

# 城市数字技术网络对碳强度的影响研究

张鑫和<sup>a</sup>, 岳书敬<sup>a,b</sup>

(东南大学 a. 经济管理学院; b. 中国特色社会主义发展研究院, 南京 211189)

**摘要:** 基于中国城市层面的数字专利引用数据, 构建反映数字技术流动交换的城市数字技术网络, 并运用网络分析方法验证数字技术网络对城市碳强度的影响。结果表明, 城市数字技术网络地位的提升有助于降低碳强度。数字技术网络通过促进产业升级和技术进步两条路径, 形成“技术-产业”共振减排效应。进一步分析显示, 城市数字技术网络对碳强度的影响在东中部、中小规模城市中更显著。另外, 数字技术网络对城市碳强度的影响具有负向溢出效应, 本地网络地位提升会增加技术关联城市的碳强度。

**关键词:** 数字技术网络; 碳强度; 技术进步; 产业升级

**DOI:** 10.13956/j.ss.1001-8409.2025.10.06

**中图分类号:** F49; X32

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-8409(2025)10-0041-08

## Impact of Urban Digital Technology Networks on Carbon Intensity

ZHANG Xin-he<sup>a</sup>, YUE Shu-jing<sup>a,b</sup>

(a. School of Economics and Management;

b. Institute for the Development of Socialism with Chinese Characteristics, Southeast University, Nanjing 211189)

**Abstract:** Based on patent citation data, this paper constructs an urban digital technology network that reflects the flow and exchange of digital technologies, and employs network analysis methods to examine the impact of digital technology networks on urban carbon intensity. The empirical results demonstrate that enhancing a city's centrality in the digital technology network significantly reduces carbon intensity. Digital technology networks facilitate synergistic emission reduction effects through dual pathways: technological advancement and industrial upgrading, forming a technology-industry coupling mechanism. Further analysis indicates more pronounced emission reduction effects in eastern-central regions and medium/small-sized cities. Moreover, the digital technology network has a negative spillover effect on urban carbon intensity, where an improvement in local network status increases the carbon intensity of technologically linked cities.

**Key words:** digital technology networks; carbon intensity; technological advancement; industrial upgrading

### 1 引言

全球气候变化正对全人类的生存发展带来日益严峻的挑战, 走向碳中和已成全球共识。实现碳达峰、碳中和是党中央统筹国内国际两个大局作出的重大战略决策, 也是推动我国绿色低碳发展、实现可持续发展的内在要求<sup>[1,2]</sup>。随着新一轮科技革命和产业变革的加速推进, 数字技术在节能减排方面的作用日益凸显。当前, 数字技术助力“双碳”目标已成为推动中国式现代化与经济社会发展全面绿色转型的重要命题<sup>[3,4]</sup>。数字技术具有显著的融合性<sup>[5]</sup>, 可以通过与不同技术的交叉融合带动行业与行业、地区与地区的连接<sup>[6]</sup>, 并形成复杂的网络关系。那么, 由数字技术流动交换形成的复杂网络关系在碳减排中扮演了什么样的角色? 对该问题的探索有助于从更大的网络空间视角考察数字技术的碳

减排效应, 从而充分揭示数字技术的碳减排潜力。

城市数字技术网络会通过多种路径影响地区碳强度<sup>[6]</sup>。城市数字技术网络促进了数字技术向传统产业渗透, 推动了数字产业链和产业集群的发展壮大, 有助于优化产业结构<sup>[7]</sup>。另外, 城市数字技术网络推动了异质性知识和互补性资源的流动, 促进了知识技术的跨地区整合重组, 可以提升地区技术进步水平。技术进步和产业升级有助于降低城市碳强度<sup>[8]</sup>。因此, 城市碳强度不仅仅取决于城市自身数字技术水平, 还受到其在数字技术网络中位置的影响。

已有文献主要考察城市内部数字技术应用对碳强度的影响, 忽视了数字技术流动连接形成的网络的减排效应, 这会低估数字技术对碳减排的赋能效果<sup>[9,10]</sup>。事实上, 随着中国城市间数字技术联系的加深, 城市逐步

收稿日期: 2024-11-18

基金项目: 国家社会科学基金项目(21BJL056)

作者简介: 张鑫和(1993—), 男, 安徽天长人, 博士研究生, 研究方向为数字经济与环境经济; 岳书敬(1979—), 男, 河南新乡人, 博士、教授、博士生导师, 研究方向为数字经济、环境经济与创新经济。

由场所空间中的生产基地转变为流动空间中的经济平台。相对于传统的集聚经济,网络经济成为理解城市碳排放效率的重要基础<sup>[11]</sup>。因此,本文从网络视角出发,考察城市在数字技术网络中的位置特征如何影响碳强度。具体而言,本文主要回答如下问题:城市数字技术网络位置特征对碳强度有何影响?这种影响的作用机制是什么?在不同城市中有何异质性?探究城市数字技术网络对碳强度的影响,能够突破以往仅聚焦于城市内部的研究视角,深化对数字技术在城市系统中减排机制的理解,为政策制定者在更大空间尺度上制定碳减排策略提供参考。

本文的边际贡献主要有:第一,本文研究城市数字技术网络对碳强度的影响,从新的视角探讨了数字技术与碳减排之间的关系,弥补了现有文献的不足。第二,为理解城市数字技术网络如何影响碳强度提供了经验证据。从技术进步和产业升级两个方面,检验了数字技术网络对城市碳强度的作用机制。第三,从区位差异、城市规模等角度出发,考察了城市数字技术网络对碳强度的异质性影响。

