

环境监管精准化的减污降碳效应研究

——基于污染源在线监测系统的准自然实验

程洪飞¹, 李豫新¹, 赵晶²

(1. 石河子大学 经济与管理学院, 新疆 石河子 832003;

2. 南京航空航天大学 经济与管理学院, 南京 211106)

摘要:以污染源在线监测系统作为环境监管精准化的典型工程,构建时变双重差分模型并利用中国工业企业相关数据实证检验环境监管精准化的减污降碳效应。研究发现:污染源在线监测显著降低了企业二氧化硫与二氧化碳排放,具有明显的减污降碳效应;机制分析表明,污染源在线监测不仅通过强化企业源头管控与提升末端治污能力驱动其减污降碳,而且能倒逼企业绿色技术创新“量质齐升”进而促进企业可持续减排;异质性分析表明,污染源在线监测的减污降碳效应因区域政策、减排约束、企业规模而具有明显的异质性和非对称性特征。

关键词:环境监管;污染源在线监测;精准治污;减污降碳;信息技术

DOI:10.13956/j.ss.1001-8409.2025.09.10

中图分类号:X322

文献标识码:A

文章编号:1001-8409(2025)09-0073-08

Effect of Pollution and Carbon Reduction Under Precise Environmental Supervision: Quasi-natural Experiments Based on Online Monitoring System of Pollution Source

CHENG Hong-fei¹, LI Yu-xin¹, ZHAO Jing²

(1. School of Economics and Management, Shihezi University, Shihezi 832003;

2. College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106)

Abstract: Taking the online monitoring system of pollution sources as a typical project of precise environmental supervision, this paper constructs a time-varying difference-in-difference model and empirically tests the effect of precise environmental supervision on pollution and carbon reduction by using the data of Chinese industrial enterprises. It finds that the online monitoring system significantly reduces the sulfur dioxide and carbon dioxide emissions of enterprises, and has obvious pollution and carbon reduction effects. Mechanism analysis shows that the online monitoring system can not only drive industrial enterprises to reduce emissions through source control and terminal treatment, but also force industrial enterprises to carry out green technology innovation. Heterogeneity analysis shows that the reduction effect of the online monitoring system has obvious heterogeneity and asymmetry due to regional policies, emission reduction constraints, and enterprise scale.

Key words: environmental regulation; online monitoring system of pollution sources; precise pollution control; pollution and carbon reduction; information technology

引言

“十四五”及未来一段时期中国生态文明建设将由重点关注“减污”转向“降碳”为重点、协同推进减污降碳^[1]。但环境污染具有隐蔽性且难以量化评估,同时传统的环境监管方式容易导致“鞭长莫及”问题^[2],严重影响了环境治理效能。因此,推进精准治污是提升环境治理能力与持续推进生态文明建设的重要举措。信息技术变革为政府环境监管精准化提供了技术支撑,例如打破传统地理空间的边界、极大弱化物理时空对信息传播

的限制^[3]。为了及时采集污染物排放信息、加强执法监督、促进污染治理,原国家环境保护总局陆续发布了国家重点监控企业名单,并形成了“重点污染源-环境监测中心”的污染源在线监测系统,旨在利用信息技术实时监测重点污染源的排放情况。污染源在线监测系统能否推动企业减污降碳?若能,其发挥作用的内在机制是什么?回答上述问题对深化理解信息技术赋能政府环境治理、持续推进减污降碳具有重要意义。

信息技术革命引领社会形态由工业社会向信息社

收稿日期:2024-09-16

基金项目:国家社会科学基金项目(22AJY005);新疆生产建设兵团研究生科研创新项目(2023)

作者简介:程洪飞(1990—),男,河北内丘人,博士研究生,研究方向为区域经济与能源环境经济;李豫新(1962—),男,河南唐河人,教授、博士生导师,研究方向为区域经济与产业发展(通讯作者);赵晶(1994—),女,河南商丘人,博士研究生,研究方向为能源政策与管理。

会转变,不同的社会形态必定带来不同的政府治理逻辑。从信息经济学的角度看,政府环境治理低效的主要原因在于信息不对称,而信息技术的核心功能即可解决信息不对称问题。陈强远等研究发现信息技术与制度环境的有效契合有助于提高政府治理效率^[4]。信息技术赋能政府环境治理有助于弱化因科层制运作的结构性特征而产生的信息不对称问题,帮助政府实现公共治理精准化^[5]。Shahbaz等研究表明信息技术提升了政府环境治理能力,原因在于信息通信技术强化了信息的流通与共享^[6]。不仅如此,信息技术推动政府开放公共数据、加强环境法规进而提升了环境治理效能^[7,8]。从资源基础观的角度看,传统的环境监管以人力物力等资源为基础,地理距离容易导致监管“鞭长莫及”进而降低环境治理效率^[2]。Greenstone等研究发现空气污染自动监测系统突破了传统的环境监管模式,有效打击了地方政府在环境治理领域的作弊行为^[9]。信息技术打破了环境监管的时空限制,降低了对传统资源的依赖程度和监管成本,进而提升了政府环境监管能力^[10]。金浩和陈诗一的研究表明,信息技术与政府环境监管相结合能够弱化因地理距离产生的衰减效应^[3]。

