

数字基础设施与企业污染减排： 理论分析与经验证据

董雪兵 梁本波 张允达

摘要：随着我国环境督察机制与生态环保治理体系不断完善，工业污染联防联控取得显著成效，但创新支撑不足与地方保护主义仍是制约污染治理效能提升的核心瓶颈。数字基础设施以其低交易成本的全域互联优势与要素整合能力，为工业污染治理提供新动能。通过构建两部门内生增长模型，将企业污染排放的负外部性内生化为消费者效用函数，并基于中国工业企业微观数据库进行实证检验的研究发现：数字基础设施通过驱动企业技术革新、优化生产成本、促进知识溢出与破除区域行政壁垒四条路径，显著降低企业污染排放强度。该减排效应在省际边界、高方言分化、高行政等级及资源型地区更为突出，加大教育补贴力度与强化环境规制水平更有利于强化数字基础设施的企业污染减排效应。

关键词：数字基础设施；污染减排；市场分割；知识溢出；成本优化

DOI：10.19836/j.cnki.37-1100/c.2026.04.009

一、引言

自党的十八大以来，生态文明建设被纳入国家发展战略，绿色低碳发展不仅是高质量发展的必然要求，也是我国深度参与全球气候治理的战略路径。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十五个五年规划纲要》指出，要“深入推进数字中国建设，提升数智化发展水平”^①。数字基础设施是以数据创新为驱动，以通信网络为基础，以算力设施为支撑，涵盖5G、数据中心、云计算、人工智能、物联网、区块链等新一代信息通信技术，并基于上述技术构建的各类数字平台，是数字经济发展的关键载体^②。深入探究数字基础设施能否促进企业污染减排、实现生态环境协同发展，具有重要的理论与现实意义。

现有文献虽然对传统基础设施的经济与环境效应在宏观层面均有丰富的探讨，但是对数字基础设施的环境效应的研究较多围绕城市宏观层面，鲜有深入企业微观层面的证据。例如，Holl以西班牙制造业企业的数据为样本，研究发现高速公路通过促进当地人口集聚进而促进企业全要素生产率的提高^③。Ghani等利用印度高速公路里程数据研究发现，高速公路通过吸引新企业进驻进而提高资源配置效率以及提高企业全要素生产率^④。孙传旺等通过理论分析与实证检验发现，增加交通基础设施投资能够显著改善城市空气质量^⑤。Liang等利用宽带中国示范政策构建交错

作者简介：董雪兵，浙江大学国家战略与区域发展研究院副院长，浙江大学长三角智慧绿洲创新中心未来区域发展实验室主任（杭州 310058；dxh@zju.edu.cn）；梁本波（通讯作者），浙江大学经济学院博士研究生（杭州 310058；liangbenbo@zju.edu.cn）；张允达，浙江大学长三角智慧绿洲创新中心未来区域发展实验室特聘副研究员（嘉兴 314102；ydcchung@zju.edu.cn）。

① 《中华人民共和国国民经济和社会发展第十五个五年规划纲要》，北京：人民出版社，2026年，第39页。

② 赵星：《新型数字基础设施的技术创新效应研究》，《统计研究》2022年第4期。

③ Holl A., “Highways and Productivity in Manufacturing Firms”, *Journal of Urban Economics*, 2016, 93, pp. 131-151.

④ Ghani E., Goswami G. A., Kerr R. W., “Highway to Success: The Impact of the Golden Quadrilateral Project for the Location and Performance of Indian Manufacturing”, *The Economic Journal*, 2016, 126, pp. 317-357.

⑤ 孙传旺、罗源、姚昕：《交通基础设施与城市空气污染——来自中国的经验证据》，《经济研究》2019年第8期。

双重差分模型发现,宽带中国通过促进市场一体化水平进而显著降低城市空气污染水平,并且可以改善邻近城市的空气质量^①。相较已有研究,本文边际贡献主要体现在两方面:一是在理论层面,通过构建两部门内生增长模型,将企业污染排放的负外部性内生化至消费者效用函数,为数字基础设施影响企业污染排放的相关研究提供了全新的数理框架;二是在实证层面,基于中国工业企业数据库与企业污染排放数据库的匹配数据,为数字基础设施驱动企业污染减排的效应及作用机制提供了新的微观经验证据。

二、理论模型与研究假说

借鉴 Acemoglu 和 Restrepo^② 的模型设定,假定最终产品市场为完全竞争市场,中间产品市场为垄断竞争市场,最终产品生产投入要素、服务和中间产品进行生产。在此基础上,构建内生增长模型探讨数字基础设施建设对企业污染排放的影响机制。

(一) 市场假定

假定各地区经济通过使用不变替代弹性函数对各行业产出进行加总,产出计价物商品 Y :

$$Y = \left(\int_{i \in I} y_i^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} di \right)^{\frac{\sigma}{\sigma-1}}, \sigma > 1 \quad (1)$$

其中, y_i 为第 i 个行业的净产出, I 表示一组行业的集合。在各行业中,最终产品生产厂商通过投入 G 和体现该行业数字化水平的中间品 $q(\theta_i)$ 进行生产,总产出函数为:

$$y_i^g = \alpha^{-\alpha} (1 - \alpha)^{-1} G(F_i, X_i)^{\alpha} (q(\theta_i))^{1-\alpha} \quad (2)$$

其中, y_i^g 为最终产品生产厂商生产的最终产品数量; $G(F_i, X_i) = F_i^{\eta} X_i^{1-\eta}$, $\eta \in (\underline{\eta}, \bar{\eta})$, 且 $0 < \underline{\eta} < \bar{\eta} < 1$ 。 F_i 是生产投入的要素,包括数字要素和传统要素两种。传统要素的使用会产生一定的污染,而数字要素的使用不会产生污染。 X_i 代表生产所需的数字化服务,由数字基础设施提供。 q 代表中间产品的数量; θ_i 代表中间产品的数字化水平, $\theta_i \in [0, 1]$; $1 - \alpha$ 代表生产所需中间产品的相对份额。生产投入 F_i 是行业 i 特定任务 z 的加总:

$$F_i = \left(\int_0^1 F_{i,z}^{\frac{\xi-1}{\xi}} dz \right)^{\frac{\xi}{\xi-1}} \quad (3)$$

