU Cui-ying, JIN Hao, FAN Jian-ling (1873)
Pollution Characterizations and Oxidative Potentials of Water-Soluble Organic Matters at Different Polarity Levels in Winter PM _{2.5} Over Xi'an	LUO Yu, HUANG Sha-sha, ZHANG Tian, <i>et al.</i> (1882)
Emission Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM ₁₀ and PM _{2.5} from Vehicle Exhaust and Civil Combustion Fuels	WANG Hong-lei, LIU Si-han, SUN Jie-juan, <i>et al.</i> (1890)
Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in the Core Area of Ili River Valley in Spring	GU Chao, XU Tao, MA Chao, <i>et al.</i> (1899)
Evaluation of Changes in PM _{2.5} Exposure Concentration and Health Risk for Urban Resident in Zhengzhou Based on High Spatial Resolution Grids	LI Yuan, XU Yi-fei, YUAN Ming-hao, <i>et al.</i> (1911)
Emission Inventory of Building Material Industry in Henan Province Based on Multi-source Data Integration	LIU Xiao, HU Jing-nan, WANG Hong-mei, <i>et al.</i> (1924)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Winter in Kaifeng City	SHI Yu-qi, ZHENG Kai-yun, DING Wei-ting, <i>et al.</i> (1933)
Changes in O ₃ -VOCs-NO _x Sensitivity and VOCs Sources at an Urban Site of Nanjing Between 2020 and 2021	LU Xiao-bo, WANG Ming, DING Feng, <i>et al.</i> (1943)
Variation Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Urban Beijing in Summer	ZHANG Rui, SUN Xue-song, WANG Yu, <i>et al.</i> (1954)
Chemical Characteristics and Source Apportionment for VOCs During the Ozone Pollution Episodes and Non-ozone Pollution Periods in Qingdao	JIA Zhi-hai, GU Yao, KONG Cui-li, <i>et al.</i> (1962)
Characteristics of O ₃ Production in the Western Suburb of Hefei in Summer Based on the Observation of Total Peroxy Radical	YU Hui, WEI Na-na, XU Xue-zhe, <i>et al.</i> (1974)
Evaluation of Energy Saving and Carbon Reduction Effect of Air Pollution Prevention and Control Action Plan and Innovation Intermediary Effect	LI Shao-lin, WANG Qi-qi (1985)
Scenario Simulation and Effects Assessment of Co-control on Pollution and Carbon Emission Reduction in Beijing	YU Shan, ZHANG Shuang, ZHANG Zeng-jie, <i>et al.</i> (1998)
Simulation of Anthropogenic CO ₂ Emissions in the Yangtze River Delta Based on Different Emission Inventories	MA Xin-yi, HUANG Wen-jing, HU Ning, <i>et al.</i> (2009)
Water Quality Change Trend and Risk Analysis of Wuhan Hanjiang River Water Source	ZHUO Hai-hua, LOU Bao-feng, XU Jie, <i>et al.</i> (2022)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Resistance Genes in Different Water Sources in the Wuhan Section of the Yangtze River	LI Bo-lin, ZHANG He, WANG Jun, <i>et al.</i> (2032)
Occurrence Characteristics, Sources, and Toxicity Risk Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Typical Rivers of Northern Shaanxi Mining Area, China	WU Xi-jun, DONG Ying, ZHAO Jian, <i>et al.</i> (2040)
Spatio-temporal Characteristics of Organic Aggregates and the Driving Factors in Typical Lakes	XIE Gui-juan, GONG Yi, ZHU Fu-cheng, <i>et al.</i> (2052)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Water of Different Functional Parks in Guilin	LI Pei-zhao, WU Li, HUANG Fei-fei, <i>et al.</i> (2062)
Environmental Driving Factors and Assessment on the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae of Six Inflow Rivers in Yangtze River Basin	ZHANG Jing, HU Yu-xin, HU Sheng, <i>et al.</i> (2072)
Influence and Driving of Environmental Heterogeneity on the Epilithic Diatom Community in Xiangxi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	JI Lu-lu, ZHAO Lu, OUYANG Tian, <i>et al.</i> (2083)
Characteristics of Phytoplankton Communities and Key Impact Factors in Three Types of Lakes in Wuhan	ZHANG Hao-kun, MIN Fen-li, CUI Hui-rong, <i>et al.</i> (2093)
Effects of Heavy Metal Pollution on the Structure of Microbial Communities in Different Habitats	HE Yi-fan, XIAO Xin-zong, WANG Jia-wen (2103)
Structure and Distribution Characteristics of Bacterial Community in Boqing River Water	WANG Sen, CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (2113)
Effects of Microplastic Exposure on the Community Structure and Function of Symbiotic Bacteria in <i>Sinularia microclavata</i>	LIU Min, CHE Wen-xue, ZENG Ying-xu, <i>et al.</i> (2122)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Emerging Contaminants from Raw Water to Drinking Water in Shanghai	YAN Qi (2136)
