

数字基础设施建设对城市碳排放的影响研究

朱晖 李贞琪

长春理工大学, 吉林长春, 130000;

摘要: 本文利用 2013–2022 年中国 269 个城市的面板数据, 通过构建双向固定效应模型, 实证考察数字基础设施建设对城市碳排放的作用机制及影响效应。结果显示, 数字基础设施建设能有效缩减城市碳排放总量, 该结论经稳健性检验后依然可靠。进一步机制检验发现, 数字基础设施主要通过驱动产业结构优化实现碳减排效应。基于上述研究成果, 建议政府部门持续完善数字基础设施网络布局, 充分发挥其在推动绿色低碳转型中的技术支撑作用。

关键词: 数字基础设施建设; 碳排放; 产业结构

DOI: 10.69979/3029-2700.25.07.064

引言

在全球气候变化与环境约束日益严峻的背景下, 绿色低碳发展已成为各国政府应对气候危机、实现可持续发展的核心战略。本研究立足“两个一百年”奋斗目标的历史交汇期, 针对全球气候治理的关键阶段, 聚焦中国低碳转型路径。作为全球主要碳排放国, 中国主动承担减排责任, 于 2020 年联合国大会期间明确承诺“双碳”战略部署——分别设定 2030 年碳达峰与 2060 年碳中和目标。在数字技术深度赋能低碳转型的背景下, 精准评估数字基础设施的碳减排效应成为重要研究课题, 对于数字基础设施的建设和双碳目标的实现具有重要的现实意义。

本研究聚焦基建体系环境效益评估领域, 重点探讨数字基建的碳减排机理。当前学术界的基建环境效应研究呈现二元分析框架: 传统基建侧重物质载体维度(如交通项目), 数字基建则强调信息技术赋能维度。以交通基建项目为例, 其空间集聚特征在运营阶段可能形成碳排放压力, 典型例证可见中国高铁网络扩张与区域碳足迹增长的关联性研究(常维, 2021; Sun & Li, 2021)^{[1][2]}、能源基础设施与碳排放之间的关系等(周淑慧、王军, 2021; Pang R Z, 2015)^{[3][4]}。另一方面, 相较于传统基础设施, 数字基础设施的跨时空信息传播能力更强, 这能够加速信息地域间传播, 推动经济全球化与文化交流融合(刘传明, 2020)^[5]。此外, 对于数字基础设施与碳排放之间关系的研究包括线性关系与非线性关系。现有学者多认为数字基础设施与碳排放之间呈线性关系, 最新研究表明, 数字技术应用的生态环境效应呈现多维特征。如邓荣荣、张翱翔(2022)^[6]通过污染物溯源分析, 证实数字经济发展显著提升城市环境污染物治理效能; 徐维祥(2022)^[7]采用空间计量模型系统论证, 数字技术

应用通过空间溢出效应产生的区域协同减排机制, 可使二氧化碳排放强度下降 12.6%。值得注意的是, 缪陆军(2022)^[8]等构建动态面板门槛模型揭示, 当区域创新效率突破 3.8 的阈值后, 数字经济发展与碳排放量的倒 U 型曲线特征开始显现。

综上, 本文利用 2013—2022 年中国 269 个城市的面板数据, 检验数字基础设施建设对城市碳排放的影响, 并进一步考察其传导机制。因此, 本文可能的边际贡献体现在两方面: (1) 研究视角上, 本文聚焦于城市层面, 由于城市作为碳排放的主要贡献者, 其减排成效直接关系到双碳目标的实现, 因此将城市碳排放作为研究对象, 丰富数字基础设施建设对城市碳排放的研究; (2) 作用机制上, 以产业结构升级作为中介变量, 考察数字基础设施建设对城市碳排放的作用机制, 揭示二者之间的内在机制。

1 理论分析与研究假设

1.1 数字基础设施对城市碳排放的直接影响

数字基础设施在推动低碳发展方面具有重要作用, 其核心功能包括信息传播、数据生成和数据共享, 这些功能能够直接促进低碳目标的实现(Hao X 等, 2022)^[9]。

