

# 生态补偿减少了 PM<sub>2.5</sub> 污染吗？

——基于 PSM-DID 的检验

王素凤 方 晖 焦建玲

**摘 要** 近年来，大气污染治理生态补偿逐渐成为地方政府降低 PM<sub>2.5</sub> 污染的重要举措。理论上，补偿办法实施能够促进各地开展污染减排，进而改善空气质量。作者将 2018 年以前山东、湖北、河南和安徽四省发布《环境空气质量生态补偿（暂行）办法》视为政策冲击，以山东等七个省份 97 个地级市（省辖市）2015—2019 年的环境经济数据为样本，借助倾向得分匹配-双重差分（PSM-DID）研究发现，生态补偿办法能够有效降低 PM<sub>2.5</sub> 污染水平；加入虚拟变量与解释变量交互项的回归结果显示，生态补偿政策通过作用于经济增长和城市规模产生了显著的间接减霾效应。进一步借助连续型 DID 验证了生态补偿标准对 PM<sub>2.5</sub> 污染的抑制作用。根据实证结果，持续推进大气污染治理生态补偿并优化补偿标准，发挥经济增长、人口政策和产业政策等配套措施的协同减霾作用，是完善当前大气污染治理生态补偿机制、促进环境与经济可持续发展的重要保障。

**关键词** PM<sub>2.5</sub> 污染治理 生态补偿 倾向得分匹配 双重差分

【中图分类号】F290 【文献标识码】A 【文章编号】2095 - 851X (2022) 04 - 0060 - 17

## 一、引言

优良的大气环境不仅对人类健康有着重要影响，同时也是经济社会可持续发展的

【基金项目】国家自然科学基金“大数据背景下能源企业绿色创新及其扩散路径研究：基于多元互动关系网络视角”（批准号：71972064）；安徽建筑大学科研储备库培育项目“公平与效率视角下长三角雾霾治理生态补偿与合作减排机制研究”（批准号：2021XMK05）。

【作者简介】王素凤，安徽建筑大学经济与管理学院教授、硕士生导师，本文通讯作者，邮政编码：230022；方晖，安徽建筑大学经济与管理学院硕士生，邮政编码：230022；焦建玲，合肥工业大学管理学院教授、博士生导师，邮政编码：230009。

致谢：感谢审稿专家匿名评审，当然文责自负。

重要保障 (Perera et al., 2021)。然而，随着经济社会的快速发展，大气污染现状不容乐观。对此，政府相继出台多项政策，旨在从产业结构、城市扩张、能源消耗乃至区域协同等不同途径减少雾霾排放 (Shi et al., 2021)。大气污染治理生态补偿就是其中之一，它主要体现为大气环境破坏者对受损者的补偿和大气环境服务受益者对提供者的补偿，是一种同时运用市场与行政手段调节大气环境利益主体关系的制度安排 (Cui et al., 2021)。

由于空气的流动性，PM<sub>2.5</sub> 污染存在溢出效应 (Liu et al., 2021)，导致相邻行政区的大气环境成为一种“准公共品”，给大气污染治理带来了复杂性和挑战性。基于“保护者受益、污染者付费”原则，环境空气质量生态补偿政策将 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 浓度等纳入考核指标，建立奖惩和补偿机制，使得污染的外部成本内部化，以期提高排放主体的环境效率，改善空气质量 (Qi et al., 2021)。2014 年以来，山东、湖北、河南、安徽等地先后发布了《环境空气质量生态补偿（暂行）办法》。那么，这些政策在污染物控制和补偿标准上有什么特点？是否发挥了政策的减霾效应？影响政策效应的关键变量有哪些？对这些问题的实证检验和科学判断是优化生态补偿政策、提升环境质量的重要前提。

截至目前，已有许多文献探讨了环境政策在污染治理方面的作用，但对空气质量生态补偿的减霾效果少有关注，且相关研究主要是对已在全国或省域、行业推行的治理政策做“效果后评估”，其研究结论对大气污染治理生态补偿这类正在进行的政策参考价值非常有限。本文借助倾向得分匹配 (Propensity Scoring Matching, PSM) 遴选处理组和控制组样本，从而使研究能反映两类地区的大气质量变化差异，并充分聚焦实施地区的政策效应。此外，很多成果都认可环境监管对空气质量的提升效果，但并未深入揭示空气污染的变化是否是这些环境政策发挥的作用。本文运用双重差分 (Difference-In-Difference, DID) 方法进行检验，并替换被解释变量和虚拟变量，引入连续型 DID，系统考察环境空气质量生态补偿政策对 PM<sub>2.5</sub> 浓度变化的影响。

## 二、文献综述

随着雾霾污染形势的变化，以及人们对雾霾损害认识的加深，越来越多的学者尝试从不同角度来研究 PM<sub>2.5</sub> 治理政策评价问题，并运用不同的评价技术展开分析，如基于环境承载力的分位数回归 (石敏俊等, 2017)、基于选择实验调查数据的 Logit 模型 (颜俨等, 2018)、基于 DPSIR 模型的城市雾霾治理测度指数 (陈诗一、王建民, 2018)、基于演化博弈和仿真分析的雾霾治理效率测度 (柏明国等, 2020) 等，其结论基本上都支持雾霾治理政策的减排效应。然而，在治理政策实施的同时，仍然还有许多其他因素会对空气质量产生显著影响，比如经济增长、城市规模扩张、产业结构变化以及其它相关政策。换言之，宏观的政策效果评价并不能揭示某一治理举措的真实效果，需要使用双重差分 (DID) 方法来控制其他因素，得到政策实施前后雾

霾排放差异的准确变化。利用这一工具,一些文献评估了雾霾治理政策对大气环境的改善作用(杜雯翠、夏永妹,2018)。

尽管 DID 方法在政策评价中得到了较广泛的应用,但该方法也存在一些易错之处。例如,在样本选择上,若不满足随机分组或随机抽样的条件,将导致“政策内生性”和“选择性偏误”;仅用 0 和 1 两种情况对处理变量进行赋值,无法体现样本在处理程度上的异质性;更重要地,忽视了处理组和控制组在政策冲击前后的显著差异可能来自同期其它政策的影响,导致 DID 回归结果偏误。针对上述问题,有不少文献将倾向得分匹配(PSM)与双重差分相结合,在回归之前先借助 PSM 估计倾向得分,进行样本匹配,确保样本选择尽量接近自然实验(准自然实验)(万海远、李实,2013);以连续变量作为处理变量的代理变量,构建连续型 DID,以更准确地测度样本处理的差异,从外延上对 DID 作出扩展(Moser and Voena, 2012);为确保处理变量对产出变量作用机制的排他性,可实施安慰剂检验,例如,将研究区间向前推移若干年份再回归(刘瑞明、赵仁杰,2015)。考虑到共同趋势假设可能被违背,可以利用三重差分模型来控制趋势差异对政策效应识别的干扰(Qi et al., 2021)。

