

# 网络基础设施、时空动态效应与城市碳排放效率

张跃,蔡朱丽

(淮北师范大学 经济与管理学院,安徽 淮北 235000)

**摘要:**作为促进经济高质量发展的重要引擎,网络基础设施建设也会对城市碳排放效率产生重要影响。将“宽带中国”战略作为网络基础设施的代理变量纳入城市碳排放效率提升的分析框架,借助2007—2020年城际面板数据进行考察。研究结果表明:第一,网络基础设施能够提升城市碳排放效率,并且是通过促进绿色技术创新、推动产业结构升级实现的;第二,网络基础设施对城市碳排放效率的提升作用呈现随时间增长逐渐增强的特征,对邻近“宽带中国”示范城市呈现正向空间溢出效应且效应趋于稳定,对邻近非示范城市呈现负向空间溢出效应且效应逐渐减弱;第三,在高科技创新水平、非东北地区、低环境污染水平的城市,网络基础设施对城市碳排放效率的提升作用更为明显。结论为进一步提高中国城市碳排放效率,从发挥政策作用、贯通作用机制、推进协同共治、探索优化路径方面提出建议。

**关键词:**网络基础设施;宽带中国;城市碳排放效率;时空动态效应;准自然实验

**中图分类号:**X32;F49 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-6049(2024)06-0067-11

## 一、引言

全球气候变化加剧,二氧化碳排放已成为各国的关注焦点。国家主席习近平在2020年第75届联合国大会上提出中国力争在2030年前实现碳达峰,2060年前实现碳中和。中国城市集中了大量产业和人口,碳排放占全国总量的70%<sup>[1]</sup>。作为全球第二大经济体和最大碳排放国,中国需要在资本、劳动和能源投入不增加的前提下,追求最大经济增长和最少二氧化碳排放<sup>[2]</sup>,即提高碳排放效率。城市作为节能减排的主阵地,其碳排放效率的提升直接关系到“双碳”目标的实现。因此,在城市层面深入研究如何提高碳排放效率,对实现“双碳”目标和推进绿色转型具有重要意义。

国内外学者已广泛探讨了碳排放效率的影响因素。在宏观层面,研究多集中于产业集聚<sup>[3]</sup>、能源消耗结构<sup>[4]</sup>、技术进步<sup>[5]</sup>等视角;在微观层面,企业所有制结构<sup>[2]</sup>、企业技术创新<sup>[6]</sup>、碳税和碳交易<sup>[7]</sup>等因素被认为影响碳排放效率。截至2023年6月,中国网民规模达10.79亿人,互联网普及率达76.4%<sup>①</sup>。已有研究表明网络基础设施对城市合作创新<sup>[8]</sup>、低碳经济发展<sup>[9]</sup>、企业创新边界拓展<sup>[10]</sup>、全要素生产率增长<sup>[11]</sup>等均具有积极作用,那么网络基础设施建设与城市碳排放效率提升之间是否存在因果关系?如果有,影响机制如何?进一步地,其如何影响城市碳排放效率的时间动态效应、空间分布效应?

已有大多数研究仍停留在探索基础设施建设对碳排放总量或单一要素碳排放效率的影响,将其与全要素碳排放效率明确联系起来的研究较少。与本文分析角度较为一致的是王真和楚尔鸣<sup>[12]</sup>、郭劲光和王虹力<sup>[13]</sup>的研究,指出信息基础设施建设能够显著降低城市碳排放强度、提升碳排放效率,并

收稿日期:2024-05-05;修回日期:2024-09-05

**基金项目:**国家社会科学基金青年项目“制度组态视角下资源型城市绿色转型效率提升的多元路径研究”(23CJY015);安徽省哲学社会科学规划青年项目“数字经济提升安徽城市碳排放效率的效应与路径研究”(AHSKQ2022D041)

**作者简介:**张跃(1992—),男,安徽宿州人,经济学博士,淮北师范大学经济与管理学院副教授,研究方向为数字经济与绿色发展研究;蔡朱丽(2000—)女,江苏南通人,通讯作者,淮北师范大学经济与管理学院硕士研究生,研究方向为数字经济与绿色发展研究。

①数据来自第52次《中国互联网络发展状况统计报告》,具体网址见<https://www.cnnic.cn/n4/2023/0828/c88-10829.html>。

且对于地理位置邻近、经济状况相似的地区具有正向空间溢出作用。然而较为遗憾的是,这些研究未能回答网络基础设施对碳排放效率的影响呈现怎样的时空动态效应,即一方面,其促进作用能否随着时间的增长而逐渐增强?另一方面,其空间溢出效应对于不同城市是否具有异质性?忽略这两个问题可能会导致研究结果的偏差,因此有待深入研究。

基于此,本文借助中国 275 个地级市及以上城市 2007—2020 年的统计数据进行研究,潜在贡献如下:第一,在研究视角方面,从网络基础设施视角出发,考察其对城市碳排放效率的影响与作用机制,有助于丰富碳排放效率影响因素的研究范畴。第二,在研究内容方面,从时间和空间两个维度出发,得出网络基础设施对城市碳排放效率的提升作用随着时间的积累逐渐增强,其对邻近“宽带中国”非示范城市产生“绿色虹吸”效应,对邻近示范城市产生“绿色涓滴”效应,并进一步识别了空间溢出效应的有效区间。

## 二、政策背景与理论分析

### (一) 政策背景

为应对经济高质量发展的要求,中国实施了一系列以新发展理念为导向的政策措施,其中《“宽带中国”战略及实施方案》由国务院发布,目标是到 2020 年实现宽带网络的优化和技术升级,使服务质量、应用水平和产业支撑能力达到世界先进水平。战略的重要举措之一是评选“宽带中国”示范城市,符合评选标准的地级市及以上城市可以参选。自 2014 年至 2016 年,工业和信息化部及国家发改委共批复了 117 个示范城市(群),要求在创建期末达到全国领先的网络基础设施水平<sup>①</sup>。

