



孙倩, 李国祥, 薛进军. 数字经济发展缓解碳排放不平等: 来自偏向性技术进步的证据[J]. 中国人口·资源与环境, 2025, 35(6): 16-26. [SUN Q, LI G X, XUE J J. Digital economy development mitigating carbon emission inequality: evidence from biased technical progress [J]. China population, resources and environment, 2025, 35(6): 16-26.]

数字经济发展缓解碳排放不平等

——来自偏向性技术进步的证据

孙倩^{1,6}, 李国祥^{2,3}, 薛进军^{4,5,6}

(1. 清华大学经济管理学院, 北京 100084; 2. 南京师范大学商学院, 江苏 南京 210023; 3. 湖北经济学院大数据与数字经济研究院, 湖北 武汉 430205; 4. 中国社会科学院大学应用经济学院, 北京 102488; 5. 昆明理工大学管理与经济学院, 云南 昆明 650500; 6. 碳排放权交易省部共建协同创新中心, 湖北 武汉 430205)

摘要 各地区协同推进低碳转型, 是中国破解资源环境约束、补齐经济高质量发展短板的必然选择。然而, 地区间碳排放空间失衡和降碳策略的异质性特征, 对全国实现“双碳”目标构成严峻挑战。该研究基于不平等理论, 剖析地区间碳排放差异的形成机理, 系统解构数字经济发展缓解地区间碳排放不平等的理论逻辑, 通过要素配置效率与偏向性技术进步双重传导路径, 揭示其作用机制, 并基于 2011—2019 年中国 278 个地级及以上城市面板数据, 采用双向固定效应模型进行实证检验。研究结果表明: 数字经济发展可以显著降低城市间碳排放不平等程度, 提升高碳城市的碳减排速率, 该结论在进行系列稳健性检验后仍然成立。从作用机制来看, 数字经济发展通过优化创新要素配置, 强化技能溢价效应, 逐步引导技术进步更多地依赖高技能劳动力, 更好地推动高碳城市劳动偏向性技术进步, 进而缩小城市间碳排放不平等。相较于减排偏向性技术进步, 节能偏向性技术进步由于更契合高碳城市的要素禀赋特征, 故在缓解碳排放不平等方面更具优势。异质性分析表明, 数字经济发展有助于缓解高数字禀赋城市的碳排放不平等, 较高的数字技术应用空间和人力资本水平有助于更好发挥数字经济对碳排放不平等的缓解效应。鉴于此, 该研究提出应构建多元协同政策体系, 推动地区间数字技术合作和要素流动, 加速高碳城市数字化转型与技术要素优化配置, 以数字化治理协同推进低碳转型, 从而激发数字经济提升碳减排效率与缓解碳排放不平等的倍增效应。

关键词 数字经济; 偏向性技术进步; 碳减排; 碳排放不平等

中图分类号 F49; F061.5 文献标志码 A 文章编号 1002-2104(2025)06-0016-11 DOI: 10.12062/cpre.20250135

第 28 届联合国气候变化大会指出, 实现净零排放目标的关键在于能源转型, 并呼吁各国立足本国国情实施公正、有序和公平的能源转型。然而, 当前全球碳排放不平等现象依然突出, 高收入国家人均碳排放量远超低收入国家, 而低收入国家往往承担了更多气候变化后果^[1]。在同一国家不同地区或行业也存在碳排放不平等现象。碳排放不平等表现为不同地区或经济部门在碳排放量、受气候变化影响程度等方面的不均衡现象。以中国碳核算数据库 (Carbon Emission Accounts & Datasets, CEADs) 计算的

城市碳排放量数据为例, 2019 年碳排放量排名前五的省份占全国碳排放总量的 36.65%, 而排名后十位省份仅占 13.10%, 区域间碳减排压力过度失衡成为中国低碳转型面临的重大挑战^①。缓解碳排放不平等是助力实现碳中和目标, 保障各群体公平享有秩序、整洁以及可持续环境的自由和免受气候变化带来的危害的重要手段。

数字经济的高渗透性为缓解碳排放不平等提供了新契机。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》明确提出, 促进数字技术

收稿日期: 2024-07-06 修回日期: 2025-01-24

作者简介: 孙倩, 博士后, 助理研究员, 主要研究方向为能源经济学、数字经济与技术创新。E-mail: sunqian@sem.tsinghua.edu.cn。