无论是《大气污染防治行动计划》这类“常态化治理”政策,还是“奥运蓝”、“APEC 蓝”等“事件型治理”措施,都具有一个共同特征,即研究区域政策干预的时点一致。与上述政策不同,各地空气质量生态补偿实施的年份往往并不一致。为此,一些文献采用多期 DID 方法评价某项政策的效果(Fan and Zhang, 2021)。一般而言,选择某个年份为时间断点,在此之前为事前组, DID 交互项等于 0, 该年之后则为事后组, DID 交互项为 1, 以尽可能消除那些可能影响 DID 交互项估计的不可观测因素和时间效应。不过到目前为止,相关方法的改进在雾霾治理政策评价领域的应用还比较少见。

本文的边际贡献在于:第一,揭示生态补偿政策对大气污染的真实效应。当前生态补偿政策的评价以流域和林业等为主,关注空气质量补偿政策效果的研究偏少,本文构建 DID 回归模型,检验研究区域环境空气质量补偿政策对  $PM_{2.5}$  污染的直接效应;并通过引入相关控制变量与虚拟变量的交互项,探究补偿政策对  $PM_{2.5}$  污染的间接作用。第二,实施替换被解释变量和虚拟变量、构建连续型 DID 等稳健性检验手段,在验证研究结论可靠性的同时,进一步揭示生态补偿标准对雾霾污染的影响。在此基础上提出政策启示,为大气污染治理和生态补偿政策制订提供理论依据。

### 三、政策背景与研究假设

#### (一) 政策背景

自 2013 年以来,生态补偿作为雾霾治理的一项环境政策工具,逐渐受到重视。2013 年 11 月《中共中央关于全面深化改革若干重大问题的决定》首次提出“推动地区间建立横向生态补偿制度”;2016 年 5 月《关于健全生态保护补偿机制的意见》确立了我国“分类补偿与综合补偿相结合”的生态补偿政策框架;2017 年 10 月,党的

十九大强调建立市场化、多元化生态补偿机制；2019年11月，国家发展和改革委员会发布《生态综合补偿试点方案》，国内生态补偿进入了快速发展和完善阶段。

相较于流域、森林等领域的生态补偿，环境空气质量补偿起步较晚。为有效遏制雾霾污染并改善空气质量，自2014年起，山东、河南等地先后发布了《环境空气质量生态补偿暂行办法》（或实施办法，以下简称《办法》）（见表1）。

表1 中国各地《办法》实施现状

序号	省域	涉及范围	实施时间	修订时间	实施办法名称
1	山东	全省	2014年2月	2017年4月	山东省环境空气质量生态补偿暂行办法
2	湖北	全省	2016年1月	2018年11月	湖北省环境空气质量生态补偿暂行办法
3	河南	全省	2016年7月	2018年8月	河南省城市环境空气质量生态补偿暂行办法
4	山西	全省	2017年10月	2019年2月	山西省城市环境空气质量改善奖惩方案
5	安徽	全省	2018年7月	—	安徽省环境空气质量生态补偿暂行办法
6	河北	石家庄、邯郸、廊坊、邢台	2015年10月	—	石家庄市环境空气质量奖惩办法(试行) 邯郸市环境空气质量生态补偿办法(试行) 廊坊市环境空气质量奖惩办法(试行) 邢台市改善大气环境质量奖惩办法(试行)
7	宁夏	银川	2016年1月	2020年2月	银川市环境空气质量生态补偿暂行办法
8	山西	渭南	2018年1月	—	渭南市环境空气质量生态补偿实施办法(试行)
9	江苏	苏州	2020年3月	—	苏州市乡镇(街道)空气质量补偿指导意见
10	江苏	吴江区	2020年4月	2021年3月	吴江区区镇空气质量补偿实施办法(试行)
11	江苏	太仓市区	2020年5月	—	太仓市区镇(街道)空气质量补偿实施办法(试行)

资料来源：表中相关环境空气质量生态补偿暂行办法分别来自各省（市、区）人民政府网站，具体包括：①山东省人民政府网 <http://www.shandong.gov.cn/>；②湖北省人民政府网 <https://www.hubei.gov.cn/>；③湖南省人民政府网 <https://www.hunan.gov.cn/>；④山西省人民政府网 <https://www.shanxi.gov.cn/>；⑤安徽省人民政府网 <https://www.anhui.gov.cn/>；⑥石家庄、邯郸、廊坊、邢台市人民政府网：<https://www.sjz.gov.cn/>，<https://www.hd.gov.cn/>，<https://www.lf.gov.cn/>，<https://www.xingtai.gov.cn/>；⑦银川市人民政府网：<http://www.yinchuan.gov.cn/>；⑧渭南市人民政府网 <http://www.weinan.gov.cn/>；⑨苏州市人民政府网：<https://www.suzhou.gov.cn/>；⑩吴江区人民政府网：<http://www.wujiang.gov.cn/>；⑪太仓市人民政府网：<http://www.taicang.gov.cn/>。

进一步地，表2从《办法》涵盖的污染物或指标、考核权重、补偿单价等方面对各地生态补偿政策作出了比较。可以看出，PM<sub>2.5</sub>浓度变化是补偿政策考量的重点指标之一，但权重设置存在差异；同时，在补偿单价上，存在区间补偿（如山东、河南、山西等）、单一价格补偿（如湖北、安徽等）、奖惩补偿（如河北石家庄、江苏苏州等）等不同形式。

表2 《办法》涉及的污染物种类及补偿标准

省/市	考核污染物/指标	考核指标权重	补偿单价 <sup>b</sup>	计量单位
山东	PM <sub>2.5</sub> 、PM <sub>10</sub> 、SO <sub>2</sub> 、NO <sub>x</sub> 浓度； 空气质量优良天数比例	0.6、0.15、0.15、0.1 —	20~80 20	万元/微克 万元/百分点
湖北	PM <sub>2.5</sub> 和PM <sub>10</sub> 浓度	—	80	万元/微克
河南	PM <sub>2.5</sub> 和PM <sub>10</sub> 浓度 空气质量优良天数	—	4.5~25 20	万元/微克 万元/天
山西	环境空气质量综合指数 PM <sub>2.5</sub> 、SO <sub>2</sub> 浓度 <sup>a</sup>	—	200~400 10~20	万元/个 万元/微克
安徽	PM <sub>2.5</sub> 和PM <sub>10</sub> 浓度	均等赋权	26.54	万元/微克
石家庄、邯郸、 廊坊、邢台	空气质量达标天数、重度以上 污染天数、PM <sub>2.5</sub> 浓度	—	落后者补偿先进者 100万元	—
银川	PM <sub>2.5</sub> 、PM <sub>10</sub> 、NO <sub>2</sub> 、O <sub>3</sub> 浓度； 空气质量优良天数比例	0.4、0.3、0.15、0.15 —	30 30	万元/微克 万元/天
渭南	PM <sub>2.5</sub> 、PM <sub>10</sub> 、NO <sub>2</sub> 浓度 空气质量达标天数	—	10 10	万元/微克 万元/天
苏州	空气质量排名	—	前二奖 40 后二罚 60	万元
吴江区	PM <sub>2.5</sub> 、O <sub>3</sub> 浓度及改善率排名； 空气质量优良天数比例	0.4、0.3、0.3 —	前二奖 60 后二罚 60	万元
太仓市区	PM <sub>2.5</sub> 月均浓度及改善率排名	—	前三奖 240、144、96 后二罚 60	万元