## 2 概念界定和研究假设

### 2.1 概念界定

本文按照技术网络→城市技术网络→城市数字技术网络的顺序对核心解释变量进行概念界定。在演化经济地理领域,技术网络是特定技术知识相互组合形成的技术空间<sup>[12,13]</sup>。在技术网络中,技术为节点,技术之间的关联为边。因此技术网络是“技术-技术”一模网络,是“城市-城市”一模网络进行尺度转换的基本单位。城市技术网络则是技术网络经尺度转换后的宏观地理表征<sup>[14]</sup>。在城市技术网络中,“节点”为积累大量技术要素的城市,“边”为不同城市中技术要素的跨地域组合关系。城市间通过大量的异质性技术要素组合联系形成了“城市技术网络”。

在上述概念的基础上引出城市数字技术网络的概念:由不同城市之间数字技术要素在流动与交换过程中所构成的特定组合关系,其所呈现出的特定空间形制是这些组合关系在空间上的累积和叠加。在本文的概念中,城市数字技术网络的连边关系是两种连接关系的并集,包含数字技术与数字技术的组合以及数字技术与非数字技术的组合。

### 2.2 城市数字技术网络对碳强度的影响

城市数字技术网络在推动地区增效减排方面具有独特优势。一方面,数字技术具有显著的边际复制成本趋近于零的特性<sup>[15]</sup>。这一特性在城市数字技术网络中得到了充分发挥,网络使得数字技术能够跨地区迅速扩展。当城市在数字技术网络中占据核心地位时,可通过网络快速复制已有数字化解决方案。例如,开发跨地区的智能电网调度模型,通过对全体数据的低成本复制分析,优化电力传输和分配方案,提升清洁能源消纳规模,促进地区节能减碳。

另一方面,数字技术具有边际报酬递增的特征。数字技术网络连接了以城市为单位的不同生产主体,并将

数据作为输入纳入生产函数。数据可复制、共享以及反复使用的特性,突破了传统生产要素的稀缺性和排他性限制,强化了规模报酬递增的前提条件<sup>[16]</sup>。在城市数字技术网络中,高中心度城市生产、分析、复用数据要素的规模更大,可以实现更显著的规模报酬递增。在同等规模的碳排放限值下,高中心度城市可以实现更大规模的经济增长,从而降低碳强度。综上,提出假设:

H1:城市数字技术网络可以降低碳强度。

### 2.2.1 城市数字技术网络、技术进步和碳强度

技术进步是降低碳强度的重要驱动因素。城市数字技术网络可以通过促进技术进步降低碳强度。数字技术网络使得创新主体之间的知识分享和合作更高效<sup>[16]</sup>:数字技术网络有助于克服距离摩擦和边界阻隔,为远距离主体提供知识流动的管道,实现不同区域之间异质性知识的流动<sup>[17]</sup>。另外,数字技术网络可以丰富地理邻近主体的知识互动交流形式,提高短距离知识互动的效率<sup>[18]</sup>。在数字技术城市网络中,节点中心度的提升意味着城市对网络知识的传递、整合和复用的能力更强。城市数字技术网络通过促进多样化、异质性的知识组合推动技术进步<sup>[19]</sup>。技术进步通常意味着更先进的能源利用方式和更高效的能源效率,从而有助于降低碳强度。综上,提出假设:

H2:城市数字技术网络可以促进技术进步,降低碳强度。

### 2.2.2 城市数字技术网络、产业升级和碳强度

产业升级是推动城市碳减排的重要因素<sup>[20]</sup>。城市数字技术网络可以通过促进产业升级降低碳强度。作为通用目的技术,数字技术具有良好的嵌入性,特别是跨行业渗透能力,可同时赋能制造业、服务业等多个领域。数字技术网络将数字技术的易嵌入性扩展到更大的空间中<sup>[7]</sup>。高中心度城市的数字技术能更加充分地嵌入不同的生产活动和技术类型,覆盖全产业链的各个环节,加速产业链的解耦与重组,进而提升各部门要素投入的协同应用,提高资源配置效率,促进产业升级<sup>[15]</sup>。具体而言,数字技术网络可以从两个方面推动产业升级:一是数字技术网络嵌入赋能推动产业内部技术跃迁形成的产业高级化;二是数字技术网络强化城市在技术空间中的联系,增加城市间竞争,从而倒逼产业结构升级。综上,提出假设:

H3:城市数字技术网络可以促进产业升级,降低碳强度。

## 3 实证策略、变量和数据

### 3.1 实证策略

#### 3.1.1 基准模型

首先证明城市数字技术网络对碳强度的影响,设定如下基准模型:

$$CI_{it} = \alpha_1 + \beta_1 DTnetwork_{it} + \beta_2 X_{it} + \zeta_i + \psi_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

式(1)中, $CI_{it}$ 表示城市*i*在*t*年的碳强度(取自然对数)。核心解释变量 $DTnetwork_{it}$ 为表示网络位置特征的指标,本文使用节点中心度作为代理变量。

参考相关文献<sup>[21-23]</sup>,本文控制其他因素( $X_{it}$ )对碳

强度的影响;财政支出占GDP比重、市场化水平、人口密度、人均GDP、金融发展水平、第二产业占GDP比重。 $\zeta_i$ 和 $\psi_i$ 分别表示城市固定和时间固定效应。 $\varepsilon_{it}$ 为误差项。