企业污染排放具有明显的负外部性,但企业并未承担由此产生的社会成本^[11]。因此,政府的环境规制干预是有必要的。关于环境规制有效性的研究,虽然部分文献认为环境规制可能会影响经济产出,但学术界认为环境规制能促进生产技术进步、倒逼企业绿色技术创新、提高绿色全要素生产率等^[12-14],进而推动污染减排。例如韩超等研究发现“十一五”时期污染物总量控制计划显著降低了二氧化硫排放^[15]。关于环境规制与减污降碳的研究结论表明,能源结构调整、绿色技术创新是环境规制推动减污降碳的关键过程^[16]。程洪飞等研究表明能源转型过程中的环境规制发挥了绿色创新补偿效应,实现了降碳与增长兼得^[17]。信息技术赋能环境规制方面,Usman等研究表明信息通信技术提升了环境政策的严格性,有助于实现可持续发展目标^[18]。基于信息技术构建的生态环境监测网络提升了环境执法效率,进而促进了企业绿色技术创新与污染减排^[19]。Zou等研究发现信息技术赋能政府治理显著减少了污染排放并降低了二氧化碳排放强度^[20]。污染源在线监测兼具信息技术与规制特征,其本身属于环境规制范畴,是环境治理、污染信息采集与统计的重要手段。但学术界鲜有关注污染源在线监测对企业减污降碳的影响,虽然金浩和陈诗一分析了污染源在线监测如何破除地理距离障碍对政府监管的影响^[3],但缺乏对政府监管精准化如何推动减污降碳的深入分析,这为本文研究提供了可拓展的空间。

本文的边际贡献体现在四个方面:第一,以污染源在线监测系统为典型工程,考察了政府环境监管精准化对企业减污降碳的影响,为评估信息技术赋能政府环境治理提供了现实依据。第二,基于污染源在线监测系统形成的外生冲击,运用时变双重差分模型等方法更加准确地识别环境监管精准化的政策效应,从强化企业治污

行为与倒逼企业绿色技术创新的视角深入分析作用机制,补充了环境监管精准化作用于微观企业层面的理论研究。第三,基于区域政策、减排约束与企业相对规模考察污染源在线监测的异质性影响,拓展了环境监管精准化的多维有效性检验,为有为政府推进生态文明建设提供更全面的经验证据。

1 理论分析与研究假设

非对称信息是导致环境治理棘手的主要因素之一,降低信息不对称有助于重塑政府层级间、政府与企业间的博弈关系,提高政府环境决策与政策执行的有效性^[2]。原国家环境保护总局要求重点监测名单中的企业安装自动监测设备,并利用信息技术实现污染排放信息在各级环保部门间实时互联互通,降低了中央政府-地方政府-企业两两之间信息不对称,使得企业的污染行为由“隐性”转为“显性”,其污染排放信息暴露于各级环保部门的监测系统。第一,污染源在线监测系统降低了上级环保部门与地方环保部门之间的信息不对称程度,“谁来监管监管者”的问题得到有效解决,提高了地方政府与上级部门环保要求的执行一致性,进而降低了污染企业与地方政府博弈时的议价能力,企业不得不积极落实减排责任。第二,在线实时监测打破了传统的时空边界,弱化了地理距离对环境监管的影响,减少环境监管盲区并提高监测的精度与效率,“鞭长莫及”的问题得到极大缓解,有助于环保部门在更大范围内、更加精准地监测企业的污染排放行为^[3]。第三,企业排污行为不仅受地方政府监管而且受上级环保部门实时监测,降低了企业寻租的可能性,“徇私舞弊”的现象得到有效抑制,迫使企业在现行标准与责任约束下强化其治污行为。

1.1 强化企业减排行为

命令型环境规制政策引致的“硬约束”将对市场主体的污染行为产生影响。污染源在线监测系统要求将重点监控企业作为执法监督的重点,并根据现场执法检查对后的监测数据征收排污费。重点监控企业被要求率先落实减排责任,若在减排目标约束内增加排污将支付相应的排污费;若在减排目标外超额排放,不仅面临相应的排污费还要承担高额的违规成本。企业作为市场微观主体,其行为决策遵循利润最大化原则。因此,在减排约束下污染源在线监测将强化企业的治污行为。从生产流程上区分,企业的治污行为包括源头管控与末端治理。源头管控影响工业污染物与二氧化碳产生,而末端治理环节的处理设备影响污染物排放^[21]。第一,面对环境监管精准化的“硬约束”,企业最直接快速且有效的方式即末端治理,企业通过购买安装废气处理设备、去除二氧化硫设备、污水处理设备等,提升企业污染物处理能力进而降低污染排放。末端治理的方式只能对现有的污染物进行处理而不能影响污染物的产生,因此对碳减排的影响较小。第二,环境监管精准化的“硬约束”将驱动企业强化源头管控,直接降低污染物与二氧化碳的产生量。例如通过减产、控制化石能源消耗、调整能源消耗结构、提高能源利用效率、引进清洁生产工艺等方式遏制污染物与二氧化碳产生,从源头上促

进减污降碳。基于此,本文提出假设:

H1:污染源在线监测促进了企业减污降碳。

H2:污染源在线监测驱动企业源头管控与末端治理进而促进减污降碳。

1.2 倒逼企业绿色技术创新

绿色技术创新存在技术和环境双重外部性^[22],这导致市场主体投资绿色技术创新的主观能动性不足。因此,外部干预成为绿色技术创新的重要驱动力^[23]。污染源在线监测增加了企业污染排放的边际成本,高额的排污费或额外的违规成本将倒逼企业寻求可持续的发展方式。首先,污染物的末端治理需要资金的长期稳定投入,产生巨额的设备投入与维护成本,且这部分成本不能产生直接的经济收益。从长期来看,末端治理的方式不具有可持续性。其次,源头管控仅依靠限制能源消耗、调整能耗结构等方式虽能较好地控制污染物及二氧化碳产生,但可能干扰企业正常的生产活动。因此,企业需要采用更加可持续的方式落实减排责任,而绿色技术创新的好处是提高能源利用效率、降低能耗强度,这是从源头上推动减污降碳的关键。最后,在外部压力的影响下企业为了向外界传递环境保护等绿色信号,维持或增强企业声誉,企业会积极开展绿色技术创新^[24],以便在高压的环境规制下获得更多的市场支持。另外,国家重点监控企业名单实施方案提出各地在安排污染源治理项目、先进适用技术示范项目和污染治理专项资金计划时,要优先考虑国家重点监控企业。在严格约束企业污染排放的同时,政府通过治理项目、技术引进与资金支持等方式激励企业通过技术变革实现可持续发展。基于此,本文提出假设:

H3:污染源在线监测通过倒逼企业绿色技术创新推动减污降碳。

2 研究设计

2.1 模型设定

由于受政策冲击的时间和个体在不断变化,本文采用时变双重差分模型(Time-varying DID)进行实证检验。具体模型设定如下:

$$Y_{it} = \alpha_1 + \beta_1 \text{Online}_{it} + \gamma_1 X_{it} + \lambda_i + \mu_c + \theta_t + \delta_{it} \quad (1)$$

式(1)中, i 和 t 分别表示企业和年份, Y 分别表示 LnSO_2 、 LnCO_2 ; Online_{it} 表示企业 i 在 t 年是否被纳入污染源在线监测系统,若被纳入该系统则企业 i 在 t 年及之后被赋值1,否则赋值0。 X 表示一系列控制变量, λ_i 、 μ_c 和 θ_t 分别表示企业、行业和年份固定效应, δ_{it} 表示随机误差项。

2.2 数据样本与处理

本文以2006—2013年中国工业企业为研究样本,主要涉及中国工业企业数据库、工业企业污染数据库和中国企业创新专利数据库。本文借鉴Brandt等人的方法进行数据匹配与识别^[25],在此基础上对数据做如下处理:(1)剔除异常值样本,如二氧化硫排放小于0、工业中间投入合计小于0、负债合计小于0等;剔除年末从业人数小于8人的企业;剔除主营业务收入小于500万元的企业。(2)剔除废气排放为0且在样本期内二氧化硫

排放之和为0的企业,目的是仅保留废气排放企业。(3)为了消除通货膨胀的影响,本文以2001年为基期,采用生产者价格指数(PPI)和消费者价格指数(CPI)对企业财务指标及经济发展水平等货币型变量进行平减处理。(4)剔除关键变量缺失值较多的企业。为了保证样本的连续性,剔除年份缺失超过两年的样本。最终得到20608家企业、时间区间2006—2013年共164847个观测值的数据集。

2.3 变量定义与数据描述

2.3.1 被解释变量

二氧化硫排放:“十一五”时期废气总量控制主要以二氧化硫为主,本文以 SO_2 为工业企业废气排放的代理变量,具体以企业 SO_2 排放总量的自然对数表示(LnSO_2)。

二氧化碳排放:限于数据可得性,本文借鉴孙博文和郑世林的研究^[1],基于碳排放系数法以企业煤炭、石油和天然气消耗计算企业碳排放,并取自然对数表示(LnCO_2)。根据企业能源消耗及《省级温室气体清单编制指南(试行)》《企业温室气体排放核算方法与报告指南》、IPCC碳排放核算指南,按照以下方法计算:

$$\text{CO}_2 = \sum_{n=1}^3 (\text{AD}_n \times \text{EF}_n) \quad (2)$$

$$\text{AD}_n = \text{FC}_n \times \text{NCV}_n \quad (3)$$

$$\text{EF}_n = \text{CC}_n \times \text{OF}_n \times \frac{44}{12} \quad (4)$$

式(2)至式(4)中, n 表示能源种类; AD 表示化石燃料活动数据; EF 表示化石燃料燃烧的排放因子; FC 表示能源消耗量,单位为吨或万立方米; NCV 表示低位发热量; CC 表示单位热值含碳量; OF 表示碳氧化率。

2.3.2 核心解释变量

污染源在线监测系统:企业是否被纳入污染源在线监测系统(Online),若某个企业在某年被纳入监测系统,则该企业在该年及之后年份赋值Online为1,否则Online为0。关于被纳入污染源在线监测企业的识别:根据原国家环境保护总局分别在2007年、2009年、2011年、2012年和2013年发布的国家重点监控企业名单目录,以及部分省份根据自身情况额外补充的企业名录,以“企业名称-六位数行政区划代码”与样本数据集当年及前后两年进行模糊匹配,根据匹配得分对结果进行识别并手工整理,按照逐年递增的方式最终得到2007年758家、2009年1125家、2010年1256家、2011年1488家、2012年1635家和2013年1783家企业。

2.3.3 机制变量

源头管控。一是减产机制,企业面临监管精准化的压力时可能通过减产来落实减排责任,本文以主营业务收入的自然对数作为企业产值的代理变量(Lnzy)进行检验。二是限制能耗机制。最直接的源头管控方式即控制能源消耗。因此,本文以企业能源消耗为源头管控的机制变量,并区分能源消耗总量(fuel)、煤炭消耗总量(coal)、燃料煤(rcoal)、原料煤(ycoal)与能源消耗结构(ecs),其中能源消耗结构以煤炭消耗总量占能源消耗总量(能源消耗总量=煤炭消耗总量+燃料油消耗总量

+ 天然气消耗总量)的比重表示。各类能源均被折合为标准煤进行计算。

末端治理。在政府治理的约束下企业可能通过增加治污设备数量以落实减排责任。本文以除硫设备安装数量(treatment)、除硫能力(descap)与二氧化硫去除量(de-so₂)为企业末端治理的代理变量,均取自然对数表示。