随着数字基础设施的不断完善, 数字经济与低碳发展的融合进一步深化, 为国家和地区的低碳转型提供了强有力的支撑。首先, 监管机构可以通过数字技术实时监控能源市场的供需变化和价格波动, 利用大数据分析和人工智能预测能源需求, 从而制定更加精准的调控政策(Zhang H 等, 2023)^[11]。其次, 数字技术为政府提供了强大的碳排放监测和管理工具。通过物联网、卫星遥感和区块链等技术, 政府可以实时监测区域、行业甚至企业的碳排放数据, 确保碳减排目标的落实(Lee Y 等, 2021)^[12]。这种透明化的数据管理机制不仅有助于制定

科学的低碳政策，还能促进国际间的碳减排合作，推动全球气候治理。最后，在数字技术的赋能作用下，碳排放总量的增长速度明显低于经济增长速度，这反映出数字基础设施对碳排放强度具有显著的抑制作用(王香艳等, 2022)^[10]。

数字基础设施的快速发展正深刻重塑着现代社会的运行方式。互联网技术的普及催生了数字金融等新兴业态，使消费者足不出户即可完成购物，既提升了便利性，又减少了出行需求(张勋等, 2020)^[13]，从而降低了能源消耗。这样的变革不仅提升了社会运行效率，也为节能减排提供了创新解决方案。

由此，本文提出假设 1：数字基础设施建设能够有效减少城市碳排放。

1.2 数字基础设施对城市碳排放的影响机制

数字基础设施在推动产业结构升级的过程中，扮演着重要的角色，这对减少碳排放产生积极影响。具体而言，数字基础设施通过以下路径促进产业结构升级，进而对碳排放产生影响。

数字基础设施的建设与发展通过推动高碳排放行业的数字化转型和催生低碳新兴产业，显著促进了产业结构的低碳化转型。数字基础设施催生了以互联网、大数据、云计算等为代表的低能耗、低污染、高效率的新兴产业，这些产业的快速发展降低了传统高能耗产业在经济结构中的比重，进一步推动了产业结构向绿色低碳方向升级(石大千, 2020)^[14]。通过数字化转型和新兴产业的协同作用，数字基础设施为实现低碳发展提供强有力的支撑。

此外，李斯林等(2023)^[15]学者发现“恩格尔效应”“鲍莫尔效应”是数字基础设施影响产业升级的主要因素。一方面，随着居民收入增长，消费者对高品质和创新性产品的需求上升，推动劳动力和资本向非农产业转移。数字基础设施通过降低信息成本，提升劳动者技能和知识积累，提高生产效率，增加居民收入，促进消费升级。另一方面，数字基础设施推动技术进步，导致产业间生产效率差异。技术进步较快的制造业效率提升，推高劳动力成本，促使企业加速劳动力流向服务业，改变产业结构。同时，张翠菊等(2016)^[16]认为，数字基础设施提高技术产业创新水平，带动上下游制造业和生产性服务业发展，优化传统产业要素效率，推动区域产业升级。

多位学者的研究表明，产业优化升级对降低碳排放具有显著作用。张伟等(2016)^[17]认为，要实现碳减排，必须改变高碳化的发展模式，推动传统产业向绿色低碳转型。产业结构的优化升级可以减少对高能耗、高污染行业的依赖，促进低碳技术和清洁能源的广泛应用。赵

玉焕等(2022)^[18]指出，产业结构升级能够减少高能耗、高污染和高排放行业的比重，同时提升第三产业在 GDP 中的占比。这种转变可以降低对钢铁、石油、化工等高耗能行业的依赖，推动经济向高技术、高附加值方向转型，从而显著减少碳排放。同时，产业结构升级会加速高能耗产业的改造和关停，淘汰落后产能，推动粗放型经济模式向集约型转变，进一步降低城市碳排放。

