

中国数字基础设施发展对环境污染的影响研究

张文城, 白凤兰

(湖南大学 经济与贸易学院, 长沙 410006)

摘要:我国正在大力推进数字经济建设和绿色发展转型。因此,本文利用2006—2019年中国省级面板数据,使用固定效应模型、空间杜宾模型、中介效应模型等方法从多维度检验数字基础设施发展对环境污染的影响及其机制。研究发现:数字基础设施发展减少了工业二氧化硫、工业烟尘、PM_{2.5}、工业废水等污染物的排放。作用机制分析显示,数字基础设施发展能够通过促进绿色创新和优化产业结构两个渠道来减少污染排放。本文还发现数字基础设施发展对环境污染的影响存在空间异质性和空间溢出效应。本文的研究有助于更好地理解我国数字经济发展对污染减排的影响、作用机制和地区空间差异,也佐证了数字经济和绿色发展之间的协同关系。

关键词:数字基础设施;环境污染;中介效应;空间杜宾模型

中图分类号:F49;X196 **文献标志码:**A **文章编号:**1002—980X(2023)5—0137—12

一、引言

党的二十大报告指出要“加快发展数字经济”。同时,“十四五”规划也强调“加快建设新型基础设施,强化数字转型”,数字经济已成为推动经济社会高质量发展的重要引擎。与此同时,中国经济高速增长也带来环境污染等负外部性问题,制约着中国可持续发展,阻碍中国高质量发展的步伐。党的二十大报告指出“促进绿色转型,深入推进污染防治”,实际上,数字经济与绿色发展有着紧密的关联。我国《“十四五”国家信息化规划》也强调“推动数字化绿色化协同发展,以数字化引领绿色化,以绿色化带动数字化”。在上述背景下,有必要考察的重要问题是:数字基础设施发展是否会对污染排放产生显著影响?其主要的的作用机制是什么?系统讨论以上问题对于我国建设数字强国与促进绿色发展具有重要的政策含义。

数字经济最早出现在20世纪90年代,通常是指利用信息技术对经济系统进行描述的过程(Crawford, 1996)。从已有研究来看,不同学者基于不同视角对数字经济发展带来的经济效应及环境效应进行了有益的探究。例如,曾燕萍等(2022)得出结论:数字金融是推动中国经济高质量发展的重要力量,以及杨文溥和曾会锋(2022)研究发现数字经济不仅推动了中国经济高质量发展,同时促进了企业全要素生产率的提升。当前,数字经济与环境保护之间的关系也开始引起学术界的广泛关注。例如,李广昊和周小亮(2021)研究发现数字经济减少了主要污染物二氧化硫的排放,邓荣荣和张翱翔(2022)则发现数字经济对不同污染物的抑制作用存在差异性,其中对二氧化硫排放的影响最大。此外,部分学者从碳排放视角进行研究,例如,Dong等(2022)以国家层面为研究视角,发现数字经济在降低碳排放强度的同时促进了人均碳排放的增加。谢文倩等(2022)、郭丰等(2022)、田红宇和关洪浪(2022)均得出相似结论:数字经济有利于降低碳排放。同时,部分学者研究发现数字经济对本区域空间减排具有“先增,后抑”的倒U型趋势,同时兼具“先抑,后增”的空间溢出效应(李治国和王杰,2022)。国外学者Ahmadova等(2022)发现数字化与本国环境绩效间存在倒U型关系,即随着本国数字化达到某一阈值,数字化将产生“反弹效应”不能有效减少污染排放。此外,程文先和钱学锋(2021)研究发现数字经济有利于提升企业绿色全要素生产率,主要表现为赋能“规模效应”和“技术效应”助推制造业企业绿色转型,且通过产业链对上下游企业产生正向的溢出效应(戴翔和杨双至,2022)。许宪春等(2019)研究发现大数据与绿色发展相辅相成,中国要实现绿色发展,需要推动大数据与传统产业深度融合。

另外,数字经济包括数字产业化和产业数字化两大部分,在构成上包括数字基础设施、数据和数字技术

收稿日期:2022-12-01

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金“中国居民消费环境负荷评估与分析”(71903052);中央高校基本科研业务费“全球价值链发展的资源环境效应研究”(531118010124)

作者简介:张文城,经济学博士,湖南大学经济与贸易学院副教授,研究方向:国际贸易与环境、环境投入产出分析;白凤兰,湖南大学经济与贸易学院硕士研究生,研究方向:资源与环境经济、数字经济。

应用等关键要素^①,而衡量一个地区的数字经济发展程度往往采用多维度的综合性指标。例如,盛斌和刘宇英(2022)采用三个维度54个指标构建中国各省份的数字经济发展指数,以此反映中国区域数字经济发展水平,魏丽莉和侯宇琦(2022)以数字产业为核心框架采用指标构建法测度中国各地级市的数字经济发展水平,上述研究数字经济发展的环境效应均采用类似的思路来测度中国数字经济发展水平。鉴于此,本文基于2006—2019年中国省级面板数据,分析数字基础设施发展产生的环境效应及其背后的理论机制。

在已有研究的基础上,本文包括以下三个方面的边际贡献:①研究内容方面,聚焦数字基础设施核心要素探究数字经济发展的污染减排效应及其背后的传导机制,丰富和拓展了对该问题的研究;②理论机制方面,本文从绿色创新、产业结构优化视角对其作用机制进行了讨论,进一步厘清、深化和拓展了数字基础设施影响污染减排效应的作用机制;③研究方法方面,通过Moran'I、莫兰散点图、空间杜宾模型等方法深入考察数字基础设施发展对污染减排的空间差异性。此外,为缓解内生性问题选取历史数据作为工具变量为本文研究结论提供可靠的稳健性检验。

二、理论分析和研究假设

1. 数字经济发展通过提高企业、政府治理效率,减少污染排放

从企业角度看,数字革命引致的网络技术的渗透推动企业向数字化、网络化和智能化转变,催生出具有智能化检测系统的产生,提高了企业污染治理技术,尤其对企业污染的检测和末端治理方面发挥着重要作用,为企业实现智慧化污染检测提供技术支持。此外,企业利用网络技术和大数据将碎片化的数据、信息及资源进行整合重组,提升了企业运行效率,降低了交易成本(于世海等,2022),尤其在促进创新、改善人力资本结构等方面推动企业转型升级,从而提升企业污染减排效率(赵宸宇等,2021)。从产业转型看,互联网、大数据及人工智能的发展提升了产业数字化转型速度(易加斌等,2021),为产业绿色化转型提供技术支持。从政府监管来看,数字经济的发展促进政府监管模式的创新,尤其相较于传统监管模式的落后、效率低下、监管供需失衡等问题,数字经济发展为政府实现高效率监管提供了核心的技术保障,提升了政府环境监管的准确性和感知力。从社会公众监督来看,数字经济催生了政府与社会公众交流互动模式的创新,实现了信息的互通和共享,社会公众能够借助网络通讯等方式参与环境治理和监督,实现环境效应的改善。

因此,提出以下研究假设:

数字基础设施发展有利于减少污染排放(H1)。

2. 数字经济发展通过促进绿色创新、优化产业结构升级减少污染排放

在新一轮科技革命的影响下,数字技术成为赋能绿色发展、调整产业结构、重塑社会新的经济发展形态的重要驱动力(陈强远等,2020)。当前,数字经济在发挥“技术红利”的同时促进绿色产出,催生清洁型产业转型升级(邵帅等,2022),焦豪等(2021)研究发现数字化借助互联网等数字基础设施的更新迭代,催生新经济形态,释放数字红利推动生态数字系统的建立,部分学者发现数字经济通过降低企业生产成本、提升创新水平,进而减少污染排放(于世海等,2022)。苗效东等(2022)借助网络技术发现大数据通过影响产业结构优化进而推动制造业绿色发展,此外,大数据的飞速发展为绿色转型提供动力作用,尤其在资源合理配置和环境监管方面起到推动作用(许宪春等,2019)。因此,进一步说明数字经济的飞速发展已成为企业转型升级的重要驱动力,特别对绿色创新与产业结构升级有着重要的影响作用(郭丰等,2022)。

因此,提出以下研究假设:

数字基础设施发展通过提升绿色创新水平、优化产业结构进而减少污染排放(H2)。

3. 数字经济发展对污染排放存在空间溢出效应

以互联网为代表的数字基础设施的发展打破了传统空间约束和地理限制,实现了实体与虚拟、线上与线下的连接(李海舰等,2014),因此,数字革命深刻影响了资本、要素的跨区域流动,进一步重塑了中国经济地理新发展格局(曹玉平,2022)。Cairncross(1997)在其著作中提出通信技术革命将对地理、边界、时空产生颠覆性的改变。此外,随着经济的快速发展,互联网在产生集聚力量的同时使得近距离面对面交流成为可能(Leamer and Storper, 2001),尤其对污染排放的空间溢出效应产生巨大冲击。更进一步,数字经济依托网络信息和数字化平台,形成资源环境“数据价值链”,有效破解了资源环境“数据孤岛”等问题,增强了各区域发

① 参见《“十四五”国家信息规划》和《中国数字经济发展白皮书(2022)》。

展的深度和广度(Leamer and Storper, 2001)。

因此,提出以下研究假设:

数字基础设施发展对污染排放存在空间溢出效应(H3)。

三、研究设计

(一)模型设定

本文通过使用固定效应模型探究数字基础设施对环境污染的影响,具体模型如下:

$$ENV_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 \ln Dig_{it} + \alpha_2 Control_{it} + u_i + \pi_t + \varepsilon_{it} \tag{1}$$

其中: ENV_{it} 为被解释变量即环境污染指标; i 为省份; t 为时间; Dig_{it} 为自变量即数字基础设施指标, $Control_{it}$ 为控制变量; α_1 为数字基础设施发展对环境污染的影响系数; ε_{it} 为随机误差项; u_i 为省份固定效应; π_t 为时间固定效应; α_2 为待估系数。同时数字基础设施将通过中介变量对污染排放产生影响,因此建立中介效应模型:

$$M_{it} = \gamma_0 + \gamma_1 \ln Dig_{it} + \gamma_2 Control_{it} + u_i + \pi_t + \varepsilon_{it} \tag{2}$$

$$ENV_{it} = \beta_0 + \beta_1 \ln Dig_{it} + \beta_2 M_{it} + \beta_3 Control_{it} + u_i + \pi_t + \varepsilon_{it} \tag{3}$$

其中: M_{it} 为中介变量,分别代表绿色专利申请数量(*Green patent*)、产业结构高级化(*Advanced*); γ_1 为数字基础设施发展对绿色创新和产业结构的影响系数, β_1 为加入中介变量后数字基础设施发展对环境污染的影响系数; $\gamma_1\beta_2$ 为中介效应。

(二)变量测度与说明

1. 被解释变量

基于数据可得性原则选取:工业废水排放量(*Water*)、工业烟尘排放量(*Smoke*)、工业二氧化硫排放量(SO_2)、可吸入颗粒物 $PM_{2.5}$ ($PM_{2.5}$)、地表粉尘质量浓度变化(*Surface*)作为本文的被解释变量来衡量各省份的环境污染状况。

2. 核心解释变量

基于数据可得性原则选取:IPV4地址数(*IPV4*)、域名数(*Domain*)、网站数(*Website*)、互联网宽带接入端口密度(*Internet*)、长途光缆线路密度(*Cableline*)、移动电话交换机容量(*Mobilephone*)、移动电话年末用户数(*Mobile-end*)、局用电话交换机容量(*CTE*)、邮政营业网点(*Boutlets*)等指标(郭家堂和骆品亮,2016;盛斌和刘宇英,2022)。同时参考赵涛等(2020)的研究使用主成分分析方法(PCA)进行处理,得到数字基础设施综合指标(*Dig*)。

3. 中介变量

基于前文讨论数字基础设施发展将提升绿色创新水平和优化产业结构两个机制变量影响污染减排效应。因此,本文选取绿色专利申请数量(*Green*)表示数字基础设施发展对绿色技术创新的影响。此外,参考于春晖等(2011)的研究选用第三产业增加值比第二产业增加值构建产业结构高级化指标(*Insh*)。

4. 控制变量

本文的控制变量主要包括人均财政支出(*Finance*)、人口密度(*PD*)、人力资本(*Hucap*)、城市化水平(*Urban*)、环境规制(*Enr*,市容环境卫生治理投资额/GDP)、科研经费投入强度(*RD*)、电力消费量(*Electric*)。所有变量见表1。

(三)数据来源和描述性统计

为确保样本数据的完整性和连续性,本文选取2006—2019年中国省级层面(因数据缺失,未包含西藏地区及港澳台地区)的观测值作为实证研究的样本数据。数据分别来源于《中国统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国互联网发展统计报告》、中国互联网信息中心、中国财政部。为了确保数据的统一性、减弱数据差异性,对部分变量进行取对数处理,少数缺失数据通过插值法补齐,所有变量的描述性统计结果见表2。

表1 构建指标体系

变量属性	变量名称	变量符号	具体变量名称
被解释变量	环境污染指标	<i>Water</i>	工业废水排放量
		SO_2	工业二氧化硫排放量
		<i>Smoke</i>	工业烟尘排放量
		$PM_{2.5}$	可吸入颗粒物 $PM_{2.5}$
		<i>Surface</i>	地表粉尘质量浓度

续表

变量属性	变量名称	变量符号	具体变量名称
核心解释变量	数字基础设施指标	<i>IPV4</i>	IPV4地址数
		<i>Domain</i>	域名数
		<i>Website</i>	网站数
		<i>Internet</i>	互联网宽带接入端口密度
		<i>Cableline</i>	长途光缆线路密度
		<i>CTE</i>	局用电话交换机容量
		<i>Mobilephone</i>	移动电话交换机容量
		<i>Mobile-end</i>	移动电话年末用户数
中介变量	绿色创新协调指标	<i>Boutlets</i>	邮政营业网点
		<i>Green</i>	绿色专利申请数量
控制变量	经济、人力、科技能源等综合指标	<i>Insh</i>	产业结构高级化
		<i>Finance</i>	人均财政支出
		<i>Hucap</i>	人力资本
		<i>Urban</i>	城市化水平
		<i>PD</i>	人口密度
		<i>Enregulat</i>	环境规制
		<i>RD</i>	科研经费投入强度
		<i>Electric</i>	电力消费量