“宽带中国”战略(以下简称战略)的实施为研究网络基础设施对城市发展的影响提供了良好的准自然实验条件。原因在于:第一,战略的引入创造了相对独立和可控的研究环境,示范城市在网络基础设施建设方面取得了更显著的进展,包括更快的建设速度、更广泛的覆盖范围以及更高的普及率,这些差异可以成为评估战略实施效果的重要线索。第二,在技术更新换代快速发展的时代,静态的网络基础设施建设测度方法和标准无法及时捕捉新兴技术和变革,因此需要建立灵活的测度框架,将该战略作为衡量指标,使得测度更具可比性和时效性,有利于更好地把握城市网络发展的实际状况。

### (二) 理论分析

#### 1. 作用机制分析

网络基础设施通过促进产业结构升级,进而提升城市碳排放效率。一方面,网络基础设施的发展具有促进产业结构升级的积极作用。首先,其能够推动传统行业的升级改造,助力分享经济模式、新兴产业以及物联网等信息技术产业的发展<sup>[11]</sup>。其次,网络基础设施发展有利于提升城市信息化水平,加速创新生产要素配置和使用效率的提高,推进知识密集型产业发展。此外,它还能缓解信息不对称,促使产业间合作创新,进一步放大产业升级的积极效应<sup>[8]</sup>。最后,互联网普及也有助于缩小城乡数字鸿沟,促进均衡发展<sup>[14]</sup>。另一方面,产业结构升级对碳排放效率提升具有积极作用。郭炳南和卜亚<sup>[15]</sup>认为产业结构高级化在全国和区域层面均显著提升碳排放效率。

网络基础设施通过推动绿色技术创新,从而提升城市碳排放效率。一方面,网络基础设施能够促进绿色技术创新。从微观角度看,良好的网络基础设施可以促进技术知识的外部传播,并激励公司间的技术合作<sup>[16]</sup>,以加速绿色技术创新的推广和落地,促进经济向高附加值、高科技含量的绿色产业转型。此外,它也能拓展企业创新边界,突破地理限制,提高企业创新质量和效率<sup>[10]</sup>,为绿色技术开发和应用提供更多机会。从宏观角度看,网络基础设施通过提升本地信息化水平,缓解创新主体间信息不对称,降低市场摩擦显著促进了城市间合作创新<sup>[8]</sup>,此外,网络基础设施依靠信息元的流动,促进数据库的完善和公共服务平台的建立<sup>[11]</sup>,进而为绿色技术创新提供多元化信息。另一方面,绿色技术创新对碳排放效率提升具有积极作用。牛子恒和崔宝玉<sup>[17]</sup>研究得出“宽带中国”战略的实施加速了污染监测技术在高污染产业中的应用,增强了监测力度,进而抑制大气污染。

<sup>①</sup>数据来自新闻办就 2016 年上半年工业通信业发展情况举行的新闻发布会,具体网址见 [https://www.gov.cn/xinwen/2016-07/25/content\\_5094677.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2016-07/25/content_5094677.htm)。

综上所述,本文提出研究假说1。

假说1:网络基础设施可以通过绿色技术创新、产业结构升级渠道提升城市碳排放效率。

## 2. 时间动态效应分析

长期来看,网络基础设施对城市碳排放效率的提升作用存在时间增长效应,即呈现随时间增长逐渐增强的效应。一方面,依据梅特卡夫定律和网络边际成本递减规律,随着网络覆盖范围的扩大和节点数量的增加,网络基础设施能够吸引更多的用户和企业接入,进而形成正反馈循环,表现为网络基础设施建设投入的边际成本随用户规模扩大而降低。与此同时,其作为准公共品具有外部性,会对资本、劳动力等其他要素产生正向溢出效应,使得生产可能性曲线向外移动,呈现边际收益递增的趋势,进一步强化了网络基础设施的规模经济效应。网络基础设施发展初期,外部性和正反馈效应尚未充分显现,随着时间的推移,完善的网络覆盖和高效的信息流动,使得技术创新的兼容性和延展性大幅提升,能够极大地促进技术知识的外部传播和企业间的技术合作。另一方面,现有研究表明在网络边际成本递减和技术报酬递增规律的双重驱使下,创新要素会加速向网络基础设施发达的区域集聚,产生驱动技术创新的网络叠加效应<sup>[18]</sup>。石玉堂等<sup>[19]</sup>指出早期获得试点批复的城市会受到更强的驱动力。

综上所述,本文提出研究假说2。

假说2:网络基础设施对城市碳排放效率的提升作用呈现随时间增长逐渐增强的效应。

## 3. 空间溢出效应分析

网络基础设施对碳排放效率的空间溢出效应主要体现在以下三个方面:首先,网络基础设施发展能够提高信息共享和数字化服务的便利性,促进周边城市的生产力和经济效益提升,激发更多的商业活动和就业机会,进而增加能源和资源的需求。进一步地,由于资源的稀缺性,以邻为壑的发展模式也可能发生,“宽带中国”非示范城市的资源与人力可能会向示范城市转移,从而带来“绿色虹吸”效应。其次,网络基础设施发展能够影响资源利用效率,推动城市的生态创新,促进低碳生产方式和绿色生产方式的采用,拉动城市可持续发展的进程。最后,其还会影响城市生态环境保护的意识,良好的网络基础设施有利于生态环境管理经验的共享,而“宽带中国”示范城市间具备更好的信息传输能力,因此可能会增强生态环境保护能力,从而带来“绿色涓滴”效应。王凯等<sup>[20]</sup>认为旅游产业结构合理化对旅游业碳排放效率具备显著正向直接影响,但其负向空间溢出效应尚未显现,旅游产业结构高级化对旅游业碳排放效率具备显著负向直接影响,但其正向空间溢出效应暂时受到抑制。由此可见,对碳排放具有显著直接作用的影响因素不一定对其具有相同方向显著的空间溢出作用,故网络基础设施的空间溢出效应作用方向具有不确定性。

综上所述,本文提出假说3。

假说3:网络基础设施的空间溢出会对空间关联城市的碳排放效率产生影响。

## 三、研究设计

### (一) 模型设计

本文将研究对象聚焦于地级市层面,将“宽带中国”战略作为一项准自然实验,由于该战略分三批次实施,因此设定基于双向固定效应的渐进双重差分模型,具体形式如下:

$$Y_{it} = \alpha + \beta did_{it} + \delta_j \sum_{j=1}^n X_{it} + \mu_i + v_t + \lambda_{it} \quad (1)$$

