

数字基础设施建设是否促进碳生产率的提升？ ——基于省际面板数据的实证分析

蔡 玉，薛景纯，杨星蕊

南京邮电大学经济学院，江苏 南京

收稿日期：2024年12月5日；录用日期：2024年12月20日；发布日期：2025年1月24日

摘 要

利用2010~2021年30个省份的面板数据，构建数字基础设施指标体系，运用空间面板回归和双固定效应等多模型实证考察数字基础设施提升碳生产率的影响。研究结果表明：数字基础设施建设提升碳生产率的影响存在显著的正向促进作用，经过一系列的检验该结果仍成立；增长极、交易成本、资源错配以及技术创新效应是数字基础设施赋能碳生产率提升的潜在传导机制；数字基础设施在中部、非老工业区和数字经济发达省份可以显著提升碳生产率；进一步分析表明，数字基础设施对碳生产率的提升存在显著的空间自相关性和溢出效应，在提高本土区域碳生产率的同时，对邻近区域碳生产率产生促进作用；本文丰富了数字基础设施提升碳生产率的路径研究，为政府加强统筹规划，重塑省域间信息交互模式，推动实现绿色低碳发展提供政策启示。

关键词

数字基础设施，碳生产率，资源错配效率，空间效应

Does the Construction of Digital Infrastructure Promote an Improvement in Carbon Productivity?

—An Empirical Analysis Based on Provincial Panel Data

Yu Cai, Jingchun Xue, Xingrui Yang

School of Economics, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing Jiangsu

Received: Dec. 5th, 2024; accepted: Dec. 20th, 2024; published: Jan. 24th, 2025

Abstract

Using panel data from 30 provinces in China from 2010 to 2021, a set of digital infrastructure indicators was constructed, and the impact of digital infrastructure on carbon productivity was empirically examined using spatial panel regression and double fixed effect models. The results show that the promotion of digital infrastructure construction has a significant positive impact on carbon productivity, which remains valid after a series of tests; the growth pole, transaction cost, resource misallocation, and technological innovation effects are the potential transmission mechanisms through which digital infrastructure empowers carbon productivity improvement; digital infrastructure can significantly improve carbon productivity in central, non-old industrial areas, and digital economy-developed provinces; further analysis shows that digital infrastructure has significant spatial autocorrelation and spillover effects in improving carbon productivity, improving the carbon productivity of the local region while promoting the carbon productivity of neighboring regions; finally, this paper enriches the study on the pathways of digital infrastructure improving carbon productivity and provides policy implications for governments to strengthen overall planning, reshape inter-provincial information interaction modes, and promote green and low-carbon development.

Keywords

Digital Infrastructure, Carbon Productivity, Resource Misallocation Efficiency, Spatial Effect

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

低碳经济背景下，全球变暖等气候问题逐渐成为国际社会关注的焦点。据 IEA 数据显示，我国碳排放总量持续增长，在 2023 年创下新高，增长 4.13%，达 126 亿吨。国务院印发《2030 年前碳达峰行动方案》，明确制定碳达峰实施方案的时间表、路线图。国家“十四五”规划指出新型数字基础设施是数字经济发展的底座和基石，也是拉动新一轮经济增长的重要引擎，有助于促进稳增长、调结构、惠民生。作为全球最大的实时数据生产国，我国数字基础设施建设不断取得新突破，为优化能源使用、提高资源效率提供新的可能性。从智能电网到绿色数据中心，从远程工作到共享经济，数字技术的应用正在开辟减少碳足迹的新途径。那么，数字基础设施能否有效促进碳生产率的提升？其作用机制是什么？是否存在多维异质性和空间溢出效应？明晰上述问题，对于加快构建“双碳”政策体系，推进碳达峰碳中和具有重要的理论意义和现实意义。

目前，学者们对于数字基础设施促进碳减排的研究主要集中在产业、技术创新、产业结构等方面，且存在区域发展不平衡的特征性事实。一方面，数字基础设施的完善打破地理限制，提升了农村金融包容度和金融服务质效[1]，同时利用对环境的正负外部性分析数字基础设施对碳排放的影响。另一方面是城市群经济效益和产业结构调整，逐步缩小各省市海洋耦合协调状态空间差异[2]，显著促进制造业、物流产业、土地利用效率以及区域经济韧性的高质量发展[3]，从而推动传统行业的低碳转型。此外，数字基础设施发展水平和碳排放形成区域发展不平衡的特征性事实，不同区域内绿色基础设施的投入对碳排放的影响存在差异[4]，同时通过区域技术、绿化水平呈现“U”型曲线碳排放效应。

综上, 现有研究集中在数字基础设施建设对碳减排产业、区域、新技术的实证检验, 仅有少数学者关注数字基础设施对碳生产率的影响, 也仅限于对产业结构和地区层面的讨论。基于此, 本文从数字基础设施对碳生产率资源错配、交易成本的潜在传导机制和空间溢出效应造成的影响出发, 选取 2010 年~2021 年省际面板数据, 构建数字基础设施评价指标体系, 运用中介模型探究数字基础设施对碳生产率的影响机制; 从区域、老工业水平和数字经济发展水平三个维度分析其异质性, 并实证检验数字基础设施促进碳生产率提升的空间溢出效应。