在生产过程中,数字要素可以对传统要素所执行的生产任务进行一定的替代。一部分生产任务 $F_{i,z}$ 既可以由数字要素执行,也可以由传统要素执行:

$$F_{i,z} = \begin{cases} A_i l_{i,z} + m_{i,z}, & z \in [0, \theta_i] \\ A_i l_{i,z}, & z \in (\theta_i, 1] \end{cases} \quad (4)$$

其中, $l_{i,z}$ 表示行业 i 任务 z 中使用的传统要素的数量, $m_{i,z}$ 表示行业 i 任务 z 中使用的数字要素的数量。 A_i 表示行业 i 中传统要素相对于数字要素的生产率。 $z \in [0, \theta_i]$ 的任务对于传统要素和数字要素来说是完全替代的。 θ_i 的提升将扩展数字要素可替代传统要素的任务集合,表明行业 i 数字化技术水平的提升。

由于行业 i 的中间产品 $q(\theta_i)$ 由拥有数字技术的垄断者提供,一旦新技术被创造出来,垄断者就可以恒定的单位成本提供包含该技术的商品,以便于简化,该单位成本通常设定为最终产品的 $1 - \alpha$ 单位,则行业净产出为:

$$y_i = y_i^g - (1 - \alpha) q(\theta_i) \quad (5)$$

① Liang B., He G., Wang Y., "The Digital Economy, Market Integration and Environmental Gains", *Global Finance Journal*, 2024, No.100956.

② Daron A., Pascual R., "Demographics and Automation", *The Review of Economic Studies*, 2022, 89(1), pp. 1-44.

设定每单位数字基础设施提供1单位的数字化服务和不定量的数字要素,因此 X_i 也是行业 i 中数字基础设施的总数,用 X 表示数字基础设施的非弹性供给;生产所需传统要素由传统设施1:1提供,用 L 表示传统设施的非弹性供给。 W 表示传统设施的价格, V 表示数字基础设施的价格, M 表示数字要素投入的总供给, $\phi = X/(L + X)$ 表示生产过程中使用的数字基础设施所占份额。根据市场出清条件,可得:

$$L = \int_{i \in I} \int_0^1 l_{i,z} dz di \quad (6)$$

$$M = \int_{i \in I} \int_0^1 m_{i,z} dz di \quad (7)$$

$$X = \int_{i \in I} \int_0^1 x_i di \quad (8)$$

(二)企业生产决策

令 $\Theta = \{\theta_i\}_{i \in I}$ 表示所有行业采用的数字技术的集合, $y_i^g, F, X, q(\theta_i)$ 价格分别为 p_Y, p_F, p_X, p_θ ,则最终产品生产厂商目标为:

$$\max \pi_{1i} = \max \{ p_{Y,i} y_i^g - p_{F,i} F_i - p_{X,i} X_i - p_{\theta,i} q(\theta_i) \} \quad (9)$$

对上式进行求解,可得最终产品厂商对中间产品的需求函数为:

$$q_i(\theta) = \alpha^{-1} F_i^{\eta_i} X_i^{1-\eta_i} \left(\frac{p_{\theta,i}}{p_{Y,i}} \right)^{-\frac{1}{\alpha}} \quad (10)$$

面对弹性为 α^{-1} 的需求曲线,行业 i 的技术垄断者设定价格使利润最大化,该价格等于边际成本的 $1/(1-\alpha)$ 倍。计算可得利润最大化的价格为 $p_{\theta,i} = p_{Y,i}$,行业 i 的产出价格为 $p_{Y,i} = \lambda_i p_{X,i}^{\eta_i} V^{1-\eta_i}$,其中 $\lambda_i = (1-\alpha)\eta_i^{-\eta_i}(1-\eta_i)^{-(1-\eta_i)}$ 。采用数字要素的决定取决于数字化带来的成本节约,而成本节约又由要素价格决定。令 ϖ_i 表示当任务由数字要素而不是传统要素生产时成本下降的百分比,可得:

$$\varpi_i = \frac{1}{1-\zeta} \left(1 - \left(\frac{A_i P_M}{W} \right)^{1-\zeta} \right) \quad (11)$$

当 $W/A_i > P_M$ 时,行业 i 使用传统要素生产的有效成本 W/A_i 大于使用数字要素生产的成本 P_M ,因此 $\varpi_i > 0$,生产过程将采用数字要素;当 $W/A_i < P_M$ 时,行业 i 使用数字要素生产比使用传统要素生产更昂贵,该行业中的企业不采用数字要素。通过定义一个阈值 θ_i^A 来总结数字要素使用决策,即:当 $\varpi_i > 0$ 时 $\theta_i^A = \theta_i$,当 $\varpi_i \leq 0$ 时 $\theta_i^A = 0$ 。由此可得产出价格:

$$p_{Y,i} = \lambda_i (\theta_i^A P_M^{1-\zeta} + (1-\theta_i^A) \left(\frac{W}{A_i} \right)^{1-\zeta})^{\frac{\eta_i}{1-\zeta}} V^{1-\eta_i} \quad (12)$$

上式表明,更大程度使用数字要素降低了传统要素所占的成本份额。

除了产品 y_i 以外,生产过程中企业还会产出污染 e_i ,污染的排放量与传统要素的使用量正相关: $e_i = \kappa_i l_i, \kappa_i > 0$;污染会对工人产生负外部性: $\nu' = \nu/\mu_i(e_i)$,其中 ν 是工人在没有受到污染影响下的间接效用, $\mu_i(e_i)$ 表示污染排放带给劳动力的负外部性, $\mu_i(e_i)$ 是单调增函数, $\partial \mu_i / \partial e_i > 0$ 。