式(1)中, $Y_{it}$ 是被解释变量,表示城市*i*在*t*时期的碳排放效率; $did_{it}$ 是核心解释变量,表示城市*i*在时期*t*是否被列为“宽带中国”示范城市,其系数 $\beta$ 衡量战略处理效应; $X_{it}$ 是影响城市碳排放效率的控制变量集合; $\mu_i$ 是城市固定效应; $v_t$ 是时间固定效应; $\lambda_{it}$ 是随机误差项。

### (二) 变量说明

#### 1. 被解释变量

碳排放效率( $Y$ )。采用规模报酬可变的非期望产出 SBM 模型,选用劳动力投入(年末单位从业人员)、资本投入(资本存量)、能源投入(全社会用电量)、期望产出(2003年为基期的实际 GDP)和非期

望产出(人均二氧化碳排放量)进行测度。其中二氧化碳排放量以 IPCC2006 提供的相关转化因子测算得出<sup>[21]</sup>,资本存量以 2003 年为基期,采取永续盘存法测算。

## 2. 核心解释变量

“宽带中国”战略(*did*)。以此作为网络基础设施的衡量指标,示范城市建设当年及其以后设为 1,其余年份为 0。本文共 275 个样本城市,其中 106 个示范城市作为处理组城市,剩余 169 个城市作为控制组城市。

## 3. 控制变量

综合现有文献<sup>[22-24]</sup>,影响城市碳排放效率的控制变量如下:政府干预(*gov*),以地方财政一般预算内支出占 GDP 比重的对数值表示;技术水平(*tech*),以 R&D 人员占年末单位从业人员比重表示;开放度(*open*),以当年实际使用外资金额占 GDP 比重表示;人口密度(*den*),以人口总数占城市面积比值的对数来表示。

### (三) 数据来源

本文样本最终包含中国 275 个地级市及以上城市 2007—2020 年的数据,研究数据来自《中国城市统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国城市建设统计年鉴》、中国研究数据服务平台,示范城市名单来自中华人民共和国工业和信息化部公告<sup>①</sup>。

关于缺失值,首先从各城市统计公报中尝试补齐数据;其次,删除数据缺失过于严重的样本城市;接着,采用线性插值法等填补缺失值;最后,使用均值法完成剩余数据的补齐。各变量的描述性统计如表 1 所示。

表 1 变量描述性统计

变量名称	变量代码	样本	平均值	标准差	最小值	最大值
碳排放效率	<i>Y</i>	3 850	0.508	0.215	0.117	1.000
“宽带中国”战略	<i>did</i>	3 850	0.159	0.366	0.000	1.000
政府干预	<i>gov</i>	3 850	2.809	0.444	1.450	4.517
人口密度	<i>den</i>	3 850	5.763	0.908	1.609	7.882
开放度	<i>open</i>	3 850	1.813	1.872	0.000	19.880
技术水平	<i>tech</i>	3 850	0.029	0.045	0.000	1.758

## 四、实证结果分析

### (一) 基准回归

#### 1. 平行趋势检验

借助双重差分法研究准自然实验的前提是战略实施前,对照组和处理组间不存在差异,因此本文首先通过事件研究法(动态双重差分法)进行平行趋势检验<sup>[25]</sup>,将战略实施前一期作为基期,将考察期定为战略实施前 3 年至后 3 年。

$$\begin{aligned}
 Y_{it} = & \alpha + \sum_{s=-3}^{-2} \beta_s^{pre} \cdot I(t - T_D^i = s) \\
 & + \sum_{s=0}^3 \beta_s^{post} \cdot I(t - T_D^i = s) + \delta_j \sum_{j=1}^n X_{it} \\
 & + \mu_i + v_t + \lambda_{it} \quad (2)
 \end{aligned}$$

式(2)中  $\beta_s^{pre}$ 、 $\beta_s^{post}$  分别表示战略实施前、后  $S$  期的处理效应, $t$  为当期研究年份, $T_D^i$  为城市  $i$  成为“宽带中国”示范城市的起始年份, $I(\cdot)$  为示性函数,当括号内的条件被满足时取 1,否则取 0。检验结果如图 1 所示,战略实施前及战略实施当年的回归系数在 90% 的置信区间包含 0,但在战略实施之后的第一年开始,回归系数显著为正,初步

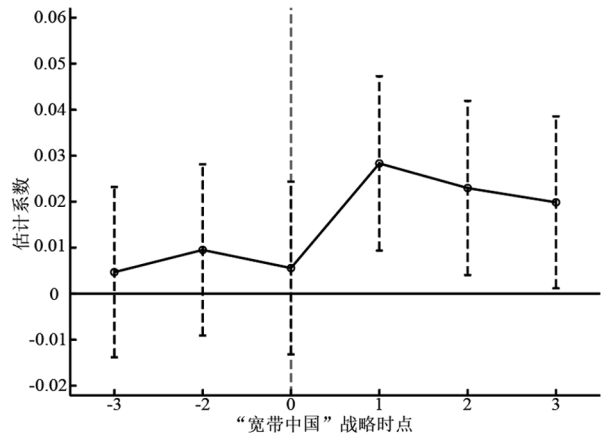


图 1 平行趋势检验

①数据来自中华人民共和国工业和信息化部,具体网址见 [https://wap.miit.gov.cn/jgsj/txs/wlfz/art/2020/art\\_9f5db18c95a48a498e487a74699312c.html](https://wap.miit.gov.cn/jgsj/txs/wlfz/art/2020/art_9f5db18c95a48a498e487a74699312c.html)。

表明网络基础设施能够显著提升城市碳排放效率,可以建立渐进 DID 模型进行进一步分析。

### 2. 基准回归结果

本文选取渐进 DID 模型验证网络基础设施对中国城市碳排放效率的影响,结果如表 2 所示。核心解释变量的系数均在 99% 的置信区间显著为正,说明网络基础设施可以促进碳排放效率的提升。