2. 理论分析与研究假设

2.1. 数字基础设施对碳生产率的直接作用机制

“双碳”目标下, 数字基础设施是推动降碳减排的关键性力量。数字基础设施基于其承载的信息技术及应用服务, 能够通过鼓励绿色生活方式、优化企业生产方式、创新政府碳监管三个层面达到促进碳生产率提升的目的。

在个人层面, 数字基础设施通过技术创新, 改变中国传统能源消费观念, 引发居民生活方式转型[5]。借助大数据、可再生能源、云计算等技术在交通建设和智能家居的广泛应用, 增强多因素的流动性、多方位智能调度, 降低个人资源浪费, 进一步促进节能环保生活。在企业层面, 数据要素的非竞争性和正外部性等特征, 加速企业生产方式的变革[6]。数字基础设施有效降低不同主体间的要素搜寻、交易、复制与匹配的成本, 优化企业生产过程, 促进数字化生产线、智能供应链管理系统等技术发展, 实现节能减排目标。在政府层面, 数字基础设施推动政府数字化治理, 构建数智政府和推动整体经济低碳发展的同时[7], 通过数字化采集和分析, 更好地监测碳排放情况, 指导政策制定和调整, 推动碳生产率的提升。

H1: 数字基础设施能够直接促进碳生产率的提升。

2.2. 数字基础设施驱动碳生产率的间接作用机制

为了进一步研究数字基础设施提升碳生产率的作用机制, 本文拟从增长极、交易成本、资源错配以及技术创新效应四个方面进行理论分析并提出研究假设。

2.2.1. 增长极效应

区域增长极初具规模时, 加速引导周边生产要素的自由流动, 逐步形成经济集聚效应和规模效应。我国数字经济的快速发展, 推动绿色增长极辐射引领区域全面转向绿色低碳[8]。而城市群和都市圈作为经济带内部的增长极, 不断完善数字基础设施建设, 驱动区域经济空间结构的重塑, 促进绿色生产要素的空间集聚。同时, 增长极对中心省域和周边省份带来的虹吸效应进一步推动了数字基础设施的大规模覆盖和产业智能化进程[9], 使得生产要素从低效率部门向高效率部门转移, 进一步提升碳生产率。

H2a: 数字基础设施通过促进各省新旧增长极的替换提升碳生产率。

2.2.2. 交易成本效应

不可避免的政策不确定性与信息时效性, 导致传统贸易模式交易成本高昂而回报率低。新型数字基础设施推进数字技术与传统产业的融合, 有效促进企业组织结构和业务模式的改造升级, 从而实现数字基础设施与三次产业的“逆向”融合[10], 降低交易成本, 对降低二氧化碳排放量产生正向作用。目前, 数字基础设施多作为数字经济发展与数字技术应用的底层依托, 通过推动交易便利化、高效化, 发挥数字产业化的乘数效应促进产业结构升级[10], 从而显著提升企业出口产品的质量和实现区域协调发展, 进一步激发市场主体衍生新商业模式、新商品、新服务。

H2b: 数字基础设施通过减少企业交易成本提升碳生产率。

2.2.3. 资源错配效应

数字技术逐步渗透到生产体系内部，加速市场信息的透明化，降低垄断行业的贸易壁垒，一定程度上缓解资源错配。数字经济使得新技术、新机遇等资源涌入交互区域，优化资本和劳动要素配置的同时，利用城乡反哺行为激活闲置生产要素[11]，从而促进城乡融合和碳生产率提升。在这一过程中，数字基础设施通过提供高效的信息平台，促进了资源在不同企业和产业间的有效流动，降低了资源错配的程度。此外，研究中国区域碳生产率空间特性的同时，也强调资源配置效率对碳生产率的重要影响，提高资源利用效率，从而提升碳生产率。

H2c: 数字基础设施通过降低资源错配指数来提升碳生产率。

2.2.4. 技术创新效应

作为信息交流的媒介，数字基础设施在整合零散信息分布的同时，优化了绿色创新活动，进一步成为数字基础设施影响碳生产率的关键基础。一方面，数字基础设施受环境、对外开放水平等因素的限制，对不同级别城市的绿色技术创新呈现边际递减规律[12]；另一方面，数字基础设施作为建设区域数字经济的重要支柱和核心中枢，打破时空限制，促进创新要素流动、生产要素链状体系发展、知识的外溢及提高资源配置效率[13]，显著促进增效型减碳。

H2d: 数字基础设施通过促进技术创新提升碳生产率。

3. 模型介绍与数据说明

3.1. 模型介绍

3.1.1. 基准回归模型

为探究数字基础设施对碳生产率的影响，本文在控制省份与时间固定效应基础上，建立基准模型，设定如下：

$$\ln \text{cpr}_{it} = \beta_0 + \beta_1 \ln \text{di}_{it} + \beta_2 \text{control}_{it} + \mu_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