对于行业 i ,存在一个技术垄断者开发新的数字化技术并向其他企业出售包含该技术的中间品 $q(\theta_i)$ 。假定垄断厂商开发新技术的总成本与总利润 $(1-\alpha)p_Y y_i / (2-\alpha)$ 成正比,消耗 $(1-\alpha)p_Y y_i c_i(\theta_i) / (2-\alpha)$ 单位的最终品,其中 c_i 是递增凸函数。根据(1)式, $y_i = p_Y^{-\sigma} Y$,获得垄断厂商净利润:

$$\pi_{2i} = \frac{1-\alpha}{2-\alpha} p_Y^{-\sigma} Y (1 - c_i(\theta_i)) \quad (13)$$

因此垄断厂商利润最大化问题可以表示为:

$$\max \ln \pi_{2i} = (1-\sigma) \ln p_Y + \ln(1 - c_i(\theta_i)) \quad (14)$$

借鉴 Chu 等^①的做法,设定成本函数 $c_i(\theta_i)$ 的形式为:

$$c_i(\theta_i) = 1 - \left[1 - \frac{H(\theta_i)}{\tau(\theta_i)} \right]^{\frac{1}{\delta(\theta_i)\rho_i\theta_i^{1-\beta}}} \quad (15)$$

其中, H 为递增凸函数, 满足 $H'(0) = 0, \lim_{x \rightarrow 1} H(x) = 1, \frac{H'(x)}{1-H(x)} \geq \frac{1}{1-x}$, 最后一个假设加强了凸性, 并确保垄断厂商利润最大化问题有一个唯一解。 $H(\theta_i)$ 的经济含义是不同行业开发利用新技术存在的效率差异。 $\tau(\theta_i)$ 表示企业间的知识溢出, 借鉴董锋等^②以及 William 等^③的研究中关于中间产品数字化水平增加能提升产业间知识溢出的发现, 数字化具有提升效果初始显著、随后边际效应递减的特点^④, 设定 $\tau(\theta_i) = \tau_0 + \kappa_\tau \ln(1 + \theta_i)$, 该函数具有单调递增但逐渐趋缓的变化特征, 能够较好地体现相关文献中描述中间产品数字化水平对知识扩散的“非线性正外部性”机制, 其中 τ_0 表示初始知识溢出水平。 $\delta(\theta_i)$ 表示市场分割程度, 类似地, 借鉴文献中关于中间产品的数字化水平增加能提升市场关联性、降低市场分割程度的发现^⑤, 以及数字边际效应递减的特点^⑥, 设定 $\delta(\theta_i) = \delta_0 \exp(-\kappa_\delta \cdot \theta_i)$, 该函数呈现单调递减且边际下降幅度趋缓的趋势, 能够较好地体现相关文献里中间产品数字化水平改善所带来的“降低行业空间隔阂、减少进入壁垒”的效果及相应的边际效应变化, 其中 δ_0 表示初始市场分割程度^⑦。 ρ_i 表示各行业技术数字化可行性的差异程度, 较高的 ρ_i 表示由于任务的性质, 垄断者开发数字技术的难度越高。在给定 H 为凸的假设下, 式(14)中的最大化问题使得每个行业具有唯一技术选择, 用映射 $\Theta^R(W)$ 表示传统设施价格 W 与均衡技术选择之间的关系。

(三) 数字基础设施建设影响企业污染排放的理论机制

数字基础设施建设水平提升会使生产过程中使用的数字基础设施所占份额上升, 意味着 ϕ 增加。由于生产投入的两种要素中只有传统要素的使用会产生污染, 并且数字要素可以对传统要素所执行的生产任务进行一定的替代, 因此 ϕ 增加会降低每单位产出附带的污染, $\frac{\partial e_i}{\partial \phi} = -\frac{1}{\phi^2} \kappa_i X_i < 0$ 。

由此, 提出假说 1: 数字基础设施建设水平提升会使企业单位产出的污染排放降低。

令 $C(W, V, P_M)$ 代表生产 1 单位最终商品所需的成本:

$$C(W, V, P_M) = \left(\int_{i \in I} p_{Y,i}^{1-\sigma} di \right)^{\frac{1}{1-\sigma}} = \left(\int_{i \in I} \lambda_i^{1-\sigma} p_{F,i}^{\eta_i(1-\sigma)} V^{(1-\eta_i)(1-\sigma)} di \right)^{\frac{1}{1-\sigma}} \quad (16)$$

均衡工资水平 W^E 和 V^E 由等成本曲线 $C(W, V, P_M) = 1$ 的正切线与坐标轴的交点确定, 斜率为 $-\frac{\phi}{1-\phi}$ 。均衡工资满足:

-
- ① Chu A. C., Cozzi G., Furukawa Y., et al., “Inflation and Innovation in a Schumpeterian Economy with North-south Technology Transfer”, *Journal of Money, Credit and Banking*, 2019, 51(2-3), pp. 683-719.
- ② 董锋、赵旭、李春玲等:《数字技术治愈服务业“成本病”的路径研究——基于效率提升与结构优化视角》,《科研管理》2025 年第 6 期。
- ③ Cong L. W., Xie D., Zhang L., “Knowledge Accumulation, Privacy, and Growth in a Data Economy”, *Management Science*, 2021, 67(10), pp. 5969-6627.
- ④ Li S., Gao L., Han C., et al., “Exploring the Effect of Digital Transformation on Firms’ Innovation Performance”, *Journal of Innovation & Knowledge*, 2023, 8(1), No.100317.
- ⑤ He Y., Shen Y., Xie C., “Internal Adjustment and Digital Transformation of Intermediate Inputs: Economic Performance and Environmental Effects”, *Journal of Cleaner Production*, 2023, 419, No.138155.
- ⑥ Constantin A., Cetulean M., Radu C., et al., “The Impact of Digitalisation on Supply Chain Competitiveness: A Multi-country Comparative Approach”, *Sustainability*, 2025, 17(9), p. 4038.
- ⑦ 魏娟、史亚雅、叶文平等:《供应链优势企业数字化转型的双边溢出效应研究》,《财经研究》2025 年第 1 期。

$$C(W^E(\phi, \Theta), V^E(\phi, \Theta), P_M) = 1 \quad (17)$$

$$\frac{1-\phi}{\phi} = \frac{C_W(W^E(\phi, \Theta), V^E(\phi, \Theta), P_M)}{C_V(W^E(\phi, \Theta), V^E(\phi, \Theta), P_M)} \quad (18)$$