绿色技术创新。在政府治理的约束下,企业可能转向绿色技术创新。基于量与质的结构化视角,分别以绿色专利申请总量(gtotal)、绿色发明专利申请量(pgt)、绿色实用新型专利申请量(rgt)并取自然对数表示绿色技术创新。需要说明,本文以绿色专利申请总量表示绿色技术创新的“量”;绿色发明专利相对于绿色实用新型专利的难度更大、技术含量更高,因此以绿色发明专利申

请量表示绿色技术创新的“质”。本文采用绿色专利申请量衡量企业绿色技术创新,原因在于:专利授权可能受到行政审批等外部因素的干扰,而专利申请数量则更直接地体现了企业绿色技术创新的策略选择和创新动态。

2.3.4 控制变量

借鉴金浩和陈诗一的研究^[3],控制如下变量:企业规模(scale),以总资产的自然对数表示;企业年龄(lnage),以统计年份与企业成立年份之差的自然对数表示;企业负债率(debtr),以企业负债合计占总资产的比重表示;资本劳动比(lnklratio),以固定资产与年末平均从业人数比值的自然对数表示;产出劳动比(lnplratio),以工业总产值与从业人数比值的自然对数表示。表1汇报了主要变量的描述性统计。

表1 主要变量的描述性统计

变量类别	变量名称	英文缩写	样本量	均值	标准误	最小值	最大值
被解释变量	二氧化硫排放	LnSO ₂	150355	9.422	3.041	0.000	17.735
	二氧化碳排放	LnCO ₂	143785	7.727	3.390	0.000	22.339
核心解释变量	污染源在线监测	Online	164847	0.053	0.225	0.000	1.000
主要机制变量	企业产值	Lnzy	157204	11.693	1.461	3.917	19.045
	能源消耗总量	fuel	149663	6.977	3.211	0.000	18.944
	除硫设备数量	treatment	68809	0.559	0.625	0.000	5.130
	绿色专利总量	gtotal	164705	0.018	0.166	0.000	4.927
控制变量	企业规模	scale	126513	11.765	1.568	6.347	19.277
	企业年龄	Lnage	163827	2.366	0.718	0.000	7.605
	企业负债率	debtr	126466	0.510	0.255	0.000	4.862
	资本劳动比	Lnklratio	125029	4.443	1.279	0.002	13.632
	产出劳动比	Lnplratio	125344	5.921	1.101	0.002	14.743

3 实证分析

3.1 基准回归

表2报告了污染源在线监测对企业减污降碳的回归结果,所有回归均控制了时间固定效应、企业固定和行业固定效应。由列(2)可知,Online对二氧化硫排放(LnSO₂)的影响为-0.194,回归结果在1%的显著性水平下显著;由列(4)可知,Online对二氧化碳排放(LnCO₂)的影响为-0.264,回归结果在1%的显著性水平下显著。上述结果表明,污染源在线监测显著降低了企业二氧化硫与二氧化碳排放,促进了减污降碳协同治理。验证了H1。

表2 基准回归结果

变量	LnSO ₂		LnCO ₂	
	(1)	(2)	(3)	(4)
Online	-0.216*** (0.049)	-0.194*** (0.051)	-0.280*** (0.094)	-0.264*** (0.098)
控制变量	No	Yes	No	Yes
固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes
N	134556	114929	126799	108463
Adj-R ²	0.758	0.752	0.674	0.649

注:***、**、*分别表示1%、5%、10%的显著性水平;括号内为聚类到企业的稳健标准误。固定效应包括年份固定、企业固定、行业固定。下表同

3.2 平行趋势假设检验

本文将平行趋势检验模型设定如下:

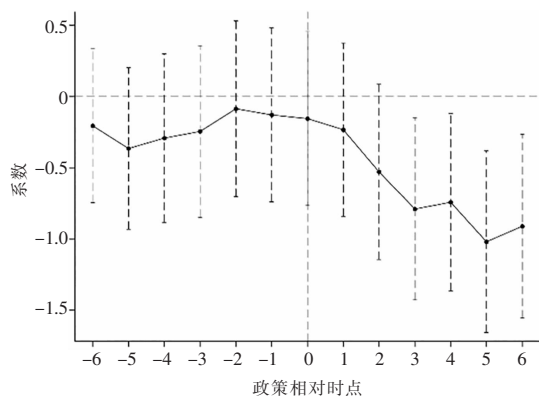
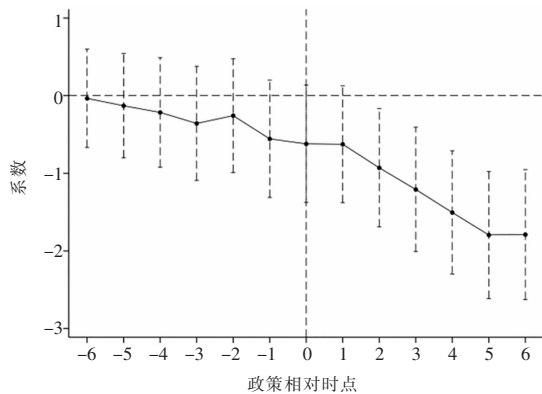
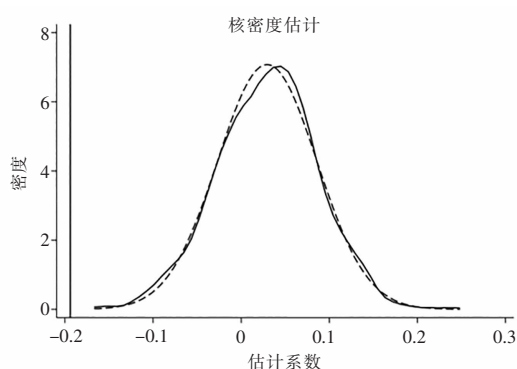
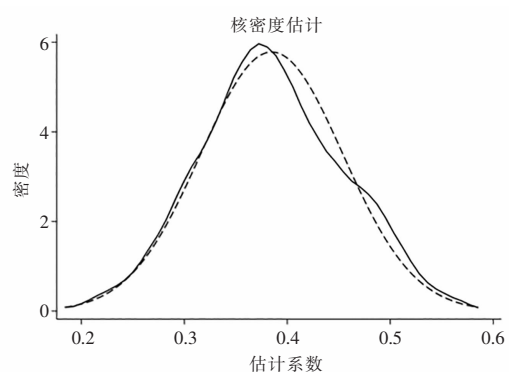
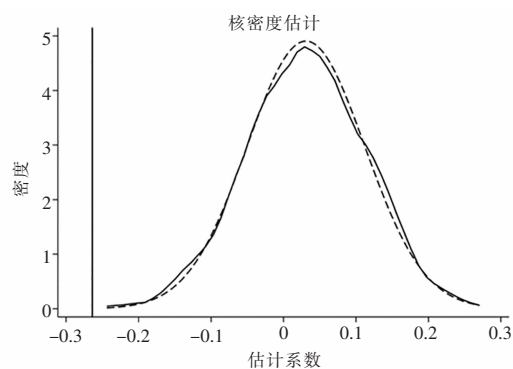
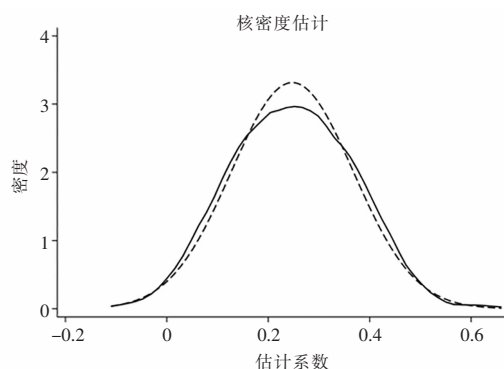
$$Y_{it} = \alpha + \sum_{k=-6}^6 \beta_k D_{it}^k + \gamma X_{it} + \lambda_i + \mu_c + \theta_t + \delta_{it} \quad (5)$$

式(5)中,Y分别表示二氧化硫排放(LnSO₂)与二氧化碳排放(LnCO₂);D_{it}^k表示企业i被纳入全国重点监控企业名单前(后)k年,其他变量与式(1)相同。

本文以被纳入污染源在线监测系统当年为政策冲击年份(第“0”期),并以此计算相对政策年份。以相对时点前第七年(-7)为基期考察政策实施前后6年的变化。图1与图2显示,污染源在线监测系统实施前的估计系数均不显著,满足平行趋势假设。从动态效应看,污染源在线监测系统的实施对企业二氧化硫与二氧化碳排放的抑制作用逐渐增大且显著,具有明显的动态可持续特征。

3.3 安慰剂检验

为了排除其他可能的不可观测因素影响,本文进行安慰剂检验。借鉴曹清峰的思路分别采用随机样本和随机时间两种方法^[26]。由图3和图4可知,随机样本和随机时间的估计系数基本满足正态分布,而且基准回归所得真实的样本估计值(图3中黑色垂直实线所示,-0.194)独立于500次随机抽样的回归结果。表明其他随机性因素并未产生明显影响,证明基准回归结果是稳健的。同理可得,图5和图6的结果表明基准回归中关于污染源在线监测与企业二氧化碳排放的估计结果是稳健的(图5中黑色垂直实线的值为-0.264)。

图1 平行趋势假设检验(LnSO₂)图2 平行趋势假设检验(LnCO₂)图3 随机样本(LnSO₂)图4 随机时间(LnSO₂)图5 随机样本(LnCO₂)图6 随机时间(LnCO₂)

3.4 其他稳健性检验

3.4.1 稳健性检验Ⅰ:缓解内生性

借鉴宋弘等的研究^[27],采用控制省份特征因素的方式缓解因选择性产生的内生性问题,特征因素包括“十一五”时期末各省减排目标排名(rank_2010)、滞后一期排污费征收额(ptfei)。具体地,在回归中加入这些因素与时间线性趋势的交互项。由表3列(1)与列(2)可知,污染源在线监测降低了二氧化硫和二氧化碳排放。证明结果依然稳健。

3.4.2 稳健性检验Ⅱ:逐年倾向得分匹配

为了排除样本自选择偏误,本文以控制变量为样本匹配的识别特征进行卡尺内1:4的K近邻匹配。对最

终匹配样本进行多期双重差分检验(PSM-DID),表3列(3)与列(4)显示污染源在线监测降低了二氧化硫与二氧化碳排放。证明基准回归结果具有稳健性。

3.4.3 稳健性检验Ⅲ:控制其他政策影响

以2007年排污权交易试点为政策冲击,将政策虚拟变量(Pilot)纳入基准回归。表3列(5)与列(6)的回归结果显示,控制排污权交易试点政策之后,污染源在线监测对企业二氧化硫与二氧化碳排放的影响与基准回归结果基本保持一致。证明基准回归结果稳健。

4 机制检验

为了避免因果机制的内生性问题,本文采用一步法进行机制检验^[28]。模型构建如下:

表 3 其他稳健性检验结果

变量	缓解内生性		PSM - DID		控制其他政策	
	LnSO ₂	LnCO ₂	LnSO ₂	LnCO ₂	LnSO ₂	LnCO ₂
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Online	-0.191 *** (0.051)	-0.259 *** (0.098)	-0.201 *** (0.052)	-0.287 *** (0.100)	-0.193 *** (0.051)	-0.263 *** (0.098)
Pilot					-0.214 *** (0.035)	-0.219 *** (0.046)
省份特征	Yes	Yes	No	No	No	No
控制变量	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
N	114929	108463	111405	105208	114929	108463
Adj - R ²	0.752	0.650	0.751	0.648	0.752	0.650

$$M_{it} = \alpha_2 + \beta_2 Online_{it} + \gamma_2 X_{it} + \lambda_i + \mu_c + \theta_t + \delta_{it} \quad (6)$$

式(6)中,M 表示一系列机制变量;其他内容的含义与式(1)相同。

4.1 强化企业减排行为

4.1.1 强化源头管控

由表 4 列(1)可知,污染源在线监测对企业产值的影响为-0.099,且在 1% 的显著性水平下显著。这表明环境监管精准化推动重点污染企业通过减产来落实减排责任。由表 4 列(2)可知,污染源在线监测对企业能源消耗总量的影响为-0.224;列(3)、列(4)显示污染源在线监测对企业煤炭消耗、燃料煤消耗的影响分别为-0.279、-0.281,结果均在 1% 的显著性水平下显著。上述结果说明,污染源在线监测驱动企业通过源头管控来限制能源消耗,减少了煤炭尤其是燃料煤消耗。从能源消耗结构看,列(5)显示污染源在线监测降低了煤炭在能源消耗中的比重。由此可知,根据二氧化硫与二氧化碳同根同源的特征,企业通过减产机制、限制能耗机制推动了减污降碳。环境监管精准化使得企业的污染行为由“隐性”转为“显性”,进而驱动企业通过源头管控来落实减排责任。上述结论验证了 H2。

表 4 强化源头管控检验结果

变量	减产机制		限制能耗机制		
	企业产值	能源消耗总量	煤炭消耗总量	燃料煤	能源消耗结构
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Online	-0.099 *** (0.010)	-0.224 *** (0.074)	-0.279 *** (0.079)	-0.281 *** (0.099)	-0.012 * (0.007)
控制变量	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
N	124173	113084	101308	95328	101308
Adj - R ²	0.951	0.701	0.724	0.701	0.657

4.1.2 加强末端治理

表 5 列(1)显示,污染源在线监测促使企业安装除硫设备,增长了约 6.9%。列(2)与列(3)的结果表明污染源在线监测显著提升了企业除硫能力和二氧化硫去除量,且均在 1% 的显著性水平下显著。上述结果说明污染源在线监测促使企业强化末端治理,通过安装除硫设备提升二氧化硫减排能力。结果验证了 H2。面对环

境监管精准化的“硬约束”,企业最直接快速且有效的方式即末端治理,通过安装废气处理设备提升企业污染物处理能力进而降低污染排放。

表 5 加强末端治理检验结果

变量	除硫设备安装 (1)	除硫能力 (2)	二氧化硫去除量 (3)
Online	0.069 *** (0.017)	0.316 *** (0.063)	0.514 *** (0.108)
控制变量	Yes	Yes	Yes
固定效应	Yes	Yes	Yes
N	50882	48668	53675
Adj - R ²	0.829	0.831	0.868

4.2 倒逼企业绿色技术创新

表 6 列(1)的回归结果表明,污染源在线监测提升了企业绿色技术创新总量,影响大小为 0.018 且在 1% 的显著性水平下显著。由列(2)与列(3)可知,污染源在线监测分别促进了绿色发明专利与绿色实用新型专利,均在 1% 的显著性水平下显著。这说明污染源在线监测能够倒逼企业绿色技术创新“量质齐升”,加速企业绿色转型。污染源在线监测是信息技术赋能政府环境监管精准化的具体表现,其“强约束”属性将倒逼企业绿色技术变革,进而形成可持续的减排能力。上述结论验证了 H3,同时验证了环境规制的有效性 & 波特效应的存在性。

表 6 倒逼企业绿色技术创新检验结果

变量	绿色技术创新总量 (1)	绿色发明 (2)	绿色实用新型 (3)
Online	0.018 *** (0.004)	0.008 *** (0.003)	0.013 *** (0.003)
控制变量	Yes	Yes	Yes
固定效应	Yes	Yes	Yes
N	124924	124924	124924
Adj - R ²	0.436	0.449	0.381

5 异质性分析

5.1 区域政策异质性

地区间差别化的政策供给可能影响污染源在线监测的减污降碳效应。本文根据 1998 年国务院相关文件(国函[1998]5 号)划分的酸雨控制区和二氧化硫污染控制区(简称“两控区”),将样本分为两控区(赋值 1)、

非两控区(赋值 0),然后进行分类回归。由表 7 列(1)与列(2)可知,污染源在线监测对非两控区企业二氧化硫排放的影响是两控区企业的 2 倍多。由列(3)与列(4)可知,污染源在线监测对二氧化碳排放的影响没有明显的异质性。可能的原因在于:相对于两控区对二氧化硫的早期控制,非两控区可能具有更高的污染排放强度。污染源在线监测实施后产生了较大的边际减排效应,大幅降低非两控区企业的二氧化硫排放。

表 7 区域政策异质性检验结果

变量	LnSO ₂		LnCO ₂	
	非两控区	两控区	非两控区	两控区
	(1)	(2)	(3)	(4)
Online	-0.270 *** (0.085)	-0.128 ** (0.062)	-0.305 ** (0.155)	-0.240 * (0.125)
组间系数差异检验	P = 0.073		P = 0.8435	
控制变量	Yes	Yes	Yes	Yes
固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes
N	45069	69852	41575	66885
Adj - R ²	0.725	0.765	0.659	0.647