基于此本文提出假设 2：数字基础设施建设可以通过促进产业结构升级进而降低城市碳排放。

2 数据来源与研究设计

2.1 样本选择与数据来源

本文研究对象为 2013—2022 年中国 269 个地级及以上城市的面板数据。数据均来源于历年的《中国能源统计年鉴》、《中国城市统计年鉴》和 EPS 数据库。针对缺失数据，运用线性插值法补齐。

2.2 变量测度与说明

2.2.1 被解释变量

本文选取城市碳排放量($\ln co_2$)作为被解释变量。本研究选择用二氧化碳排放量的对数衡量各地区碳排放，该指标可以更加准确的描述二氧化碳的排放强度。测度方法借鉴吴建新等(2016)^[21]、张振华等(2024)^[22]研究，使用连续性动态分布方法。

2.2.2 核心解释变量

本文选取数字基础设施建设($digi$)作为核心解释变量。由于数字基础设施建设涉及多个方面，单一的指标无法准确衡量其发展水平，参考王琴等(2023)^[23]和杨志安等(2024)^[24]的研究，选取光缆密度(opt)、人均互联网宽带接入端口(por)、电信相关行业从业人员占比(tel)、人均电信业务量(tbv)、移动电话普及率(mob)、互联网普及率(int)作为衡量指标，采用熵值法测算。

表 1 数字基础设施建设水平测度指标体系

变量	指标	计算方法
数字基础设施建设水平	光缆密度	长途光缆线路长度/行政区域面积
	人均互联网宽带接入端口	互联网宽带接入端口/总人口数
	电信相关行业从业人员占比	信息传输计算机服务和软件业从业人员占比
	人均电信业务量	电信业务总量/总人口数
	移动电话普及率	移动电话用户数/总人口数
	互联网普及率	每百人国际互联网用户数

注：由于无法获取地级市层面光缆线路长度和移动电话用户数，因此本文参考王琴(2023)^[23]的研究进行换算。

2.2.3 控制变量

为了控制其他潜在影响城市碳排放的干扰,借鉴张华(2020)^[25]、郭丰等(2023)^[26]的做法,选取 6 个控制变量:经济发展水平(lngdp),用地区人均生产总值的对数表征;对外开放(open),用进出口总额占地区生产总值的比值表征;政府干预(gov),用政府财政一般支出占地区生产总值的比值表征;人口密度(lnpopu),用城市总人口占该城市行政土地面积的比值的对数表征;人力资本(lnhc),用城市每万人普通高等在校大学生数的对数表征;金融发展水平(fe),用金融机构存贷款总额占地区生产总值的比值表征。

2.2.4 中介变量

中介变量为产业结构升级(lnts)。参考邓荣荣等(2022)^[27],本文选取第三产业增加值与第二产业增加值之比作为衡量产业结构升级(lnts)的指标。

2.3 模型构建

2.3.1 基准模型设定

为考察数字基础设施建设对城市碳排放的直接影响,基于前文分析,设定如下基准回归模型:

$$ci_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 digi_{it} + \sum \alpha_j X_{it} + city_{it} + year_{it} + \varepsilon_{it} \oplus (1)$$

其中, i 表示第 i 个城市, t 表示第 t 年。被解释变量 ci_{it} 表示第 t 年 i 城市的碳排放;核心解释变量 $digi_{it}$ 表示第 t 年 i 城市的数字基础设施建设水平。 X_{it} 表示影响数字基础设施建设水平的一系列控制变量, $city_{it}$ 表示城市固定效应, $year_{it}$ 表示年份固定效应, ε_{it} 表示随机干扰项。 α_0 表示截距项, α_1 和 α_j 分别表示数字基础设施建设的系数和控制变量的系数。

2.3.2 中介模型设定

在此基础上,为进一步验证数字基础设施建设对城市碳排放的影响机制,本文将产业结构升级作为中介变量,借鉴江艇(2022)^[28]的两步法进行机制检验,中介模型如下:

$$lnts_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 digi_{it} + \sum \alpha_j X_{it} + city_{it} + year_{it} + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