由于成本函数 $C(W, V, P_M)$ 是 W 、 V 和 P_M 的联合凹函数, 这意味着等成本曲线 $C(W, V, P_M) = 1$ 是凸的。因此 ϕ 的增加会导致 $W^E(\phi, \Theta)$ 增加、 $V^E(\phi, \Theta)$ 降低, 即 $\frac{\partial W^E(\phi, \Theta)}{\partial \phi} > 0$ 。而 $\Theta^R(W)$ 是 W 的非递减函数^①, 即 $\frac{\partial \Theta^R(W)}{\partial W} \geq 0$ 。因此, 由链式法则可得 $\frac{\partial \Theta^R(\cdot)}{\partial \phi} \geq 0$ 。此外, 式(11)表明 $\frac{\partial \varpi_i}{\partial W} \geq 0$, 传统设施使用价格的上升会使得数字要素替代传统要素带来更高的成本节约, 因此会有更多的行业愿意进行数字化改造, 也就是说集合 $i \in I^+(\phi, \Theta)$ 会随着 ϕ 的增加而扩大。综上所述, 生产过程中使用的数字基础设施所占份额 ϕ 的提升扩大了数字化技术集 Θ^* 和采用这些技术的行业集 $I^+(\phi, \Theta^*)$ 。

由此, 提出假说2: 数字基础设施建设会促进行业数字技术水平提升和技术多样化。

由式(11)可得 $\frac{\partial \varpi_i}{\partial W} \geq 0$, 传统设施使用价格的上升会使得数字要素替代传统要素带来更高的成本节约, 并且由于 $\frac{\partial W^E(\phi, \Theta)}{\partial \phi} > 0$, 因此由链式法则可得 $\frac{\partial \varpi_i}{\partial \phi} \geq 0$ 成立。也就是说, 在生产过程中使用的数字基础设施所占份额 ϕ 的提升会带来更高的成本降低幅度。

由此, 提出假说3: 数字基础设施建设可以促进企业成本优化。

由 $\frac{\partial \tau(\theta_i)}{\partial \theta_i} = \frac{\kappa_\tau}{1 + \theta_i} > 0$, 以及假说2证明过程中已证明了 $\Theta^R(\cdot)$ 与 ϕ 的非递减关系, 因此 $\frac{\partial \tau}{\partial \phi} = \frac{\partial \tau}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial \phi} > 0$ 。也就是说, ϕ 的提升会使企业间的知识溢出增强。

由此, 提出假说4: 数字基础设施建设会提升企业知识溢出水平。

类似地, 有 $\frac{\partial \delta(\theta_i)}{\partial \theta_i} = \delta_0 \exp(-\kappa_\delta \theta_i) (-\kappa_\delta) < 0$, 以及 $\Theta^R(\cdot)$ 与 ϕ 的非递减关系, 有 $\frac{\partial \delta}{\partial \phi} = \frac{\partial \delta}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial \phi} < 0$ 。也就是说, ϕ 的提升会使市场分割程度降低。

由此, 提出假说5: 数字基础设施建设会降低市场分割程度。

三、计量模型与变量说明

(一) 模型设置

基于前文理论分析, 为了检验数字基础设施对企业污染减排的影响, 构建以下模型:

$$Y_{ijkt} = \eta_0 + \alpha_1 Dgi_{kt} + \xi N_{ijkt} + \lambda X_{kt} + \varphi_i + \varphi_{jt} + \varphi_{pt} + \mu_{ijkt} \quad (19)$$

其中, i 为企业, j 为行业, k 为城市, p 为省份, t 为年份, Dgi_{kt} 为数字基础设施水平, Y_{ijkt} 为 k 城市 j 行业 i 企业 t 年的二氧化硫污染物排放强度, 参考已有文献, 使用企业 SO_2 排放量与工业总产值比值的对数表示^②。 N_{ijkt} 为一系列企业层面的控制变量, 并进一步加入城市层面控制变量 X_{kt} 以控制遗漏变量的内生性问题^③。 α_1 为解释变量的系数即数字基础设施对企业污染的影响。 φ_i 为企业固定效应, φ_{jt} 为行业与

① 限于篇幅, 如需证明过程请联系通讯作者。

② 马倩倩、陈诗一:《经济收敛与环境失衡: 基于西部大开发战略的研究》,《世界经济》2023年第8期。

③ 王贤彬、陈博潮、张艺川:《法治强化与行政边界污染治理: 来自环保法庭设立的证据》,《世界经济》2024年第11期。

年份的交互固定效应,用于捕捉行业随年份变化的不可观测因素; φ_{pt} 为省份与年份的交互固定效应,用于捕捉省份层面时变的不可观测因素; μ_{ijkt} 为随机扰动项。

(二)数据说明

1.被解释变量:企业污染排放强度($Lngqds2$)

数据来源于中国工业企业污染数据库,样本跨度为2006—2014年,对数据进行如下清洗:剔除固定资产、总资产、工业总产值、固定资产净值年平均余额缺失或小于等于0的异常值样本,剔除资产总计小于固定资产或流动资产的异常样本,剔除员工人数缺失或者小于8的样本,剔除企业资产负债率(企业杠杆水平)大于等于100以及小于等于0的异常样本^①,剔除SO₂和COD排放量缺失以及小于等于0的异常值。由于企业污染物排放是自行上报,可能存在瞒报等可能,借鉴陈登科^②的方法,选取企业SO₂排放量与企业工业总产值的比值并取对数作为企业污染排放强度,在稳健性分析部分使用COD排放量与工业总产值比值的对数值。