表 2 变量说明与描述性统计

主要类别	变量	单位	均值	标准差	最小值	最大值
被解释变量	<i>lnWater</i>	万吨	10.508	1.251	6.305	12.568
	<i>lnSmoke</i>	吨	12.032	1.211	7.399	15.599
	<i>lnSO₂</i>	吨	12.837	1.157	7.562	14.489
	<i>lnPM_{2.5}</i>	微米	1.658	0.731	0.155	3.828
	<i>lnSurface</i>	微米	2.884	0.827	1.201	5.269
核心解释变量	<i>Dig</i>	—	-0.06	0.951	-1.237	4.737
中介变量	<i>lnGreen</i>	项	7.468	1.656	2.639	11.116
	<i>Insh</i>	—	1.068	0.609	0.500	5.169
控制变量	<i>lnFinance</i>	元/人	8.971	0.683	7.337	10.450
	<i>lnHucap</i>	个	12.978	0.815	10.255	14.181
	<i>lnPD</i>	人/平方千米	5.489	1.266	2.079	8.413
	<i>lnElectric</i>	亿千瓦小时	7.157	0.744	4.582	8.809
	<i>lnEnregulat</i>	亿元	1.957	1.346	-1.966	5.284
	<i>Urban</i>	%	55.134	13.748	27.464	89.635
	<i>RD</i>	%	1.499	1.081	0.201	6.315

四、实证检验与分析

(一)基准回归

依据式(1)的假设,本文通过基准回归结果发现数字基础设施发展能够显著减少污染排放。具体分析如下:表 3 中的(1)~(5)列 *Dig* 系数均在 1% 的水平下显著为负,说明数字基础设施发展减少了污染排放,与假设 1 符合。从回归系数来看,数字基础设施发展对二氧化硫排放量影响最大,其次是对工业烟尘排放量、地表粉尘质量浓度变化、PM_{2.5}、工业废水排放量的影响依次递减。

(二)内生性分析

本文在研究中不可避免受到遗漏变量、不可观测变量的影响。因此,为确保实证结果的稳健性,缓解内生性问题是本文研究进展的重要组成部分。

本文参考黄群慧等(2019)的研究思路,使用 1984 年邮局数和固定电话数作为本文的工具变量,关于使用 1984 年邮局数和固定电话数作为工具变量的合理性已有较多学者展开了深入的讨论(黄群慧等,2019;赵涛等,2020)。此外,以邮局数和固定电话为代表的信息基础设施的完善为数字经济的飞速发展奠定了良好的基础,促进了数字基础设施的快速发展,满足相关性特征。其次,数字基础设施的发展是以互联网、大数据的变革为契机,而历史邮局数和固定电话数对环境污染的影响正在逐渐消失,就当前来看,邮局数和固定电

话数难以影响环境污染,因此满足排他性要求。基于以上逻辑分析,选取1984年历史数据作为本文的工具变量是合理的。此外,本文选取的工具变量是1984年的截面数据,但该数据是不随时间变化的。因此,参考Nunn和Qian(2014)的研究,并借鉴赵涛等(2020)研究引入一个随时间变化的变量与1984年的截面历史数据相乘形成面板数据进而构造本文的工具变量。因此,引入上一年互联网宽带接入端口与1984年邮局数和固定电话数相乘作为本文的工具变量。

表4估计结果表明,使用两阶段最小二乘法估计方法后,数字基础设施对污染减排的影响仍然通过了1%的显著性水平检验,使用工具变量估计结果与基准回归结果一致,验证了基准回归结果的稳健性。此外,本文对于“工具变量识别不足”和“弱工具变量”问题均进行了检验,结果显示均拒绝原假设,不存在以上问题。因此,所有检验结果表明选取1984年邮局数和固定电话数与上一年互联网宽带接入端口做交互项作为本文的工具变量是合理的。

(三)稳健性检验

1. 替换变量及测度方法

(1)替换被解释变量。在基准回归中使用各污染物排放总量作为被解释变量进行回归,为了增加结论的稳健性,进一步对各污染物排放强度进行检验,污染物排放强度即污染物排放总量与国内生产总值(GDP)的比值,分别用 $ln1$ 、 $ln2$ 、 $ln3$ 、 $ln4$ 、 $ln5$ 表示。估计结果见表5的(1)~(5)列, Dig 的回归系数依然通过了1%的显著性水平检验,与基准回归结果一致。

(2)替换核心解释变量测度方法。在基准回归中使用主成分分析的方法测度数字基础设施发展水平($Digit$),进一步借鉴郭丰等(2022)的研究做法采用熵值法重新测度数字基础设施发展水平。估计结果见表5的(6)~(10)列,数字基础设施发展对环境污染的影响分别在1%、5%的水平下显著为负,验证了前文结论的稳健性。

2. 核心解释变量滞后效应检验

考虑到数字基础设施发展可能对环境污染存在滞后效应,因此,本文对核心解释变量(Dig)滞后一期($L.Dig$)和两期($L2.Dig$)研究。估计结果见表6, $L.Dig$ 和 $L2.Dig$ 对污染减排的影响依然在1%、5%的水平下显著为负,进一步佐证了数字基础设施发展对污染减排具有抑制作用的假设。

3. 样本再处理检验

(1)控制变量再缩尾处理。在前文中已对所有变量进行了1%的缩尾处理,考虑到控制变量可能对稳健性存在一定极端值的影响,本文进一步对控制变量进行5%的再缩尾处理。估计结果见表7,数字基础设施对污染排放的影响依然在1%水平下依然显著为负,结果稳健。

(2)调整样本时期。2015年10月随着党的十八届五中全会的召开,中国经济发展进入新常态,此外,部

表3 数字基础设施影响环境污染的基准回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	$\ln SO_2$	$\ln Smoke$	$\ln PM_{2.5}$	$\ln Surface$	$\ln Water$
Dig	-0.701*** (0.064)	-0.585*** (0.066)	-0.462*** (0.040)	-0.547*** (0.044)	-0.175*** (0.059)
$\ln Hucap$	0.408*** (0.074)	0.741*** (0.088)	-0.323*** (0.069)	-0.322*** (0.078)	0.392*** (0.087)
$\ln PD$	-0.262*** (0.045)	-0.367*** (0.052)	-0.279*** (0.041)	-0.351*** (0.045)	0.075 (0.048)
$\ln Finance$	-0.890*** (0.078)	-0.368*** (0.087)	0.087 (0.058)	0.077 (0.066)	-1.005*** (0.077)
$\ln Electric$	1.245*** (0.070)	1.342*** (0.107)	0.839*** (0.057)	0.958*** (0.063)	1.082*** (0.097)
$\ln Enregulat$	-0.053 (0.040)	-0.092** (0.041)	-0.092*** (0.031)	-0.115*** (0.035)	-0.003 (0.039)
$Urban$	-0.001 (0.005)	0.006 (0.005)	-0.026*** (0.004)	-0.025*** (0.004)	0.020*** (0.003)
RD	-0.003 (0.074)	-0.149** (0.062)	0.538*** (0.036)	0.609*** (0.040)	-0.085 (0.060)
$Constant$	8.148*** -0.701***	-1.843 (1.422)	1.373 (0.915)	2.120** (1.042)	5.336*** (1.652)
Year/Province	是	是	是	是	是
N	420	420	420	420	420
R^2	0.737	0.691	0.559	0.569	0.788