Adsorption Characteristics of Fluoride in Low-Concentration Water by Aluminum and Zirconium-Modified Biochar	LIU Yan-fang, GAO Wei, LIU Rui, <i>et al.</i> (2147)
Sorption Characteristics and Site Energy Distribution Theory of Typical Estrogens on Microplastics	LIU Jiang-yan, ZHENG Mi-mi, HU Jia-wu, <i>et al.</i> (2158)
Selection and Evaluation of Model Pollutants for Performance Assessment of Advanced Treatment of Industrial Park Wastewater by Ozonation	XIN Bo, SHAN Chao, LÜ Lu (2168)
Identifying Driving Factors and Their Interacting Effects on Sources of Heavy Metal in Farmland Soils with Geodetector and Multi-source Data	ZHANG Hong-ze, CUI Wen-gang, LIU Sui-hua, <i>et al.</i> (2177)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of Coal Mine Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model	MA Jie, SHEN Zhi-jie, ZHANG Ping-ping, <i>et al.</i> (2192)
Contamination and Probabilistic Health Risk Assessment of Heavy Metals in Agricultural Soils Around a Lead-Zinc Smelter	HUANG Jian-bo, JIANG Deng-deng, WEN Bing, <i>et al.</i> (2204)
Prediction of PAHs Content in Soil Around Gas Stations in Beijing Based on BP Neural Network	MA Sai-yan, WEI Hai-ying, MA Jin, <i>et al.</i> (2215)
Spatial-temporal Distribution and Risk Assessment of Quinolones Antibiotics in Soil of Shijiazhuang City	ZHAO Xin-yu, CHEN Hui, ZHAO Bo, <i>et al.</i> (2223)
Accumulation and Pollution Risks of Heavy Metals in Soils and Agricultural Products from a Typical Black Shale Region with High Geological Background	DENG Shuai, DUAN Jia-hui, NING Mo-huan, <i>et al.</i> (2234)
Geochemical Characteristics of Cd in Different Parent Soils in Karst Area and Prediction of Cd Content in Maize	DAI Liang-liang, XU Hong-gen, GONG Hao, <i>et al.</i> (2243)
Pollution Risk and Contribution Analysis of Pb, Cd, and As in Soils and Crops Under Different Land Use Types in Longyan City	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi (2252)
Influencing Factors of Cadmium Content in Wheat Grain: A Meta-analysis and Decision Tree Analysis	LIU Na, ZHANG Shao-bin, GUO Xin-yu, <i>et al.</i> (2265)
Response Characteristics of Soil Organic Carbon Pool and Its Chemical Composition During Secondary Forest Succession in the Loess Plateau	LIU Han-yu, LIU Ying-yi, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (2275)
Effects of Short-Term Nitrogen and Phosphorus Addition on Soil Respiration Components in a Subalpine Grassland of Qilian Mountains	JIANG Yuan, GAN Xiao-ling, CAO Feng-feng, <i>et al.</i> (2283)
Response of Soil Microbial Diversity to Long-term Enclosure in Degraded Patches of Alpine Meadow in the Source Zone of the Yellow River	YANG Peng-nian, LI Xi-lai, LI Cheng-yi, <i>et al.</i> (2293)
Diversity and Predictive Functional of <i>Caragana jubata</i> Bacterial Community in Rhizosphere and Non-rhizosphere Soil at Different Altitudes	LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i> (2304)
Effects of Simulated Acid Rain and Nitrogen Deposition on Soil Bacterial Community Structure and Diversity in the Masson Pine Forest	WANG Nan, QIAN Shao-yu, PAN Xiao-cheng, <i>et al.</i> (2315)
Effects of Phosphogypsum and <i>Suaeda salsa</i> on the Soil Moisture, Salt, and Bacterial Community Structure of Salinized Soil	LIU Yue, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i> (2325)
Effects of Combined Application of Fungal Residue and Chemical Fertilizer on Soil Microbial Community Composition and Diversity in Paddy Soil	GENG He-tian, WANG Xu-dong, SHI Si-bo, <i>et al.</i> (2338)
Effects of Aeration on Surface Water Nutrient Dynamics and Greenhouse Gas Emission in Different Straw Returning Paddy Fields	HU Jin-hui, XUE Li-hong, QIAN Cong, <i>et al.</i> (2348)
Effects of Exogenous Melatonin Treatment on the Growth and Antioxidant System of Rice Seedlings Under Antimony Stress	CHU Yu-tan, LI Yan, HUANG Yi-zong, <i>et al.</i> (2356)
Life Cycle Prediction Assessment of Energy Saving and New Energy Vehicles for 2035	FU Pei, LAN Li-bo, CHEN Ying, <i>et al.</i> (2365)
Distribution, Sources, and Behavioral Characteristics of Microplastics in Farmland Soil	BO Lu-ji, LI Bing, ZHANG Kai, <i>et al.</i> (2375)
Research Progress on the Remediation Technology of Herbicide Contamination in Agricultural Soils	HU Fang-yu, AN Jing, WANG Bao-yu, <i>et al.</i> (2384)
Research Progress and Prospect of Herbicide Residue Characteristics in Black Soil Region of China	LI Rui, WU Qiu-mei, ZHAO Gui-mei, <i>et al.</i> (2395)