2.解释变量:数字基础设施水平(Dgi)

现有文献对数字基础设施建设水平的量化相对有限,且“宽带中国”示范政策的实施时间与研究样本期不匹配。基于此,借鉴已有文献^③使用熵权TOPSIS的方法,从“投资强度”“活跃程度”“普及范围”三个维度,结合六个次级指标综合测度城市数字基础设施水平^④。由于城市层面的长途光缆长度和互联网宽带端口接入数量的数据并未在官方统计年鉴以及统计公报中披露,借鉴王琴等^⑤的研究方法,使用各省份统计年鉴公布的长途光缆长度和互联网宽带端口接入数量与各城市的电信产业基础收入占所属省份收入权重乘积来衡量。

3.控制变量

企业层面控制变量包括经营能力、企业规模、资产负债率、员工规模和固定资产规模,分别以主营业务收入、总资产、总负债与总资产之比、从业人员数和固定资产规模衡量,其中除资产负债率外均作加1取对数处理。城市层面控制变量包括人口规模、绿色技术创新水平、产业结构高级化、经济发展水平、人力资本、基础设施水平、工资水平、城镇化率和财政分权,分别以年末户籍人口、绿色发明专利申请量、第三产业与第二产业增加值之比、2006年不变价实际人均GDP、每万人高校在校人数、人均城市道路面积、职工平均工资、常住城镇人口占比,以及城市人均财政支出占中央、省级和城市人均财政支出总和的比重衡量^⑥。

四、回归结果与分析

(一)基准模型回归结果

基准回归结果如表1所示,第(1)列仅加入了核心解释变量,第(2)—(4)列依次加入固定效应、企业层面控制变量和城市层面控制变量。结果表明,核心解释变量系数均显著为负,假说1得到验证。

① Brandt L., Van Biesebroeck J., Zhang Y., “Creative Accounting or Creative Destruction? Firm-level Productivity Growth in Chinese Manufacturing”, *Journal of Development Economics*, 2012, 97(2), pp. 339-351.

② 陈登科:《贸易壁垒下降与环境污染改善——来自中国企业污染数据的新证据》,《经济研究》2020年第12期。

③ 杜挺、谢贤健、梁海艳等:《基于熵权TOPSIS和GIS的重庆市县域经济综合评价及空间分析》,《经济地理》2014年第6期。

④ 邓丽、陆扬、钟章奇:《数字基础设施、空间溢出效应与全要素生产率》,《经济经纬》2025年第1期。

⑤ 王琴、李敬、丁可等:《数字基础设施、要素配置效率与城乡收入差距》,《统计与决策》2023年第9期。

⑥ 限于篇幅,解释变量指标构建以及数据描述性统计表格未在文中提供,如有需要请联系通讯作者。

表 1 基准回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	<i>Lngqqdso2</i>	<i>Lngqqdso2</i>	<i>Lngqqdso2</i>	<i>Lngqqdso2</i>
<i>Dgi</i>	-19.628*** (0.437)	-1.624* (0.968)	-3.372*** (0.933)	-3.236*** (0.941)
企业层面控制变量	否	否	是	是
城市层面控制变量	否	否	否	是
企业固定效应	否	是	是	是
行业-年份固定效应	否	是	是	是
省份-年份固定效应	否	是	是	是
观测值	140417	99528	99527	99527
<i>R</i> ²	0.043	0.833	0.853	0.853

注：括号内为聚类到企业的稳健标准误，*、**和***分别代表10%、5%和1%置信区间的显著性水平；如无特殊说明，下表同。

(二)稳健性检验

考虑到样本极端值对基准回归结果的影响，对全样本进行1%缩尾处理后重新进行回归，表2第(1)—(3)列是将缩尾后的企业SO₂污染排放强度作为被解释变量的回归结果，第(4)—(6)列则是将缩尾后的企业COD排放强度作为被解释变量的回归结果，核心解释变量系数均显著为负，进一步表明数字基础设施促进企业污染减排的结论是稳健的。

表 2 稳健性检验回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	<i>Lngqqdso2</i>	<i>Lngqqdso2</i>	<i>Lngqqdso2</i>	<i>Lngqqdcod</i>	<i>Lngqqdcod</i>	<i>Lngqqdcod</i>
<i>Dgi</i>	-1.679* (0.942)	-3.378*** (0.900)	-3.272*** (0.909)	-6.307*** (1.138)	-8.697*** (1.085)	-9.380*** (1.106)
企业层面控制变量	否	是	是	否	是	是
城市层面控制变量	否	否	是	否	否	是
企业固定效应	是	是	是	是	是	是
行业-年份固定效应	是	是	是	是	是	是
省份-年份固定效应	是	是	是	是	是	是
观测值	99528	99527	99527	71322	71321	71321
<i>R</i> ²	0.836	0.856	0.856	0.835	0.849	0.849

(三)内生性检验

借鉴已有研究，构造城市地形起伏度与2005—2013年的全国互联网宽带用户数交互项作为工具变量^①。合理性在于：第一，地形起伏度作为外生自然禀赋，会影响光缆铺设、通信基站等基础设施建

① Liang B., “Digital Allocation Effect, Market Integration, and Low-carbon Development”, *Environment, Development and Sustainability*, 2025, (prepublish). pp. 1-34.