注:***、**、*分别表示在1%、5%、10%的置信水平上显著;括号内的值为异方差稳健标准误。

表4 基于工具变量法的回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	$\ln SO_2$	$\ln Smoke$	$\ln PM_{2.5}$	$\ln Surface$	$\ln Water$
Dig	-0.204*** (0.059)	-0.366*** (0.070)	-0.384*** (0.042)	-0.457*** (0.046)	0.0861 (0.066)
Controls/Year	是	是	是	是	是
N	420	420	420	420	420
R^2	0.884	0.757	0.601	0.612	0.808
Kleibergen-Paap rk LM 统计量					47.311 [0.0000]
Kleibergen-Paap rk Wald F 统计量					226.351 [61.486]
Cragg-Donald Wald F					226.35 [0.0000]
Hansen 检验 P 值	0.3061	0.7807	0.0029	0.0253	0.0021
Sargan 检验 P 值	0.2376	0.8484	0.0236	0.0912	0.0064

注:***、**、*分别表示在1%、5%、10%的置信水平上显著;括号内的值为异方差稳健标准误,[]数值为P值,| |数值为Stock-Yogo弱识别检验10%水平上的临界值。

分文献将 2015 年作为研究数字经济的重要起始年份。因此,选取 2015 年作为本文研究的重要时间节点,并将样本调整为 2006—2015 年和 2016—2019 年分别进行检验。估计结果见表 8, *Dig* 的系数依然显著,结果稳健。

表 5 替换被解释变量、替换核心解释变量测度方法的回归估计结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
	<i>ln1</i>	<i>ln2</i>	<i>ln3</i>	<i>ln4</i>	<i>ln5</i>	<i>lnSO₂</i>	<i>lnSmoke</i>	<i>lnPM_{2.5}</i>	<i>lnSurface</i>	<i>lnWater</i>
<i>Dig</i>	-0.074*** (0.008)	-0.071*** (0.009)	-0.047*** (0.004)	-0.055*** (0.005)	-0.032*** (0.008)					
<i>Digit</i>						-5.287*** (0.431)	-4.294*** (0.448)	-3.439*** (0.337)	-4.030*** (0.375)	-0.936** (0.402)
Controls/Year/Province	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是
<i>N</i>	420	420	420	420	420	420	420	420	420	420
<i>R</i> ²	0.815	0.668	0.633	0.671	0.607	0.746	0.714	0.571	0.585	0.786

注:***、**、*分别表示在 1%、5%、10% 的置信水平上显著;括号内的值为异方差稳健标准误, *ln1* 表示污染物排放总量与国内生产总值(GDP)的比值。

表 6 数字基础设施发展对环境污染滞后效应的回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
	<i>lnSO₂</i>	<i>lnSmoke</i>	<i>lnPM_{2.5}</i>	<i>lnSurface</i>	<i>lnWater</i>	<i>lnSO₂</i>	<i>lnSmoke</i>	<i>lnPM_{2.5}</i>	<i>lnSurface</i>	<i>lnWater</i>
<i>L.Dig</i>	-0.517*** (0.075)	-0.439*** (0.082)	-0.507*** (0.044)	-0.601*** (0.049)	-0.195*** (0.069)					
<i>L2.Dig</i>						-0.570*** (0.084)	-0.447*** (0.092)	-0.557*** (0.053)	-0.656*** (0.059)	-0.204*** (0.075)
Controls/Year/Province	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是
<i>N</i>	390	390	390	390	390	360	360	360	360	360
<i>R</i> ²	0.731	0.222	0.567	0.576	0.794	0.739	0.246	0.578	0.586	0.805

注:***、**、*分别表示在 1%、5%、10% 的置信水平上显著;括号内的值为异方差稳健标准误。

表 7 控制变量再缩尾处理的回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	<i>lnSO₂</i>	<i>lnSmoke</i>	<i>lnPM_{2.5}</i>	<i>lnSurface</i>	<i>lnWater</i>
<i>Dig</i>	-0.689*** (0.081)	-0.542*** (0.081)	-0.424*** (0.040)	-0.502*** (0.046)	-0.179*** (0.058)
Controls/Year/Province	是	是	是	是	是
<i>N</i>	420	420	420	420	420
<i>R</i> ²	0.671	0.610	0.559	0.560	0.743

注:***、**、*分别表示在 1%、5%、10% 的置信水平上显著;括号内的值为异方差稳健标准误。

表 8 调整样本时期的回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
	<i>lnSO₂</i>	<i>lnSmoke</i>	<i>lnPM_{2.5}</i>	<i>lnSurface</i>	<i>lnWater</i>	<i>lnSO₂</i>	<i>lnSmoke</i>	<i>lnPM_{2.5}</i>	<i>lnSurface</i>	<i>lnWater</i>
<i>Dig</i>	-0.433*** (0.067)	-0.892*** (0.130)	-0.489*** (0.067)	-0.595*** (0.074)	-0.326*** (0.109)	-0.423*** (0.064)	-0.384*** (0.093)	-0.561*** (0.064)	-0.656*** (0.0704)	-0.003 (0.071)
Controls/Year/Province	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是
<i>N</i>	300	300	300	300	300	120	120	120	120	120
<i>R</i> ²	0.853	0.747	0.581	0.594	0.803	0.841	0.822	0.716	0.723	0.860

注:***、**、*分别表示在 1%、5%、10% 的置信水平上显著;括号内的值为异方差稳健标准误。

五、机制检验与进一步讨论

(一) 机制检验

1. 基于绿色创新的机制检验

前文从绿色创新和产业结构优化的视角,理论分析了数字基础设施对污染减排效应的传导机制,为验证该机制是否成立,本文使用逐步回归法进行实证分析。估计结果见表 9,数字基础设施对绿色创新和产业结构高级化的影响均通过了 1% 的显著性水平检验,说明数字基础设施发展提升了绿色创新水平,促

表 9 数字基础设施与中介变量的回归结果

变量	<i>lngreen</i>	<i>lnsh</i>
<i>Dig</i>	0.181*** (0.029)	0.110*** (0.030)
Controls/Year/Province	是	是
<i>N</i>	420	420
<i>R</i> ²	0.969	0.676

注:***、**、*分别表示在 1%、5%、10% 的置信水平上显著;括号内的值为异方差稳健标准误。

进了产业结构优化升级,验证假设2。

进一步使用逐步回归法检验绿色创新对污染减排的中介效应。表10的(1)~(5)列报告了绿色创新对污染减排的影响,从回归系数可知绿色创新对污染减排效应的影响分别通过1%和5%的显著性水平检验,说明数字基础设施通过提升绿色创新水平进而抑制污染排放。验证了假设2。

表10 绿色创新、产业结构高级化与环境污染的回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
	lnSO ₂	lnSmoke	lnPM _{2.5}	lnSurface	lnWater	lnSO ₂	lnSmoke	lnPM _{2.5}	lnSurface	lnWater
<i>Dig</i>	-0.611*** (0.062)	-0.553*** (0.065)	-0.402*** (0.042)	-0.466*** (0.047)	-0.191*** (0.060)	-0.600*** (0.053)	-0.474*** (0.050)	-0.397*** (0.041)	-0.469*** (0.046)	-0.072 (0.049)
<i>Ingreen/Insh</i>	-0.230*** (0.080)	0.030 (0.076)	-0.115** (0.057)	-0.156** (0.063)	0.198*** (0.066)	-0.722*** (0.076)	-0.738*** (0.071)	-0.360*** (0.049)	-0.386*** (0.054)	-0.702*** (0.069)
Controls/Year/Province	是	是	是	是	是	是	是	是	是	是
<i>N</i>	420	420	420	420	420	420	420	420	420	420
<i>R</i> ²	0.750	0.713	0.571	0.587	0.791	0.796	0.770	0.603	0.613	0.835