### 3.1.2 工具变量估计

为控制内生性问题对实证结果的干扰,本文使用两类工具变量。

第一,使用某一城市所在省份当年的中心度均值 $DT_{avg,i,t}$ (剔除该城市本身)作为工具变量。一般而言,同一省份内城市间的数字技术连接较为紧密,与其在城市数字技术网络中的状态高度相关,满足相关性假设。另外,某一城市的数字技术连接行为一般不足以决定省份层面的数字技术网络,满足外生性假设。

第二,参考已有文献的做法<sup>[24]</sup>,本文通过剔除度值分布处于前10%的样本,构建虚构网络,开展工具变量估计。以基准回归式(1)为例,首先将核心解释变量拆分为以下两部分:

$$DT_{network}_{i,t} = DT\_drop_{i,t} + \Delta DT_{i,t} \quad (2)$$

式(2)中, $DT\_drop_{i,t}$ 表示在剔除度值前10%城市节点的虚构网络中,城市*i*在*t*年的网络位置重要性; $\Delta DT_{i,t}$ 表示将度值前10%的城市重新加入网络后,该城市网络位置重要性的变化值。由于城市数字技术网络中起重要作用的是度值分布靠前的那些城市节点,因此变量 $DT_{network}_{i,t}$ 的信息主要来源于变量 $\Delta DT_{i,t}$ ,变量 $DT\_drop_{i,t}$ 提供的信息较为有限,即 $cov(\Delta DT_{i,t}, DT\_drop_{i,t} | X_{i,t}) = 0$ 。同时,结合城市数字技术网络的特征,度值前10%的城市样本对于某一城市来说是相对外生的,因此有 $cov(\Delta DT_{i,t}, \varepsilon_{i,t} | X_{i,t}) = 0$ 。相应地,式(1)可写为:

$$CI_{it} = \alpha_1 + \beta_1 \Delta DT_{i,t} + \beta_2 X_{i,t} + \zeta_i + \psi_i + \mu_{i,t} \quad (3)$$

式(3)中, $\mu_{i,t} = \beta_1 DT\_drop_{i,t} + \varepsilon_{i,t}$ 。综上,对于式(1),可使用虚构网络方法构建的变量 $\Delta DT_{i,t}$ 作为变量 $DT_{network}_{i,t}$ 的工具变量。

### 3.1.3 机制检验

根据研究假设,城市数字技术网络通过技术进步和产业升级两条路径降低碳强度。因此,构建如下检验模型:

$$M_{it} = \alpha_1 + \beta_1 DT_{network}_{i,t} + \beta_2 CVs + \zeta_i + \psi_i + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

式(4)中, $M_{it}$ 为机制变量。机制变量的具体说明见下文,其他变量含义与方程(1)一致。上述模型均使用OLS估计,为提高回归结果的稳健性,所有回归结果均使用聚类到城市层面的稳健标准误。

## 3.2 变量测度

### 3.2.1 城市数字技术网络的构建和测度

城市数字技术网络是由城市间数字技术流动所构成的特定组合关系。城市是构成该网络的基本单元,而城市间的数字技术要素的流动关系将各城市连接起来。本文使用中国数字技术专利的引用关系构建城市数字技术网络,其原因在于:专利引用是指一件专利被后申请专利的申请人或审查员所引用,表征着两件专利在技术上的关联性。如果一个专利引用了之前的专利,则可以推测该专利使用了之前专利中所包含的知识。专利引用网络可以展示技术创新的动态过程,还可以看出部门与部门间、行业与行业间、地区与地区之间的技术关

联特征。具体而言,本文基于中国国家知识产权局发布的《关键数字技术专利分类体系(2023)》展示了详细的数字技术分支,识别整理了全样本数字技术专利的引用数据,并按照城市年度进行加总,形成有向加权的城市数字技术网络。

本文主要考察城市的网络地位对碳强度的影响,使用节点中心度(degree)度量,计算公式如下:

$$degree = indegree_i + outdegree_i \quad (5)$$

$$indegree_i = \sum_{j=1}^k T_{ij} \quad (6)$$

$$outdegree_i = \sum_{j=1}^k T_{ji} \quad (7)$$

其中, $indegree_i$ 和 $outdegree_i$ 分别表示城市*i*的入度和出度中心度, $k$ 为城市网络节点数量, $T_{ij}$ 和 $T_{ji}$ 为城市*i*和城市*j*间的数字技术连接次数。网络中心度反映城市对数字技术资源支配、吸收和利用能力,中心度越高表明城市在数字技术网络中地位越高。

### 3.2.2 被解释变量

碳强度:本文以城市碳强度(CI)为因变量,其中碳排放数据来源于EDGAR。根据CO<sub>2</sub>卫星栅格数据,利用Arcgis软件提取了中国城市层面的碳排放总量。碳强度是指单位国内生产总值GDP产出所产生的碳排放量。计算公式为:碳强度=碳排放量/GDP。

