

“大气十条”与绿色全要素生产率

——基于三大重点区域不同强度环境约束的实证研究

王 赛

重庆大学, 重庆

收稿日期: 2022年12月5日; 录用日期: 2023年1月10日; 发布日期: 2023年1月17日

摘 要

《大气污染防治行动计划》(简称“大气十条”)明确约束了京津冀、长三角和珠三角三个重点区域细颗粒物浓度分别下降25%、20%和15%, 该阶梯型的减排目标是否可以带来污染的阶梯型下降, 同时带来绿色全要素生产率的阶梯型提升? 为科学检验“大气十条”治理成效以及其对三个重点目标区域绿色全要素生产率的影响, 本文运用双重差分法(DID)对三个重点目标区域进行实证检验。研究表明, “大气十条”确实为三个区域带来了阶梯型的污染减排, 但绿色全要素生产率并未呈现阶梯型的上升, 具体表现为: 京津冀地区污染减排量最大, 而绿色全要素生产率却相对长三角、珠三角地区有所下降。进一步的中介效应检验证明了京津冀地区严苛的环境规制抑制了地区经济效率, 从而对绿色全要素生产率产生损害。基于以上研究结果, 本文提出了进一步推进污染治理、提升绿色全要素生产率的政策建议。

关键词

大气污染防治行动计划, 绿色全要素生产率, 双重差分

The “Ten Rules for the Atmosphere” and Green Total Factor Productivity

—Empirical Study on Environmental Constraints of Different Intensity in Three Key Regions

Sai Wang

Chongqing University, Chongqing

Received: Dec. 5th, 2022; accepted: Jan. 10th, 2023; published: Jan. 17th, 2023

Abstract

The Action Plan for the Prevention and Control of Air Pollution (referred to as the “Ten Rules for the

文章引用: 王赛. “大气十条”与绿色全要素生产率[J]. 可持续发展, 2023, 13(1): 130-143.

DOI: 10.12677/sd.2023.131016

Atmosphere”) clearly restricts the concentration of fine particles in the three key regions of Beijing Tianjin Hebei, the Yangtze River Delta and the Pearl River Delta to decrease by 25%, 20% and 15% respectively. Can the stepped emission reduction target bring about a step down in pollution and a step up in green total factor productivity? In order to scientifically test the effectiveness of the “Ten Rules for the Atmosphere” governance and its impact on the green total factor productivity of the three key target regions, this paper uses the difference-in-differences method (DID) to conduct an empirical test on the three key target regions. The research shows that the “Ten Rules for the Atmosphere” has indeed brought a ladder shaped pollution reduction to the three regions, but the green total factor productivity has not shown a ladder shaped rise, specifically: Beijing Tianjin Hebei region has the largest pollution reduction, while the green total factor productivity has declined relatively to the Yangtze River Delta and the Pearl River Delta. Further intermediary effect test proves that strict environmental regulation in Beijing Tianjin Hebei region inhibits regional economic efficiency, thus harming green total factor productivity. Based on the above research results, this paper proposes policy recommendations to further promote pollution control and improve green total factor productivity.

Keywords

Air Pollution Prevention Action Plan, Green Total Factor Productivity, Double Difference

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

绿水青山就是金山银山，节约资源和保护环境是我国的基本国策。《中国应对气候变化的政策与行动》白皮书指出气候变化是全人类的共同挑战，气候变化事关中华民族永续发展，关乎人类前途命运。改革开放 40 多年以来，中国实现了经济的腾飞，创造了历史的奇迹，取得了举世瞩目的成绩。然而，这 40 余年的发展奇迹是以高资源投入为基础的，是属于粗放式的发展，是以牺牲绿水青山为代价换来的。过去十余年，伴随着我国工业化、城镇化的推进，中国的大气污染问题愈发严重，以 PM2.5 为代表的污染物逐渐成为制约我国可持续发展的难题。中国作为世界上最大的发展中国家，在经济发展新常态下，我国高度重视应对气候变化，实施了一系列应对气候变化战略、措施和行动，取得了积极成效，《大气污染防治行动计划》即为其中之一。大气环境保护事关人民群众根本利益，事关经济持续健康发展，我国为了彻底解决大气污染这个阻碍可持续发展的难题，2013 年 9 月，国务院印发了《大气污染防治行动计划》，也称为“大气十条”。“大气十条”对京津冀、长三角、珠三角三大重点地区，提出了严苛的污染防治目标：到 2017 年，京津冀、长三角、珠三角区域的细颗粒物浓度分别下降 25%、20%、15% 左右。“大气十条”旨在补全我国目前各方面环境问题的短板，也被称为史上最严环境制度。

经济新常态强调发展的增长动力由要素驱动向创新驱动转换，落脚点是绿色全要素生产率(Green total factor productivity, 简称为 GTFP)。绿色全要素生产率是全要素生产率(Total factor productivity, 简称为 TFP)的扩展延伸，其除兼顾传统 TFP 中的投入约束之外，同时涵盖资源与环境约束，是综合考虑经济与环境效益的经济增长指标，可以同时反映经济发展的高效性和可持续性。“波特假说”认为，环境规制可以通过促进企业技术创新来抵消由环境保护带来的成本并且提升企业在市场上的盈利能力，从而获得竞争优势，也就是意味着环境规制可以提高生产效率。“大气十条”作为一项环境规制工具，降低三

大重点地区污染状况的同时,对兼顾经济与环境因素的绿色全要素生产率会产生怎样的影响呢?是否可以实现生产效率和环境质量双赢的局面?目前学术界的研究大都着眼于抽象量化的环境规制水平与绿色全要素生产率之间的关系,而针对“大气十条”这一具体政策与绿色全要素生产率之间影响关系的研究几乎空白。有关“大气十条”政策的主要研究点在于污染排放量是否显著减少,政策是否行之有效,而缺乏进一步对环境经济协调发展的研究。本文从“大气十条”中对京津冀、长三角和珠三角阶梯型的步步加强的环境规制政策内容出发,理清政策与绿色全要素生产率的影响机制,运用双重差分实验(DID)考察政策对京津冀、长三角和珠三角三个重点目标区域的污染减排影响效果及绿色全要素生产率的变化,提出进一步合理推进污染治理、提升绿色全要素生产率的政策建议。