注：***、**、*分别表示在1%、5%、10%的置信水平上显著；括号内的值为异方差稳健标准误。

2. 基于产业结构高级化的机制检验

基于前文理论分析,影响区域污染减排效应的另一个重要的传导机制则为产业结构的优化升级,因此,本文进一步使用逐步回归法检验产业结构高级化对污染减排的中介效应。表10的(6)列~(10)列报告了产业结构高级化对环境污染的影响,从回归系数可知产业结构高级化对污染减排效应的影响均在1%的水平下显著为负,说明数字基础设施通过促进产业结构升级优化进而抑制污染排放。验证了假设2。

(二)进一步讨论

1. 数字基础设施与产业结构的调节效应分析

为探究数字基础设施与产业结构升级对污染减排效应的影响,本文进一步在模型中引入产业结构高级化指数(*Insh*)及其交互项(*Dig*×*Insh*)。从表11回归结果可知,数字基础设施与产业结构高级化对污染减排的影响均在1%的水平下显著为负,表明数字基础设施的发展和产业结构高级化均有助于减少各区域污染物的排放。更进一步,交互项(*Dig*×*Insh*)的回归系数在1%的水平下均显著为正(除对二氧化硫的影响为不显著),这表明当产业结构越好时,数字基础设施在抑制污染减排行为中的负向作用越弱。

表11 数字基础设施与产业结构高级化的交乘项回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	lnSO ₂	lnSmoke	lnPM _{2.5}	lnSurface	lnWater
<i>Dig</i>	-0.080*** (0.020)	-0.151*** (0.022)	-0.077*** (0.009)	-0.092*** (0.011)	-0.093*** (0.015)
<i>Insh</i>	-0.090*** (0.011)	-0.085*** (0.012)	-0.043*** (0.007)	-0.048*** (0.008)	-0.078*** (0.008)
<i>Dig</i> × <i>Insh</i>	0.004 (0.016)	0.065*** (0.017)	0.026*** (0.008)	0.031*** (0.009)	0.059*** (0.009)
Controls	是	是	是	是	是
<i>N</i>	420	420	420	420	420
<i>R</i> ²	0.850	0.737	0.680	0.714	0.695

注：***、**、*分别表示在1%、5%、10%的置信水平上显著；括号内的值为异方差稳健标准误,该部分被解释变量为各污染物相对量的排放,即污染物排放总量与国内生产总值(GDP)的比值。

2. 分区域讨论

本文进一步将样本划分为东部、中部、西部进行异质性分析。表12估计结果显示,数字基础设施对东部、中部、西部地区污染减排效应的影响依然通过了1%和5%的显著性水平检验,其中数字基础设施对中部和西部地区的污染减排效应影响最大,而对东部地区的影响程度最小,表明数字基础设施对创新水平较低省份和经济落后地区的污染减排效应更为明显。可能存在的原因:东部地区经济的快速发展在释放数字基础设施带来的绿色创新水平、优化产业结构方面的“减排红利”趋于稳定。西部地区由于经济发展较为落后,数字技术逐步成为推动西部地区要素配置效率提升、转变“粗放式”经营模式的核心动力,因而中西部地区的污染减排边际效应高于东部地区。

(三)空间相关性及其溢出效应分析

为探究数字基础设施和污染减排是否存在空间自相关关系,本文首先使用全局Moran'*I*指数检验数字基础设施与环境污染的空间相关性。计算公式如式(4)。

表 12 东部、中部、西部地区数字基础设施发展影响环境污染的回归结果

区域	变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
		lnSO ₂	lnSmoke	lnPM _{2.5}	lnSurface	lnWater
东部地区	Dig	-0.421*** (0.088)	-0.685*** (0.072)	-0.193*** (0.034)	-0.249*** (0.040)	-0.521*** (0.057)
	Controls	是	是	是	是	是
	N	154	154	154	154	154
	R ²	0.867	0.926	0.697	0.703	0.950
中部地区	Dig	-1.066*** (0.121)	-0.891*** (0.200)	-0.274*** (0.090)	-0.326*** (0.095)	-0.367*** (0.078)
	Controls	是	是	是	是	是
	N	112	112	112	112	112
	R ²	0.848	0.545	0.857	0.858	0.878
西部地区	Dig	-0.624*** (0.113)	-0.167 (0.105)	-0.519*** (0.118)	-0.610*** (0.133)	0.236** (0.115)
	Controls	是	是	是	是	是
	N	154	154	154	154	154
	R ²	0.429	0.625	0.551	0.579	0.697

注:***、**、*分别表示在 1%、5%、10% 的置信水平上显著;括号内的值为异方差稳健标准误。

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \quad (4)$$

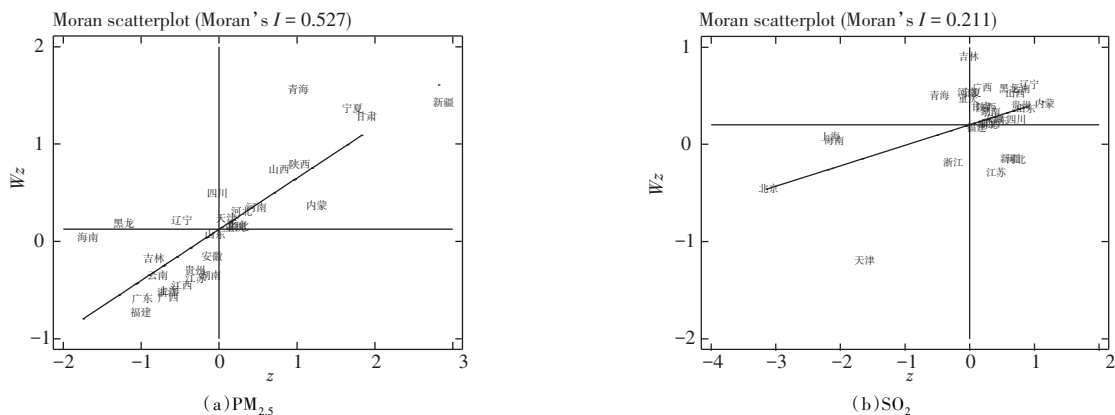
其中: $S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$, $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$; W_{ij} 为 0-1 空间权重矩阵; X_i 、 X_j 为本文中各省份的污染排放量。Moran' I 取值范围 $[-1, 1]$, 当 Moran' $I > 0$ 时, 为正相关即高高聚集或低低聚集; 当 Moran' $I < 0$ 时, 为负相关即高低聚集; 当 Moran' I 越接近 0 时, 表明不存在空间相关性。各类污染物 Moran' I 估计结果见表 13, 数字基础设施影响各污染物的全局 Moran' I 均大于 0, 且通过了 1%、5%、10% 的显著性水平检验, 这表明数字基础设施对污染减排在空间范围内存在正相关关系, 具有空间集聚效应。