其中， i 、 t 表示省份和年份，被解释变量 cpr_{it} 为碳生产率指标，核心解释变量 di_{it} 表示第 i 省第 t 年的数字基础设施建设水平， control_{it} 为相关控制变量指标， μ_i 为省份固定效应， γ_t 为时间固定效应， ε_{it} 为随机扰动项。

3.1.2. 渐进 DID 模型

“宽带中国”政策影响碳生产率的提升，但各省实施时间存在先后差异，故构建渐进 DID 模型研究其对碳生产率提升的机制，构建模型如下：

$$\ln \text{cpr}_{it} = \beta_0 + \beta_1 \text{KDZG}_{it} + \sum_{n=1}^5 \beta_n \text{control}_{nit} + \text{year}_i + \text{province}_t + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

模型中 KDZG_{it} 表示是否实行“宽带中国”政策。实行“宽带中国”政策的省份(处理组)在当年及以后年份受到冲击的省份赋值为 1，未实行“宽带中国”政策的省份(对照组)和缺失值的处理组取 0。

3.1.3. 中介效应模型

本文参考江艇的中介方法[14]，构建中介效应模型，其中 M_{it} 表示中介变量，包括增长极效应、交易成本效应、资源错配效应以及技术创新效应。

$$M_{it} = \beta_0 + \beta_1 \ln \text{di}_{it} + \theta_1 \text{control}_{it} + \mu_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

3.1.4. 空间计量模型

由于地区间的联结互动，使得各地区间的数字基础设施与碳生产率可能并不相互独立，而存在某种

程度上的空间依赖性。基于此，分别构建空间滞后、空间误差和空间杜宾三种空间计量模型进行实证检验，其中空间杜宾(SDM)模型如下：

$$\ln \text{cpr}_{it} = \alpha + \rho W \ln \text{cpr}_{it} + \delta W \ln \text{di}_{it} + \beta_1 \ln \text{di}_{it} + \beta_2 \text{control}_{it} + \mu_{it} \tag{4}$$

μ_{it} 为随机误差项， ρ 为空间自回归系数， W 为空间权重矩阵。

3.2. 指标选取

3.2.1. 被解释变量

碳生产率(lncpr)为被解释变量，选取国内生产总值(GDP)与二氧化碳排放总量的比值取对数来衡量，该方法能够直观地反映了单位碳排放的经济产出。

3.2.2. 解释变量

选取数字基础设施综合评分(di)作为核心解释变量，在参考钞小静研究的基础上[15]，从通信网络、新技术、算力基础设施三个方面选取九个指标，构建评价指标体系取对数表示，具体指标见表 1，同时，利用 topsis 熵权法对各省数字基础设施建设水平进行赋权评分。

Table 1. Digital infrastructure evaluation index system
表 1. 数字基础设施指标评价体系

一级指标	二级指标	单位
通信网络基础设施	互联网普及率	%
	宽带接入端口数	万个
	移动电话普及率	部/百人
	IPv4 地址数	百万
新技术基础设施	人工智能企业数量	家
	区块链企业数量	家
	大数据企业数量	家
算力基础设施	专利申请数	千项
	信息传输、软件和信息技术就业人员	万人

3.2.3. 控制变量

数字基础设施对碳生产率的影响涉及许多复杂因素，借鉴相关研究，本文选取以下指标作为控制变量：(1) 地理位置(geo)，用各省森林覆盖率来衡量。(2) 产业结构(lnind)，采用产业结构合理化指数取对数来衡量。(3) 税负水平(lnsw)，采用税收收入/地区生产总值取对数来衡量。(4) 交通基础设施水平(lnjtss)，用公路里程数取对数来衡量。(5) 人力资本水平(rlzb)，选取高等学校在校生人数/总人口来衡量。

3.2.4. 机制变量

本文从增长极、企业成本、资源错配指数以及技术创新来检验数字基础设施间接影响碳生产率的提升，其中增长极效应参考各省高新技术的投入——产出比数据(zzj)，选取新产品开发的支出与收入的比值来衡量；交易成本效应(cb)，选用主营业务成本与主营业务收入的比值度量[16]；资源错配指数(zy)，使用生产函数法对各城市的资本、劳动和市场要素扭曲程度进行测度[17]；绿色技术创新(gy)，使用绿色发明专利申请数和绿色实用新型专利申请数量之和来衡量。

3.3. 样本选择与数据来源

选用 2010~2021 年我国 30 个省份(除西藏)的数据，数据主要来源于《中国城市建设统计年鉴》《中

国环境统计年鉴》《中国统计年鉴》《中国信息统计年鉴》、国家统计局、能源统计年鉴及天眼查 APP，其中，二氧化碳排放总量的数据来源于中国碳核算数据库(CEADs)和 IPCC 方法测算的权重，由于 CEADs 最新的官方统计数据更新至 2021 年，本文的数据范围截至 2021 年，描述性统计见表 2。