2. 文献综述

针对《大气污染防治行动计划》政策,一方面,学者们对其污染治理成果进行了研究,杨斯悦、王凤等[1](2020)使用双重差分法评估其实施效果,研究表明该政策对大多污染排放量的下降产生了显著影响,总体上可以认为该政策已经达标完成,但是个别污染物、地区空气质量的绝对值仍未达到国家标准。卢亚灵等[2](2020)以北京市为例,采用疾病成本法、人力资本法和市场价值法核算空气质量改善带来的效果,肯定了“大气十条”实施的有效性和必要性。陈林、肖倩冰[3](2021)等使用双重差分法研究“大气十条”政策是否有利于降低京津冀晋鲁蒙、长三角、珠三角三个目标区域内城市的雾霾污染水平,使用门槛回归检验产业结构合理化与高级化对雾霾治理是否存在门槛效应,研究表明政策只对京津冀晋鲁蒙地区产生了显著雾霾治理效应,京津冀晋鲁蒙与周边区域样本、长三角与周边区域样本下产业结构合理化与高度化存在门槛效应。另一方面,也有学者研究“大气十条”与企业全要素生产率,张昭文[4](2020)使用上市公司数据,运用双重差分检验“大气十条”对企业生产率的影响,结果表明“大气十条”政策对企业全要素生产率有显著的负向影响,“大气十条”政策从创新渠道促进了全要素生产率的提高,但从资源配置渠道阻碍了企业发展。

对于绿色全要素生产率(GTFP),习近平在十九大报告中指出,坚持人与自然和谐共生,必须树立和践行绿水青山就是金山银山的理念,坚持节约资源和保护环境的基本国策。绿色全要素生产率是在传统的全要素生产率基础上将能源消耗和环境污染纳入核算,以求对经济绩效和社会福利变化做出更准确评价的一种综合全要素生产率(李斌等[5],2016)。它同时兼顾期望产出和非期望产出,综合考虑了经济和环境效益,谋求绿色协调发展,相比全要素生产率能更好反映经济发展的可持续性。GTFP的测算方法主要使用基于DEA的Malmquist指数,Tone[6](2001)首先提出了基于松弛测度的包含“非期望产出”的非径向、非角度SBM(slacks-based measure)模型。Chung[7]等(1997)提出基于方向性距离函数的Malmquist-Luenberger(ML)生产率指数,可以测度包含非期望产出的全要素生产率,除以上之外还有很多学者对其测算方式进行了深入研究。不少学者对我国省际或城市的GTFP进行了测度并分析,余奕杉、卫平[8](2021)使用超效率SBM的GML指数测算中国283个城市的GTFP,研究发现城市绿色全要素生产率增长动力主要来源于技术进步;平均增幅上东部>中部>西部;超大及特大城市、行政等级较高的城市绿色全要素生产率增长具有领先优势。卢丽文等[9](2017)使用SBM-ML指数测度了资源环境约束下的长江经济带108个城市2003~2013年的绿色全要素生产率。结果表明长江经济带城市处于良性发展阶段,增长主要来源于技术进步与规模效率的提升。此外,学术界关于环境规制与绿色全要素生产率的关系争论不止,近年来我国的环境问题逐渐严峻,环境规制与可持续发展成为了学术界的热议话题。部分学者们认为环境规制可以有效提升绿色全要素生产率,王兵、刘光天[10](2015)研究节能减排是否能实现经济和环境双赢,研究发现:节能减排对中国绿色全要素生产率贡献度高达90.23%,减排绩效优于节能绩效,节能减排主要通过推动技术进步促进绿色全要素生产率增长。徐佳、崔静波[11](2020)研究低碳

城市和企业绿色技术创新, 研究发现: 低碳城市试点政策能够在一定程度上诱发企业整体层面的绿色技术创新, 试点政策对高碳行业、非国有企业更显著, 命令控制型政策工具是试点政策发挥作用的主要路径。Porter [12] (1995) 认为环境规制倒逼企业采用先进的技术和管理, 提高资源利用率, 进而提升全要素生产率。Hamamoto [13] (2006) 以污染治理成本和 R & D 支出分别表示环境规制强度和技术创新, 以美日制造业数据检验环境规制与技术创新关系, 结果表明环境规制压力存在刺激企业技术创新效应。另一方面, 有学者认为环境规制提升绿色全要素生产率是有条件的, 董直庆、王辉 [14] (2019) 研究环境规制对本地与邻地的影响, 研究发现: 环境规制并非一定能激励本地绿色技术进步, 表现为先抑后扬的门槛特征, 而环境规制对邻地绿色进步表现出倒 U 型作用效应, 峰值在城市经济圈 300 千米地域内。王杰、刘斌 [15] (2014) 研究环境规制对工业企业全要素生产率的影响, 研究发现: 环境规制与企业全要素生产率之间符合“倒 N 型”关系, 即环境规制强度较弱时, 企业环境成本较低, 技术创新的动机不够, 全要素生产率降低, 当环境规制提高到能够促进企业技术创新时, 只要环境规制处于合理的范围内, 就会促进企业全要素生产率的提高, 但环境规制强度超过了企业所能承受的范围, 全要素生产率就会下降。还有学者认为环境规制与绿色全要素生产率并无相关性, 何枫、祝丽云等 [16] (2015) 研究环境规制对中国钢铁企业绿色技术效率的影响, 发现当前的环境规制强度与整体绿色技术效率之间并无显著相关性。

综上所述, 对于研究《大气污染防治行动计划》政策本身的文献来说, 目前学术界研究的着眼点大都在: 一是, 是否显著减少了污染, 改善了环境; 二是, 是否达到预期制定的目标, 三是, 政策的合理性、必要性。而未尝有文献将该环境政策与绿色全要素生产率相联系, 所以“大气十条”政策对绿色全要素生产率的影响有待深入研究。除此之外, 大多数文献均在整体上考察“大气十条”的影响, 针对“大气十条”中三个重点目标区域的阶梯型环境规制的政策内容, 鲜有文献对该内容进行细化比对研究, 所以目前“大气十条”相关研究都比较片面。对于环境规制与绿色全要素生产率, 学术界的相关研究比较全面但仍有不足之处, 表现在: 一是, 绝大多数文献都没有考察一个具体的政策, 而是使用一个指标来衡量环境规制强度, 并且环境规制指标的选取也各不相同; 二是, 就绿色全要素生产率的测算方面来说, 目前大多文献采用 DEA 模型进行测算, 测算方法上有改进空间。本文从“大气十条”对京津冀、长三角和珠三角的阶梯型环境规制的政策内容出发, 理清政策与绿色全要素生产率的影响机制, 运用双重差分法(DID)考察政策对京津冀、长三角和珠三角三个重点目标区域的污染减排影响及绿色全要素生产率变化, 创新点有如下: 一是, 本文考察了“大气十条”具体政策与绿色全要素生产率的关系, 相比于其他文献使用抽象化的环境规制强度数据, 本研究具备现实意义, 补充了目前有关“大气十条”政策成效研究的不足; 二是, “大气十条”对三个重点目标区域有不同的减排目标, 说明“大气十条”是一个较为理想的可以用来比较分析不同环境规制强度影响效应的政策, 本文基于其不同的减排目标, 运用双重差分实验考察更严苛的环境规制与污染减排和绿色全要素生产率之间的关系, 得出“大气十条”更加细化的政策效应; 三是, 本文使用熵值法将各类污染处理为一个综合污染指数, 运用超效率 SBM-GML 测算绿色全要素生产率, 使绿色全要素生产率的测算结果更先进、有效、稳健。