从控制变量的回归结果看:(1)政府干预的回归系数显著为正。这可能是因为政府的资金投入可以用于支持环保技术创新、能源高效利用,此外,政府通过政策引导和管理手段,可以提高企业和居民的资源节约意识,从而间接推动碳排放效率提升。(2)人口密度的回归系数显著为负。这可能是因为高人口密度导致城市能源消耗增加、交通拥堵加剧以及工业生产对能源的消耗增加。(3)技术水平的回归系数显著为正。这可能得益于先进的环保技术和清洁能源技术的应用,从而实现了绿色生产。(4)开放度的回归系数不显著。这与相关研究结论一致<sup>[24]</sup>,可能是因为开放度对城市碳排放效率的影响受到国际市场的波动、能源价格的变化、贸易政策等多种因素的影响,这些因素的复杂作用掩盖了开放度本身对碳排放效率的影响。

### (二) 稳健性检验

#### 1. 安慰剂检验

考虑到示范城市名单安排对回归结果产生的不可观测影响,本文设计安慰剂检验,结果如图 2 所示。回归系数的核密度分布图与正态分布的核密度分布非常接近,满足均值为 0,因此可以认为不可观测的偶然因素没有影响实验结论。

#### 2. 排除其他政策影响

在“宽带中国”战略推进过程中,中国还实施了其他具有碳减排效应的政策,如自贸区试点政策<sup>[26]</sup>、低碳城市试点政策<sup>[23]</sup>、绿色财政政策<sup>[24]</sup>,本文将以上政策虚拟变量纳入模型中,结果见表 3 列(1)至列(3)。“宽带中国”战略的回归系数始终显著为正,说明网络基础设施对碳排放效率的影响并未受到其他政策的干

表 2 基准 DID 回归结果

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
<i>did</i>	0.026*** (0.007)	0.029*** (0.007)	0.030*** (0.007)	0.031*** (0.007)	0.031*** (0.007)
<i>gov</i>		0.046*** (0.012)	0.044*** (0.012)	0.046*** (0.012)	0.045*** (0.012)
<i>den</i>			-0.251*** (0.045)	-0.250*** (0.045)	-0.249*** (0.045)
<i>tech</i>				0.120** (0.048)	0.117** (0.048)
<i>open</i>					0.002 (0.002)
R <sup>2</sup>	0.022	0.026	0.034	0.036	0.037
城市固定	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
年份固定	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes

注:\*\*\*、\*\*和\*分别表示在 1%、5%和 10%的显著性水平上显著,括号内为稳健标准误。

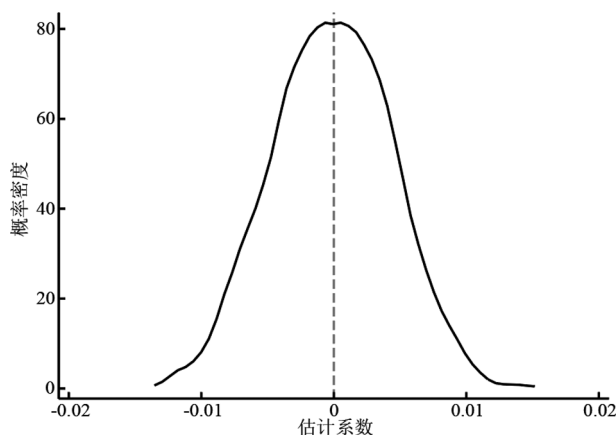


图 2 安慰剂检验

表 3 排除其他政策影响和 PSM-DID

变量	排除其他政策影响			PSM-DID	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
<i>did</i>	0.031*** (0.007)	0.031*** (0.007)	0.031*** (0.007)	0.028*** (0.007)	0.034*** (0.007)
自贸区试点政策	0.005 (0.011)	0.004 (0.011)	0.004 (0.011)		
低碳城市试点政策		0.008 (0.008)	0.008 (0.008)		
绿色财政政策			-0.005 (0.013)		
R <sup>2</sup>	0.037	0.037	0.037	0.022	0.040
城市固定	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
时间固定	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
控制变量	Yes	Yes	Yes	No	Yes

注:\*\*\*、\*\*和\*分别表示在 1%、5%和 10%的显著性水平上显著,括号内为稳健标准误。

“宽带中国”战略的回归系数始终显著为正,说明网络基础设施对碳排放效率的影响并未受到其他政策的干

扰,其实施效果是稳健可靠的。

### 3. PSM-DID

示范城市名单可能并非严格外生,进而影响研究的稳健性。本文借助 PSM-DID 进行检验<sup>[27]</sup>。采用 1:1 近邻匹配,并对处于共同支撑域的样本进行回归。匹配后  $P$  值均大于 0.1,说明匹配过程有效地确保了处理组和对照组在处理前的相似性。由表 3 列(4)与列(5)可知,核心解释变量的回归系数始终在 1% 的水平上显著为正,说明研究结果稳健,限于篇幅,倾向得分匹配表未列出,留存备索。

#### (三) 作用机制检验

为考察网络基础设施提升碳排放效率的作用机制,首先,根据理论分析确定产业结构升级 ( $In-du$ )、绿色技术创新 ( $Inno$ ) 为机制变量;其次,选取第三产业产值占 GDP 比重作为产业结构升级的代理变量,借助每万人绿色专利授权数作为绿色技术创新的代理变量;最后,建立如下模型进行考察。

$$Y_{it} = \alpha + \beta did_{it} + \delta_j \sum_{j=1}^n X_{it} + \mu_i + v_t + \lambda_{it} \quad (3)$$

$$MV_{it} = \alpha + \beta did_{it} + \delta_j \sum_{j=1}^n X_{it} + \mu_i + v_t + \lambda_{it} \quad (4)$$

$$Y_{it} = \alpha + \beta_1 did_{it} + \beta_2 MV_{it} + \delta_j \sum_{j=1}^n X_{it} + \mu_i + v_t + \lambda_{it} \quad (5)$$