注：a 指采暖期（1~3月、11~12月）的考核指标；b 表中省（或市）《办法》若有修订的，“补偿单价”以修订后的为主；补偿单价为区间值的，为阶梯补偿，例如山西省规定：差值在1个数值（含）以内时，扣罚资金系数为200万元/个数值，超过1个数值时，扣罚资金系数为400万元/个数值。

资料来源：表中数据来自各省（市、区）环境空气质量生态补偿相关办法，具体见表1第6列“实施办法名称”。

为考察生态补偿政策在削减空气污染上的有效性，首先需要合理地确定研究区域。考虑到PM<sub>2.5</sub>排放的空间溢出特征，尽可能选择地理上接壤的省份，且确保生态补偿政策涵盖省内所有地级市（含直辖市）；同时，还要包含政策干预时点前后已实施、未实施的适量样本。基于中国行政区划并结合表1，确定以2018年为政策实施年份，选择当年已实施《办法》的安徽及与其相邻的山东、河南、湖北四省为政策“处理组”，选择当年仍未实施政策、且与安徽相邻的江苏、江西、浙江为“控制组”。七个省份共97个城市<sup>①</sup>2015—2019年PM<sub>2.5</sub>均值变化情况如图1所示，2015年

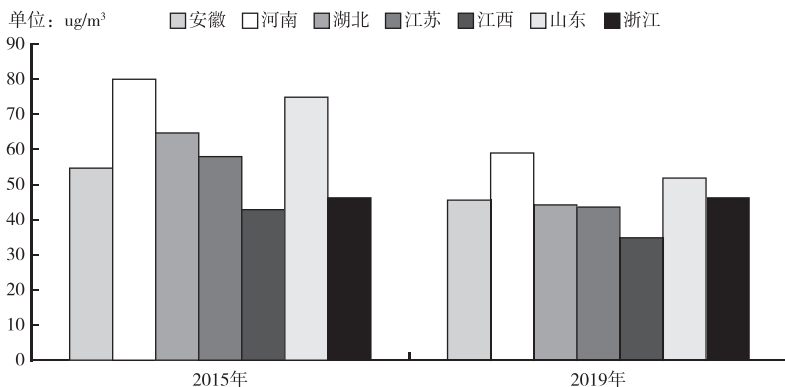
① 七个省份共有96个地级市和4个省辖县级市。在4个省辖县级行政单位中，湖北省天门市、潜江市和仙桃市PM<sub>2.5</sub>等空气质量数据缺失，为保证数据完整性和统计口径一致性，未被纳入研究区域，仅保留河南省济源市，加上96个地级市，共有97个城市（见表3）。为简单起见，下文均以“地级市”指代。

PM<sub>2.5</sub>均值最大（河南，80.352μg/m<sup>3</sup>）与最小（江西，43.068μg/m<sup>3</sup>）的两省数值相差将近1倍，其中，97个城市PM<sub>2.5</sub>最大值、最小值和平均值分别为100.33μg/m<sup>3</sup>（山东德州）、29.58μg/m<sup>3</sup>（浙江舟山）、62.50μg/m<sup>3</sup>，有23个城市达到轻度及以上污染（大于75μg/m<sup>3</sup>），占总体的23.71%；2019年上述指标均显著降低，全省PM<sub>2.5</sub>均值最大的仍是河南（59.245μg/m<sup>3</sup>）、最小的则是浙江（30.629μg/m<sup>3</sup>），97个城市PM<sub>2.5</sub>最大值、最小值和平均值分别降至69.17μg/m<sup>3</sup>（河南安阳）、20.08μg/m<sup>3</sup>（浙江舟山）、45.92μg/m<sup>3</sup>，轻度及以上污染城市个数为零。

表3 研究区域构成

序号	省域	下辖地区(地级市/省辖市)
1	山东	济南、青岛、淄博、枣庄、东营、烟台、潍坊、济宁、泰安、威海、日照、临沂、德州、聊城、滨州、菏泽
2	湖北	武汉、黄石、十堰、宜昌、襄阳、鄂州、荆门、孝感、荆州、黄冈、咸宁、随州
3	河南	郑州、开封、洛阳、平顶山、焦作、鹤壁、新乡、安阳、濮阳、许昌、漯河、三门峡、南阳、商丘、信阳、周口、驻马店、济源
4	安徽	合肥、淮北、亳州、宿州、蚌埠、阜阳、淮南、滁州、六安、马鞍山、芜湖、宣城、铜陵、池州、安庆、黄山
5	江苏	南京、无锡、徐州、常州、苏州、南通、连云港、淮安、盐城、扬州、镇江、泰州、宿迁
6	江西	南昌、景德镇、萍乡、九江、新余、鹰潭、赣州、吉安、宜春、抚州、上饶
7	浙江	杭州、宁波、温州、嘉兴、湖州、绍兴、金华、衢州、舟山、台州、丽水

资料来源：表中各省份所辖地级市/省辖市来自《中国城市统计年鉴》（2020年）。

图1 各省份2015年、2019年PM<sub>2.5</sub>均值变化比较

数据来源：PM<sub>2.5</sub>历史数据网 <https://www.aqistudy.cn/historydata/>。

## （二）研究假设

### 1. 环境政策对雾霾污染的直接影响

许多文献关注到环境政策对空气质量的影响。根据耿冠楠等（2020）的研究，

2013—2017年《大气十条》实施期间，中国东部地区PM<sub>2.5</sub>排放浓度显著降低。环境政策的效果往往与地方政府行为密切相关，并在地方政府间产生“逐顶竞争”、“逐底竞争”和“差异化竞争”三类现象，规制本身有利于降低雾霾污染（申伟宁等，2020），但由于污染的外溢性，规制竞争也降低了治理效率（Yamagishi, 2019）。张立文等（2019）研究进一步证实，环境政策对PM<sub>2.5</sub>防治具有正效应，且存在区域异质性；相较于常态化治理而言，事件型治理（如“两会蓝”现象）政策执行乏力。