3. 影响机理与研究设计

3.1. 影响机理分析

在绿色全要素生产率计算框架下, 相比于全要素生产率, 绿色全要素生产率将非期望产出即污染排放纳入计算模型, 是同时考量经济效率与污染减排的综合指标。综上, 毋庸置疑, 经济效率和污染减排是绿色全要素生产率最主要的影响因素。本文根据“大气十条”政策内容以及相关文献, 以这两大核心影响因素为基础, 总结出了“大气十条”对绿色全要素生产率的影响机制, 包含以下四个部分: ① 产业

结构优化：“大气十条”指出，通过严控“两高”行业新增产能、淘汰落后产能、压缩过剩产能以及加快清洁能源替代利用等手段来推动产业转型升级，而产业结构绿色化是实现经济绩效和环境绩效协同发展的的重要途径，严格的环境规制增强人们的环保意识，派生出绿色需求。绿色需求作为一种高层次的、生态化的消费意愿，推动以清洁产业为主的第三产业发展，从而降低资源和污染密集型产业占比(蔡乌赶[17], 2017)。即“大气十条”通过优化产业结构达到降低污染减排的效果，从而影响绿色全要素生产率。

② 技术创新：“大气十条”指出，要加快企业技术改造以及加快调整能源结构，前者通过支持绿色创新、培育绿色产业来促进创新，后者通过控制煤炭消费、严格节能审查来保障创新。环境规制对技术创新既有正面的“补偿效应”，也有负面的“抵消效应”，“补偿效应”通过生产工艺或治污技术的改进和创新资金支持以体现，“抵消效应”通过研发资金挤出和投资挤出以体现(蒋伏心[18], 2013)。新古典经济学提出遵从成本假说，认为环境规制导致了企业治污成本上升，而波特(1995)提出相反观点，认为科学设计的环境规制可促使企业环境规制成本内在化，通过技术进步带来“创新补偿效应”，进而提升全要素生产率。综上所述，“大气十条”关于技术创新的部分通过两个路径影响绿色全要素生产率：一是创新补偿，企业通过改进技术降低污染和能源投入，对污染减排和经济效率均有促进作用；二是遵从成本，治污能力的创新是有成本的，成本的上升影响着经济效率。

③ 制度改革：“大气十条”指出要继续完善环境经济政策以及加强严格监督管理，前者主要对企业进行补贴激励，后者主要对企业进行约束，“萝卜”与“大棒”两者结合进行改革，不仅促进企业创新补偿效应，同时也降低企业遵从成本效应，从而间接影响着绿色全要素生产率。

④ 区域互动：“大气十条”指出要建立区域协作机制，统筹区域环境治理，重点是协作机制建立、工作制定、环保考核和责任追究。一方面，区域协作可以提升绿色经济效率，另一方面，环保考核使得区域间不仅是合作治污的关系，也是竞争治污的关系。临近地区污染控制的严厉程度对本地污染控制决策具有显著影响(李永友、沈申荣[19], 2008)，地方政府的环境规制行为呈现“逐底竞争”的特征(李胜兰等[20], 2014)，赵霄伟[21] (2014)研究发现环境规制竞争与工业经济增长表现为明显的区域特征。综上所述，“大气十条”的区域互动政策内容从区域协作和环境规制竞争两个角度对绿色全要素生产率产生影响。影响机理如图 1 所示，“大气十条”主要通过产业结构优化、技术创新、制度改革和区域互动四个方面影响污染减排和经济效率，进而影响绿色全要素生产率。

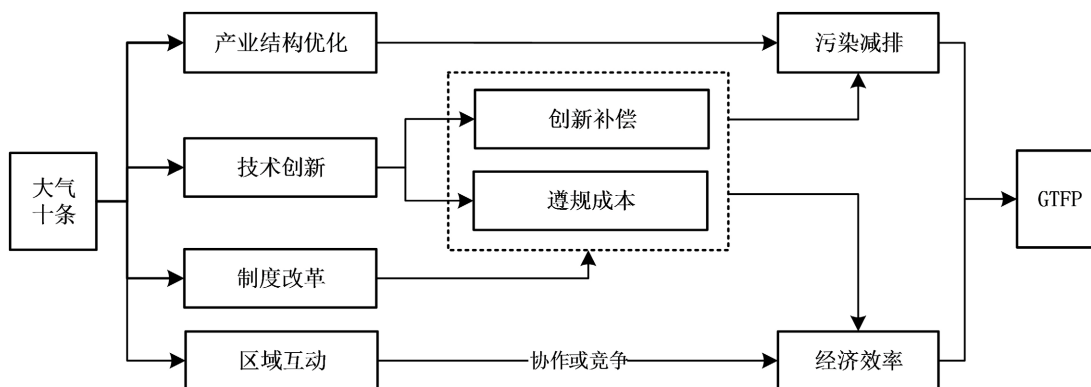


Figure 1. Policy impact mechanism
图 1. 政策影响机理

3.2. 研究设计

基于政策内容《大气污染防治行动计划》对京津冀、长三角、珠三角三个重点区域的污染减排目标要求是分别下降 25%、20%、15%左右，为实证研究“大气十条”阶梯型的环境规制对三个重点目标区

域的污染减排影响效果及绿色全要素生产率的变化,本研究把三个目标地区分为两两一组进行双重差分实验,两两之间环境规制强度均不相同,三组分别为:①对于京津冀(25%减排目标)和珠三角(15%减排目标),以京津冀为实验组,珠三角为控制组;②对于长三角(20%减排目标)和珠三角(15%减排目标),以长三角为实验组,珠三角为控制组;③对于京津冀(25%减排目标)和长三角(20%减排目标),以京津冀为实验组,长三角为控制组。分别对地区污染和绿色全要素生产率进行双重差分实验,旨在考察阶梯型环境规制下的污染物减排、绿色全要素生产率是否具有阶梯性,以及更严苛的环境规制对绿色全要素生产率的影响作用,细化解读“大气十条”对三个地区污染及绿色全要素生产率的影响。