其中  $MV$  为机制变量,式(3)为基准回归模型,式(4)考察政策变量与机制变量的关系,若政策变量的回归系数显著,则可进行式(5)。

产业结构升级的作用机制结果见表 4 列(1)至列(3)。由列(2)可知,政策变量系数显著为正,说明网络基础设施能够促进产业结构升级;由列(1)与列(3)可知,加入产业结构升级后,政策变量的回归系数由 0.031 3 降低到 0.030 6,且产业结构升级的回归系数依旧显著为正,表明中介效应成立,进一步计算可知该渠道下中介效应占总效应的比例为 2.493%。绿色技术创新的作用机制结果见表 4 列(1)、列(4)和列(5)。由列(4)可知,政策变量系数显

表 4 作用机制检验

变量	产业结构升级			绿色技术创新	
	(1) Y	(2) Indu	(3) Y	(4) Inno	(5) Y
$did$	0.031 3 *** (0.006 7)	0.709 4 *** (0.215 2)	0.030 6 *** (0.006 7)	0.175 5 *** (0.010 5)	0.025 9 *** (0.006 9)
$Indu$			0.001 1 ** (0.000 5)		
$Inno$					0.031 0 *** (0.010 6)
$R^2$	0.036 5	0.741 3	0.037 7	0.596 4	0.038 8
城市固定	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
年份固定	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
控制变量	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
中介效应占比		2.493%		17.381%	

注:\*\*\*、\*\*和\*分别表示在 1%、5%和 10%的显著性水平上显著,括号内为稳健标准误。

著为正,说明网络基础设施建设能够促进绿色技术创新;由列(1)与列(5)可知,加入绿色技术创新后,政策变量的回归系数由 0.031 3 降低到 0.025 9,且绿色技术创新的回归系数依旧显著为正,中介效应成立,进一步计算可知该渠道下中介效应占总效应的比例为 17.381%。综上所述,假说 1 得证。

#### (四) 异质性分析

##### 1. 科技创新水平异质性

本文选取研究窗口期的中间年份,即 2013 年专利发明数作为科技创新水平的划分依据,并进行分组回归,结果如表 5 列(1)至(3)所示。在科技创新水平较低的城市,网络基础设施对碳排放效率的影响不显著,而在科技创新水平中和高等级城市,其均呈现显著正向影响。主要原因在于,在科技创新水平较低的城市,可能存在着技术能力不足的问题,导致无法充分利用战略所带来的信息技术资源优势,从而限制了其对碳排放效率的影响。

表5 异质性分析

变量	科技创新水平异质性			地理区位异质性				环境污染指数异质性	
	低水平 (1)	中水平 (2)	高水平 (3)	东部 (4)	中部 (5)	西部 (6)	东北 (7)	低 (8)	高 (9)
<i>did</i>	0.026 (0.017)	0.034*** (0.010)	0.034*** (0.009)	0.032*** (0.010)	0.032*** (0.008)	0.079*** (0.017)	-0.007 (0.020)	0.047*** (0.012)	0.013* (0.008)
R <sup>2</sup>	0.037	0.101	0.126	0.138	0.173	0.047	0.181	0.069	0.092
城市固定	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
年份固定	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
控制变量	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes

注：\*\*\*、\*\*和\*分别表示在1%、5%和10%的显著性水平上显著，括号内为稳健标准误。

## 2. 地理区位异质性

本文按照《中国环境统计年鉴2022》的区位划分标准进行分组回归，结果见表5列(4)至列(7)。网络基础设施发展有利于东部、中部和西部碳排放效率的提升，其中对西部城市的提升作用最大，东部和中部城市次之，对东北地区碳排放效率的影响不显著。原因可能在于西部地区在网络基础设施方面起步相对较晚，因此具有后发优势，从而战略的推行对其产生了更为显著的促进作用。东北地区可能受制于国家经济结构调整和区域产业布局等因素的影响，因此网络基础设施建设对其碳排放效率的作用还未显现。

## 3. 环境污染指数异质性

使用熵权法，借助工业二氧化硫排放量、工业废水排放量、工业烟尘排放量，测算城市环境污染指数。根据2013年环境污染指数进行城市分类并做异质性分析，结果如表5列(8)和列(9)所示。战略在低环境污染城市的实施效果比在高环境污染城市的效果好3.6倍。可能是因为环境污染水平较低的城市往往更注重生态保护和环境治理，在绿色产业发展方面已经具备一定的优势，且社会对于绿色发展理念的认知程度更高，因此这些城市在战略实施中能够更快地适应相关战略的引导。

## 五、进一步分析：时空动态效应检验

### (一) 时间动态效应检验

为探究时间动态效应，本文将研究窗口划分为三个阶段：一是示范城市评选阶段，中国逐批评选了117个示范城市；二是评选完成后两年，示范城市格局已经形成，“宽带中国”战略稳步发展；三是新冠疫情期间，经济发展低迷对中国社会、环境等多方面带来了不可忽视的影响。参考曹跃群等<sup>[28]</sup>的研究方法，构建虚拟变量 $yr1$ 、 $yr2$ 和 $yr3$ ，分别表示第一阶段、第二阶段和第三阶段，估计结果见表6。

由表6可知网络基础设施对碳排放效率的作用呈现倒“U”型特征，这与假说2不符。考虑到新冠疫情期间，中国集中力量发展医疗和防疫措施，导致绿色高科技产业持续运转受到冲击，同时，一些传统高能耗产业在疫情防控初期获得政府支持以保证基本需求的供应，这在一定程度上削弱了绿色产业的发展势头。此外，疫情对劳动者复工率、地区潜在经济增长也带来了消极影响<sup>[29]</sup>。因此本文借助事件研究法，剔除疫情因素后进一步验证假说2，研究结果如图3所示。

由图3可知从战略实施第二年开始，城市

表6 时间动态效应

	(1)	(2)
$yr1 \times did$	0.018* (0.009)	0.022** (0.009)
$yr2 \times did$	0.040*** (0.010)	0.045*** (0.010)
$yr3 \times did$	0.022** (0.010)	0.029*** (0.010)
R <sup>2</sup>	0.023	0.037
城市固定	Yes	Yes
年份固定	Yes	Yes
控制变量	No	Yes