### 3.2.3 机制变量

产业升级:已有文献主要使用产业结构衡量地区的产业升级<sup>[22, 23]</sup>,但该衡量方式并不一定能够反映现实情况。每个地区都具有独特的生产能力和比较优势,地区一般会在其优势行业上进步更快,使用总的产业结构数据会掩盖这些增长细节,进而得出有偏差的结论。本文使用出口复杂度作为城市产业升级的代理变量。其逻辑在于,一种产品的生产制造需要一系列生产知识和能力的配合,包括资源、基础设施、制度等,城市出口的产品反映了该城市拥有的生产知识以及组织这些知识的能力<sup>[25]</sup>。类比这个概念,如果一个地区倾向于生产更复杂、更稀缺的产品,发展多样化的产品结构,则说明该地区的产业发展水平越高。因此,参考已有文献的做法<sup>[26]</sup>,计算城市层面的出口复杂度作为产业升级的代理变量。

技术进步:已有文献主要用专利数量衡量地区技术进步,但事实上,并非所有的专利都具有相同的价值。大量低价值专利的叠加并不能准确衡量地区的技术水平。一般而言,复杂技术往往难以发明和模仿,只能被少数经济体生产与应用,因而具有更高的价值<sup>[27]</sup>。因此,本文参考已有研究的做法,使用技术复杂度衡量地区技术进步<sup>[27]</sup>。基于2000多万项技术专利的分类信息,结合网络多样性方法计算城市层面的技术复杂度。

### 3.3 数据说明

2010年以前,中国城市间数字技术的引用较为稀少,由此构成的网络稀疏度较大,无法有效反映足够的信息。因此,本文将数据区间选择为2010年至2021年。碳排放数据来自EDGAR数据库,数字技术专利数据来源于中国国家知识产权局,产业升级数据来自对外贸易统计数据库,控制变量数据来自《中国城市统计年鉴》。考虑到数据的分布特征和消除异方差,本文对被解释变

量及主要控制变量进行了对数化处理<sup>①</sup>。由于核心解释变量为离散值,且存在 0 值,本文对其进行加 1 后取自然对数。表 1 报告了变量的描述性统计结果。

表 1 描述性统计

变量	N	Min.	Mean	P50	Max.	Std.
CI	3408	-2.154	0.377	0.377	3.400	0.758
degree	3408	0.000	6.639	6.542	13.871	2.236
fiscal	3408	-3.126	-1.711	-1.753	0.470	0.440
market	3408	1.212	2.088	2.115	2.517	0.219
popu	3408	-7.591	-3.465	-3.324	-0.220	0.926
pgdp	3408	8.576	10.709	10.686	13.056	0.592
fin	3408	-0.991	0.296	0.280	3.001	0.390
sec_ind	3408	10.680	45.879	46.373	89.750	11.071

## 4 实证结果与讨论

### 4.1 典型事实分析

表 2 报告了城市数字技术网络的常见拓扑结构指标。城市数字技术网络表现出如下发展趋势:第一,网络规模不断扩大。城市节点数和连边数持续增加。在 2019 年之后,网络节点数和连边数有所下降。究其原因,公共卫生事件导致中国经济放缓,企业创新活动受阻,数字技术流动频率下降。第二,网络密度提升明显。城市之间的数字技术联系强度逐渐增加,城市节点之间的互动增加、关联度提升,网络逐渐由稀疏变为稠密。第三,网络复杂性显著提升。城市数字技术网络的平均聚类系数逐渐增加,平均路径长度持续降低。

表 2 2010—2021 年城市数字技术网络变化趋势

年份	节点	边	网络密度	平均聚类系数	平均路径长度
2010	315	52145	0.527	0.404	2.123
2011	335	180361	1.611	0.464	1.948
2012	344	401621	3.403	0.525	1.872
2013	345	609552	5.136	0.544	1.836
2014	347	795653	6.627	0.559	1.813
2015	348	796569	6.596	0.578	1.79
2016	357	1655995	13.029	0.623	1.74
2017	362	2118814	16.213	0.628	1.73
2018	365	2863541	21.553	0.663	1.683
2019	365	3429645	25.813	0.676	1.666
2020	365	2521764	18.98	0.66	1.691
2021	357	1119527	8.808	0.561	1.816

数字技术网络中心度作为核心解释变量,其分布特征与演变规律是识别网络驱动碳减排效应的关键。为揭示头部城市的数字技术网络动态演进规律,本文基于 2010 年与 2021 年的数据,展示了排名前 10 城市的中心度值及其变化,如表 3 所示。研究发现:数字技术网络的核心枢纽持续极化。北京、深圳、上海、杭州等城市始终占据网络核心地位。2010—2021 年,北京的中心度值从 16249 跃升至 380427。另外,数字技术网络的边缘节点呈结构性跃迁。成都、东莞通过嵌入“粤港澳—成渝”

双循环技术廊道,中心度排名分别上升至第 8、10 位,表明“东数西算”等国家工程有效推动了数字技术网络的区域再平衡。

表 3 2010、2021 年城市数字技术网络中心度排名前 10 的城市

排名	2010 年		2021 年	
	城市名称	中心度	城市名称	中心度
1	北京市	16249	北京市	380427
2	深圳市	14577	深圳市	269128
3	上海市	9631	上海市	150497
4	杭州市	4769	杭州市	110965
5	南京市	3607	广州市	104482
6	广州市	3430	南京市	103943
7	武汉市	3108	武汉市	83797
8	西安市	2906	成都市	82808
9	苏州市	2711	西安市	63763
10	天津市	2502	东莞市	59979

### 4.2 基准回归

基准回归结果如表 4 所示。根据表 4 列(1)、列(2),degree 的系数显著为负,表明城市数字技术网络地位提升有助于降低碳强度。数字技术网络地位的提升意味着本地智能化水平的提升。随着人工智能、大数据等技术的引入,城市可以通过智能化的管理系统进行能源消耗优化、交通流量调控、环境监测等工作。例如,通过智能电网、智能建筑管理等系统,城市能够更高效地使用能源,从而降低碳强度<sup>[28]</sup>。