3.3. 数据来源

传统的全要素生产率的测算方法因未能将资源消耗、污染排放等环境约束条件纳入产出指标中而具有局限性,而绿色全要素生产率考虑了非期望产出对经济效率的影响。目前计算绿色全要素生产率的方法主要为 DEA-Malmquist,该方法属于非参数分析,无需设定生产函数,首先通过投入产出测算决策单元的效率水平,再运用 Malmquist 指数得到生产率。相比于传统的 DEA-Malmquist 模型,基于超效率 SBM (Super Slack-Based Measure)函数的全局参比 Malmquist-Luenberger 指数(GML)既可以有效处理径向和角度的问题,同时又可以实现生产前沿的全局可比性。故本文使用超效率 SBM 结合 GML 指数测算全国 242 个地级市 2004~2019 年的绿色全要素生产率。

Table 1. Variable descriptive statistics
表 1. 变量描述性统计

变量	样本量	均值	标准差	最小值	最大值
劳动投入	3872	459.77	334.45	43.35	3149.35
资本存量	3872	52,005,665	66,788,982	2,071,543	770,496,894
能源投入	3872	603,721	925,658	1126	8,057,600
污染综合指数	3872	0.0655	0.0649	0.0011	0.6937
实际 GDP	3872	15,289,365	21,869,097	486,411	250,160,494
GTFP	3872	1.4372	0.4173	0.4270	5.0574
产业结构	3872	49.51	11.88	8.05	90.97
基础设施水平	3872	3.9470	3.4897	0.1183	37.5520
金融支持	3872	2.1588	1.0472	0.5600	8.7316

GTFP 测算中的投入产出选择:①劳动力投入。选择各城市全市人口代表劳动投入;②资本投入。关于资本存量的估算,永续盘存法计算公式为: $K_{it} = (1-d)K_{it-1} + I_{it}$, 其中 i 和 t 表示地区和年份, K 、 I 分别表示资本存量和新增社会固定资产投资, d 表示固定资产折旧率,选用张军(2004)算法,折旧率取 9.6%,以 2003 年的固定资本形成除以 10%作为基期资本存量;③能源投入。选择市辖区工业用电量代表能源投入;④期望产出。选择地区生产总值按消费者价格指数平减后的数据代表期望产出;⑤非期望产出。选择二氧化硫、废水和烟(粉)尘排放三者进行熵值法加工后得到的综合污染指数作为非期望产出。由于 DEA-Malmquist 方法测算出的指数反映的是绿色全要素生产率的变化率,本文通过参考邱斌等[22] (2008)

的方法，将指数累乘而得到绿色全要素生产率水平指数。本文控制变量选择有：① 产业结构(*ind*)：产业结构与绿色全要素生产率息息相关，相较于第一产业和第三产业，第二产业会消耗更多的资源并产生更多的污染，本文选取第二产业增加值占地区国内生产总值的比例来体现；② 基础设施水平(*infr*)：基础设施水平的波动可以改变信息和知识传播速度，影响规模经济的形成，对劳动分工能够产生一定的作用，进而可能对绿色全要素生产率产生影响，本文采用人均道路面积来体现；③ 金融支持(*fin*)：金融发展水平可以影响资源配置效率和绿色技术生产率，本文将金融机构年末存贷款余额占地区国内生产总值的比例作为金融支持的体现。本文主要通过 EPS 数据平台和各省市统计年鉴获取所需数据。本文对原始样本数据中小部分缺失数据运用插值法或线性拟合方法予以补充，对数据缺失严重或异常的样本进行删除处理。最终得到 2004~2019 年 242 个地级市平衡面板数据，数据描述性统计如表 1 所示。

4. 实证研究

4.1. “大气十条”重点区域的双重差分实验

4.1.1. 双重差分研究设计

双重差分法(Differences-in-Differences, DID)又称为倍差法，是用来进行政策影响评估、制度绩效评估和项目评价等的一种方法。通常选择一组未受到政策影响的地区或个体作为控制组，而将受到政策影响的地区或个体作为处理组，控制组在政策实施前后的差异可以视为纯粹的时间效应，将处理组的前后变化减去控制组的前后变化即可得到政策的“净效应”，并且双重差分法的准自然实验可以有效地避免环境政策问题的内生性和遗漏变量等问题。

使用双重差分法进行实证研究的原因一是，鉴于“大气十条”对京津冀、长三角、珠三角三个目标区域制定了不同的减排目标，分别为减排 25%、20%、15%，即为层层递进环境规制强度，适合纳入双重差分实验，研究环境规制影响差异；二是，三个目标区域的经济地位和发展水平均相似，保证了 DID 实验处理组和实验组的同趋势性。在政策处理时点的选择上，本研究考虑了政策一定的时滞性，2015 年作为政策处理时点。所以，本文尝试使用 DID 方法，把三个地区分成两两一组进行双重差分实验，即两两之间环境规制强度均不相同，三组分别为：① 京津冀和珠三角。以京津冀为实验组，珠三角为控制组，前者减排目标为 25%，后者减排目标为 15%；② 长三角和珠三角。以长三角为实验组，珠三角为控制组，前者减排目标为 20%，后者减排目标为 15%；③ 京津冀和长三角。以京津冀为实验组，长三角为控制组，前者减排目标为 25%，后者减排目标为 20%。本文按照以上分组，分别对各地区的污染综合指数和绿色全要素生产率进行双重差分实验，旨在考察当环境规制阶梯型逐步加强时，污染是否因此逐步下降，绿色全要素生产率是否因此逐步上升，细化解读“大气十条”对三个地区污染及绿色全要素生产率的影响，双重差分模型构建如下：

$$Y_{it} = \beta_0 + \beta_1 Treat_i \times Period_t + \beta_2 Z_{it} + \beta_3 Treat_i + \beta_4 Period_t + \varepsilon_{it}$$

其中， i 表示城市， t 表示年份， Y_{it} 表示污染综合指数或绿色全要素生产率被解释变量。 $Treat_i$ 是地区虚拟变量，例如当使用京津冀和珠三角两个区域进行 DID 实验时，由于京津冀有更严格的环境规制，所以处理组是京津冀地区，其值取 1；控制组是珠三角地区，其值取 0，以此类推。 $Period_t$ 是时间虚拟变量，处理时点前取 0，处理时点后取 1。 Z_{it} 为控制变量，使用金融支持 *fin*、产业结构 *ind* 和基础设施水平 *infr*， $\beta_3 Treat_i$ 为区域固定效应， $\beta_4 Period_t$ 为年份固定效应， ε_{it} 为扰动项。表 2 为目标区域在处理时点前后污染综合指数与 GTFP 对比，各地区污染综合指数均有所下降，下降最为明显的是京津冀地区，各地区 GTFP 指数均有所上升，其中上升最为明显的区域是长三角地区，京津冀地区污染下降幅度虽然最明显，但 GTFP 指数上升幅度相对较小。