《环境空气质量生态补偿（暂行）办法》旨在构建空气质量生态补偿机制，促进利益相关主体积极开展环境保护，不断降低污染成本、提高排放效率，减少污染物排放，进而改善大气质量。

假设1：《办法》实施能够对PM<sub>2.5</sub>污染产生直接减排效应。

## 2. 环境政策对雾霾污染的间接影响

除了直接减霾作用，环境政策还可能从两个层面发挥间接减霾效应：

从雾霾污染的形成机理来看，补偿政策通过“排名”和“奖惩”等手段，使得排污主体和社会公众的环保意识不断增强，进而提高环保治理投入力度，有助于雾霾污染控制；有效的环境政策会影响人口流动和企业区位选择，进而改变城市规模、重塑经济地理格局（万庆，2017），而合理的城市规模和产业结构也有利于降低雾霾排放水平。

从雾霾跨域排放的特点来看，补偿政策还可能通过其它变量影响污染溢出。例如，环境规制会促使污染产业转移，即存在“污染避难所”现象（罗艳、陈平，2017）；同时，环境规制也有助于优化地方产业结构，降低本地及周边地区雾霾污染；进一步地，雾霾污染的溢出性和地方政策环境规制竞争的“模仿性”将减轻周边区域的雾霾污染，有利于实现区域协同减霾（陈生明，2019）。

假设2：《办法》实施通过作用于地方经济增长、城市人口和产业结构而对PM<sub>2.5</sub>污染产生间接减排效应。

## 四、研究设计

### （一）模型构建

《环境空气质量生态补偿（暂行）办法》可被视为在相关地区实施的一项政策试验，本文使用“倾向得分匹配-双重差分法”（PSM-DID）估计该项政策的实施对地区PM<sub>2.5</sub>排放浓度的影响。以2018年为时间断点，将此前已经发布该办法的山东、河南、湖北和安徽四省作为处理组（共62个地级市，见表3）；将2018年以前未实施该办法的江苏、江西和浙江三省作为控制组（共35个地级市，见表3）。DID基准回归模型设定如下：

$$\ln PM_{2.5it} = \beta_0 + \beta_1 DID_{it} + \beta_2 X_{it} + \delta_t + \mu_i + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

式中，下标*i*和*t*分别代表城市和年份； $\ln PM_{2.5it}$ 表示空气质量，以各地PM<sub>2.5</sub>排

放浓度 (ln 表示取自然对数, 下同) 进行度量。  $DID_{it} = treat_{it} \times time_{it}$ , 其中, 虚拟变量  $treat_{it}$  为个体分组变量,  $treat_{it} = 1$  表示城市  $i$  实施了《办法》,  $treat_{it} = 0$  表示城市  $i$  未实施《办法》; 虚拟变量  $time_{it}$  为时间分组变量,  $time_{it} = 1$  表示  $t$  年城市  $i$  开始实施《办法》,  $time_{it} = 0$  表示  $t$  年城市  $i$  未开始实施《办法》;  $X_{it}$  代表一系列控制变量, 包括经济发展水平、交通拥挤程度、人口密度、产业结构、对外开放、环境规制、降雨量、气温以及风速, 除产业结构、对外开放和环境规制以外 (避免对数化后出现负值), 均作自然对数处理;  $\delta_t$  和  $\mu_i$  分别表征时间固定效应和个体固定效应;  $\varepsilon_{it}$  为误差项。

为进一步检验假设 2, 在上述 DID 基准回归模型的基础上引入经济增长、城市人口和产业结构与虚拟变量  $time$  的交互项, 得到如下模型:

$$\ln PM_{2.5it} = \alpha_0 + \alpha_1 DID_{it} + \alpha_2 time_{it} \times \ln pgdp_{it} + \alpha_3 time_{it} \times \ln dens_{it} + \alpha_4 time_{it} \times \ln inst_{it} + \delta X_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

DID 估计无偏的最重要前提是处理组与控制组满足“共同趋势”假设, 即如果未实施《办法》, 这两类地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度变化随时间而发生的变化不存在系统性差异。然而, 研究区域内 97 个城市间可能存在一定的异质性, 因此, 在 DID 估计之前首先运用倾向得分匹配法 (PSM) 匹配样本, 再通过 DID 法解决内生性问题。借鉴张俊 (2017) 的作法, 利用非参数核匹配法确定权重, 并借助 Logit 回归获得变量估计倾向得分。将处理组空气质量在政策实施前后的变化减去匹配后控制组空气质量的变化, 得到《办法》实施的平均处理效应 (Average Treatment Effect on the Treated, ATT), 作为环境政策对空气质量实际影响的有效度量。

## (二) 变量选择

### 1. 被解释变量

被解释变量为空气质量水平 ( $\ln PM_{2.5}$ ), 以城市 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度进行度量。另外, Shi 等 (2021) 研究表明, SO<sub>2</sub> 对 PM<sub>2.5</sub> 的形成有重要影响; 而空气质量指数 (AQI) 同时监测包括 PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>2</sub> 等在内的六项污染物, 故也采集了这两个指标, 作为政策效应评价中 PM<sub>2.5</sub> 的替代变量。

### 2. 解释变量

解释变量为样本城市是否为实施《办法》城市。如果样本城市当年实施了《办法》, 则变量 DID 取值为 1, 否则 DID 取值为 0。

### 3. 控制变量

为着重考察《办法》的实施对地区空气质量的影响, 本文将控制以下变量: ①社会经济因素, 包括经济增长 ( $\ln pgdp$ )、交通拥堵 ( $\ln ncv$ )、人口密度 ( $\ln dens$ )、产业结构 ( $inst$ )、对外开放 ( $open$ ) 和环境规制 ( $enre$ )。其中, 经济增长以各市人均国内生产总值 (2015 年不变价) 作为代理性变量, 利用地区实际 GDP 与年末户籍总人口之比进行计算。已有许多文献证实了经济增长对空气污染的重要效应 (Zhang et al., 2019b)。交通拥堵以各地“民用车辆拥有量”予以度量。道路拥堵程度与雾霾