设成本,制约数字基础设施投入强度与空间布局;第二,地形起伏度由长期地质地貌演化形成,短期内不受经济政策、企业行为和污染治理决策影响,而全国互联网宽带用户增长主要源于技术进步、设备成本下降和政策推广,单个城市污染排放难以影响全国用户规模,且滞后一期可避免工具变量受到当期数字基础设施水平的反向影响,因此二者的交互项既满足相关性要求^①,也具有较强外生性。表3报告了两阶段最小二乘法的估计结果,结果表明,数字基础设施仍然能够有效降低企业污染排放强度。

表3 内生性检验回归结果

变量	地形起伏度工具变量			
	(1)	(2)	(3)	(4)
	第一阶段		第二阶段	
	<i>Dgi</i>	<i>Dgi</i>	<i>Lngqqdso2</i>	<i>Lngqqdso2</i>
工具变量	-3.92e-07*** (3.14e-08)	-2.59e-07*** (3.47e-08)		
<i>Dgi</i>			-132.11*** (22.702)	-114.68*** (32.034)
KP-LM			145.10 [0.000]	56.30 [0.000]
KP-WF			155.911 {16.38}	55.771 {16.38}
企业层面控制变量	否	是	否	是
城市层面控制变量	否	是	否	是
企业固定效应	是	是	是	是
行业-年份固定效应	是	是	是	是
省份-年份固定效应	是	是	是	是
观测值	99528	99527	99528	99527

注: {}内为 Stock-Yogo 检验在 10% 显著性水平上的临界值, [] 内为 P 值。

五、进一步分析

(一)作用机制分析

参考江艇^②的研究,将机制变量作为基准模型的被解释变量进行回归,而机制变量影响企业污染减排的分析则通过已有文献进行论证。

1. 技术进步视角

技术创新有利于企业优化生产工艺和提高污染排放净化效率^③,已有研究发现发明专利和实用新型专利技术在减排效果上尤为显著,非绿色专利的减排效用甚至超过了绿色专利^④。表4第(1)列以企业发明专利数量加1取对数衡量技术创新,第(2)列以发明专利、实用新型专利和外观设计专利

① Nunn N., Qian N., "US Food Aid and Civil Conflict", *American Economic Review*, 2014, 104(6), pp. 1630-1666.

② 江艇:《因果推断经验研究中的中介效应与调节效应》,《中国工业经济》2022年第5期。

③ 田潇潇、郭克莎:《绿色制造技术创新对制造业绿色发展的影响》,《经济理论与经济管理》2023年第8期。

④ 党海卿、沈坤荣、师博:《创新驱动、知识产权保护与空气质量提升》,《中国人口·资源与环境》2023年第7期。

总量加1取对数进行稳健性检验。结果表明,数字基础设施通过提升企业信息化与数字化应用能力,强化污染物监测、排放溯源和生产治理优化,从而提高企业生产效率与治污能力,假说2成立。

2. 成本优化视角

成本降低可提升企业资金配置效率,使其将更多资源投入环保技术与清洁生产工艺研发,从而降低能源消耗和污染排放,并推动绿色转型^①。数字基础设施通过促进数字技术应用优化内部管理、减少资源浪费并提升运营效率,同时推动数字金融发展、提高企业融资可得性并缓解融资约束^②。分别以管理费用与总资产之比、利息支出与总负债之比衡量企业内部管理成本和外部融资成本,表4第(3)列和第(4)列结果表明,数字基础设施能够显著降低企业内部管理成本和外部融资成本,假说3得到验证。

3. 知识溢出视角

梅特卡夫定律认为,网络价值与节点规模的平方成正比,为理解数字基础设施的经济与环境效益提供了理论依据。数字基础设施通过扩大信息网络、降低搜寻与知识传播成本,促进专利技术、管理经验和合作对象信息的传播匹配,从而提升合作机会、分担研发成本,并加速创新成果扩散与应用。借鉴既有研究^③,以企业剔除自引的专利被他人引用次数总量衡量知识溢出效应,表4第(5)列结果表明,数字基础设施能够促进企业间知识溢出,假说4得到验证。

4. 破除行政壁垒视角

新经济地理学认为,产业集聚能够通过规模效应和知识溢出提升地区创新水平,而运输成本与行政壁垒则会阻碍商品和要素自由流动,形成市场分割并抑制资源有效配置^④。数字基础设施通过提升市场信息透明度、降低信息不对称和交易成本,促进商品流通与要素跨区域配置,从而削弱市场分割并推动市场一体化^⑤。参考吕冰洋和贺颖^⑥的做法,基于各城市八大类商品消费价格指数,采用价格法测度市场分割程度^⑦。表4第(6)列结果表明,核心解释变量系数显著为负,说明数字基础设施能够降低市场分割,优化企业要素配置,假说5得到验证。

表4 作用机制分析回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	发明专利 申请量	全专利 申请量	内部管理 成本	外部融资 成本	知识溢出	行政壁垒
<i>Dgi</i>	0.387** (0.175)	0.871*** (0.323)	-0.276*** (0.086)	-0.443** (0.225)	9.360* (5.308)	-0.161*** (0.025)
企业层面控制变量	是	是	是	是	是	是
城市层面控制变量	是	是	是	是	是	是
企业固定效应	是	是	是	是	是	是
行业-年份固定效应	是	是	是	是	是	是
省份-年份固定效应	是	是	是	是	是	是

① 陈诗一、张建鹏、刘朝良:《环境规制、融资约束与企业污染减排——来自排污费标准调整的证据》,《金融研究》2021年第9期。
② 崔惠玉、王宝珠、徐颖:《绿色金融创新、金融资源配置与企业污染减排》,《中国工业经济》2023年第10期。
③ 刘修岩、王峤:《知识溢出的边界效应——来自专利引用数据的证据》,《经济研究》2022年第11期。
④ Krugman P, “Increasing Returns and Economic Geography”, *Journal of Political Economy*, 1991, 99(3), pp. 483-499.
⑤ 马述忠、房超:《线下市场分割是否促进了企业线上销售——对中国电子商务扩张的一种解释》,《经济研究》2020年第7期。
⑥ 吕冰洋、贺颖:《迈向统一市场:基于城市数据对中国商品市场分割的测算与分析》,《经济理论与经济管理》2020年第4期。
⑦ 限于篇幅,价格法公式推导以及具体计算过程未在文中提供,如需要请联系通讯作者。