Table 2. Comparison before and after the variable policy
表 2. 变量政策前后对比

变量	京津冀地区		珠三角地区		长三角地区	
	2004~2015 均值	2016~2019 均值	2004~2015 均值	2016~2019 均值	2004~2015 均值	2016~2019 均值
污染综合指数	0.1441	0.0545	0.0818	0.0477	0.1117	0.0572
GTFP	1.2945	1.3319	1.4492	1.6740	1.5344	1.9116

4.1.2. 双重差分实证结果

Table 3. Double difference experimental results
表 3. 双重差分实验结果

变量	(1) 京津冀与珠三角		(2) 长三角与珠三角		(3) 京津冀与长三角	
	污染综合指数	GTFP	污染综合指数	GTFP	污染综合指数	GTFP
<i>DID</i>	-0.0421** (0.0210)	-0.273*** (0.1028)	-0.0112 (0.0153)	0.190** (0.0863)	-0.0313* (0.0173)	-0.345*** (0.0685)
<i>fin</i>	-0.0133** (0.0055)	0.183*** (0.0268)	0.0443*** (0.0040)	0.122*** (0.0226)	0.0183*** (0.0043)	0.129*** (0.0172)
<i>ind</i>	0.000920* (0.0005)	-0.000872 (0.0027)	0.00171*** (0.0004)	-0.000153 (0.0023)	0.00233*** (0.0005)	0.00106 (0.0018)
<i>infr</i>	0.00188** (0.0009)	-0.00219 (0.0045)	-0.000373 (0.0007)	0.0197*** (0.0037)	0.00707*** (0.0013)	0.0544*** (0.0053)
<i>cons</i>	0.0493 (0.0394)	1.069*** (0.1928)	-0.114*** (0.0286)	0.993*** (0.1610)	-0.0908*** (0.0316)	0.886*** (0.1251)
年份固定效应	YES	YES	YES	YES	YES	YES
区域固定效应	YES	YES	YES	YES	YES	YES
样本数量	352	352	545	545	609	609
R ²	0.2169	0.2486	0.2726	0.2640	0.1988	0.4533

注：*、**、***分别表示在 10%、5%、1%的水平上显著。括号内代表 t 值。

双重差分实验结果如表 3 所示，变量 *DID* 即为模型中的 $Treat_i \times Period_t$ 项，其系数是本文重点考察对象。结果(1)是对京津冀地区和珠三角地区进行的双重差分实验，“大气十条”中对京津冀和珠三角的减排要求分别是 25%和 15%，即京津冀有更严苛的环境规制，将京津冀地区作为处理组，珠三角地区作为控制组进行实验。结果显示污染综合指数的 *DID* 项显著为负，说明京津冀地区的减排力度比珠三角地区明显更大，促成了更大幅度的污染减排，符合政策要求。值得注意的是，对于 GTFP 来说，*DID* 项亦显著为负，而在 GTFP 的 DEA-Malmquist 计算过程中，非期望产出的大幅度减少理应促成 GTFP 的增长，但实际的实验结果显示京津冀地区的污染下降幅度确实更大，但 GTFP 变化趋势却相比珠三角降低，出现了有悖理论的情况。结果(2)是对长三角地区和珠三角地区进行的双重差分实验，“大气十条”中对长

三角和珠三角的减排要求分别是 20% 和 15%，即长三角有更严苛的环境规制，将长三角地区作为处理组，珠三角地区作为控制组进行实验。结果显示污染综合指数的 *DID* 项虽然为负但是并不显著，原因可能是 20% 和 15% 的减排目标相差不大，所以污染减排为负但不够显著。对于 *GTFP* 来说，*DID* 项显著为正，说明长三角地区的 *GTFP* 相对于珠三角地区处于增长状态，即减排和 *GTFP* 同时处于增加状态，符合实际。结果(3)是对京津冀地区和长三角地区进行的双重差分实验，“大气十条”中对京津冀和长三角的减排要求分别是 25% 和 20%，即京津冀有更严苛的环境规制，将京津冀地区作为处理组，长三角地区作为控制组进行实验。根据结果(1)出现的有悖理论的情况，此时我们对结果(3)的预期推断是京津冀地区减排的 *DID* 项为负，同时 *GTFP* 的 *DID* 项为负，即京津冀地区虽然减排更多，但并未促进 *GTFP* 的增长，反而致使 *GTFP* 的下降。而正如预期判断那样，结果(3)中 *DID* 项在 10% 显著水平下为负，同时 *GTFP* 的 *DID* 项显著为负。和结果(1)京津冀与珠三角的双重差分实验类似，京津冀污染减少相对更多，但 *GTFP* 却并未相对上升，反而下降。

本文基于结果(1)和结果(3)对京津冀的双重差分检验结果以及“大气十条”对绿色全要素生产率的影响机制进行推断：在“大气十条”政策实施背景下，京津冀地区高度严苛的环境规制(25%减排要求)虽然促成了污染的大幅降低，但也同时影响了地区的经济效率，从而对绿色全要素生产率造成较大的抑制作用，导致绿色全要素生产率相对其他两目标地区降低，该推断是否合理还需下文进一步研究。

4.1.3. 双重差分平行趋势检验

双重差分实验的前提是，在处理时点前一段时间内，控制组和处理组变化趋势应该是一致的。为确保前文双重差分实验的稳健性，我们选用处理时点五年前及之后的数据，即 2010~2019 年的污染综合指数和 *GTFP* 进行平行趋势检验，以观察三个地区的污染综合指数与 *GTFP* 变化趋势情况，若三个地区数据变化趋势基本一致，即可认为其满足平行趋势假设。如图 2 和图 3 所示，三个目标区域的污染综合指数以及 *GTFP* 基本呈现出相同趋势变化，满足平行趋势假设。