污染之间存在相互作用，均与机动车行驶密切相关（袁韵等，2020）。人口密度以城市年末户籍总人口与行政区域面积的比值进行衡量。人口集聚度过低可能导致基础设施资源的浪费，但过度集聚又会造成城市资源短缺、道路拥堵以及空气污染等“城市病”（Xu et al., 2020）。产业结构以第二产业产值占 GDP 的比重衡量。一般认为，产业结构与  $PM_{2.5}$  之间存在正相关关系（Xue et al., 2021），即随着第二产业占比增大， $PM_{2.5}$  浓度呈上升趋势，反之则呈下降趋势。对外开放以外商直接投资（FDI）占 GDP 的比重作为代理变量。Xie 和 Sun（2020）研究发现，FDI 对  $PM_{2.5}$  存在重要影响，但其作用的方向是不确定的，且存在空间异质性。环境规制以“建成区绿化覆盖率”来衡量。Zhang 等（2019a）指出，2006—2016 年中国环境规制通过促进产业结构优化升级而显著抑制了雾霾污染排放。②自然气象因素，主要包括年降水量（ $\ln apre$ ）、年平均气温（ $\ln temp$ ）和年平均风速（ $\ln wind$ ），这些变量对大气  $PM_{2.5}$  浓度均具有显著影响（Chen et al., 2020）。其中，气温和风速均取 1—12 月数据的算术均值作为年度数值；一般而言，风速与  $PM_{2.5}$  浓度呈负相关关系，故在统计风速时，仅考虑平均风速在 3~4 级及以上的天数。

本文以 2015—2019 年山东等七省 97 个城市的面板数据为样本，评估《环境空气质量生态补偿（暂行）办法》实施的减霾效应。变量说明与描述性统计如表 4 所示。

表 4 变量说明与描述性统计

变量名称	变量内涵	单位	最小值	最大值	均值	标准差
$\ln PM_{2.5}$	$PM_{2.5}$ 年均浓度	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	3.0000	4.6100	3.9152	0.2769
$\ln AQI$	空气质量指数年均值	—	3.7400	4.9500	4.4571	0.2030
$\ln SO_2$	$SO_2$ 年均浓度	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	1.5200	4.7200	2.8007	0.5469
$\ln pgdp$	经济增长	元	9.6900	11.8400	10.7698	0.4963
$\ln ncv$	交通拥堵	辆	10.6500	15.1500	13.3553	0.7979
$\ln dens$	人口密度	人/平方公里	4.8200	9.6200	7.5053	0.9975
$inst$	产业结构	%	31.7100	66.9000	47.0212	6.6335
$open$	对外开放	%	0.0700	28.5400	3.0461	3.2145
$enre$	环境规制	%	24.3800	67.0000	41.9429	3.7840
$\ln apre$	年降水量	毫米	5.6200	8.5500	6.9608	0.4817
$\ln temp$	年平均气温	摄氏度	2.5600	3.0200	2.8029	0.0968
$\ln wind$	年平均风速	天	0.0000	366.0000	107.5258	102.3254
有效样本数			485			

数据来源：（1）表中  $PM_{2.5}$  浓度（ $PM_{2.5}$ ）、空气质量指数（AQI）和二氧化硫浓度（ $SO_2$ ）来源于“ $PM_{2.5}$  历史数据网”①，由于网站仅提供月度数据，取 1—12 月的平均浓度作为年度数值；（2）气温（ $temp$ ）和风速（ $wind$ ）数据来源于“天气后报网”②；（3）产业结构（ $inst$ ）、对外开放（ $open$ ）和环境规制（ $enre$ ）数据取自《中国城市统计年鉴》（2016—2020）；（4）其余指标均来自各市统计年鉴（2016—2020）。

①  $PM_{2.5}$  历史数据网：<https://www.aqistudy.cn/historydata/>。

② 天气后报网：<http://www.tianqihoubao.com/lishi/index.htm>。

## 五、实证检验

### （一）PSM 结果

根据研究设计，本文分别以 2018 年已实施《办法》的 62 个样本城市为处理组、未实施《办法》的 35 个样本城市为控制组，利用 Logit 模型来估计倾向得分，借助核匹配法赋予权重，并施加共同支撑条件。在给出倾向得分结果之前，需要先进行匹配平衡性检验（见表 5）。根据平衡性检验结果，除了年平均气温（*lntemp*），匹配前处理组和控制组协变量的差异基本上都是显著的；而匹配后除了开放水平（*open*），两组协变量已经基本平衡，即匹配提高了处理组和控制组的可比性。

为保证处理组和控制组的倾向得分有足够多的重合区域，匹配方法还需要满足“共同支撑假设”。如图 2 所示，处理组和控制组均只有少部分不在共同取值范围内（Off support），这意味着匹配时仅会损失少量样本。可以认为，核匹配估计方法得当，匹配后得到 456 个样本，其中处理组 300 个、控制组 156 个。

根据 PSM 结果，整体平均处理效应（ATT）估计值为 -0.278，提示政策冲击存在负效应；对应的 *t* 值为 2.84，高于临界值（2.58），表明 ATT 在 1% 的显著性水平上通过了检验。

表 5 协变量平衡检验结果

	匹配前			匹配后		
	处理组	控制组	差异	处理组	控制组	差异
<i>lnpgdp</i>	10.5980	10.8980	-0.3000***	10.5980	10.7630	-0.1650
<i>lnncv</i>	13.3220	13.4130	-0.0910**	13.3220	13.3530	-0.0310
<i>lndens</i>	7.5366	7.3930	0.1436***	7.5366	7.4500	0.0866
<i>inst</i>	47.6590	45.8910	1.7680***	47.6590	46.1640	1.4950
<i>open</i>	2.8959	3.0728	-0.1769***	2.8959	3.0309	-0.1350*
<i>enre</i>	41.9300	43.5240	-1.5940***	41.9300	42.1820	-0.2520
<i>lnapre</i>	6.9701	6.7627	0.2074*	6.9701	6.9417	0.0284
<i>lntemp</i>	2.8040	2.8744	-0.0704	2.8040	2.7769	0.0271
<i>lnwind</i>	107.9710	106.5400	1.4310**	107.9710	109.2840	-1.3130

注：\*\*\*、\*\*和\*分别表示1%、5%和10%的显著性水平。

数据来源：利用统计软件 StataSE 14 得到 PSM 检验结果。

### （二）DID 回归

#### 1. 平行趋势检验

DID 方法的重要前提是“平行趋势假定”，即处理组和控制组在政策干预前被解释变量（ $\ln PM_{2.5}$ ）的变化应该一致。本文通过加入处理变量（*treat*）与处理前各年

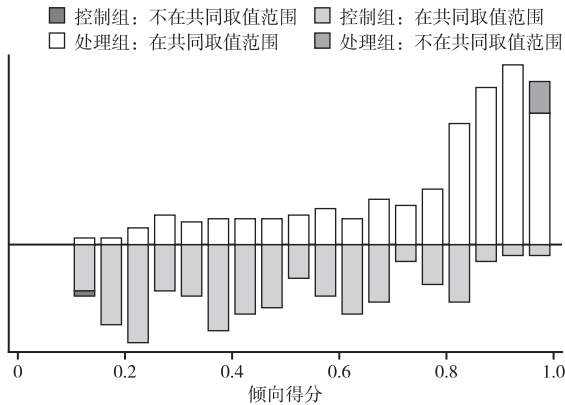


图2 共同取值范围

数据来源：利用统计软件 StataSE 14 得到共同取值范围。

虚拟变量的交互项 ( $Before_i$ ) 进行检验，如果交互项不显著，则满足平行趋势假设。同时，加入处理变量 ( $treat$ ) 与处理后各年虚拟变量的交互项 ( $After_i$ )，考察政策的有效性。