Table 2. Descriptive statistics
表 2. 描述性统计

变量名	样本量	均值	标准差	最小值	最大值
lncpr	360	669.01	493.40	111.49	3310.81
ln di	360	127.99	302.33	3.47	3603.51
geo	360	33.15	17.89	4.02	66.8
ln ind	360	0.18	0.39	-0.63	1.66
ln sw	360	-2.51	0.30	-3.11	-1.67
ln jtss	360	2.45	0.08	2.24	2.57
rlzb	360	0.02	0.01	0.01	0.11
zzj	360	12.56	9.96	0.30	80.22
cb	360	0.83	0.03	0.72	0.89
zy	360	0.30	0.10	0.004	0.67
gy	360	7.84	1.44	3.14	10.93

4. 实证结果分析

4.1. 基准回归

数字基础设施对碳生产率的影响如表 3 所示，第(1)列未添加固定效应和控制变量，结果显示，数字基础设施对碳生产率呈显著正相关；第(2)列在前一列的基础上，构建时间、个体双固定效应，数字基础设施的回归系数显著为正；第(3)列加入全部控制变量，经验证，数字基础设施对碳生产率具有显著的促进作用，回归系数始终在 1%的水平上显著，数字基础设施水平每增加 1%，碳生产率增加 0.500%。

引入控制变量后，数字基础设施对碳生产率的系数呈现出一定的波动现象，总体在 1%的显著性水平上正相关，从而明确数字基础设施推动碳生产率提升的积极作用。就控制变量而言，地理位置、产业结构合理化指数和税负水平影响碳生产率的效果明显，始终 5%显著，其中税务水平对碳生产率提升起抑制作用，而人力资本水平和交通基础设施水平作用不明显。

Table 3. Baseline regression results
表 3. 基准回归结果

变量名	(1)	(2)	(4)
	lncpr	lncpr	lncpr
ln di	0.413*** (18.8271)	0.544*** (5.1170)	0.500*** (6.7591)
geo			0.009** (2.2994)
ln ind			0.654** (2.6222)

续表

lnsw			-0.866** (-2.3235)
lnjtss			-3.272 (-1.6242)
rlzb			1.982 (0.2490)
常数	-2.154*** (-23.7105)	-2.305*** (-7.6893)	3.317 (0.7368)
时间固定	否	是	是
个体固定	否	是	是
N	360	360	360
R ²	0.496	0.537	0.730

注：***、**和*分别表示在 1%、5%和 10%的水平上显著；括号内的数值为 t 值，采用聚类稳健标准误，下同。

4.2. 稳健性检验

4.2.1. 替换被解释变量

碳强度是指单位 GDP 的二氧化碳排放量，与碳生产率呈倒数关系，故选取碳强度作为替换被解释变量，具体公式如下：

$$cei = CO_2 \div GDP \quad (5)$$

回归结果如表 4 第(1)列所示，在添加固定效应与控制变量后，数字基础设施对碳强度的回归系数为 -0.501，在 1%水平上显著，说明数字基础设施水平的提升，会降低碳强度。

4.2.2. 改变估计方法

以滞后一期和滞后两期作为外生变量，缓解双向因果问题，考察前两期年数字基础设施对后两期碳生产率产生的影响，滞后一期结果如表 4 第(2) (3)列所示，滞后两期结果如表 4 第(4) (5)所示，结果表明数字基础设施对碳生产率和碳强度始终在 1%水平上显著，再次验证了研究结论的稳健性。

Table 4. Results of robustness tests

表 4. 稳健性检验结果

变量名	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	lncei	lnopr	lncei	lnopr	lncei
ln di	-0.501*** (-6.7535)				
L.ln di		0.516*** (6.7626)	-0.516*** (-6.7643)		
L2.ln di				0.531*** (6.7964)	-0.531*** (-6.8011)
常数	-3.375 (-0.7537)	3.588 (0.7966)	-3.639 (-0.8110)	3.738 (0.8259)	-3.784 (-0.8388)

续表

控制变量	是	是	是	是	是
时间固定	是	是	是	是	是
个体固定	是	是	是	是	是
N	360	330	330	300	300
R ²	0.731	0.731	0.732	0.729	0.729

4.2.3. “宽带中国”政策冲击

数字基础设施建设是否完善在很大程度上影响碳生产率提升效果，国务院于 2013 年 8 月 17 日发布“宽带中国”战略实施方案，其正式成为国家战略。本文选取“宽带中国”政策作为外生变量，有效缓解了不满足随机抽样而产生的内生性问题。表 5 第(1)列显示“宽带中国”政策冲击的稳健性检验结果，估计系数在 10%的水平上显著为正。这充分说明了在“宽带中国”战略作为准自然实验的背景下，数字基础设施对碳生产率的提升具有显著的促进作用。