表 4 基准回归结果

变量	被解释变量:CI	
	(1)	(2)
degree	-0.108 *** (0.019)	-0.050 *** (0.013)
fiscal		0.237 *** (0.062)
market		-0.100 (0.074)
popu		-0.124 (0.107)
rgdp		-0.000 ** (0.000)
fin		0.446 *** (0.087)
sec_ind		-0.008 *** (0.001)
City FE	YES	YES
Year FE	YES	YES
R <sup>2</sup>	0.947	0.973

注:表格中的所有列均控制了城市和年份固定效应。其中星号表示系数的显著性水平:\*\*\* p < 0.01, \*\* p < 0.05, \* p < 0.1

①由于第二产业占 GDP 比重未有明显偏态分布,因而未进行对数化。

4.3 稳健性检验

4.3.1 替换解释变量

(1)使用特征向量中心度代替节点中心度。特征向量中心度的思想在于,一个城市在网络中的重要性取决于与其连接城市的重要性,计算公式如下:

$$evecent(i) = e_i = c \sum_{j=1}^N a_{ij} e_j \quad (8)$$

式(8)中,c为比例常数,记  $e_i$  为节点 I 的重要性度量值,向量  $e = (e_1, e_2, \dots, e_N)^T$  是特征值问题  $e = cAe$  的解,A 是网络图 G 的邻接矩阵。回归结果如表 5 的第(1)列所示,核心解释变量的系数依然在 1% 的水平下显著为负,与基准回归一致。

(2)使用 Pagerank 中心度代替节点中心度。Pagerank 中心度的思想在于,一个节点的重要性不仅取决于节点本身的中心度,也取决于其相邻节点的重要性,该指数可以更准确地反映各城市节点在网络中的相对位置,计算公式如下:

$$pagerank(i) = d \left( \sum_{j=1}^N a_{ij} \frac{PR_j}{IDC_j} \right) + \frac{1-d}{N} \quad (9)$$

式(9)中, $PR_j \geq 0$  表示节点 I 的 PageRank 值;为了避免 0 值,赋予每一个 PageRank 指数最小值  $(1-d)/N$ , $d$  ( $0 \leq d \leq 1$ ) 为阻尼因子。结果如表 5 第(2)列所示,核心解释变量系数在 1% 的水平下显著为负,与基准回归一致。

4.3.2 滞后解释变量

考虑到核心解释变量对碳强度影响的滞后性,本文进一步将解释变量的一阶滞后项加入模型,回归结果如表 5 列(3)所示。结果表明,核心解释变量的方向依旧显著不变,证实了基准回归的稳健性。

4.3.3 剔除特殊样本

北京、上海等直辖市在政治、经济、文化等方面均具有特殊的优势,这类地区在数字技术网络中具有较高的中心度,使得城市网络中心度呈现出幂律分布的特征,从而会造成估计结果的偏误。因此,剔除四个直辖市后进一步回归检验,结果如表 5 列(4)所示。结果表明,剔除特殊样本不影响本文研究结论。

表 5 稳健性检验结果

变量	替换变量		滞后解释变量	剔除特殊样本
	(1)	(2)	(3)	(4)
pagerank	-0.063 *** (0.015)			
evcent		-0.035 *** (0.008)		
degree			-0.048 *** (0.012)	-0.047 *** (0.012)
CVs	YES	YES	YES	YES
City fixed	YES	YES	YES	YES
Year fixed	YES	YES	YES	YES
R <sup>2</sup>	0.972	0.973	0.976	0.972

4.3.4 工具变量估计

本文使用前文构建的工具变量进行稳健性检验,结果如表 6 所示。两个工具变量的 KPL 统计量均在 1% 的

置信水平下显著,拒绝“工具变量不可识别”的原假设,CDW 统计量均大于 10% 的 Stock - Yogo weak ID 标准,说明不存在弱工具变量问题。degree 的系数均在 1% 的水平下显著为负,证实了城市数字技术网络地位提升可以降低城市碳强度。

表 6 内生性检验结果

变量	(1) IV = DTavg <sub>i,t</sub>	(2) IV = ΔDT <sub>i,t</sub>
degree	-0.196 *** (0.021)	-0.058 *** (0.007)
CVs	YES	YES
City FE	YES	YES
Year FE	YES	YES
Kleibergen - Paap rk LM statistic	352.141 ***	3179.762 ***
Cragg - Donald Wald F statistic	391.417 [16.38]	50000 [16.38]
R <sup>2</sup>	0.426	0.512

5 进一步分析

5.1 机制分析

为证实技术进步渠道的存在,本文使用前文构建的技术复杂度(Tech\_cpx)指标作为技术进步的代理变量。同时,还使用城市专利申请规模(Tech\_siz)和专利多样性(Tech\_div)作为代理变量进行稳健性检验,结果如表 7 所示。

表 7 列(1)中 degree 的系数显著为正,说明城市数字技术网络地位提升可以通过促进城市技术进步降低碳强度。列(2)、列(3)的稳健性检验同样证实了技术进步渠道的成立。数字技术本身具有融合创新的特性,可以突破创新过程从知识积累、研究到应用的线性规律<sup>[16]</sup>。城市数字技术网络进一步强化了数字技术的融合特性,使得创新主体之间的知识分享和合作更高效,有助于加速数字创新产品和服务的快速迭代,促进整体技术进步,从而降低城市碳强度<sup>[29]</sup>。