注：\*\*\*、\*\*和\*分别表示在1%、5%和10%的显著性水平上显著，括号内为稳健标准误。

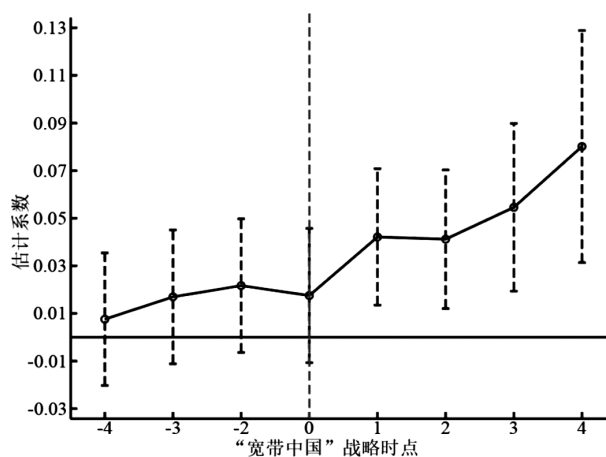


图3 剔除疫情因素后网络基础设施的时间动态效应

碳排放效率的系数均在 99% 的置信区间显著为正,且整体上呈现逐年增长的趋势。通过对比分析可以认为表 6 呈现的时间特征可归因于新冠疫情这一外生冲击,实际上网络基础设施对城市碳排放效率的促进作用具备时间增长效应,综上所述,假说 2 得证。

## (二) 空间溢出效应检验

### 1. 空间溢出效应

渐进 DID 模型假设样本个体之间相互独立,然而,网络基础设施的影响可能通过城市间的资源流动进行传递。为验证相邻城市碳排放效率的空间相关性,本文使用莫兰指数进行检验。2007—2020 年间的莫兰指数在 1% 的显著水平上均显著,表明有必要进一步研究空间效应,空间相关性检验结果未列出,留存备索。

$$Y_{it} = \alpha + \rho W \times Y_{it} + \beta did_{it} + \gamma W \times did_{it} + \delta_j \sum_{j=1}^n X_{it} + \mu_i + v_t + \lambda_{it} \quad (6)$$

构建 SDID 模型,如式(6)所示。 $W$  是空间权重矩阵, $\rho$  是被解释变量的空间自相关系数, $\gamma$  是核心解释变量的溢出效应。

SDID 结果如表 7,研究表明:(1) 战略的回归系数均在 1% 的水平上显著为正,进一步验证了假说 1;(2) 战略的空间加权项系数均在 1% 的水平上显著为负,说明网络基础设施对碳排放效率的提高具有负向溢出效应;(3) 城市碳排放效率空间加权项的系数在 1% 的水平上显著为正,表明邻近地区的碳排放效率提升能够促进本城市碳排放效率的提高。综上所述,假说 3 得证。

### 2. 空间溢出效应分解

政策变量的空间加权项系数表示的是平均空间溢出效应,不能体现处理组对控制组、处理组对其他处理组溢出效应的异质性。参考 Chagas *et al.*<sup>[30]</sup> 和胡宗义等<sup>[31]</sup> 的空间效应分解方法,建立如下模型:

$$Y_{it} = \alpha + \beta TT_{it} + \gamma TU_{it} + \delta_j \sum_{j=1}^n X_{it} + \mu_i + v_t + \lambda_{it} \quad (7)$$

$W2$  为二阶最近邻矩阵,若城市  $i$  为“宽带中国”示范城市,且位于另一个示范城市的两个最邻近城市之一,则  $TT_{it}^{w2}$  取 1,表示示范城市受到周围示范城市影响,否则取 0。 $TT_{it}^{w3}$ 、 $TT_{it}^{w4}$ 、 $TT_{it}^{w5}$ 、 $TT_{it}^{w6}$  含义依此类推;若城市  $i$  不是“宽带中国”示范城市,但位于“宽带中国”示范城市的两个最邻近城市之一,则  $TU_{it}^{w2}$  取 1,表示非示范城市受到示范城市影响,否则取 0。

由于  $TU$  的系数从六阶最近邻矩阵开始不显著,限于篇幅,表 8

表 7 空间双重差分模型结果

变量	地理距离矩阵		邻接矩阵	
	(1)	(2)	(3)	(4)
$did$	0.027*** (0.006)	0.032*** (0.006)	0.024*** (0.006)	0.028*** (0.006)
$wdid$	-0.028*** (0.011)	-0.039*** (0.014)	-0.030*** (0.009)	-0.029*** (0.010)
$\rho$	0.695*** (0.058)	0.673*** (0.060)	0.120*** (0.025)	0.112*** (0.025)
$R^2$	0.005	0.018	0.005	0.019
城市固定	Yes	Yes	Yes	Yes
时间固定	No	No	No	No
控制变量	No	Yes	No	Yes

注:\*\*\*、\*\*和\*分别表示在 1%、5%和 10%的显著性水平上显著,括号内为稳健标准误。

表 8 空间溢出效应分解

变量	W2	W3	W4	W5	W6
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
$TT$	0.002 (0.009)	0.020** (0.008)	0.015* (0.009)	0.026*** (0.010)	0.023** (0.010)
$TU$	-0.031*** (0.007)	-0.027*** (0.007)	-0.023*** (0.007)	-0.013* (0.008)	-0.013 (0.009)
$R^2$	0.037	0.042	0.039	0.039	0.038
城市固定	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
时间固定	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
控制变量	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes

注:\*\*\*、\*\*和\*分别表示在 1%、5%和 10%的显著性水平上显著,括号内为稳健标准误。



仅报告二阶至六阶最近邻矩阵下的效应分解。一方面,由列(1)至列(4)可知, $TU$ 的系数显著为负并逐步趋于0,表明非示范城市碳排放效率会受到邻近示范城市网络基础设施发展的负向溢出作用,并且随着距离增加负向溢出效应逐渐衰减;另一方面,由图4可知, $TT$ 的系数显著为正,且呈现倒“U”型趋势并逐步趋于0.037,表明示范城市碳排放效率提升会受到邻近示范城市网络基础设施发展的正向溢出效应,并且随着示范城市间距离的增加正向溢出效应趋于稳定。可能的原因在于:(1)相邻示范城市通过合作、经验共享以及技术交流等方式,推动了整个区域碳排放效率提升,而完备通信网络设施作用的发挥受距离的影响较小,因此其“绿色涓滴”效应能够一定程度上突破地域限制稳定发挥作用。(2)示范城市对周边非示范城市的资源、人才更具吸引力,因此带来“绿色虹吸”效应,并且其流动难度随距离增加而增长,因此负向溢出效应逐渐趋于0。假说3得以进一步验证。

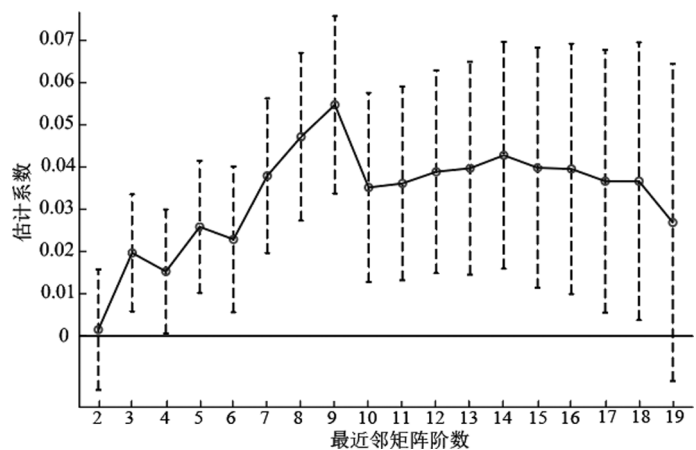


图4 “宽带中国”示范城市间空间溢出效应衰减边界

方式,推动了整个区域碳排放效率提升,而完备通信网络设施作用的发挥受距离的影响较小,因此其“绿色涓滴”效应能够一定程度上突破地域限制稳定发挥作用。(2)示范城市对周边非示范城市的资源、人才更具吸引力,因此带来“绿色虹吸”效应,并且其流动难度随距离增加而增长,因此负向溢出效应逐渐趋于0。假说3得以进一步验证。

## 六、结论与启示

立足于碳排放效率提升的紧迫性及网络基础设施在国际竞争中具有战略意义的典型事实,本文就网络基础设施对城市碳排放效率的时空动态效应展开研究,以“宽带中国”战略作为网络基础设施的代理变量,借助中国275个地级市2007—2020年的数据,通过双重差分法,主要得到以下结论:(1)网络基础设施通过促进产业结构升级和绿色技术创新显著提升了中国城市碳排放效率。(2)时间动态效应表明,网络基础设施对碳排放效率提升作用随时间推移逐渐增强;空间动态效应表明,其平均溢出效应为负,效应分解进一步说明其对邻近“宽带中国”非示范城市碳排放效率呈现负向溢出效应,且随着距离增加逐渐减弱;对邻近示范城市呈现正向溢出效应,且该效应可一定程度突破地域限制。(3)网络基础设施对低科技创新水平、东北地区城市碳排放效率的促进作用不显著,对高科技发展水平、西部地区、低环境污染水平的城市具备更为突出的促进作用。

基于以上结论,本文具有如下政策启示:(1)发挥政策作用,不断推进网络基础设施优化升级。通过推进宽带覆盖优化,提升传输速率和稳定性,加强数据安全与网络设备维护,确保网络基础设施的持续稳定运行,以强化其对城市碳排放效率影响的可持续性。(2)贯通作用机制,持续推动产业升级与绿色技术创新。注重传统行业的改造升级、信息化水平提升的驱动作用,进一步推动技术知识的传播与创新主体的集聚,以提高碳减排效果。(3)推进协同共治,力争化解空间负面溢出效应。建立跨地区碳排放协调机制,缓解示范城市对非示范城市的“绿色虹吸”效应,充分发挥示范城市间的“绿色涓滴”效应,共同推动碳排放量的降低。(4)探索优化路径,因地制宜制定碳减排发展策略。充分认识到不同城市在碳减排方面的差异性,对于低科技创新水平城市,可以优先加大对科技创新的投入;对于东北地区,可以鼓励绿色产业的发展以推动碳排放效率的提升。

## 参考文献:

- [1] CAI B F, CUI C, ZHANG D, et al. China city-level greenhouse gas emissions inventory in 2015 and uncertainty analysis [J]. Applied energy, 2019, 253: 113579.
- [2] 马大来, 陈仲常, 王玲. 中国省际碳排放效率的空间计量[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(1): 67-77.
- [3] PORTER M E. Clusters and the new economics of competition[J]. Harvard business review, 1998: 77-90.