4.2.4. 反事实检验

反事实分析是一种用于因果推断的方法，通过构建假设条件场景来估计某个特定行动或决策对结果的影响。

基于“宽带中国”政策的影响，分别进行政策提前一期、政策提前二期、政策提前三期以及政策提前四期的反事实检验，具体结果如表 5 所示。结果始终在 10%和 5%的水平上显著为正，且系数逐步增大，表明无论“宽带中国”政策提前多少期，始终影响着数字基础设施赋能碳生产率的提升。可能受数字经济发展水平和产业结构等原因影响，“宽带中国”政策越提前实施，其对碳生产率的影响逐步加强。

Table 5. Results of progressive DID regression
表 5. 渐进 DID 回归结果

变量名	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	lncpr	lncpr	lncpr	lncpr	lncpr
did	0.356*	0.358*	0.361**	0.367**	0.377**
	(2.0106)	(2.0424)	(2.0736)	(2.1017)	(2.1303)
常数	-0.324	-0.268	-0.174	-0.042	0.007
	(-0.0604)	(-0.0508)	(-2.0331)	(-0.0082)	(0.0013)
控制变量	是	是	是	是	是
时间固定	是	是	是	是	是
个体固定	是	是	是	是	是
N	360	360	360	360	360
R ²	0.465	0.469	0.474	0.479	0.485

4.3. 机制检验

数字基础设施对增长极、交易成本、技术创新和资源错配的影响机制结果如表 6 所示。研究结果显示，数字基础设施对技术创新、资源错配、交易成本以及增长极效应有正向影响。其中，技术创新效应

在 1%的水平上显著为正，表明数字基础设施的完善显著促进了技术创新，进而提升了碳生产率。可能是因为数字基础设施的建设推动了数据资源的高效利用，为企业的生产决策、能源管理等提供了强大的数据支撑，降低信息不对称的同时优化资源配置，促进传统产业的转型升级。资源错配效应在 1%的水平上显著为正，意味着数字基础设施在一定程度上提升了资源的利用效率，从而对碳生产率产生积极影响。交易成本效应在 1%的水平上显著为正，系数相对较小，数字基础设施建设和运营过程中，可能涉及较高的交易成本，一定程度上抵消了对碳生产率的提升作用。增长极效应在 1%的水平上显著为正。数字基础设施的发展在某些地区形成了增长极，吸引了大量的资源和要素聚集，但部分因素导致地区间的差异扩大，可能会对周边地区碳生产率产生负面影响。

Table 6. Regression of mediating effects
表 6. 中介效应回归

变量名	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	lnopr	lngy	lnzy	lnob	lnzzj
lnoi	0.500*** (6.7591)	1.229*** (9.8934)	0.217*** (4.0747)	0.021*** (4.1840)	0.203*** (2.7769)
常数	3.317 (0.7368)	2.784 (0.5579)	-3.891* (-1.9880)	0.236* (1.7064)	6.275* (1.9963)
控制变量	是	是	是	是	是
时间固定	是	是	是	是	是
个体固定	是	是	是	是	是
N	360	360	360	360	360
R ²	0.730	0.825	0.241	0.276	0.139

综合来看，数字基础设施对碳生产率的影响是复杂且多元，在未来的发展中，注意地区经济和产业结构差异，具体问题具体分析，实现碳生产率的持续提升。

4.4. 异质性分析

4.4.1. 区域异质性分析

将样本划分为东部、中部、西部和东北地区。估计结果如表 7 所示，数字基础设施对中部碳生产率显著为正，可能是因为数字基础设施建设水平更高，扩大了数字经济的正向外部效应，促进与传统产业融合发展，一定程度上释放了数字经济带来的碳减排红利，随之提高生产效率；对东北地区碳生产率的影响显著为负，存在抑制作用，可能是因为东北传统产业发展更为突出，能源消耗较大，同时东北地区人口流失大，缺少科技创新和人才支持，从而限制了数字基础设施赋能碳生产率提升的正向作用。

4.4.2. 基于工业化水平的异质性分析

从表 7 可以看出，数字基础设施对碳生产率的影响在非老工业地区 1%水平上显著为正，可能是数字经济促进数字技术的应用，加速传统高碳产业向低碳或无碳产业转型。而老工业省份数字基础设施对碳生产率的影响在 10%的水平上显著为负，可能是因为其数字基础设施覆盖率较低，传统耗能产业比重更高，同时由于资源禀赋、地理位置、气候条件等限制，一定程度上限制了碳生产率的提升。

Table 7. Results of heterogeneity tests
表 7. 异质性检验结果

变量	区域				工业化水平		数字经济发展水平	
	东部	西部	中部	东北	老工业区	非老工业区	发达	欠发达
Indi	-0.036 (-1.4286)	0.056 (0.9412)	1.109*** (4.2702)	-0.068** (-2.0427)	-0.231* (2.3803)	0.360*** (11.7427)	0.411*** (4.5601)	0.036 (0.2421)
常数	0.748 (0.2575)	-0.038 (-0.0046)	6.703 (0.8582)	-59.973*** (0.6446)	-11.393*** (-4.5711)	2.522 (1.5197)	4.442 (1.7585)	-8.591 (-1.7204)
控制变量	是	是	是	是	是	是	是	是
时间固定	是	是	是	是	是	是	是	是
个体固定	是	是	是	是	是	是	是	是
N	120	132	72	36	228	132	180	180
R ²	0.993	0.960	0.972	0.992	0.803	0.876	0.800	0.716