5.2 减排约束异质性

“十一五”时期中央政府根据二氧化硫的总量减排目标划定了排放限额(截止到 2010 年)。本文根据排放限额的高低将样本分为两部分:对排放限额较低地区(意味着较高的减排要求)的企业赋值 0,对排放限额较高地区(意味着较低的减排要求)的企业赋值 1。由表 8 列(1)与列(2)可知,在低排放限额下污染源在线监测对企业二氧化硫排放的影响显著为负,且明显高于基准回归结果。由列(3)与列(4)可知,在低排放限额下污染源在线监测对企业碳排放的影响不显著,但在高排放限额下污染源在线监测表现出较强的降碳效应。污染源在线监测对减污与降碳的非对称性影响的原因可能在于:“十一五”时期排放限额主要针对二氧化硫,当企业面临较高的减排目标约束时,为了快速有效落实减排责任,其主要通过安装除硫设备等末端治理方式降低二氧化硫排放。

表 8 减排约束异质性检验结果

变量	LnSO ₂		LnCO ₂	
	低排放限额	高排放限额	低排放限额	高排放限额
	(1)	(2)	(3)	(4)
Online	-0.359 *** (0.079)	-0.033 (0.066)	-0.136 (0.131)	-0.389 *** (0.145)
组间系数差异检验	P = 0.000		P = 0.045	
控制变量	Yes	Yes	Yes	Yes
固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes
N	57265	57664	54122	54341
Adj - R ²	0.748	0.754	0.640	0.657

5.3 企业规模异质性

企业规模相对大小不同其边际污染强度可能不同,考虑企业规模异质性能更好地评估环境规制的有效性,

根据企业规模特征构造虚拟变量,将样本分为两类并进行分样本回归:规模相对较小企业定义为 0,规模相对较大企业定义为 1。由表 9 列(1)与列(2)可知,污染源在线监测对规模相对较小企业二氧化硫排放的影响明显高于基准回归结果。但对规模相对较大企业二氧化硫排放的影响不显著。由列(3)与列(4)的回归结果可知,污染源在线监测对规模相对较小企业二氧化碳排放的影响远高于对规模相对较大企业的影响。相对而言,规模相对较小的企业往往具有更高的污染排放强度,而精准化的环境规制手段作用于此类企业更容易产生较大的边际减排效应。

表 9 企业规模异质性检验结果

变量	LnSO ₂		LnCO ₂	
	规模相对较小	规模相对较大	规模相对较小	规模相对较大
	(1)	(2)	(3)	(4)
Online	-0.518 *** (0.111)	-0.094 (0.059)	-0.653 *** (0.234)	-0.227 ** (0.108)
组间系数差异检验	P = 0.000		P = 0.025	
控制变量	Yes	Yes	Yes	Yes
固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes
N	56992	55918	52939	53651
Adj - R ²	0.721	0.783	0.629	0.683

6 研究结论与政策启示

6.1 研究结论

本文以污染源在线监测系统为政府环境监管精准化的典型工程,利用 2006—2013 年中国工业企业数据库、工业企业污染数据库和中国企业创新专利数据库的相关数据,并构建时变双重差分模型实证检验污染源在线监测系统的减污降碳效应。研究发现:污染源在线监测系统具有显著的减污降碳效应。机制分析表明,污染源在线监测通过驱动企业强化源头管控、加强末端治理以及倒逼企业绿色技术创新进而降低二氧化硫与二氧化碳排放。具体地,源头管控表现为减产、限制能源消耗,尤其是降低煤炭中的燃料煤消耗,末端治理表现为增加治污设备数量、提升去污能力;企业绿色技术创新表现为“量质齐升”,进而推动企业可持续减排。异质性分析表明,污染源在线监测的减污降碳效应因区域政策、减排约束、企业规模而具有明显的异质性和非对称性。研究结论为环境监管精准化促进减污降碳的有效性提供了经验证据,对以数字技术推动生态文明建设具有重要意义。

6.2 政策启示

第一,推动新一代信息技术与政府环境监管有效契合,充分发挥环境监管精准化的优势。政府应全面总结污染源在线监测等精准治污方式的实施经验,将其推广到其他领域的生态环境监测。现阶段关于大气污染的监测体系在不断加强,但对温室气体的监测仍然缺位,下一步应借助数字技术提升对温室气体的监测能力。应加快宽带、融合、安全、泛在的新一代信息基础设施建

设,持续、深入推进物联网在节能减排、环境监测等领域的应用,逐步形成全面感知、广泛互联的环境智能管理体系,提高环境监管治理的精细化水平。

第二,加快构建高效协同、开放共享的数据资源平台,强化环境监管治理的数据底座。推进环境监管精准化离不开坚实的数据底座和数字平台。应完善生态环境信息统计的体制机制,充分发挥生态环境监测网络的数据统计功能,加快构建生态环境数据资源体系。各地方政府和相关部门应持续梳理规范生态环境数据目录,进一步摸清数据底数、加强数据“一本账”管理,同时应做好污染源监测、碳排放监测以及环境质量等业务的数据库集成,构建生态环境数据资源体系,为提升政府环境监管能力提供可靠的数据基础。