通信作者: 李国祥, 博士, 副教授, 硕导, 主要研究方向为数字经济、气候金融、能源战略与政策系统分析。E-mail: lgx_0614@126.com。

基金项目: 国家自然科学基金“企业数字化转型驱动减污降碳协同的机理与政策优化研究: 基于偏向性技术进步的视角”(批准号: 72304145); 人力资源和社会保障部 111 引智工程(批准号: B18014); 碳排放权交易省部共建协同创新中心开放课题“实现 1.5 度目标的能源转型要求: 迫切性与现实性的选择”(批准号: 24CICETS-YB012); 湖北经济学院大数据与数字经济研究院课题“链主企业数字化驱动产业链生态优化的作用机理与效应识别”(批准号: 2024KFYB06)。

①数据来自中国碳核算数据库提供的 1997—2019 年 290 个中国城市碳排放清单(<https://www.ceads.net.cn/data/city/>)。

与实体经济深度融合,赋能传统产业转型升级。数字经济正成为推动中国能源产业低碳转型以及实现碳达峰碳中和目标的重要抓手^[2]。数字技术的泛生性、普惠性、渗透性等特征,能够降低企业碳减排成本^[3],强化高碳城市的后发优势,促进绿色资本、高技能劳动力等要素在高碳城市集聚,使得高碳城市以低碳要素在行业或部门间的优化再配置来提升低碳技术创新水平^[4-5]和技术进步的靶向性,从而缩小高碳城市与低碳城市的碳排放强度差距。由此可见,数字经济是影响碳排放不平等的重要因素,其中数字经济发展所推动的技术进步对缓解碳排放不平等有着关键作用,尤其是数字经济的要素再配置效应,通过重构区域要素比较优势,进而改变技术进步的偏向性特征。偏向性技术进步是指技术进步偏向于某一要素或特征时会获得更大的边际报酬,是一种诱导性技术变革^[6-7]。其主要作用途径如下:一方面,数字经济发展可以改变要素相对供给规模和价格,使技术进步偏向于使用或节约某类要素,表现出要素偏向特征,这为不同要素禀赋城市或行业通过确定适宜的技术进步方向来提高碳减排效果提供了依据^[8]。另一方面,企业可以借助数字技术精准干预生产流程,引导创新资源流向有利于实现协同降碳的技术进步领域(如节能、减排等),使技术进步表现出环境偏向特征^[9]。鉴于此,本研究将深入探讨数字经济发展是否能够缓解碳排放不平等,以及其背后的作用机制。

1 文献综述

1.1 碳排放不平等的影响因素

现有研究针对碳排放不平等的概念及其影响因素展开研究,认为碳排放不平等是环境不平等概念的延伸。环境不平等是指不同社会群体不成比例地受到环境危害的影响^[10];碳排放不平等是指国家、地区和个人无法平等地使用、享受气候系统资源,同时不公平地分担了稳定气候系统的义务和成本^[1]。围绕碳排放不平等的因素研究主要涉及以下3支文献。

第一支文献分析了收入水平如何影响碳排放不平等。Duro等^[11]研究发现,人均二氧化碳排放量的区域不平等主要归因于人均收入水平的不平等。大部分国家最高收入群体的碳排放量是最低收入群体的4倍左右,但在有些国家该差距达到了13.3倍^[12],加剧碳排放不平等的主要因素是收入的非均衡增长^[13]。第二支文献认为消费模式差异加剧了碳排放不平等。家庭消费是增加碳排放量的重要来源,随着生活水平提高,家庭能源消耗的比重将持续上升^[14]。但由于消费模式差异,家庭碳足迹的分布并不均匀,高收入群体具有较高边际消费和碳排放量^[15]。此外,生产活动产生的二氧化碳排放来自不同类型的能源

消耗部门,能源消费类型差异尤其是化石能源消费差异会加剧碳排放不平等^[16]。第三支文献从数字化视角研究了碳排放不平等问题。区域间能源结构、绿色全要素生产率和绿色技术水平差异,形成了要素跨区域流动的客观条件,而智慧交通发展和数字技术创新则加速了区域间要素流通速度,逐渐成为维护能源正义和缓解碳排放不平等的重要手段^[17-18],但目前该类研究较少,这为本研究深入探讨数字经济如何缓解碳排放不平等留下了空间。