表 7 机制检验:技术进步

变量	Tech_cpx (1)	Tech_siz (2)	Tech_div (3)
degree	0.379 *** (0.027)	0.326 *** (0.024)	0.155 *** (0.018)
CVs	YES	YES	YES
City fixed	YES	YES	YES
Year fixed	YES	YES	YES
R <sup>2</sup>	0.964	0.973	0.916

为证实产业升级渠道,本文使用出口产品复杂度(EPC)作为产业升级的代理变量。此外,还使用产业复杂度(ICI)和产业结构(Ind\_str)(第三产业增加值与第二产业增加值的比例)作为代理变量进行稳健性检验<sup>[30]</sup>。ICI 的构建方式为:基于城市工商企业注册数据,构建区域 - 行业关联矩阵,利用特征向量法计算城市产业复杂度指数。结果如表 8 所示。

表 8 机制检验:产业升级

变量	EPC (1)	ICI (2)	Ind_str (3)
degree	0.012 * (0.006)	0.001 * (0.000)	0.035 *** (0.012)
CVs	YES	YES	YES
City fixed	YES	YES	YES
Year fixed	YES	YES	YES
R <sup>2</sup>	0.979	0.211	0.930

表 8 列(1)中的 degree 系数显著为正,说明城市网络地位提升可以促进产业升级。列(2)、列(3)的结果同样证实了产业升级渠道。高中心度城市作为数字技术网络的枢纽节点,优先吸收不同地区的数字技术要素,促进数字产业集聚,从而优化本地产业结构,降低碳强度。另外,在城市数字技术网络中,城市网络地位越高,数字技术向传统产业的渗透组合越充分,有助于提升本地的产业数字化水平。总体而言,数字技术网络对产业升级的推动作用体现为双重路径:一方面,通过产品复杂度的提升实现产业内部的技术跃迁;另一方面,通过数据要素的网络化配置推动产业结构向服务业主导转型。两类路径共同构成“技术深化-结构优化”的协同降碳机制。

## 5.2 异质性分析

### 5.2.1 区位异质性

中国城市发展具有显著的区位差异,导致城市数字技术网络对碳强度的影响存在差异。因此,按照东、中、西的方式对城市进行分组回归,结果如表 9 所示。表 9 列(1)、列(2)显示,在东部和中部地区,城市网络地位提升有助降低碳强度。列(3)结果表明,这种效应在西部地区并不显著。东、中部城市在产业与人才等方面具有优势,可以更好地发挥城市数字技术网络的赋能作用。西部地区传统产业占比较高,创新型产业、信息化产业的发展动能不足,不利于城市数字技术网络的渗透融合。

表 9 区位异质性检验

变量	(1) 东部地区	(2) 中部地区	(3) 西部地区
degree	-0.104 *** (0.021)	-0.059 *** (0.014)	-0.003 (0.020)
CVs	YES	YES	YES
City fixed	YES	YES	YES
Year fixed	YES	YES	YES
R <sup>2</sup>	0.983	0.970	0.965

### 5.2.2 城市规模异质性

城市数字技术网络对碳强度的影响在不同规模城市中具有差异性。本文按照特大城市、大城市和中小城市的分组进行异质性检验。结果如表 10 所示。结果表明,城市网络地位对碳强度的抑制作用仅在中小城市中

显著,在特大城市和大城市中并不显著。中小城市的传统产业占比高,数字化改造空间大。数字技术网络通过技术融合为传统产业赋能,可以带来更显著的降碳效应。而特大城市和大城市已完成部分数字化转型,数字技术对既有体系的优化空间有限,且高附加值服务业本身碳强度较低,导致网络地位提升的减排效果减弱。

表 10 城市规模异质性检验

变量	(1) 特大城市	(2) 大城市	(3) 中小城市
degree	-0.105 (0.129)	-0.045 (0.032)	-0.042 *** (0.013)
CVs	YES	YES	YES
City fixed	YES	YES	YES
Year fixed	YES	YES	YES
R <sup>2</sup>	0.993	0.965	0.973

## 5.3 虹吸效应分析

数字技术连接下的城市呈现出复杂的网络关联形态,这种城市间的技术连接是否形成跨地区的碳转移通道?本文进一步考察数字技术网络对碳强度的溢出效应。基于城市数字技术网络数据构建反映城市间数字技术关联的权重矩阵(W)。矩阵 W 反映了任意两个城市之间的数字技术关联性大小,城市 i 与城市 j 之间的数字技术关联性越大,W<sub>ij</sub>的值越大。参考空间计量模型的设定,在基准模型中纳入各变量与矩阵 W 的交乘项,构建如下模型:

$$CI_{it} = \beta_0 + (\beta_1 + \beta_2 W) DTnetwork_{i,t} + (\theta_1 + \theta_2 W) X_{it} + \rho WCI_{it} + \zeta_i + \psi_t + \varepsilon_{it} \quad (10)$$

式(10)中,W 为城市数字技术关联矩阵,其余变量的含义与基准模型一致。 $\beta_1$  和  $\beta_2$  是本文主要关注的系数, $\beta_1$  捕捉数字技术网络的本地“碳减排”效应, $\beta_2$  捕捉数字技术网络对关联地区的溢出效应。