表6列出了平行趋势检验结果。可以看出，《办法》实施前两年(2016、2017年)的交互项 ( $Before_2$ 、 $Before_1$ ) 不显著，验证了平行趋势假设。此外，实施后一年(2019年)在1%的水平上显著，且系数为负，表明《办法》实施后  $PM_{2.5}$  污染明显下降，但是否由《办法》实施引起还需要利用 DID 进一步检验。

表6 平行趋势检验

变量	Coef.	Std. Err.	t	$P >  t $
time	-0.3123	0.0217	-14.4100	0.0000
$Before_2$	-0.0068	0.0268	-0.2600	0.7980
$Before_1$	-0.0283	0.0267	-1.0600	0.2900
Current	-0.1424	0.0275	-5.1700	0.0000
$After_i$	-0.0808	0.0268	-3.0100	0.0000
常数项	4.1192	0.0196	210.1900	0.0000
样本量	456			

数据来源：利用统计软件 StataSE 14 得到平行趋势检验结果。

## 2. 基准回归结果

基于 PSM 给出的样本，利用 DID 方法评估生态补偿的政策效应，得到基准回归结果(见表7)。表7中模型(1)(对应于表中第2列，以此类推)、模型(2)分别为不加入和加入其他控制变量的回归结果。可以看到，加入控制变量前后虚拟变量交

互项 (*DID*) 系数均显著为负, 表明《办法》实施可以显著降低雾霾污染, 验证了假设 1; 同时, 交互项系数变化不大, 这意味着采用 PSM 方法匹配样本后, 政策变量不受控制变量的影响, 进一步验证了前文 PSM 处理的合理性。

表 7 也给出了其它控制变量对空气质量的影响。其中, 经济增长 (*lnpgdp*)、人口密度 (*lndens*)、环境规制 (*enre*)、年降水量 (*lnapre*) 和年平均气温 (*lntemp*) 都对 PM<sub>2.5</sub> 污染有显著的抑制效应; 而交通拥堵 (*lnncv*) 程度的提高显著增加了 PM<sub>2.5</sub> 污染, 这与冯国强等 (2020) 所得结论相符。

表 7 《办法》实施对城市 PM<sub>2.5</sub> 污染影响的 DID 检验

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
<i>DID</i>	-0.0590 *** (2.86)	-0.0630 *** (2.71)	-0.1020 *** (3.04)	-0.9070 *** (2.65)	-0.0960 *** (2.88)	-0.0920 *** (2.70)
<i>lnpgdp</i>	—	0.0890 *** (2.68)	-0.0230 ** (-2.45)	-0.0310 *** (-2.61)	-0.0260 ** (-2.50)	-0.0080 ** (-2.16)
<i>lnncv</i>	—	0.2190 *** (8.23)	0.1760 *** (-5.61)	0.1800 *** (-5.68)	0.1780 *** (-5.66)	0.1800 *** (-5.75)
<i>lndens</i>	—	-0.1000 ** (-2.18)	-0.1150 ** (-2.19)	-0.1130 ** (-2.25)	-0.1190 ** (-2.24)	-0.1070 ** (-2.27)
<i>inst</i>	—	0.0000 (-0.18)	0.0070 *** (3.01)	0.0080 *** (3.06)	0.0080 *** (3.17)	0.0070 *** (2.95)
<i>open</i>	—	0.0010 (0.28)	0.0040 * (1.73)	0.0040 * (1.75)	0.0040 * (1.78)	0.0050 * (1.69)
<i>enre</i>	—	-0.0020 * (-1.80)	-0.0020 * (-1.66)	-0.0020 * (-1.68)	-0.0020 * (-1.66)	-0.0020 * (-1.66)
<i>lnapre</i>	—	-0.7800 *** (-3.53)	-0.0260 *** (-3.75)	-0.0260 *** (-3.73)	-0.0230 *** (-3.67)	-0.0150 *** (-3.44)
<i>lntemp</i>	—	-0.4660 * (-1.66)	-2.1560 *** (-6.03)	-2.1070 *** (-5.86)	-2.1350 *** (-5.96)	-2.2470 *** (-6.26)
<i>lnwind</i>	—	0.0000 (0.00)	-0.0010 *** (-3.99)	-0.0010 *** (-4.12)	-0.0010 *** (-3.95)	-0.0010 *** (-3.81)
<i>time × lnpgdp</i>	—	—	-0.0100 *** (-3.90)	—	—	-0.0360 ** (-2.40)
<i>time × lndens</i>	—	—	—	-0.0120 *** (-3.21)	—	-0.0290 ** (2.07)
<i>time × lninst</i>	—	—	—	—	0.0020 *** (3.68)	0.0020 *** (3.62)
常数项	4.1130 *** (435.32)	—	13.4160 *** (10.98)	13.3860 *** (10.88)	13.3960 *** (10.94)	13.4250 *** (11.03)
<i>R-squared</i>	0.7210	0.7300	0.7520	0.7450	0.7490	0.7600
样本量	456	456	456	456	456	456

注: ①表中\*、\*\*和\*\*\*分别表示在10%、5%和1%的水平上显著; ②括号内的数字为双尾检验*t*值, 下同。  
数据来源: 利用统计软件 StataSE 14 得到 DID 检验结果。

### 3. 引入虚拟变量 *time* 与解释变量的交互项

进一步利用 DID 回归模型对假设 2 进行检验, 结果见表 7 第 4—7 列。其中, 表中模型 (3) 至模型 (5) 是分别在模型 (2) 的基础上加入了虚拟变量 *time* 与经济增长、人口密度和产业结构的交互项, 模型 (6) 则为同时纳入这三个交互项的回归估计结果。研究显示, 前两个交互项均可有效抑制  $PM_{2.5}$  污染排放, 意味着《办法》通过作用于经济增长和城市人口而间接促进了大气污染减排, 部分验证了假设 2。但 *time* 与产业结构的交互项对  $PM_{2.5}$  污染表现为促进效应, 可能的原因在于, 本研究以第二产业占比衡量产业结构, 而研究期内处理组样本的产业结构并未有明显优化, 部分城市某些年份<sup>①</sup>二产占比甚至有升高趋势, 这在一定程度上加剧了大气污染。此外, 对比模型 (2) 与模型 (3) — (6) 可知, 加入解释变量交互项前后, 经济增长 (*lnpgdp*) 系数由正变负, 表明在考虑《办法》的间接减霾效应时, 经济发展事实上有助于改善空气质量; 同时, 产业结构 (*inst*)、开放水平 (*open*) 和风速的系数均由不显著变得显著, 表明考虑解释变量交互项的模型有更好的解释力。