4.4.3. 数字经济发展水平

基于 2021 数字经济发展指数，将样本划分为经济发达地区和经济欠发达地区。估计结果显示，数字基础设施对碳生产率的影响系数在数字经济发达地区显著为正，其原因可能是发达地区技术创新、智能系统优化和数字化监管更成熟，数字基础设施在绿色低碳转型中的作用更显著。而经济欠发达地区，产业数字化融合程度慢和技术创新吸收能力较弱，数字基础设施的减排潜力可能无法有效发挥。

4.5. 空间溢出效应

4.5.1. 全局空间相关性

Table 8. Global Moran index of carbon productivity and digital infrastructure
表 8. 碳生产率和数字基础设施的全局莫兰指数

年份	lncpr			Indi		
	Moran's I	Z 值	P 值	Moran's I	Z 值	P 值
2010	0.096	3.629	0.000	0.064	2.730	0.006
2011	0.090	3.493	0.000	0.040	2.077	0.038
2012	0.096	3.635	0.000	0.031	1.834	0.067
2013	0.094	3.576	0.000	0.028	1.771	0.077
2014	0.097	3.655	0.000	0.030	1.810	0.070
2015	0.096	3.621	0.000	0.038	2.044	0.041
2016	0.097	3.642	0.000	0.040	2.119	0.034
2017	0.093	3.563	0.000	0.043	2.216	0.027
2018	0.093	3.556	0.000	0.057	2.615	0.009
2019	0.092	3.525	0.000	0.061	2.726	0.006
2020	0.089	3.468	0.001	0.069	2.910	0.004
2021	0.088	3.440	0.001	0.067	2.843	0.004

运用全局莫兰指数分别对 2010~2021 年我国 30 个省份的碳生产率和数字基础设施指数进行空间关联效应检验,结果如表 8 所示,碳生产率和数字基础设施的莫兰指数均在 10%的水平上显著为正,表明在样本观测期内碳生产率和数字基础设施的空间自相关性较显著,在分布上表现出较强的空间集聚效应。因此,从总体来看,空间计量模型对本文来说具有合理性。

4.5.2. 局域空间相关性

为反映局域范围内的空间相关程度,本文绘制 2020 和 2021 年碳生产率和数字基础设施的局域莫兰指数散点图。由图 1 及图 2 可知,集中分布在第一、三象限,说明全国大部分省份的碳生产率和数字基础设施均具有空间分布上的集聚性,存在明显的正空间自相关性,但部分省份存在明显的负空间自相关性,二者均表明各省在局域空间上存在较强的关联效应,验证了全局空间自相关分析的结果。

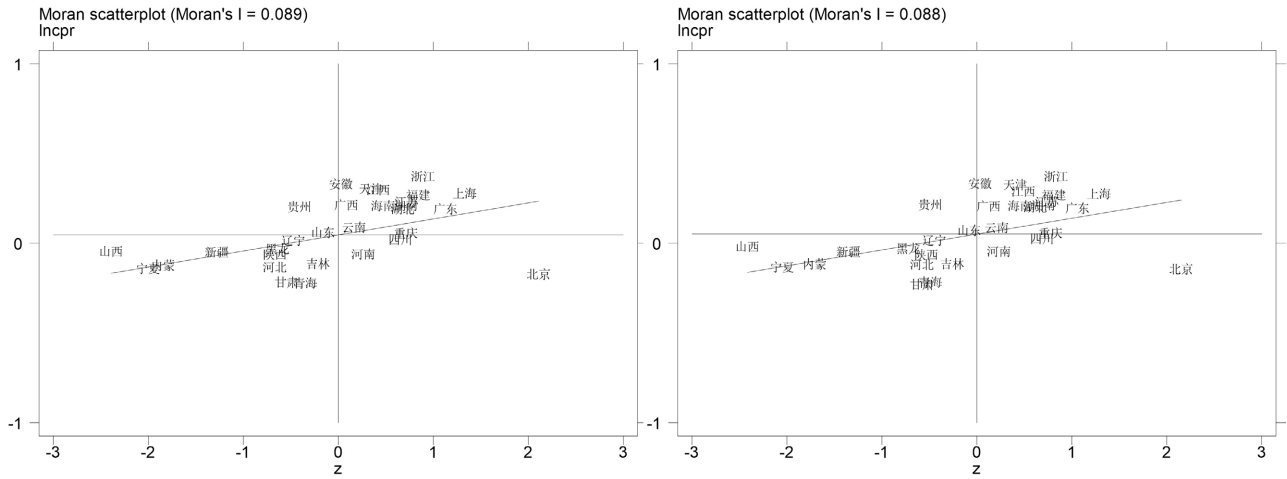


Figure 1. Carbon productivity local Moran scatter plot for 2020 and 2021
图 1. 2020 和 2021 年碳生产率局域莫兰散点图