表 11 的结果显示,数字技术网络的直接效应显著为负,表明数字技术网络中心度提升可以降低本地的碳强度。间接效应显著为正,表明数字技术网络的中心度提升会增加技术关联城市的碳强度,表现为负向溢出效应。这说明,城市间的数字技术连接会构成碳强度的转移通道。本地的中心度提升通过吸引关联城市的人才、技术等创新资源,形成城际竞争效应,从而增加数字技术空间中邻近城市的碳强度。

## 6 结论与建议

### 6.1 研究结论

基于中国城市数字专利引用数据,构建反映数字技术流动交换的城市数字技术网络,并进一步验证数字技术网络对城市碳强度的影响。研究发现:城市在数字技术网络中的地位提升可以显著降低碳强度,促进产业升级和技术进步是其发挥减排作用的两条路径。数字技术网络的减排效应在东中部及中小规模城市中显著。另外,数字技术网络对城市碳强度的影响具有负向溢出效应,本地网络地位的提升会增加与之技术关联城市的碳强度,呈现出“网络虹吸”现象。

表 11 数字技术网络对碳强度影响的溢出效应

变量	效应分解	被解释变量:CI	
		W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>
degree	直接效应	-0.048 *** (0.006)	-0.046 *** (0.006)
	间接效应	0.139 *** (0.043)	0.129 *** (0.048)
CVs		YES	YES
p		-0.261 ** (0.127)	-0.377 ** (0.152)
City FE		YES	YES
Year FE		YES	YES
N		3408	3408
Likelihood		2251.836	2259.053
Within R <sup>2</sup>		0.186	0.191

注:权重矩阵为截面数据,本文选择中间年份 2015 年的数字技术关联矩阵作为权重矩阵(W<sub>1</sub>),并以 2016 年的关联矩阵作为稳健性检验(W<sub>2</sub>)

6.2 研究贡献

6.2.1 理论贡献

(1)从城市网络视角,考察了数字技术网络的碳减排效应,揭示了数字技术网络的非地理性要素重组功能,将新经济地理学的“技术外部性”理论拓展至流动空间范畴,为区域协同减排提供了新的解释框架。(2)考察了产业升级与技术进步作为数字技术网络减排的双通道机制,为理解数字技术网络如何影响碳强度提供了深入的实证证据。(3)通过验证“网络虹吸”现象,提出数字技术网络中竞争性资源虹吸的理论解释,丰富了空间溢出效应的理论内涵。

6.2.2 实践价值

(1)有助于理解如何通过提升数字技术网络地位降低碳强度,为低碳城市发展提供启示。(2)揭示了数字技术网络的减排机制,有助于政府制定更有效的产业政策和明确技术发展方向。(3)为制定区域性碳减排政策提供依据,有助于不同地区根据自身的数字技术网络特征,制定差异化的措施。

6.3 政策启示

研究结论显示,数字技术的跨地区流动有助于降低碳强度。比如,华为云通过与西部地区的传统能源公司合作,提供云计算等技术支持,推动其实施智能化、自动化的生产流程,从而提升生产效率,降低碳强度。因此,政府应通过政策牵引,进一步畅通数字技术溢出扩散通道,促进城市间的数字技术流动。例如,通过制定税收优惠和研发补贴等惠企政策,支持数字科技企业跨地区投资合作,加强数字技术的跨地区应用与共享。支持设立“数字技术推广基金”和数字技术合作平台等,鼓励不同地区企业针对数字技术进行联合研发,贯通数字技术研发、孵化、扩散等关键链条,为数字技术人才、数字技术成果的跨地区流动提供通道。支持数字科技企业与高校或科研机构共同建设研发平台,如技术实验室、创

新孵化器、共享科研设备等,加速跨地区的数字科技成果转化与共享。

机制分析结果表明,数字技术网络通过促进技术进步和产业升级降低碳强度。因此,要鼓励数字科技企业同行业合作与跨行业融合并行,推动产业和技术双向升级。一方面,要加强建设跨地区的数字基础设施,制定数字产业集聚政策,推动不同数字技术之间融合迭代。比如,鼓励“比亚迪”与“蔚来”等企业在电池技术和智能化充电设施建设上进行合作,加速异质性数字技术的连接重组。另一方面,要利用资金支持、技术引导等形式,鼓励数字技术与传统行业跨界融合。比如,鼓励东南沿海的数字科技企业与西部传统工业企业合作,助力传统企业进行清洁能源转换和智能制造升级,从而提高能源使用效率,进而降低碳强度。

异质性分析结果表明,数字技术网络的碳减排效应仅在东中部、中小规模城市中显著。因此,应关注数字技术网络异质性减排效应。东中部、中小规模城市作为数字技术网络的受益区,要发挥数字技术的主动溢出效应,带动其他地区产业数字化和清洁化转型。比如,建立健全知识产权保护体系,建设技术交易市场 and 平台,推动跨区域的数字技术转移和共享,帮助其他地区提高数字技术的普及度。西部地区的数字基础设施相对薄弱。因此,要加强西部地区的数字基础设施建设,加快偏远地区 5G、光纤宽带等高效网络设施的普及。数字技术网络的碳减排效应在大城市中不显著。因此,要推动大城市的数字技术绿色化转型。加大对绿色数字技术的研发投入,鼓励企业和科研机构开发节能减排、资源循环利用的数字技术。

参考文献:

[1] 王锋,葛星. 低碳转型冲击就业吗:来自低碳城市试点的经验证据[J]. 中国工业经济,2022,(5):81-99.