- [4] 许士春,龙如银. 中国能源和碳排放的效率测度与影响因素研究[J]. 软科学,2015,29(3):74-78.
- [5] 李珊珊,马艳芹. 环境规制对全要素碳排放效率分解因素的影响——基于门槛效应的视角[J]. 山西财经大学学报,2019,41(2):50-62.
- [6] 王鹏,谢丽文. 污染治理投资、企业技术创新与污染治理效率[J]. 中国人口·资源与环境,2014,24(9):51-58.
- [7] 沈洪涛,黄楠,刘浪. 碳排放权交易的微观效果及机制研究[J]. 厦门大学学报(哲学社会科学版),2017(1):13-22.
- [8] 种照辉,高志红,覃成林. 网络基础设施建设与城市间合作创新——“宽带中国”试点及其推广的证据[J]. 财经研究,2022,48(3):79-93.
- [9] 景国文. 网络基础设施建设与经济低碳发展——基于“宽带中国”战略的准自然实验[J]. 工业技术经济,2023,42(3):3-12.
- [10] 沈坤荣,林剑威,傅元海. 网络基础设施建设、信息可得性与企业创新边界[J]. 中国工业经济,2023(1):57-75.
- [11] 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(3):75-88+127-128.
- [12] 王真,楚尔鸣. 信息基础设施建设能使“减排”与“增效”兼得吗? ——基于绿色技术创新视角[J]. 现代财经(天津财经大学学报),2023,43(10):74-89.
- [13] 郭劲光,王虹力. 数字赋能下减排战略的创新性选择——基于“宽带中国”试点政策的准自然实验[J]. 产业经济研究,2022(4):101-113+142.
- [14] 程名望,张家平. 互联网普及与城乡收入差距:理论与实证[J]. 中国农村经济,2019(2):19-41.
- [15] 郭炳南,卜亚. 人力资本、产业结构与中国碳排放效率——基于SBM与Tobit模型的实证研究[J]. 当代经济管理,2018,40(6):13-20.
- [16] 薛成,孟庆玺,何贤杰. 网络基础设施建设与企业技术知识扩散——来自“宽带中国”战略的准自然实验[J]. 财经研究,2020,46(4):48-62.
- [17] 牛子恒,崔宝玉. 网络基础设施建设与大气污染治理——来自“宽带中国”战略的准自然实验[J]. 经济学报,2021,8(4):153-180.
- [18] 张杰,付奎. 信息网络基础设施建设能驱动城市创新水平提升吗? ——基于“宽带中国”战略试点的准自然试验[J]. 产业经济研究,2021(5):1-14+127.
- [19] 石玉堂,王晓丹,秦芳. 网络基础设施与经济高质量发展——基于“宽带中国”试点政策的准自然实验[J]. 经济与管理,2023,37(6):59-66.
- [20] 王凯,何静,甘畅,等. 中国旅游产业结构变迁对旅游业碳排放效率的空间溢出效应研究[J]. 中国软科学,2022(12):50-60.
- [21] 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(1):54-60.
- [22] 蓝虹,王柳元. 绿色发展下的区域碳排放绩效及环境规制的门槛效应研究——基于SE-SBM与双门槛面板模型[J]. 软科学,2019,33(8):73-77+97.
- [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(6):25-41.
- [24] 薛飞,陈煦. 绿色财政政策的碳减排效应——来自“节能减排财政政策综合示范城市”的证据[J]. 财经研究,2022,48(7):79-93.
- [25] 黄炜,张子尧,刘安然. 从双重差分法到事件研究法[J]. 产业经济评论,2022(2):17-36.
- [26] 邵良杉,毕圣昊,王彦彬. 自贸区试点政策对地区碳排放的影响效应——基于省级面板数据的实证分析[J]. 企业经济,2023,42(2):48-58.
- [27] 刘瑞明,赵仁杰. 西部大开发:增长驱动还是政策陷阱——基于PSM-DID方法的研究[J]. 中国工业经济,2015(6):32-43.
- [28] 曹跃群,郭鹏飞,杨玉玲. 网络基础设施投入对区域经济高质量增长的影响研究——基于生产性资本存量的估算[J]. 管理评论,2022,34(3):19-30+54.

- [29] 翟文昊, 晋娴, 马铃. 新冠疫情缩小了农民工的就业半径吗[J]. 农业技术经济, 2024(2): 36-55.
- [30] CHAGAS A L S, AZZONI C R, ALMEIDA A N. A spatial difference-in-differences analysis of the impact of sugarcane production on respiratory diseases[J]. *Regional science and urban economics*, 2016, 59: 24-36.
- [31] 胡宗义, 周积琨, 李毅. 自贸区设立改善了大气环境状况吗? [J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(2): 37-50.

(责任编辑: 陈 春; 英文校对: 谈书墨)

## Network Infrastructure, Spatiotemporal Dynamic Effects, and Urban Carbon Emission Efficiency

ZHANG Yue, CAI Zhuli

(School of Economics and Management, Huaibei Normal University, Huaibei 235000, China)

**Abstract:** As a key engine of China's high-quality economic development, network infrastructure also significantly influences urban carbon emission efficiency. This study employs the Broadband China strategy as a proxy variable for network infrastructure in analyzing urban carbon emission efficiency improvement using panel data from 2007 to 2020. The analysis reveals several important findings. First, network infrastructure substantially enhances urban carbon emission efficiency by promoting green technological innovation and facilitating industrial restructuring. Second, this enhancing effect gradually increases over time. There is also a positive spatial spillover effect on the neighboring Broadband China demonstration cities that tends to stabilize. In comparison, the negative spatial spillover effect on the neighboring non-demonstration cities gradually weakens. Third, the effect of network infrastructure on urban carbon emission efficiency is more pronounced in cities with a high level of tech innovation, non-northeast China cities, and cities with a low level of environmental pollution. To further improve the carbon emission efficiency of Chinese cities, this study suggests leveraging policies, fostering functional mechanisms, promoting collaborative governance, and exploring optimization paths.

**Key words:** network infrastructure; Broadband China Strategy; urban carbon emission efficiency; spatiotemporal dynamic effects; quasi-natural experiment

(上接第 33 页)

## Can an Urban Smart Governance Model Promote Urban Waterlogging Disaster Resilience?

### A Quasi-natural Experiment Based on the National Smart City Pilot Policy

YANG Kai, LIU Dingrong, SUN Shi

(School of Public Administration, Guangdong University of Finance and Economics, Guangzhou 510320, China)

**Abstract:** The construction of smart cities has provided new ideas and paths for urban systems to cope with waterlogging disasters. Based on the panel data of 148 cities in China from 2005 to 2022, this study uses the national smart city pilot policy as a quasi-natural experiment to empirically analyze the effect of the urban smart governance model on the urban waterlogging disaster resilience and the internal mechanism. A difference-in-differences (DID) model is employed, and the results show that the urban smart governance model significantly improves urban waterlogging disaster resilience, and this effect increases as the construction of a smart city progresses. However, this effect shows substantial heterogeneity based on resilience dimension, city type, and city development characteristics. The proficiency of information technology workers, the strength of scientific and technological support, and the prosperity of the digital industry play a significant intermediary role. The positive effect of the urban smart governance model on urban waterlogging disaster resilience in neighboring cities diminishes as geographic distance increases, and the positive effect disappears when this distance exceeds 200km.

**Key words:** urban smart governance model; urban waterlogging disaster resilience; smart city construction; difference-in-differences model