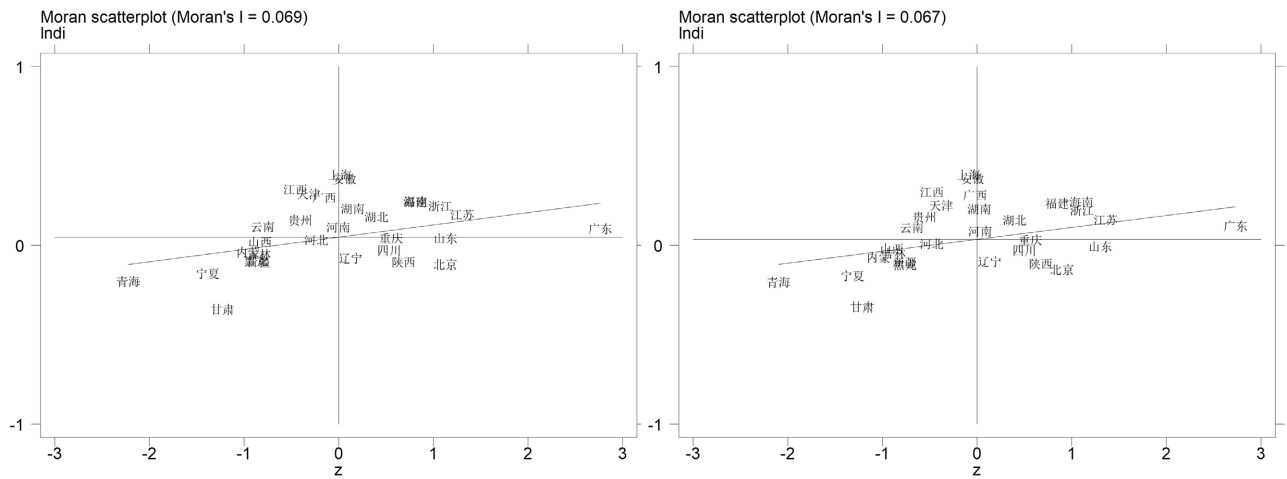


Figure 2. The digital infrastructure index local Moran scatter plot for 2020 and 2021
图 2. 2020 和 2021 年数字基础设施指数局域莫兰散点图

4.5.3. 空间溢出效应分析

本文分别构建空间邻接矩阵、经济距离及经济地理嵌套矩阵对空间计量模型展开分析。为确定空间

计量模型的具体形态，进一步运用 LM、LR 及效应检验等，可知空间邻接矩阵、经济距离矩阵和经济地理嵌套矩阵检验结果均通过显著性检验，说明空间杜宾模型不会退化为空间误差和空间滞后模型，故构建个体与时间双固定的空间杜宾模型。

Table 9. Spatial Durbin model regression results
表 9. 空间杜宾模型回归结果

变量名	空间邻接矩阵		经济距离矩阵		经济地理嵌套矩阵	
	Main	Wx	Main	Wx	Main	Wx
lndi	0.058* (1.91)	0.185*** (3.62)	0.149*** (5.28)	-0.098 (-0.94)	0.134*** (4.72)	0.282 (1.61)
Spatial rho		0.311*** (4.36)		-0.364*** (1.81)		-0.452** (-2.60)
sigma2_e		0.010*** (13.25)		0.0107*** (13.36)		0.0108*** (13.30)
控制变量	是		是		是	
时间固定	是		是		是	
个体固定	是		是		是	
N	360		360		360	
R ²	0.540		0.369		0.461	

表 9 为三种权重矩阵下空间杜宾模型的回归结果，空间邻接矩阵的 Log-likelihood 值最大，估计结果最优，因此重点关注空间邻接矩阵下的空间杜宾模型回归结果。

为深入研究数字基础设施能否对相邻地区的碳生产率产生空间溢出效应，特对空间邻接矩阵进行效应分解，结果如表 10 所示，对于核心解释变量，数字基础设施的直接效应为 0.0753，溢出效应为 0.2779，总效应为 0.3533，且都在 1%的水平上显著为正，说明本地区的数字基础设施既促进本地区的碳生产率，还提高了相邻地区的碳生产率；利用数字基础设施促进碳生产率提升的同时，提高了邻近地区的能源使用效益并促进了周边相关行业的转型升级，从而对邻近区域碳生产效率产生促进作用。

Table 10. Results of spatial effect decomposition
表 10. 空间效应分解结果

变量名称	直接效应	间接效应	总效应
lndi	0.0753** (2.49)	0.2779*** (4.29)	0.3533*** (5.02)