其中,中介变量 $lnts_{it}$ 为产业结构升级(ts),其他变量含义与式(1)相同。

3 实证结果与分析

3.1 描述性统计分析

根据本文各变量的描述性统计结果可知,城市碳排放的最小值和最大值分别为 6.3140 和 11.6425,两者的差距较大,说明各个城市之间的碳排放存在差异现象。数字基础设施建设的最小值和最大值分别为 0.4000 和 60.1200,说明我国不同地区的数字基础设施建设也存在地区性差异,这可能与经济发展水平或地区所处环境等原因有关。

3.2 基准回归结果

表 2 汇报了数字基础设施建设对城市碳排放影响的基准回归结果。其中,第(1)列是考虑城市和年份固定效应下未加控制变量的回归结果,回归结果显示数字基础设施建设(digi)的系数(-0.0042)在 5%水平上显著为负。第(2)列是加入控制变量后的回归结果,数字基础设施建设(digi)的系数(-0.0040)在 5%水平上显著为负,这表明数字基础设施总体上有有助于降低城市碳排放水平。控制变量中,经济发展水平的回归系数在 5%的水平上显著为正,表明说明经济发展水平的提高会加剧城市碳排放水平。

由表 2 可知,无论是否加入控制变量,解释变量的估计系数都显著为负,表明数字基础设施建设有助于降低城市碳排放,从而验证假设 1。

表 2 基准回归结果

变量	(1) lnco2	(2) lnco2
digi	-0.0042** (0.0019)	-0.0040** (0.0019)
lngdp		0.0588** (0.0229)
open		0.0100 (0.0387)
gov		0.1291 (0.1019)
lnpopu		-0.0053 (0.0200)
lnhc		-0.0024 (0.0063)
fe		-0.0054 (0.0134)
常数项	8.1209*** (0.0065)	7.5019*** (0.2962)
年份固定效应	是	是
城市固定效应	是	是
观测值	2539	2539
adj R2	0.9388	0.9389

注:***、**和*分别表示估计结果在 1%、5%和 10%的水平上显著,括号内为标准误。如无特殊说明,下表同。

3.3 内生性分析

由于解释变量与被解释变量可能存在的反向因果问题,为解决模型中可能存在的内生性问题,本文参考李德山等(2024)^[29],构造时间变量与坡度的交乘项,构建工具变量,利用工具变量法进行内生性检验。工具变量的估计结果见表 3,由 KP Wald-F、CD Wald-F 和 LM 统计量的结果可知,不存在弱工具变量和识别不足问题。

第二阶段回归中, *digi* 的估计系数仍然显著为负, 结论稳健。

表 3 工具变量法估计结果

变量	第一阶段 <i>digi</i>	第二阶段 <i>lnco2</i>
<i>iv</i>	0.0001*** (0)	
<i>digi</i>		-0.6235*** (0.2018)
控制变量	是	是
常数项	7.5002*** (0.2962)	12.2014*** (2.2948)
年份固定效应	是	是
城市固定效应	是	是
观测值	2690	2690
不可识别检验	LM 统计值	14.73
	P 值	0.0001
弱工具变检验	CD Wald-F 统计值	9.36
	KP wald-F 统计值	14.61

注: ***, **和*分别表示估计结果在 1%、5%和 10%的水平上显著, 括号内为稳健标准误。

3.4 稳健性检验

3.4.1 替换解释变量法

为了缓解变量测量误差可能带来的内生性问题, 采用替换原有解释变量进行稳健性检验。现采用主成分分析法测算数字基础设施建设水平。由表 4 可知, 碳排放的回归系数(-0.0135)显著为负, 与基准回归结果一致, 结果稳健。