第三,建立跨区域、跨部门、跨领域数据共享云平台并完善数据共享机制,推动环境监测数据集中共享、统筹利用、协同处理、实时更新。以生态环境数据资源体系及数据共享云平台为基础,助力完善诸如排污许可证制度、排污权交易制度、碳排放权交易制度、环境保护税等市场激励型环境规制政策,强化生态环境监测数据对相关业务的支持,优化多种环境规制政策组合进而提升政府环境监管治理效能,以“减排不减产”的方式实现减污降碳与经济发展双赢。

参考文献:

- [1] 孙博文,郑世林. 环境规制的减污降碳协同效应——来自清洁生产标准实施的准自然实验[J]. 经济学(季刊),2024,(2):624-642.
- [2] 肖红军,阳镇,凌鸿程. “鞭长莫及”还是“遥相呼应”:监管距离与企业社会责任[J]. 财贸经济,2021,42(10):116-131.
- [3] 金浩,陈诗一. 地理距离对政府监管企业污染排放的影响效应研究:兼论数据技术监管的作用[J]. 数量经济技术经济研究,2022,39(10):109-128.
- [4] 陈强远,崔雨阳,蔡卫星. 数字政府建设与城市治理质量:来自公共安全部门的证据[J]. 数量经济技术经济研究,2024,(11):132-154.
- [5] 范如国. 公共管理研究基于大数据与社会计算的方法论革命[J]. 中国社会科学,2018(9):74-91.
- [6] Shahbaz M, Wang J, Dong K, et al. The Impact of Digital Economy on Energy Transition Across the Globe: The Mediating Role of Government Governance[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022;112620.
- [7] Wu D, Xie Y. Unveiling the Impact of Public Data Access on Collaborative Reduction of Pollutants and Carbon Emissions: Evidence from Open Government Data Policy[J]. Energy Economics, 2024; 107822.
- [8] Li H, Lu J. Driving Effect of Digital Government Policy on Synergy in Corporate Pollution Reduction, Carbon Reduction, and Green Expansion[J]. Journal of Environmental Management, 2024;122301.
- [9] Greenstone M, He G, Jia R, et al. Can Technology Solve the Principal-agent Problem? Evidence from China's War on Air Pollution[J]. American Economic Review: Insights, 2022, (1): 54-70.
- [10] Pan M, Zhao X, Lv K, et al. Internet Development and Carbon Emission-reduction in the Era of Digitalization: Where will Resource-based Cities Go? [J]. Resources Policy, 2023, 81: 103345.
- [11] Coase R H. The Problem of Social Cost[J]. Journal of Law and Economics, 1960, 3: 1-44.
- [12] 张成,陆旸,郭路,等. 环境规制强度和生产技术进步[J]. 经济研究,2011,(2):113-124.
- [13] 陶锋,赵锦瑜,周浩. 环境规制实现了绿色技术创新的“增量提质”吗——来自环保目标责任制的证据[J]. 中国工业经济, 2021,(2):136-154.
- [14] 李玲,陶锋. 中国制造业最优环境规制强度的选择——基于绿色全要素生产率视角的视角[J]. 中国工业经济,2012,(5):70-82.
- [15] 韩超,张伟广,冯展斌. 环境规制如何“去”资源错配:基于中国首次约束性污染控制的分析[J]. 中国工业经济,2017(4):115-134.
- [16] 冯国强,马通. 环境治理的“资源诅咒”效应——来自二氧化硫减排的经验证据[J]. 软科学,2024,38(2):42-48.
- [17] 程洪飞,李豫新,曹梦渊. 降碳与增长何以兼得?——基于新能源示范城市政策的经验研究[J]. 财经研究,2024,50(7):126-140.
- [18] Usman M, Khan N, Omri A. Environmental Policy Stringency, ICT, and Technological Innovation for Achieving Sustainable Development: Assessing the Importance of Governance and Infrastructure [J]. Journal of Environmental Management, 2024;121581.
- [19] 宋献中,陈新,龙文滨. 数字化环境监测与企业绿色创新——基于环境监测网络建设的准自然实验[J]. 统计研究,2024,(7):64-76.
- [20] Zou S, Fan X, Zhou Y, et al. Achieving Collaborative Pollutant and Carbon Emissions Reduction Through Digital Governance: Evidence from Chinese Enterprises [J]. Environmental Research, 2024; 120197.
- [21] 韩超,王震,田蕾. 环境规制驱动减排的机制:污染处理行为与资源再配置效应[J]. 世界经济,2021,(8):82-105.
- [22] 李文健,翁翕,龚六堂. 政府如何激励创新:基于委托-代理理论的研究[J]. 经济学(季刊),2022,22(2):365-384.
- [23] Borghesi S, Cainelli G, Mazzanti M. Linking Emission Trading to Environmental Innovation: Evidence from the Italian Manufacturing Industry [J]. Research Policy, 2015, 44(3):669-683.
- [24] Chen Y, Chang C. The Determinants of Green Product Development Performance: Green Dynamic Capabilities, Green Transformational Leadership, and Green Creativity [J]. Journal of Business Ethics, 2013, 116(1):107-119.
- [25] Brandt L, Van Biesebroeck J, Zhang Y. Creative Accounting or Creative Destruction: Firm-level Productivity Growth in Chinese Manufacturing [J]. Journal of Development Economics, 2012, 97(2):339-351.
- [26] 曹清峰. 国家级新区对区域经济增长的带动效应:基于70大中城市的经验证据[J]. 中国工业经济,2020(7):43-60.
- [27] 宋弘,孙雅洁,陈登科. 政府空气污染治理效应评估——来自中国“低碳城市”建设的经验研究[J]. 管理世界,2019,(6):95-108.
- [28] 江艇. 因果推断经验研究中的中介效应与调节效应[J]. 中国工业经济,2022(5):100-120.

(责任编辑:何敏)