此外, 为了更加精确探究数字基础设施与污染减排是否存在空间自相关关系, 本文通过绘制 Moran' I 散点图进行分析。具体从图 1 来看, 2020 年 PM_{2.5}、SO₂ 排放量、工业烟尘排放量、废水排放量、地表粉尘的 Moran' I 分别为 0.527、0.211、0.062、0.386、0.531 均显著大于 0, 与 Moran' I 结果一致, 进一步表明污染物的排放存在较强的局部空间相关性。此外, 本文给出了 2006 年、2010 年、2015 年、2020 年数字基础设施的局部空间散点图, 如图 2 所示, 研究发现较多省份的数字基础设施发展水平处于第一、三象限, 说明中国数字基础设施发展在空间上存在明显的集聚效应, 呈现出高-高聚集与低-低聚集现象。因此, 本文通过构建空间计量模型继续进行实证分析。具体空间模型如下:

$$ENV_{it} = \alpha_0 + \rho WENV_{it} + \varphi_1 \ln Dig_{it} + \alpha_1 \ln Dig_{it} + \alpha_2 Control_{it} + \varphi_2 WControl_{it} + u_i + \pi_t + \varepsilon_{it} \quad (5)$$

其中: ρ 为空间自相关系数; W 为空间权重矩阵; 当两区域相邻则取 1, 否则取 0, 进而构建空间权重矩阵。

为了正确估计数字基础设施与污染排放的空间溢出效应, 首先需要检验并选择合适的空间面板模型, 按序依次进行 LM、LR、Wald-test 及 Hausman 检验, 检验结果显示均通过了 1% 的显著性水平检验, 拒绝原假设, 最终选择双向固定效应的空间杜宾模型。