续表 4

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	发明专利 申请量	全专利 申请量	内部管理 成本	外部融资 成本	知识溢出	行政壁垒
观测值	99528	99528	99528	99528	4223	96183
R^2	0.531	0.582	0.364	-0.040	0.517	0.465

(二)异质性分析

1. 基于省际边界和方言多样性

借鉴董雪兵和崔宁^①的做法,根据企业注册地经纬度坐标计算其至省份边界城市的最短距离,将该距离小于15千米的样本界定为省际交界地区企业,反之为非交界地区企业;同时,以城市方言分化指数的均值为界^②,将样本划分为高、低方言分化组。表5第(1)—(4)列的结果显示,核心解释变量的系数均显著为负,但在省际交界地区和高方言分化样本中系数的绝对值更大。这表明,数字基础设施对企业污染减排的促进作用在市场分割更为严重的区域表现得更为突出,其原因在于,省际边界与方言分化加剧了信息不对称与要素流动障碍^③,而数字基础设施通过降低交易成本、强化跨区域信息联通与环境监管协同,并借助数字媒介提升公众监督力度,从而有效缓解制度性与社会性壁垒,放大其减排效应,进一步印证了前文关于“破除地区行政壁垒”的机制结论。

2. 基于政府教育补贴和环境规制强度

首先,考虑到样本期为2006—2014年,为缓解时变分组变量与数字基础设施之间潜在的双向因果及内生性干扰,以2006年各城市教育支出占一般公共预算支出的比重衡量政府教育补贴强度;采用文本分析法,以2006年各市政府工作报告中环保相关词频占比度量环境规制强度。其次,基于上述两项指标的中位数,将样本划分为高、低两组进行分组回归。表5第(5)—(8)列的回归结果表明,在政府教育补贴水平较高或环境规制强度较高的地区,数字基础设施对企业污染减排的促进作用更为显著。原因在于,教育补贴通过提升人力资本与数字技能,推动产学研深度融合,增强企业对数字技术的吸收与应用能力^④;而更严格的环境规制通过提高污染成本,强化企业采用数字化手段进行精准治污的激励^⑤,从而放大数字基础设施的减排效应。

表5 异质性分析回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
	省际边界地区		方言分化指数		政府教育补贴		环境规制强度	
	属于	不属于	高	低	高	低	高	低
	<i>Lngqqdso2</i>	<i>Lngqqdso2</i>	<i>Lngqqdso2</i>	<i>Lngqqdso2</i>	<i>Lngqqdso2</i>	<i>Lngqqdso2</i>	<i>Lngqqdso2</i>	<i>Lngqqdso2</i>
<i>Dgi</i>	-4.257** (2.072)	-3.340*** (1.095)	-7.908*** (2.059)	-2.178* (1.205)	-4.713*** (1.248)	-0.083 (1.757)	-2.227* (1.346)	-2.057 (1.600)
企业层面控制变量	是	是	是	是	是	是	是	是
城市层面控制变量	是	是	是	是	是	是	是	是

① 董雪兵、崔宁:《市场分割与省际交界地区经济发展》,《经济理论与经济管理》2023年第9期。

② 张杰、王文凯:《方言多样化和企业创新——中国的事实及机制》,《金融研究》2022年第3期。

③ 余典范、龙睿、王超:《数字经济与边界地区污染治理》,《经济研究》2023年第11期。

④ 许家云、廖河洋、杨俊:《政府补贴与企业污染排放——基于微观企业的实证研究》,《产业经济研究》2022年第4期。

⑤ 王艳艳、蔡钟文、罗丽婷等:《环境规制成本如何影响污染企业绿色转型升级?——基于技术学习和吸收的视角》,《财务研究》2024年第4期。

续表 5

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
	省际边界地区		方言分化指数		政府教育补贴		环境规制强度	
	属于	不属于	高	低	高	低	高	低
	<i>Lngqqdso2</i>	<i>Lngqqdso2</i>	<i>Lngqqdso2</i>	<i>Lngqqdso2</i>	<i>Lngqqdso2</i>	<i>Lngqqdso2</i>	<i>Lngqqdso2</i>	<i>Lngqqdso2</i>
企业固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是
行业-年份固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是
省份-年份固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是
观测值	21002	78104	56384	43125	49032	50351	50653	48850
R^2	0.874	0.847	0.853	0.854	0.852	0.854	0.851	0.857
经验 P 值	0.005		0.000		0.062		0.035	

注:经验 P 值(组间系数差异检验)使用费舍尔随机抽样 200 次并汇报 P 值,下表同。

3. 基于城市行政等级和资源禀赋

高行政等级城市(直辖市、副省级市及省会城市)凭借政治与财政优势易于集聚创新资源,这虽有利于数字基础设施建设,但也易引发要素过度集聚的负外部性与资源错配^①。而资源型城市受制于能源依赖,多陷入以高耗能为主的“能源锁定”与“低端锁定”困境^②。将样本按城市级别和《全国资源型城市可持续发展规划》划分为高、低行政等级组以及资源型与非资源型组。表 6 结果表明,数字基础设施的减排效应在高行政等级与资源型城市中效果更强。一方面,高行政等级城市能依托制度优势高效整合创新要素,数字基础设施的优化配置效应进一步缓解了空间拥挤的负外部性,放大减排效应。另一方面,数字技术对资源型城市的绿色赋能主要表现为:一是优化能源供需与工艺流程,依托智能化调度降低系统能耗,提升产出清洁度;二是打破行业与信息壁垒,纠正高耗能部门对生产要素的过度挤占,引导资源向绿色产业流动,驱动结构转型。