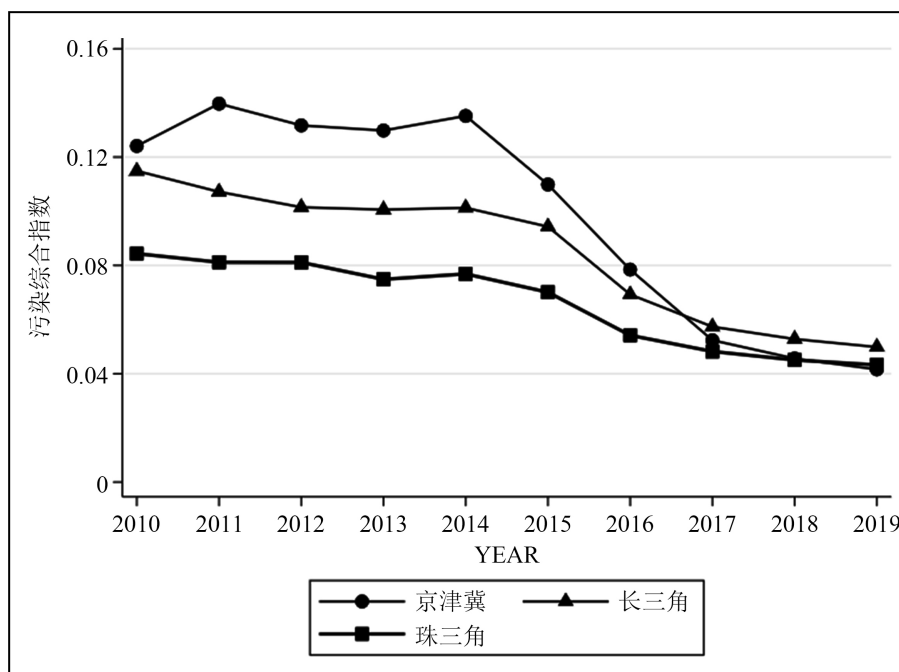


Figure 2. Parallel trend chart of pollution comprehensive index

图 2. 污染综合指数平行趋势图

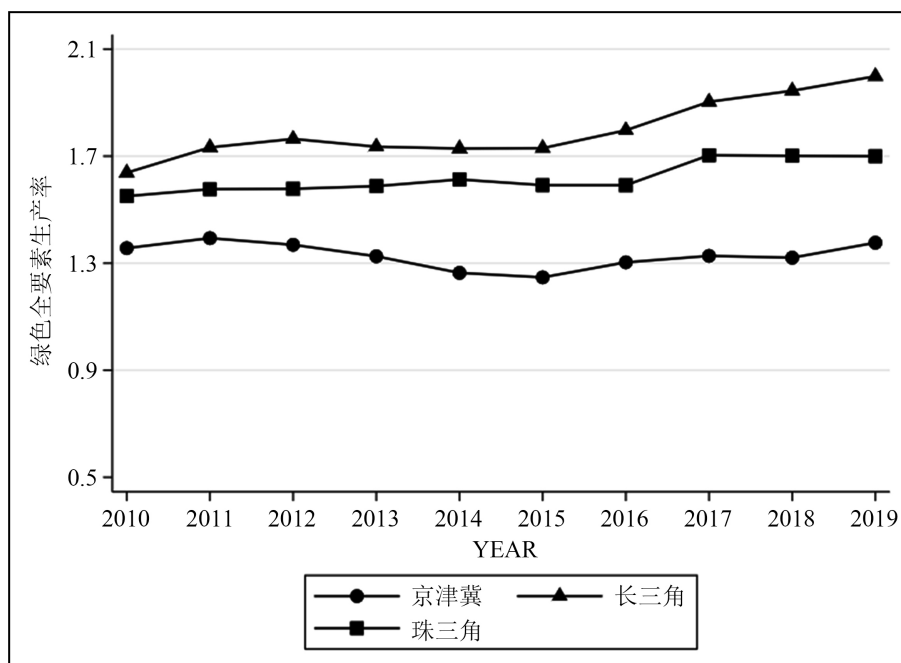


Figure 3. Green total factor productivity parallel trend chart
图 3. 绿色全要素生产率平行趋势图

4.2. 进一步分析，经济效率的中介效应检验

4.2.1. 中介效应研究设计

为了验证上文对京津冀地区的假设，即：在“大气十条”政策实施背景下，京津冀地区高度严苛的环境规制虽然促成了污染的大幅降低，但也同时影响了地区的经济效率，从而对绿色全要素生产率造成较大的抑制作用，导致绿色全要素生产率相对其他两目标地区降低。本文拟使用经济效率作为京津冀环境规制影响绿色全要素生产率的中介变量，检验其中介效应。

中介效应模型如下(图示如图 4):

$$GTFP_{it} = \alpha_1 + cER_{it} + \beta_1 Z_{it} + \mu_{i1} + v_{i1} + \varepsilon_{it1} \tag{1}$$

$$EE_{it} = \alpha_2 + aER_{it} + \beta_2 Z_{it} + \mu_{i2} + v_{i2} + \varepsilon_{it2} \tag{2}$$

$$GTFP_{it} = \alpha_3 + c'ER_{it} + bEE_{it} + \beta_3 Z_{it} + \mu_{i3} + v_{i3} + \varepsilon_{it3} \tag{3}$$

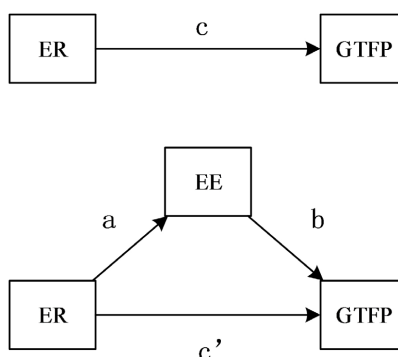


Figure 4. Illustration of the mediation effect
图 4. 中介效应图示

其中, ER 表示环境规制, EE 表示经济效率, $GTFP$ 表示绿色全要素生产率, 下标 i 和 t 分别表示地区和时期, Z 为控制变量, μ 表示个体效应, ν 表示时期效应, ε 为随机扰动项。环境规制 ER 对 $GTFP$ 的总效应为 c , 直接效应为 c' , 通过 EE 对 $GTFP$ 产生的中介效应为 ab , 三者有 $ab+c'=c$ 。为验证经济效率中介效应, 本文使用 Sobel [23] (1982、1988)、温忠麟[24] (2004、2014)总结的 Sobel 检验方法。Sobel 检验 Z 值的计算公式如下:

$$Z = \frac{ab}{\sqrt{a^2 s_b^2 - b^2 s_a^2}}$$

其中 s_a 、 s_b 分别代表 a 、 b 对应的标准误差, 当 Sobel 检验 Z 值大于 1.96 时, 表明中介效应显著。由于 Sobel 检验需要假设 $\hat{a}\hat{b}$ 服从正态分布, Z 值的计算可能不准确, 所以稳健性上使用 Bootstrap 法重复取样, 如果 ab 置信区间不包含 0, 则系数乘积显著(方杰, 张敏强, 2012 [25]; Preacher & Hayes [26], 2008)。