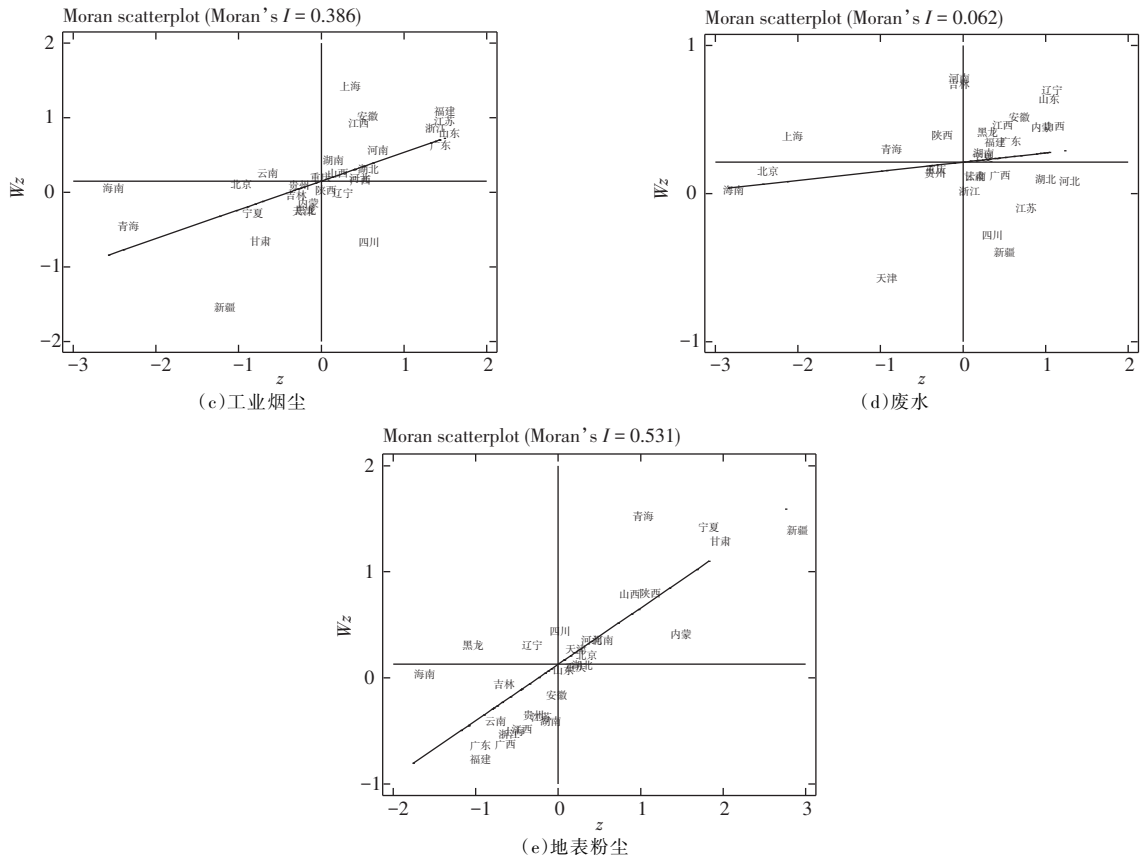


图1 2020年PM_{2.5}、SO₂、工业烟尘、废水、地表粉尘局部Moran' I 散点图

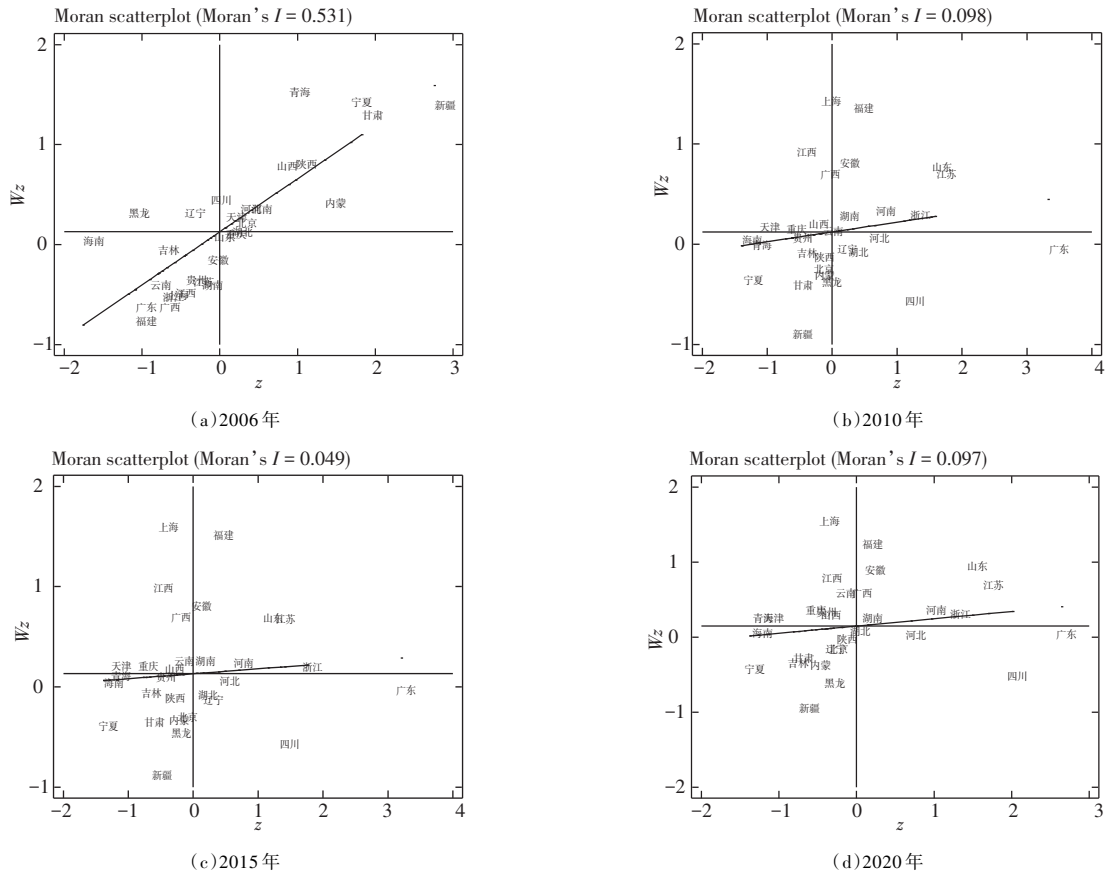


图2 2006年、2010年、2015年、2020年各地区数字基础设施发展的局部Moran' I 散点图

表 14 估计结果显示,污染减排效应的空间自回归系数均通过了 1% 的显著性水平检验,且数字基础设施的空间交乘项系数为负,但空间交乘项系数不能用以讨论数字基础设施对环境污染的边际影响。因此,本文参考 Pace 和 Lesage(2009)的研究做法使用偏微分方法解释数字基础设施发展对污染减排的直接效应和间接效应。从表 14 估计结果可知,数字基础设施对污染减排的直接效应在 1% 水平下显著为负,说明数字基础设施的发展减少了区域的污染排放。此外,数字基础设施对污染减排的间接效应存在,且在 1%、5% 的水平下显著为负,表明其他区域数字基础设施的发展在影响自身污染减排效应的同时通过空间依赖性减少了本地区污染排放。表明数字基础设施的发展对邻近省份具有负向的空间溢出效应,各省份会通过“学习效应”和“借鉴效应”等方式促进数字基础设施的发展进而减少污染排放。这进一步表明中国各省份污染减排效应不仅受到本省数字基础设施发展的影响,同时受到邻近省份的影响,由此可知,假设 3 成立。

表 13 各类污染物的 Moran' I

变量	lnSO ₂			lnSmoke			lnPM _{2.5}			lnSurface			lnWater		
	Moran' I	P	Z	Moran' I	P	Z	Moran' I	P	Z	Moran' I	P	Z	Moran' I	P	Z
2006 年	0.141**	0.044	1.707	0.136**	0.049	1.655	0.455***	0.000	4.439	0.476***	0.000	4.616	0.233***	0.007	2.463
2007 年	0.141**	0.045	1.699	0.140**	0.043	1.718	0.435***	0.000	4.287	0.450***	0.000	4.409	0.226***	0.008	2.406
2008 年	0.135**	0.049	1.653	0.133**	0.048	1.663	0.428***	0.000	4.211	0.449***	0.000	4.387	0.218***	0.009	2.349
2009 年	0.129**	0.055	1.594	0.131**	0.047	1.670	0.455***	0.000	4.422	0.475***	0.000	4.598	0.242***	0.005	2.567
2010 年	0.129**	0.058	1.568	0.119**	0.059	1.564	0.409***	0.000	4.015	0.431***	0.000	4.199	0.250***	0.004	2.632
2011 年	0.141**	0.049	1.659	0.173**	0.023	1.993	0.474***	0.000	4.647	0.487***	0.000	4.747	0.286***	0.002	2.961
2012 年	0.137**	0.053	1.621	0.203**	0.010	2.340	0.422***	0.000	4.153	0.440***	0.000	4.304	0.281***	0.002	2.905
2013 年	0.135**	0.055	1.600	0.196**	0.012	2.262	0.467***	0.000	4.552	0.486***	0.000	4.718	0.287***	0.001	2.972
2014 年	0.132**	0.058	1.572	0.180**	0.016	2.137	0.440***	0.000	4.317	0.456***	0.000	4.453	0.304***	0.001	3.135
2015 年	0.140**	0.050	1.641	0.130**	0.055	1.598	0.453***	0.000	4.438	0.470***	0.000	4.575	0.315***	0.001	3.207
2016 年	0.126*	0.071	1.468	0.135**	0.050	1.644	0.443***	0.000	4.334	0.466***	0.000	4.533	0.205***	0.012	2.253
2017 年	0.093	0.119	1.176	0.097	0.103	1.267	0.437***	0.000	4.310	0.455***	0.000	4.452	0.312***	0.001	3.186
2018 年	0.106*	0.093	1.321	0.086	0.124	1.154	0.463***	0.000	4.537	0.477***	0.000	4.660	0.332***	0.000	3.355
2019 年	0.107*	0.090	1.340	0.079	0.143	1.069	0.429***	0.000	4.249	0.449***	0.000	4.413	0.349***	0.000	3.473
2020 年	0.156**	0.036	1.796	0.079	0.145	1.056	0.475***	0.000	4.641	0.490***	0.000	4.764	0.335***	0.000	3.361

注:***、**、*分别表示在 1%、5%、10% 的置信水平上显著;括号内的值为异方差稳健标准误。

表 14 数字基础设施发展影响环境污染的空间回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	lnSO ₂	lnSmoke	lnPM _{2.5}	lnSurface	lnWater
ρ	0.479*** (0.085)	0.383*** (0.059)	0.600*** (0.039)	0.589*** (0.039)	0.354*** (0.061)
Dig	-0.308** (0.131)	-0.297*** (0.100)	-0.0424*** (0.014)	-0.042*** (0.013)	0.0356 (0.041)
$W \times Dig$	-0.304 (0.236)	-0.403* (0.230)	0.168* (0.095)	-0.005 (0.022)	-0.234*** (0.087)
直接效应	-0.385*** (0.148)	-0.345*** (0.098)	-0.0471*** (0.016)	-0.047*** (0.015)	0.0167 (0.042)
间接效应	-0.772** (0.390)	-0.729* (0.323)	-0.057*** (0.022)	-0.064 (0.050)	-0.303** (0.120)
总效应	-1.157** (0.483)	-1.074*** (0.340)	-0.104*** (0.038)	-0.337*** (0.041)	-0.286* (0.133)
Controls	是	是	是	是	是
N	420	420	420	420	420
R^2	0.107	0.480	0.537	0.425	0.767

注:***、**、*分别表示在 1%、5%、10% 的置信水平上显著;括号内的值为异方差稳健标准误。

六、结论与政策启示

本文基于 2006—2019 年中国省级面板数据,从多维度检验了数字基础设施发展过程中产生的污染减排效应及其作用机制。研究发现:总体上,数字基础设施的发展显著减少了污染排放,且对工业二氧化硫排放量影响最大。影响机制方面,数字基础设施通过促进绿色创新水平提升、优化产业结构升级进而减少污染排放。此外,通过调节效应发现当产业结构越好时,数字基础设施在抑制污染减排行为中的负向作用越弱。异质性方面,数字基础设施的发展对中部和西部地区的污染减排效应影响最大,对东部地区的影响程度相对较小,且数字基础设施对污染排放存在负向的空间溢出效应。稳健性方面,在考虑内生性问题及各种稳健性检验后,数字基础设施对污染排放具有减少作用的结论依然成立。

基于以上研究结论得到如下政策启示:第一,加大数字基础设施建设的投资力度,提升以互联网为代表

的信息基础设施的覆盖面,打破物理层使用限制、扩大区域无线网络的覆盖范围,发挥数字基础设施的污染减排优势。第二,助力企业数字化转型升级,利用新一代信息网络为环境治理提供技术支撑,实现污染减排数据与新一代信息技术耦合,推动数字技术与资源环境协同创新。第三,各地区应“因地制宜”制定数字经济发展战略,实施具有差异化的数字基础设施发展规划。此外,各地区应加强交流合作,特别是中西部地区应完善招商引资的政策措施,发挥数字经济“后发优势”潜力,促进数字经济与环境污染治理协同发展。