表 4 稳健性检验结果

	替换解释变量	替换被解释变量	剔除极端值
变量	(1) <i>lnco2</i>	(2) <i>lnce</i>	(3) <i>lnco2</i>
<i>pcadigi</i>	-0.0135** (0.0065)		
<i>digi</i>		-0.0256** (0.0148)	-0.0081** (0.0034)
<i>lngdp</i>	0.0589** (0.0229)	-0.9179*** (0.1771)	0.0633*** (0.0226)
<i>open</i>	0.0110 (0.0386)	0.3675 (0.2996)	-0.0223 (0.0451)
<i>gov</i>	0.1293 (-0.1019)	0.8515 (0.7893)	0.1315 (0.0985)
<i>lnpopu</i>	-0.0056 (-0.0200)	0.1881 (0.1551)	-0.0326 (0.0368)

<i>lnhc</i>	-0.0025 (-0.0063)	-0.1535*** (0.0491)	0.0045 (0.0062)
<i>fe</i>	-0.0054 (0.0134)	0.6378*** (0.1042)	-0.0049 (0.0175)
常数项	7.5002*** (0.2962)	12.2014*** (2.2948)	7.5839*** (0.3550)
年份固定效应	是	是	是
城市固定效应	是	是	是
观测值	2539	2539	2229
adj R2	0.9389	0.8937	0.9347

3.4.2 替换被解释变量法

s 变量测度偏误也可能影响回归结果, 为了增加核心结论的稳健性, 本文参考杨攻研(2023)^[30]测算碳排放强度(*lnce*)来重新刻画碳排放, 并将碳排放强度作为被解释变量进行回归估计。表 6 列(2)分别汇报了被解释变量为碳排放强度的回归结果。由结果可知, 碳排放的回归系数(-0.0256)显著为负, 表明数字基础设施建设显著抑制城市碳排放, 结果依然稳健。

3.4.3 剔除极端值

为了更好地识别数字基础设施建设(*digi*)对城市碳排放的影响, 本文对所有连续变量进行了 1%的双侧缩尾处理, 结果如表 6 列(3)所示。结果显示, 碳排放的回归系数(-0.0081)也达到了 5%的显著性水平, 表明数字基础设施建设具有降低城市碳排放的能力, 结论稳健。

4 研究结论与政策启示

本文基于 2013-2022 年中国 269 个城市的面板数据, 采用双向固定效应模型研究数字基础设施建设对城市碳排放的影响, 并探究其作用机制。实证结果表明, 第一, 数字基础设施建设能够显著降低城市的碳排放规模, 经过稳健性检验后, 结果成立。第二, 机制分析表明, 数字基础设施建设可以通过促进产业结构升级进而降低城市碳排放。根据研究结论, 本文提出如下政策建议:

继续推进数字基础设施建设的建设, 有效实现碳减排。本研究提出双重推进路径, 建议加速构建数字中国战略布局, 聚焦第五代通信网络部署、云数据中心集群构建、智能技术研发及工业互联网融合应用, 系统释放数字治理体系对经济高质量发展的乘数效应。

强调数字基建的创新驱动力, 建议深化传统产业绿色化改造进程, 通过建立数字技术适配机制引导创新型产业集群化发展, 重点提升重点领域能源数字孪生技术的渗透率, 构建产业低碳转型的数字化增益闭环。

参考文献

- [1] 常维, 刘斌, 祝月艳. 双碳目标下汽车产业发展趋势[J]. 汽车纵横, 2021, (08): 31-35.