### (三) 稳健性分析

#### 1. 替换空气质量衡量方法

为进一步检验前述结论的可靠性, 本文对被解释变量进行替换。分别选择各市二氧化硫年均浓度 ( $\ln SO_2$ ) 和空气质量指数 ( $\ln AQI$ ) 作为  $PM_{2.5}$  的替代变量; 为便于比较, 将以  $\ln PM_{2.5}$  为被解释变量的模型 (6) 部分回归结果一同列示于表 8。由表 8 可知, 《办法》实施显著抑制了城市  $PM_{2.5}$  污染排放。具体来看, 《办法》实施后  $\ln PM_{2.5}$ 、 $\ln SO_2$  分别下降了 0.0920 和 0.2491, 空气质量指数提高了 0.0703, 且都通过了显著性检验。这表明本文 DID 回归结果是稳健的。

表 8 替换空气质量衡量方法

	$\ln PM_{2.5}$	$\ln SO_2$	$\ln AQI$
DID	-0.0920 *** (-2.70)	-0.2491 ** (-2.19)	0.0703 ** (-2.41)
匹配方法	核匹配	核匹配	核匹配
处理组/控制组	300/156	278/154	298/157
<i>R-squared</i>	0.7600	0.6310	0.6420

数据来源: 利用统计软件 StataSE 14 得到表中回归结果。

#### 2. 采用连续型 DID

到目前为止, 我们采用的都是离散型虚拟变量, 表现在处理变量在处理前后的赋值只有 0 和 1 两种情况。这种方式的不足是无法充分揭示样本城市受政策干预的异质

① 例如, 安徽安庆 2018 年、池州 2019 年, 河南安阳、鹤壁和焦作 2018 年, 湖北黄冈、荆门 2017 年等。

性。对此，可以引入“连续型 DID”，即采用连续变量作为处理变量的代理变量，从而进一步扩展 DID 的外延。借鉴 Li 和 Yang (2021)，以《办法》中设置的补偿单价（见表 2，以  $\ln fine$  表示）替代处理变量  $treat$ ，得到新的交互项  $DID'_{it} = \ln fine_{it} \times time_{it}$ ，并运用 DID 方法进行回归。结果显示，交互项对 PM<sub>2.5</sub> 污染水平的影响系数为 -0.003，且在 1% 的水平上显著，表明根据《办法》对相关城市的处罚（即生态补偿）能够有效抑制雾霾污染排放。再次验证了本文 DID 估计结果的稳健性。

## 六、结论与政策启示

环境政策对空气质量的影响一直是发展经济学研究的热点问题之一。自 2014 年 2 月山东省首个发布省级《环境空气质量生态补偿（暂行）办法》以来，国内掀起了雾霾污染治理生态补偿的热潮。基于当前生态补偿《办法》实施现状与《中国城市统计年鉴》等资料，构造了 2015—2019 年与实施生态补偿办法相匹配的 300 个处理组和 156 个控制组样本数据，借助 PSM-DID 方法考察《办法》实施对山东济南等 62 个地级市 PM<sub>2.5</sub> 污染水平的影响。根据实证结果，《办法》实施对处理组 PM<sub>2.5</sub> 污染有显著的直接减排效应；并通过经济增长和城市人口变化间接降低了 PM<sub>2.5</sub> 污染。

以上研究发现具有重要的政策含义：首先，面对经济保持中高速增长同时促进环境保护不放松的发展新常态，各地高度重视环境政策的调控作用，特别是近年来备受关注的大气污染生态补偿制度，已成为经济环境可持续增长的一项重要举措。除了本研究中提到的七个省份，2020 年以来江苏、宁夏等省份也先后出台了补偿办法，有效改善了地区空气质量。然而，《办法》实施能否真正激发排放主体减霾的内驱力，取决于《办法》的范围和力度（如补偿单价的合理设置），也受制于配套政策的完善度和有效度（如人口政策、产业政策等）。随着减排成本的不断上升，未来补偿标准还需要提高，否则无法刺激污染减排。此外，应把握当前产业结构优化升级和地区间产业承接转移的有利契机，将产业结构作为一条畅通渠道，充分发挥大气污染治理生态补偿机制的间接减霾效应。

本研究尚存在一些局限性，如仅在城市层面考察《办法》实施对地区 PM<sub>2.5</sub> 污染的影响，而未涉及微观排放主体（如企业）的政策响应与决策机制；仅提出《办法》实施对样本城市 PM<sub>2.5</sub> 污染有直接和间接减排效应，但未给出政策效果的实施边界和优化途径。这些都是值得未来进一步研究的课题。

### 参考文献

- 柏明国、史竹生、何志 (2020)：《长江三角洲地区雾霾协同治理仿真研究》，《系统科学学报》第 2 期，第 58—63 页。
- 陈生明 (2019)：《环境规制下中国产业结构与能源消费结构对雾霾污染及空间外溢效应研究》，长沙：湖南大学博士学位论文。

陈诗一、王建民 (2018):《中国城市雾霾治理评价与政策路径研究:以长三角为例》,《中国人口·资源与环境》第10期,第71—80页。

杜雯翠、夏永妹 (2018):《京津冀区域雾霾协同治理措施奏效了吗?——基于双重差分模型的分析》,《当代经济管理》第9期,第53—59页。

冯国强、李菁、武卓尔等 (2020):《道路交通拥堵与城市雾霾污染的关系研究》,《中国人口·资源与环境》第3期,第93—99页。

耿冠楠、肖清扬、郑逸璇等 (2020):《实施〈大气污染防治行动计划〉对中国东部地区PM<sub>2.5</sub>化学成分的影响》,《中国科学:地球科学》第4期,第469—482页。

刘瑞明、赵仁杰 (2015):《国家高新区推动了地区经济发展吗?——基于双重差分方法的验证》,《管理世界》第8期,第30—38页。

罗艳、陈平 (2020):《环境规制与污染产业转移的空间交互溢出效应研究——基于空间联立方程的实证分析》,《贵州社会科学》第7期,第145—153页。

申伟宁、柴泽阳、戴娟娟 (2020):《京津冀城市群环境规制竞争对雾霾污染的影响》,《经济与管理》第4期,第15—23页。

石敏俊、李元杰、张晓玲等 (2017):《基于环境承载力的京津冀雾霾治理政策效果评估》,《中国人口·资源与环境》第9期,第66—75页。

万海远、李实 (2013):《户籍歧视对城乡收入差距的影响》,《经济研究》第9期,第43—55页。

万庆 (2017):《地方政府竞争、环境规制与中国城市规模分布研究》,武汉:武汉大学博士学位论文。

颜俨、姚柳杨、徐涛等 (2018):《空气污染治理的公众偏好及政策评价——以西安市雾霾治理为例》,《干旱区资源与环境》第4期,第19—25页。

袁韵、徐戈、陈晓红等 (2020):《城市交通拥堵与空气污染的交互影响机制研究——基于滴滴出行的大数据分析》,《管理科学学报》第2期,第54—73页。

张俊 (2017):《高铁建设与县域经济发展——基于卫星灯光数据的研究》,《经济学(季刊)》第4期,第1533—1562页。

张立文、程东坡、许玲丽 (2019):《新时代背景下环境保护政策对雾霾防治的效应分析——基于PM<sub>2.5</sub>浓度变化视角的实证研究》,《上海财经大学学报》第2期,第17—29页。

Chen, Z., D. Chen and C. Zhao, et al. (2020), "Influence of Meteorological Conditions on PM<sub>2.5</sub> Concentrations across China: A Review of Methodology and Mechanism", *Environmental International*, 139, 105558.