4.2.2. 京津冀环境规制与全局经济效率的测度

在京津冀环境规制测算方面, 本文参考蒋伏心(2013), 叶琴[27] (2018), 傅京燕、李丽莎[28] (2010)的做法, 环境规制计算过程如下:

$$UE_{ij}^s = [UE_{ij} - \min(UE_j)] / [\max(UE_j) - \min(UE_j)]$$

$$W_j = UE_{ij} / \overline{UE_{ij}}$$

$$ER_i = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 W_j UE_{ij}^s$$

其中, UE_{ij} 为 i 城市 j 污染物的单位产值污染物排放量, 本文选取废水、 SO_2 和烟粉尘, $\max(UE_j)$ 和 $\min(UE_j)$ 为各指标在京津冀地区 13 个城市中的最大值和最小值, UE_{ij}^s 为指标的标准化值。随后, 计算各指标的调整系数 W_j , 不同城市的污染物排放比重相差较大, 不同污染物的排放强度也相差较大, 调整系数的作用类似于权重, 通过对各指标值权重进行调整, 给每个城市的各个污染物赋予不同权重, 反应各城市污染物治理的变化, $\overline{UE_{ij}}$ 为京津冀 j 类污染物单位产值排放量的平均水平。最后, 计算京津冀各城市环境规制综合指数 ER_i 。

在京津冀经济效率测度方面, 目前学者们大多使用 DEA 的方法对经济效率进行衡量, 与绿色全要素生产率所使用的 DEA-Malmquist 方法不同, 后者是效率值经过 Malmquist 指数再加工得到的, 前者仅为 DEA 效率值。在面板数据下, 一般 DEA 计算出的效率是当期前沿下的相对效率, 直接使用相对效率进行跨期比较或带入计量回归是存在缺陷的, 参考黄磊等[29] (2019)和卜洪运[30]等(2017), 本文在超效率 SBM 模型基础上结合 Oh [31] (2010)构建全局生产技术集思路, 采用全局超效率 SBM 模型测度京津冀经济效率, 即可识别决策单元有效性, 又可以实现跨期比较和纳入计量模型。投入产出数据选取方面, 本文从前文计算绿色全要素生产率数据集中提取 2010~2019 年京津冀 13 个地级市的资本存量、劳动力投入、地区生产总值, 然后使用全局超效率 SBM 计算出京津冀全局经济效率。

4.2.3. 中介效应检验结果

Sobel 中介效应检验会呈现两部分内容, 一是中介效应模型对应的三个回归, 分别是表内 M1、M2 和 M3; 二是 Sobel 检验的显著性, 分别有中介效应(Indirect effect)、直接效应(Direct effect)、总效应(Total effect)以及中介效应占比。在表 4 中, M1 表示环境规制 ER 对 $GTFP$ 的总效应, 系数为-0.363 且显著, 表明环境规制越高, 绿色全要素生产率水平越低; M2 表示环境规制 ER 与全局经济效率 EE 之间的关系, 系数为-0.095 且显著, 表明环境规制抑制了经济效率; M3 同时加入了环境规制 ER 和全局经济效率 EE ,

ER 系数为直接效应，为-0.121，*EE* 系数为 2.556，根据中介效应模型，计算得到中介效应为-0.242。在表 4 后半部分内是对中介效应、直接效应、总效应的显著性检验，可以看出三个效应均显著，分别为-0.242、-0.1210、-0.363，中介效应占比为 66.68%。表 5 中，Bootstrap 结果中置信区间均不包含 0，表明 Sobel 的结果是稳健的。

Table 4. Mediation effect Sobel test results

表 4. 中介效应 Sobel 检验结果

	(1) M1	(2) M2	(3) M3
<i>ER</i>	-0.363*** (0.0577)	-0.0948** (0.0179)	-0.121*** (0.0389)
<i>EE</i>			2.556*** (0.1746)
<i>ind</i>	-0.0166*** (0.0032)	-0.00204** (0.0010)	-0.0114*** (0.0020)
<i>infr</i>	0.0503*** (0.0187)	0.0327*** (0.0058)	-0.0334** (0.0127)
<i>cons</i>	2.124*** (0.1909)	0.466*** (0.0594)	0.932*** (0.1420)
样本数量	130	130	130
Sobel-Goodman Mediation Tests (Indirect effect)		-0.2422*** (0.0488)	
Direct effect		-0.1210*** (0.0388)	
Total effect		-0.3632*** (0.0577)	
Indirect effect Proportion		66.68%	

注：*、**、*** 分别表示在 10%、5%、1%的水平上显著。括号内代表 t 值。

Table 5. Bootstrap results

表 5. Bootstrap 结果

	Coef.	[95% Conf. Interval]		
Indirect effect	-0.24220365	-0.3786888	-0.115861	(P)
		-0.3932227	-0.118288	(BC)
Direct effect	-0.12100467	-0.1788738	-0.0492262	(P)
		-0.1740479	-0.0330468	(BC)

综上所述，我们有理由相信，在京津冀地区，严苛的环境规制虽然显著减低了污染，但同时也影响了经济效率，从而抑制了绿色全要素生产率。

5. 结论及政策建议

本文基于 2004~2019 年中国各地级市的相关数据,对京津冀、长三角、珠三角三个地区进行双重差分实验,探究了“大气十条”对各地区污染排放及 GTFP 的影响,得出以下结论:一方面,通过对各个地区的双重差分实验,研究发现“大气十条”阶梯型的环境规制确实促成了阶梯型的污染减排,表现为京津冀相对于长三角有更高水平的污染减排量,长三角相对于珠三角有更高水平的污染减排量,该结论与 2018 年发布的“大气十条”终期考核通报一致。另一方面,京津冀地区实行了“大气十条”中最严苛的环境规制,污染减排量也确实最显著,但绿色全要素生产率却相对于长三角和珠三角地区有所降低,通过进一步的中介效应检验,证明了京津冀地区高度严苛的环境规制影响了该地区的经济效率,从而抑制了绿色全要素生产率。