5. 结论和政策启示

本文以我国 2010~2021 年的省际数据为样本，构建数字基础设施指标体系，测度省域数字基础设施建设水平，实证检验了数字基础设施促进碳生产率提升的机制与效应，得出以下结论：第一，数字基础设施对碳生产率提升有显著的正向作用，通过一系列稳健性检验后该结论仍然成立。第二，数字基础设施通过增长极效应、降低交易成本、减少资源错配指数以及提高技术创新来促进区域碳生产率提升。第三，空间计量检验表明，数字基础设施提升碳生产率具有空间溢出效应及对邻近区域碳生产率的显著提升产生促进作用。第四，异质性检验表明，中部地区、非老工业区和数字经济发达省份，数字基础设施对碳生产率的促进作用更显著，而东北地区和老工业区数字基础设施对碳生产率的促进作用不明显。

以上结论具有重要的政策含义:

第一, 推动数字基础设施与绿色低碳产业融合, 打造绿色发展高地。政府加大投资数字基础设施建设, 关注各行业增长极变动, 深入扶持数字基础设施与绿色低碳产业的深度融合, 同时提供政策便利鼓励绿色低碳企业发展, 加快低碳产业集群建设, 为绿色发展带来强劲动力。

第二, 推动数字节能技术应用, 降低交易成本。政府要强化社会资本引导、财政资金补贴等方式, 延续对数字基础设施运用数字节能技术的支持力度。同时, 推广本地化余热回收技术和数字技术优化供应链管理, 提升数字基础设施的能效水平, 降低整体交易成本。

第三, 优化数字基础设施布局, 提高能源配置能力。政府要搭建能源综合管控平台, 优化电力调度和匹配方案, 引导企业向可再生能源富集地区部署数据中心, 减少对传统能源的依赖, 提高能源结构的清洁化水平和全社会的用能效率。

第四, 支持数字基础设施领域技术创新, 提升区域碳生产率。支持开展信息通信设备能效、绿色运维、高效制冷等标准研制工作, 完善节能降碳标准体系。同时, 鼓励企业加强自主研发和创新能力, 推动数字技术与低碳技术的深度融合, 开发出更多具有自主知识产权的绿色节能产品和技术。

基金项目

江苏省大学生创新创业计划项目“数字基础设施建设驱动全要素碳生产率提升的机制与对策研究”(项目编号: 202410293206Y)。

参考文献

- [1] 马慧洁, 李勇坚. 金融服务体系创新助力农业强国建设探析[J]. 改革, 2024(1): 133-143.
- [2] 王泽宇, 吴琼. 数字经济与海洋经济高质量发展耦合协调分析[J]. 资源开发与市场, 2024, 40(1): 52-59.
- [3] 尹西明, 陈泰伦, 金珺, 等. 数字基础设施如何促进区域高质量发展: 基于中国 279 个地级市的实证研究[J]. 中国软科学, 2023(12): 90-101.
- [4] 林乐芬, 杨倩文. 绿色基础设施投资降低了碳排放吗[J]. 现代经济探讨, 2022(12): 29-37.
- [5] 秦炳涛, 俞勇伟, 葛力铭, 等. 智慧降碳: 数字经济发展对城市碳排放影响的效应与机制[J]. 广东财经大学学报, 2023, 38(3): 4-23.
- [6] 杨刚强, 王海森, 范恒山, 等. 数字经济的碳减排效应: 理论分析与经验证据[J]. 中国工业经济, 2023(5): 80-98.
- [7] 杨佩卿. 中国式现代化场阈数字经济赋能新型城镇化研究[J]. 西北大学学报(哲学社会科学版), 2023, 53(4): 168-182.
- [8] 郑玉雯, 李婧婧, 薛伟贤. 数字经济培育西部零碳工业园区的路径研究[J]. 科技管理研究, 2023, 43(19): 227-240.
- [9] 柳卸林, 王宁, 吉晓慧, 等. 中心城市的虹吸效应与区域协调发展[J]. 中国软科学, 2022(4): 76-86.
- [10] 蒋波, 周立新, 丁黄艳. 数字基础设施影响区域协调发展的作用机制检验[J]. 统计与决策, 2024, 40(16): 67-72.
- [11] 魏晓彤, 冯鲍, 阎世平. 数字经济对城乡融合发展的影响及其作用机制[J]. 技术经济与管理研究, 2024(1): 153-158.
- [12] 郭家琛, 王智新. 数字基础设施建设与城市绿色技术创新——来自“宽带中国”城市试点的证据[J]. 经济体制改革, 2024(1): 184-192.
- [13] 董媛香, 张国珍. 数字基础设施建设能否带动企业降碳绿色转型?——基于生产要素链式网状体系[J]. 经济问题, 2023(6): 50-56.
- [14] 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.
- [15] 钞小静, 沈路. 新型数字基础设施对黄河流域城市生态效率的空间溢出效应——基于 2013-2020 年沿线 97 个城市数据的分析[J]. 陕西师范大学学报(哲学社会科学版), 2023, 52(6): 46-60.
- [16] 白雪洁, 孙献贞. 互联网发展影响全要素碳生产率: 成本、创新还是需求引致[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(10): 105-117.
- [17] 刘诚, 夏杰长. 线上市场、数字平台与资源配置效率: 价格机制与数据机制的作用[J]. 中国工业经济, 2023(7): 84-102.