参考文献

- [1] 曹玉平, 2020. 互联网普及、知识溢出与空间经济集聚-理论机制与实证检验[J]. 山西财经大学学报, 42(10): 27-41.
- [2] 陈强远, 林思彤, 张醒, 2020. 中国技术创新激励政策: 激励了数量还是质量[J]. 中国工业经济, 10(4): 79-96.
- [3] 程文先, 钱学锋, 2021. 数字经济与中国工业绿色全要素生产率增长[J]. 经济问题探索, 10(8): 124-140.
- [4] 戴翔, 杨双至, 2022. 数字赋能、数字投入来源与制造业绿色化转型[J]. 中国工业经济, (9): 83-101.
- [5] 邓荣荣, 张翔祥, 2022. 中国城市数字经济发展对环境污染的影响及机理研究[J]. 南方经济, 10(2): 18-37.
- [6] 干春晖, 郑若谷, 余典范, 2011. 中国产业结构变迁对经济增长和波动的影响[J]. 经济研究, 46(5): 4-16, 31.
- [7] 郭丰, 杨上广, 金环, 2022. 数字经济对企业全要素生产率的影响及其作用机制[J]. 现代财经(天津财经大学学报), 42(9): 20-36.
- [8] 郭丰, 杨上广, 任毅, 2022. 数字经济、绿色技术创新与碳排放-来自中国城市层面的经验证据[J]. 陕西师范大学学报(哲学社会科学版), 51(3): 45-60.
- [9] 郭家堂, 骆品亮, 2016. 互联网对中国全要素生产率有促进作用吗?[J]. 管理世界, 33(10): 34-49.
- [10] 韩先锋, 宋文飞, 李勃昕, 2019. 互联网能成为中国区域创新效率提升的新动能吗[J]. 中国工业经济, (7): 119-136.
- [11] 黄群慧, 余泳泽, 张松林, 2019. 互联网发展与制造业生产率提升: 内在机制与中国经验[J]. 中国工业经济, 10(8): 5-23.
- [12] 焦豪, 杨季枫, 王培暖, 等, 2021. 数据驱动的企业动态能力作用机制研究-基于数据全生命周期管理的数字化转型过程分析[J]. 中国工业经济, 10(11): 174-192.
- [13] 李广昊, 周小亮, 2021. 推动数字经济发展能否改善中国的环境污染-基于“宽带中国”战略的准自然实验[J]. 宏观经济研究, 10(7): 146-160.
- [14] 李海舰, 田跃新, 李文杰, 2014. 互联网思维与传统企业再造[J]. 中国工业经济, (10): 135-146.
- [15] 李治国, 王杰, 2022. 经济集聚背景下数字经济发展如何影响空间碳排放?[J]. 西安交通大学学报(社会科学版), 42(5): 87-97.
- [16] 苗效东, 吕明元, 张旭东, 2022. 工业大数据对我国制造业绿色发展的影响-基于省级面板数据的空间效应检验[J]. 软科学, 9(19): 1-17.
- [17] 邵帅, 范美婷, 杨莉莉, 2022. 经济结构调整、绿色技术进步与中国低碳转型发展-基于总体技术前沿和空间溢出效应视角的经验考察[J]. 管理世界, 38(2): 46-69, 4-10.
- [18] 盛斌, 刘宇英, 2022. 中国数字经济发展指数的测度与空间分异特征研究[J]. 南京社会科学, 10(1): 43-54.
- [19] 陶锋, 赵锦瑜, 周浩, 2021. 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, 10(2): 136-154.
- [20] 田红宇, 关洪浪, 2022. 数字经济对粮食生产碳排放的影响研究-来自长江经济带 108 个地级市的经验证据[J]. 中国农业资源与区划, 1-16.
- [21] 魏丽莉, 侯宇琦, 2022. 数字经济对中国城市绿色发展的影响作用研究[J]. 数量经济技术经济研究, 39(8): 60-79.
- [22] 谢文倩, 高康, 余家凤, 2022. 数字经济产业结构升级与碳排放[J]. 统计与决策, 38(17): 114-118.
- [23] 许宪春, 任雪, 常子豪, 2019. 大数据与绿色发展[J]. 中国工业经济, (4): 5-22.
- [24] 许宪春, 张美慧, 2020. 中国数字经济规模测算研究-基于国际比较的视角[J]. 中国工业经济, (5): 23-41.
- [25] 杨文溥, 曾会峰, 2022. 数字经济促进全要素生产率提升的效应评价[J]. 技术经济, 41(9): 1-9.
- [26] 易加斌, 张梓仪, 杨小平, 等, 2022. 互联网企业组织惯性、数字化能力与商业模式创新[J]. 南开管理评论, 25(5): 29-42.
- [27] 于世海, 许慧欣, 孔令乾, 2022. 数字经济水平对中国制造业资源配置效率的影响研究[J]. 财贸研究, 33(12): 1-22.
- [28] 曾燕萍, 蒋楚钰, 崔智斌, 2022. 数字金融对经济高质量发展的影响-基于空间杜宾模型的研究[J]. 技术经济, 41(4): 94-106.
- [29] 赵宸宇, 王文春, 李雪松, 2021. 数字化转型如何影响企业全要素生产率[J]. 财贸经济, 42(7): 114-129.
- [30] 赵涛, 张智, 梁上坤, 2020. 数字经济、创业活跃度与高质量发展-来自中国城市的经验证据[J]. 管理世界, 36(10): 65-76.
- [31] AHMADOVA G, DELGADO MÁRQUEZ, et al, 2022. Too good to be true: The inverted U-shaped relationship between home-country digitalization and environmental performance[J]. Ecological Economics, 196, 107397-107397.

- [32] CAIRNCROSS F, 1997. The death of distance[M]. Cambridge: Harvard Business Review Press.
- [33] CRAWFORD W, 1996. The digital economy: Promise and peril in the age of networked intelligence[J]. The Journal of Academic Librarianship, 22(5): 397-397.
- [34] DONG F, HU M Y, GAO Y J, et al, 2022. How does digital economy affect carbon emissions? Evidence from global 60 countries[J]. The Science of the Total Environment, 852: 158401-158401.
- [35] LEAMER E E, STORPRR M, 2001. The economic geography of the internet age[J]. Journal of International Business Studies, 32(4): 641-665.
- [36] NUNN N, QIAN N, 2014. US food aid and civil conflict[J]. The American Economic Review, 104(6): 1630-1666.
- [37] PACE R K, LESAGE J P, 2009. A sampling approach to estimate the log determinant used in spatial likelihood problems [J]. Journal of Geographical Systems, 11(3): 209-225.

An Analysis on the Impact of Digital Infrastructure Development on Environmental Pollution in China

Zhang Wencheng, Bai Fenglan

(School of Economics and Trade, Hunan University, Changsha 410006, China)

Abstract: The Chinese government has endeavored to promote the development of digital economy and green transition. Based on Chinese provincial panel data from 2006 to 2019, the impact of digital infrastructure development on environmental pollution and its mechanisms were examined using fixed-effect and mediation models. The results showed that digital infrastructure development significantly reduced emissions of industrial sulfur dioxide, industrial soot, $PM_{2.5}$, and industrial wastewater through promoting green innovation and optimizing industrial structure. In addition, it further discussed the spatial heterogeneity and spatial spillover effects of digital infrastructure on environmental pollution. The results are helpful to understand the effect of digital economy development on environment and provide evidence on the coordination between development of digital economy and green transition in China.

Keywords: digital infrastructure; environmental pollution; mediating effect; spatial Durbin model