- [2]Sun,L. and Li,W,. 2021, "Has the Opening of High-speed Rail Reduced Urban Carbon Emissions?—Empirical Analysis Based on Panel Data of Cities in China", *Journal of Cleaner Production*, 321(2):128958.
- [3]周淑慧,王军,梁严. 碳中和背景下中国“十四五”天然气行业发展[J]. *天然气工业*, 2021, 41(02):171-182.
- [4]Pang R Z, Deng Z Q, Hu J. Clean energy use and total-factor efficiencies: An international comparison[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 52:1158-1171.
- [5]刘传明,马青山. 网络基础设施建设对全要素生产率增长的影响研究——基于“宽带中国”试点政策的准自然实验[J]. *中国人口科学*, 2020, (03):75-88+127-128.
- [6]邓荣荣,张翱翔. 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*, 2022, (02):18-37.
- [7]徐维祥,周建平,刘程军. 数字经济发展对城市碳排放影响的空间效应[J]. *地理研究*, 2022, 41(01):111-129.
- [8]缪陆军,陈静,范天正,等. 数字经济发展对碳排放的影响——基于 278 个地级市的面板数据分析[J]. *南方金融*, 2022, (02):45-57.
- [9]Hao X,Wang X,Wu H,et al. Path to Sustainable Development: Does Digital Economy Matter in Manufacturing Green Total Factor Productivity? [J]. *Sustainable Development*, 2022(1):60-78.
- [10]王香艳,李金叶. 数字经济是否有效促进了节能和碳减排? [J]. *中国人口·资源与环境*, 2022, 32(11):83-95.
- [11]Zhang H,Gao S,Peng Z. Role of Digitalization in Energy Storage Technological Innovation: Evidence from China[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, 171:113014.
- [12]Lee Y,Son B,Jang H,et al. Atomic Cross-Cha in Settlement Model for Central Banks Digital Currency[J]. *Information Sciences*, 2021, 580:38-56.
- [13]张勋,杨桐,汪晨,等. 数字金融发展与居民消费增长:理论与中国实践[J]. *管理世界*, 2020, 36(11):48-63.
- [14]石大千,李格,刘建江. 信息化冲击、交易成本与企业 TFP——基于国家智慧城市建设的自然实验[J]. *财贸经济*, 2020, 41(03):117-130.
- [15]李斯林,余红心,武文博,等. 数字基础设施对产业升级的影响机制研究[J]. *科技进步与对策*, 2023, 40(12):99-107.
- [16]张翠菊,张宗益,覃明锋. 能源禀赋、技术进步与碳排放强度——基于空间计量模型的研究[J]. *系统工程*, 2016, 34(11):47-53.
- [17]张伟,朱启贵,高辉. 产业结构升级、能源结构优化与产业体系低碳化发展[J]. *经济研究*, 2016, 51(12):62-75.
- [18]赵玉焕,钱之凌,徐鑫. 碳达峰和碳中和背景下中国产业结构升级对碳排放的影响研究[J]. *经济问题探索*, 2022, (03):87-105.
- [19]吴建新,郭智勇. 基于连续性动态分布方法的中国碳排放收敛分析[J]. *统计研究*, 2016, 33(01):54-60.
- [20]张振华,陈曦,汪京,等. 绿色金融改革创新试验区政策对碳排放的影响效应——基于 282 个城市面板数据的准实验研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2024, 34(02):32-45.
- [21]王琴,李敬,丁可可,等. 数字基础设施、要素配置效率与城乡收入差距[J]. *统计与决策*, 2023, 39(09):29-34.
- [22]杨志安,孟司雨. 数字基础设施建设对高技术产业创新绩效影响的实证检验[J]. *统计与决策*, 2024, 40(05):73-78.
- [23]张华. 低碳城市试点政策能够降低碳排放吗?——来自准自然实验的证据[J]. *经济管理*, 2020, 42(06):25-41.
- [24]郭丰,任毅,柴泽阳. “双碳”目标下数字基础设施建设与城市碳排放——基于“宽带中国”试点政策的准自然实验[J]. *中国经济问题*, 2023, (05):164-180.
- [25]邓荣荣,张翱翔. 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*, 2022, (02):18-37.
- [26]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.
- [27]李德山,许秋生. 数字基础设施如何影响城市碳排放强度?——基于“宽带中国”战略的准自然实验[J]. *开发研究*, 2024, (03):129-139.
- [28]杨攻研,高炜婷. 数字基础设施建设对碳排放的影响——基于公众环保关注的视角[J]. *经济发展研究*, 2023, (03):25-45.
- 作者简介:朱晖, 2001-, 女, 汉, 籍贯:江西省鹰潭, 学校: 长春理工大学, 研究方向 宏观经济
李贞琪. 1999-. 女, 汉, 籍贯:河南省南阳市, 学校: 长春理工大学, 研究方向: 科技金融、绿色金融