表 6 异质性分组回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	城市行政等级		资源禀赋	
	高	低	资源型	非资源型
	<i>Lngqqdso2</i>	<i>Lngqqdso2</i>	<i>Lngqqdso2</i>	<i>Lngqqdso2</i>
Dgi	-13.475*** (4.477)	-5.515*** (1.122)	-7.628** (3.405)	-3.210*** (0.999)
企业层面控制变量	是	是	是	是
城市层面控制变量	是	是	是	是
企业固定效应	是	是	是	是
行业-年份固定效应	是	是	是	是
省份-年份固定效应	是	是	是	是
观测值	18693	80816	28837	70676
R^2	0.866	0.847	0.825	0.862
经验 P 值	0.000		0.000	

① 江艇、孙鲲鹏、聂辉华:《城市级别、全要素生产率和资源错配》,《管理世界》2018 年第 3 期。

② 王昀、孙晓华、刘桐等:《资源型城市的要素错配问题更严重吗?》,《统计研究》2023 年第 2 期。

六、研究结论与对策启示

在全球绿色低碳转型的宏观背景下,探索兼顾经济发展与环境治理的有效路径具有重要的现实意义。文章从理论与实证两个层面分析数字基础设施的减排效应。理论上,构建包含数字基础设施、生产要素与污染排放的分析框架,将污染外部性纳入劳动力效用函数,在数字要素与传统要素替代机制下,揭示数字技术通过优化要素投入结构降低污染排放的作用路径。实证结果表明,数字基础设施显著降低企业污染排放强度,该结论在经过内生性检验和多种稳健性检验后依然成立。机制分析发现,数字基础设施主要通过促进技术进步、降低成本、强化知识溢出以及打破行政壁垒等渠道实现减排效应。异质性分析结果表明,数字基础设施的减排效应在省际边界、高方言分化、高行政等级及资源型地区更为显著;同时,教育补贴与环境规制强度的提升能够进一步强化其减排作用。

基于上述结论,提出如下对策建议:第一,加快数字基础设施建设与企业数字化转型,通过完善网络与算力设施、优化政策支持体系与营商环境,提升企业绿色生产能力。第二,打破地方保护与行政壁垒,推进全国统一大市场建设,促进要素跨区域流动与资源优化配置,释放数字基础设施的减排潜力。第三,强化教育投入与环境规制协同,通过提升人力资本水平与监管强度,增强企业数字技术应用能力与绿色转型动力,并以新质生产力培育为导向,推动产业结构绿色化与智能化升级。

Digital Infrastructure and Corporate Pollution Reduction: Theoretical Analysis and Empirical Evidence

Dong Xuebing^{1,3} Liang Benbo² Zhang Yunda³

(1. Institute for National Strategy and Regional Development, Zhejiang University, Hangzhou 310058, P. R. China;

2. School of Economics, Zhejiang University, Hangzhou 310058, P. R. China;

3. Innovation Center of Yangtze River Delta, Zhejiang University, Jiaxing 314102, P. R. China)

Abstract: Digital infrastructure has emerged as a critical institutional and technological foundation for reconciling industrial development with environmental governance. In China, where industrial firms remain significant contributors to local pollution, the proliferation of broadband networks, data centers, and advanced digital technologies—such as cloud computing and artificial intelligence—has the potential to reshape corporate production decisions by altering factor allocation, information transmission, and innovation incentives. This study systematically investigates whether and how urban-level digital infrastructure mitigates firm-level pollution emissions. On the theoretical front, we develop a two-sector endogenous growth model that integrates digital infrastructure, heterogeneous production factors, and pollution emissions into a unified analytical framework. Departing from conventional models that treat pollution merely as an external byproduct of production, we endogenize the negative externality of pollution within the household utility function and emphasize the substitutability between digital and traditional production factors. The model demonstrates that improvements in digital infrastructure raise the share of digital inputs in production, thereby lowering pollution intensity per unit of output and accelerating the diffusion of digital technologies across industries. On the empirical front, we draw on a comprehensive dataset

that matches the Chinese Industrial Enterprise Database with firm-level pollution data spanning 2006 to 2014, and construct a multidimensional city-level digital infrastructure index. Baseline estimations reveal that digital infrastructure significantly reduces firms' sulfur dioxide emission intensity. This core finding proves highly robust across alternative pollution measures, winsorization procedures, and instrumental variable (IV) estimations. Our IV strategy employs the interaction between city-level terrain ruggedness and the lagged national number of broadband users, exploiting the exogeneity of topographical conditions that constrain infrastructure deployment costs yet remain entirely independent of firm-level pollution dynamics. Mechanism analyses identify four primary channels through which this effect operates: (1) fostering technological progress, as evidenced by increased invention patent and total patent outputs; (2) optimizing cost structures by reducing both internal management costs and external financing costs, thereby freeing capital for cleaner production investments; (3) accelerating inter-firm knowledge spillovers by lowering information search and transmission frictions; and (4) dismantling market segmentation and administrative barriers, which facilitates the efficient cross-regional allocation of goods, technologies, and production factors. Heterogeneity analyses further substantiate these mechanisms. The pollution-reducing effect is particularly pronounced for firms located near inter-provincial borders and in regions with high dialect fragmentation—areas typically characterized by severe market segmentation and communication frictions. The effect is also stronger in higher-ranked cities and resource-based cities, where the environmental gains from correcting factor misallocation and breaking “energy lock-in” are greater. Moreover, higher local education subsidies and more stringent environmental regulations amplify these environmental gains by elevating human capital and intensifying incentives for precision pollution control. These findings suggest that digital infrastructure transcends its role as a mere technological catalyst for economic growth, serving instead as a vital governance instrument for green transformation. Accordingly, policymakers should prioritize digital infrastructure deployment, deepen corporate digital transformation, and dismantle local protectionism. Fostering synergies among educational investment, environmental regulation, and industrial upgrading will ultimately cultivate the “new quality productive forces” necessary for high-quality, sustainable economic development.

Keywords: Digital infrastructure; Pollution Reduction; Market segmentation; Knowledge spillover; Cost optimization

[责任编辑:李清杨]