基于前文机制分析和实证分析所得出的结论,本文提出以下政策建议:第一,从政策本身的角度看,《大气污染防治行动计划》仅给出了五年的阶段性任务,而空气的质量改善是一个长期的工程,政府应当出台针对空气污染的长期有效政策,并且针对的污染也应该进一步细化,逐步提高空气质量标准。第二,基于三个目标地区的双重差分实验,研究发现过于严苛的环境规制对绿色全要素生产率产生了抑制作用,所以本文认为环境规制的制定还需因地制宜,制定科学有效的环境目标,努力降低环境规制对经济效率带来的负面影响。第三,同样基于双重差分实验,本文认为,除京津冀地区以外的其他重点地区,仍然可以继续实行一定强度的环境规制,而对于京津冀地区可考虑实行稍微宽松的环境规制,以契合当地经济发展状况。第四,环境规制的影响是多方面的,我们需要不断增强区域污染治理协同,避免城市间环境规制逐底竞赛,推动环境规制互动的良性发展。第五,在目前节能减排乃至“双碳”目标下,政府应继续大力支持企业污染减排技术创新,落实创新补贴、税收优惠,降低企业遵从成本,进一步加强与企业的沟通,听取意见反馈,实现经济与环境的可持续发展。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 卢亚灵,范朝阳,蒋洪强,牛传真,李勃.北京市“大气十条”实施的空气质量改善效益[J].环境科学,2021,42(6):2730-2739. <https://doi.org/10.13227/j.hjkk.202008298>
- [3] 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.
- [4] 张昭文.“大气十条”政策对我国“两高”行业转型升级的影响研究[D]:[硕士学位论文].兰州:兰州大学,2020. <https://doi.org/10.27204/d.cnki.glzhu.2020.001704>
- [5] 李斌,祁源,李倩.财政分权、FDI与绿色全要素生产率——基于面板数据动态GMM方法的实证检验[J].国际贸易问题,2016(7):119-129. <https://doi.org/10.13510/j.cnki.jit.2016.07.011>
- [6] Tone, K. (2001) A Slacks-Based Measure of Efficiency in Data Envelopment Analysis. *European Journal of Operational Research*, **130**, 498-509. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00407-5](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00407-5)
- [7] Chung, Y.H., Färe, R. and Grosskopf, S. (1997) Productivity and Undesirable Outputs: A Directional Distance Function Approach. *Journal of Environmental Management*, **51**, 229-240. <https://doi.org/10.1006/jema.1997.0146>
- [8] 余奕杉,卫平.中国城市绿色全要素生产率测度研究[J].生态经济,2021,37(3):43-52.
- [9] 卢丽文,宋德勇,黄璨.长江经济带城市绿色全要素生产率测度——以长江经济带的108个城市为例[J].城市问题,2017(1):61-67. <https://doi.org/10.13239/j.bjsskxy.cswt.170108>
- [10] 王兵,刘光天.节能减排与中国绿色经济增长——基于全要素生产率的视角[J].中国工业经济,2015(5):57-69.
- [11] 徐佳,崔静波.低碳城市和企业绿色技术创新[J].中国工业经济,2020(12):178-196. <https://doi.org/10.19581/j.cnki.ciejjournal.2020.12.008>
- [12] Porter, M.E. and Van Der Linde, C. (1995) Green and Comparative: Ending the Stalemate. *Harvard Business Review*,

73, 120-134.

- [13] Hamamoto, M. (2006) Environmental Regulation and the Productivity of Japanese Manufacturing Industries. *Resource & Energy Economics*, **28**, 299-312. <https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2005.11.001>
- [14] 董直庆, 王辉. 环境规制的“本地-邻地”绿色技术进步效应[J]. 中国工业经济, 2019(1): 100-118.
- [15] 王杰, 刘斌. 环境规制与企业全要素生产率——基于中国工业企业数据的经验分析[J]. 中国工业经济, 2014(3): 44-56.
- [16] 何枫, 祝丽云, 马栋栋, 姜维. 中国钢铁企业绿色技术效率研究[J]. 中国工业经济, 2015(7): 84-98.
- [17] 蔡乌赶, 周小亮. 中国环境规制对绿色全要素生产率的双重效应[J]. 经济学家, 2017(9): 27-35. <https://doi.org/10.16158/j.cnki.51-1312/f.2017.09.005>
- [18] 蒋伏心, 王竹君, 白俊红. 环境规制对技术创新影响的双重效应——基于江苏制造业动态面板数据的实证研究[J]. 中国工业经济, 2013(7): 44-55. <https://doi.org/10.19581/j.cnki.ciejjournal.2013.07.004>
- [19] 李永友, 沈坤荣. 我国污染控制政策的减排效果——基于省际工业污染数据的实证分析[J]. 管理世界, 2008(7): 7-17. <https://doi.org/10.19744/j.cnki.11-1235/f.2008.07.002>
- [20] 李胜兰, 初善冰, 申晨. 地方政府竞争、环境规制与区域生态效率[J]. 世界经济, 2014, 37(4): 88-110.
- [21] 赵霄伟. 环境规制、环境规制竞争与地区工业经济增长——基于空间 Durbin 面板模型的实证研究[J]. 国际贸易问题, 2014(7): 82-92. <https://doi.org/10.13510/j.cnki.jit.2014.07.009>
- [22] 邱斌, 杨帅, 辛培江. FDI 技术溢出渠道与中国制造业生产率增长研究: 基于面板数据的分析[J]. 世界经济, 2008(8): 20-31.
- [23] Sobel, M.E. (1982) Asymptotic Confidence Intervals for Indirect Effects in Structural Equation Models. In: Leinhardt, S., Ed., *Sociological Methodology*, American Sociological Association, Washington DC, 290-312. <https://doi.org/10.2307/270723>
- [24] 温忠麟, 叶宝娟. 中介效应分析: 方法和模型发展[J]. 心理科学进展, 2014, 22(5): 731-745.
- [25] 方杰, 张敏强, 邱皓政. 中介效应的检验方法和效果量测量: 回顾与展望[J]. 心理发展与教育, 2012, 28(1): 105-111. <https://doi.org/10.16187/j.cnki.issn1001-4918.2012.01.015>
- [26] Preacher, K.J. and Hayes, A.F. (2008) Asymptotic and Resampling Strategies for Assessing and Comparing Indirect Effects in Multiple Mediator Models. *Behavior Research Methods*, **40**, 879-891. <https://doi.org/10.3758/BRM.40.3.879>
- [27] 叶琴, 曾刚, 戴劲勃, 王丰龙. 不同环境规制工具对中国节能减排技术创新的影响——基于 285 个地级市面板数据[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(2): 115-122.
- [28] 傅京燕, 李丽莎. 环境规制、要素禀赋与产业国际竞争力的实证研究——基于中国制造业的面板数据[J]. 管理世界, 2010(10): 87-98+187. <https://doi.org/10.19744/j.cnki.11-1235/f.2010.10.008>
- [29] 黄磊, 吴传清. 长江经济带城市工业绿色发展效率及其空间驱动机制研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(8): 40-49.
- [30] 卜洪运, 崔雪飞, 李红莲. 京津冀生态经济效率测度及内部视角下影响因素研究——基于全局参比的 US-SBM 模型[J]. 生态经济, 2017, 33(5): 88-94.
- [31] Oh, D.H. (2010) A Global Malmquist-Luenberger Productivity Index. *Journal of Productivity Analysis*, **34**, 183-197. <https://doi.org/10.1007/s11123-010-0178-y>