[2] 张卓群,张涛,冯冬发. 中国碳排放强度的区域差异、动态演进及收敛性研究[J]. 数量经济技术经济研究,2022,39(4):67-87.

[3] 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.

[4] Zhou J, Liu W. Carbon Reduction Effects of Digital Technology Transformation: Evidence From the Listed Manufacturing Firms in China[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2024, 198: 122999.

[5] Karanam S A, Mani D, Saha R L. Growing Technological Relatedness to the ICT Industry and Its Impacts[J]. Information Systems Research, 2024, 36(1): 344-369.

[6] Liu Y, Zhang X, Shen Y. Technology-driven Carbon Reduction: Analyzing the Impact of Digital Technology on China's Carbon Emission and Its Mechanism[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2024, 200: 123124.

[7] Pan J, Cifuentes-Faura J, Zhao X, et al. Unlocking the Impact of Digital Technology Progress and Entry Dynamics on Firm's Total Factor Productivity in Chinese Industries[J]. Global Finance Journal, 2024, 60: 100957.

[8] 刘婧玲,陈艳莹. 数字技术发展、时空动态效应与区域碳排放[J]. 科学学研究,2023,41(5):841-853.

[9] Yang Z, Gao W, Han Q, et al. Digitalization and Carbon Emis-

- sions: How does Digital City Construction Affect China's Carbon Emission Reduction? [J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 87, 104201.
- [10] Wang H, Li Y, Lin W, et al. How does Digital Technology Promote Carbon Emission Reduction? Empirical Evidence Based on E-commerce Pilot City Policy in China [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 325: 116524.
- [11] 盛科荣, 李晓瑞, 孙威, 等. 中国城市网络地位对碳排放效率的影响 [J]. 地理学报, 2023, 78(11): 2864 - 2882.
- [12] Frenken K, Boschma R A. A Theoretical Framework for Evolutionary Economic Geography: Industrial Dynamics and Urban Growth as a Branching Process [J]. Journal of Economic Geography, 2007, 7(5): 635 - 649.
- [13] Rigby D L. Technological Relatedness and Knowledge Space: Entry and Exit of US Cities from Patent Classes [J]. Regional Studies, 2015, 49(11): 1922 - 1937.
- [14] 曹湛, 戴靓, 吴祖泉, 等. 城市技术网络的概念框架与实证研究 [J]. 地理研究, 2023, 42(9): 2302 - 2323.
- [15] 田秀娟, 李睿. 数字技术赋能实体经济转型发展: 基于熊彼特内生增长理论的分析框架 [J]. 管理世界, 2022, 38(5): 56 - 73.
- [16] 陈晓红, 李杨扬, 宋丽洁, 等. 数字经济理论体系与研究展望 [J]. 管理世界, 2022, 38(2): 208 - 224 + 13 - 16.
- [17] Cao Z, Derudder B, Dai L, et al. 'Buzz - and - pipeline' dynamics in Chinese Science: The Impact of Interurban Collaboration Linkages on Cities' Innovation Capacity [J]. Regional Studies, 2022, 56(2): 290 - 306.
- [18] Zhang X, Sun C, Mei L. Agglomerative Patterns and Cooperative Networks of the Online Video Industry in China [J]. Regional Studies, 2021, 55(8): 1429 - 1441.
- [19] Pintar N, Scherngell T. The Complex Nature of Regional Knowledge Production: Evidence on European Regions [J]. Research Policy, 2022, 51(8): 104170.
- [20] 邵帅, 范美婷, 杨莉莉. 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, 2022, 38(2): 46 - 69 + 4 - 10.
- [21] 靳玮, 王弟海, 张林. 碳中和背景下的中国经济低碳转型: 特征事实与机制分析 [J]. 经济研究, 2022, 57(12): 87 - 103.
- [22] Zhang Y J, Du M. Greening Through Digitalisation? Evidence from Cities in China [J]. Regional Studies, 2023, 59(1): 1 - 15.
- [23] Wang J, Dong X, Dong K. How does ICT Agglomeration Affect Carbon Emissions? The Case of Yangtze River Delta Urban Agglomeration in China [J]. Energy Economics, 2022, 111: 106107.
- [24] 毛捷, 韩瑞雪, 刘冲. 融资平台债务增长的新机理研究: 担保网络的视角 [J]. 经济研究, 2024, 59(1): 72 - 92.
- [25] Hidalgo C A, Hausmann R. The Building Blocks of Economic Complexity [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2009, 106(26): 10570 - 10575.
- [26] Hausmann, R., Rodrik, D. Economic Development as Self-Discovery [J]. Journal of Development Economics, 2003, 72(2), 603 - 633.
- [27] Mewes L, Broekel T. Technological Complexity and Economic Growth of Regions [J]. Research Policy, 2022, 51(8): 104156.
- [28] 赵宏霞, 龚中英, 张曼莉. 数智技术促进低碳社区建设的资源编排机制研究 [J]. 软科学, 2025, 39(03): 114 - 120.
- [29] 陈晓红, 张静辉, 汪阳洁, 等. 数字赋能、技术创新与空气污染治理: 来自专利文本挖掘的证据 [J]. 经济研究, 2024, 59(12): 21 - 39.
- [30] Balland P A, Rigby D. The Geography of Complex Knowledge [J]. Economic Geography, 2017, 93(1): 1 - 23.
- (责任编辑: 何 敏)