Cui, L., H. Duan and J. Mo, et al. (2021), "Ecological Compensation in Air Pollution Governance: China's Efforts, Challenges, and Potential Solutions", *International Review of Financial Analysis*, 74, 101701.

Fan, F. and X. Zhang (2021), "Transformation Effect of Resource-based Cities Based on PSM-DID Model: An Empirical Analysis from China", *Environmental Impact Assessment Review*, 91, 106648.

Li, W. and Y. Yang (2021), "Can Environmental Centralization Help Reduce Pollution? Evidence from an Administrative Reform in China", *Journal of Cleaner Production*, 314, 127972.

Liu, Y., D. Fang and B. Chen (2021), "Interregional Spillover Effect of PM<sub>2.5</sub> Emissions on

Northeast China through the National Supply Chain”, *Applied Energy*, 303, 117670.

Moser, P. and A. Voena (2012), “Compulsory Licensing: Evidence from the Trading with the Enemy Act”, *American Economic Review*, 102 (1), pp. 396 – 427.

Perera, F., A. Berberian and D. Cooley, et al. (2021), “Potential Health Benefits of Sustained Air Quality Improvements in New York City: A Simulation Based on Air Pollution Levels During the COVID – 19 Shutdown”, *Environmental Research*, 193, 110555.

Qi, M., L. Wang and S. Ma, et al. (2021), “Evaluation of PM<sub>2.5</sub> Fluxes in the ‘2 + 26’ Cities: Transport Pathways and Intercity Contributions”, *Atmospheric Pollution Research*, 12 (5), 101048.

Qi, S., C. Zhou and K. Li, et al. (2021), “The Impact of a Carbon Trading Pilot Policy on the Low-carbon International Competitiveness of Industry in China: An Empirical Analysis Based on a DDD Model”, *Journal of Cleaner Production*, 281, 125361.

Shi, W., J. Bi and R. Liu, et al. (2021), “Decrease in the Chronic Health Effects from PM<sub>2.5</sub> during the 13<sup>th</sup> Five-Year Plan in China: Impacts of Air Pollution Control Policies”, *Journal of Cleaner Production*, 317, 128433.

Xie, D. and Q. Sun (2020), “Assessing the Impact of FDI on PM<sub>2.5</sub> Concentrations: A Nonlinear Panel Data Analysis for Emerging Economies”, *Environmental Impact Assessment Review*, 80, 106314.

Xu, G. X. Ren and K. Xiong, et al. (2020), “Analysis of the Driving Factors of PM<sub>2.5</sub> Concentration in the Air: A Case Study of the Yangtze River Delta, China”, *Ecological Indicators*, 110, 105889.

Xue, W., J. Zhang and C. Zhong, et al. (2021), “Spatiotemporal PM<sub>2.5</sub> Variations and Its Response to the Industrial Structure from 2000 to 2018 in the Beijing-Tianjin-Hebei Region”, *Journal of Cleaner Production*, 279, 123742.

Yamagishi, A. (2019), “Transboundary Pollution, Tax Competition and the Efficiency of Uncoordinated Environmental Regulation”, *Canadian Journal of Economics*, 52 (3), pp. 1165 – 1194.

Zhang, M., X. Liu and Y. Ding, et al. (2019a), “How does Environmental Regulation Affect Haze Pollution Governance? – An Empirical Test Based on Chinese Provincial Panel Data”, *Science of the Total Environment*, 695, 133905.

Zhang, S., D. Li and S. Ge, et al. (2021), “Rapid Sulfate Formation from Synergetic Oxidation of SO<sub>2</sub> by O<sub>3</sub> and NO<sub>2</sub> under Ammonia-rich Conditions: Implications for the Explosive Growth of Atmospheric PM<sub>2.5</sub> during Haze Events in China”, *Science of the Total Environment*, 72, 144897.

Zhang, Y., C. Shuai and B. Bian, et al. (2019b), “Socioeconomic Factors of PM<sub>2.5</sub> Concentrations in 152 Chinese Cities: Decomposition Analysis Using LMDI”, *Journal of Cleaner Production*, 218, pp. 96 – 107.

## Does Ecological Compensation Reduce PM<sub>2.5</sub> Pollution? A Survey Based on PSM-DID Analysis

WANG Su-feng<sup>1</sup>, FANG Hui<sup>1</sup>, JIAO Jian-ling<sup>2</sup>

(1. School of Economy and Management, Anhui Jianzhu University, Hefei 230022, China;

(2. School of Management, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** In recent years, ecological compensation for air pollution control has



gradually become an important measure for local governments to reduce  $PM_{2.5}$  pollution. In theory, the implementation of ecological compensation can promote local pollution reduction and improve air quality. Focused on the policy shock of the ecological compensation for ambient air quality issued by Shandong, Hubei, Henan and Anhui provinces in 2018 (and before), this study takes the environmental and economic data of 97 prefecture level cities (provincial cities) in seven provinces including Shandong from 2015 to 2019 as study sample. With the help of Propensity Score Matching and Difference in Difference (PSM-DID), it is found that the ecological compensation can effectively reduce the  $PM_{2.5}$  pollution; according to the regression results of the interaction between dummy variables and explanatory variables, the ecological compensation has a significant indirect haze reduction effect by acting on economic growth and urban population. The continuous DID model was further constructed to verify the negative effect of ecological compensation standard on  $PM_{2.5}$  pollution. Based on the empirical results, continuously promoting the ecological compensation for air pollution control, optimizing the setting of compensation standards, and giving full play to the synergistic haze reduction effect of supporting measures such as economic growth, population policy and industrial policy are important guarantees for improving the current ecological compensation mechanism for air pollution control and promoting the sustainable development of environment and economy.

**Key Words:**  $PM_{2.5}$ ; pollution control; ecological compensation; PSM; DID

责任编辑: 周枕戈