1.2 数字经济发展的碳减排效应和偏向性技术进步效应

关于数字经济与碳排放不平等关系研究的文献较少,现有研究主要分析了数字经济发展的环境效应尤其是碳减排效应:①数字经济具有的信息传播、数据共享等要素配置优势,可以提高要素流通效率并简化交易流程,从而减少相关主体生产经营过程中的能源消耗。同时,数字媒体宣传平台可以增加消费者对绿色环保产品的偏好和需求,迫使企业生产资源向绿色环保产品生产领域倾斜,达到减污与降碳目的^[19-20]。②数字经济通过人工智能、大数据、物联网等新技术不断推进经济一体化,强化信息化竞争和产品竞争,进而缩短产品创新生命周期,利用更高频率的技术革新持续推进全要素生产率提升^[21]。此外,数字经济发展对绿色产品质量提出了更高要求,不断催生可再生能源技术和低碳技术的研发与应用,从而加快清洁能源对化石能源的替代,促进高碳排放产业逐渐向绿色、环保产业转型^[22]。③数字化发展可以加快大数据平台的构建和应用,提高环境政策信息发布和传播速度,以及地方政府对污染性企业的监管力度,达到减污降碳效果^[23]。

企业数字化转型会影响劳动、资本、能源等要素的相对价格和投入结构,进而影响偏向性技术进步:①数字化转型会提高企业技能型劳动需求和工人工资水平^[24],催生技术进步偏向。数字化转型促使企业强化现代信息技术应用,推动高技能劳动力对低技能劳动力的替代,优化企业人力资本结构,提高人力资本(尤其是高技能人力资本)密集度,进而促进技能偏向性技术进步和产品升级^[25-26]。②数字化转型会改变企业资本结构,影响资本配置。数字化的不断发展使得信息通信技术(information and communications technology, ICT)产品相对价格下降,通过替代效应影响要素投入,实现ICT对其他资本的替代,从而提高企业全要素生产率和技术创新能力^[27]。③技术变革能够实现能源节约。企业数字化转型所应用的信息技术可以显著提高能源配置效率,提高能源要素投入产出比^[28],同时助力企业进行精益生产,降低全生命周期的综合能耗,推动全产业链绿色低碳转型^[29]。

1.3 文献述评与边际贡献

综上所述,现有研究虽在相关领域形成了诸多成果,但鲜有研究从偏向性技术进步视角,探讨数字经济与碳排放不平等的关系:①鲜有研究在同一理论框架下分析数字经济如何通过偏向性技术进步影响碳排放不平等,忽视了数字经济发展对区域内要素比较优势变化以及不同碳排放强度城市碳减排的差异化影响^[23, 30]。②相关文献在分析数字经济影响碳减排的机制路径时,较少考虑不同要素类型及单一要素内部结构下偏向性技术进步的重要作用^[28, 31-32]。③较少有文献综合比较数字经济对不同生产环节中节能偏向性和减排偏向性技术进步的作用差异^[26-27]。为了弥补上述研究的不足,本研究基于创新要素流动促进偏向性技术进步的理论框架,厘清数字经济与碳排放不平等的内在关系。本研究可能的边际贡献体现在3个方面:①将数字经济作为缓解碳排放不平等的 newPath,阐释其缓解城市间碳排放不平等的内在机理,完善和补充数字经济与碳排放不平等研究的解释逻辑。②基于要素间和要素内部结构调整,厘清数字经济发展条件下不同类型偏向性技术的选择机制,凝练出基于要素禀赋优势的低碳发展理论框架,从要素偏向性技术进步视角演绎数字经济发展缓解城市间碳排放不平等的作用机制。③基于生产流程差异,将环境偏向性技术进步分为节能偏向性与减排偏向性技术进步,进一步识别数字经济发展缓解城市碳排放不平等过程中环境偏向性技术进步的方向差异。

2 理论分析

数字经济发展缓解碳排放不平等的关键是促进低碳城市持续转型的同时,加快推动高碳城市碳减排,进而缩小城市间碳排放差距。数字经济与实体经济深度融合促进了数字技术的推广应用。但是,相对于低碳城市而言,高碳城市具有较高的能源消耗强度、偏重工业的产业结构、高碳化的能源结构、较大的绿色技术需求缺口等典型特征^[36-37],一直以来都是碳减排的主阵地^[35],这为数字经济助力碳减排提供了更多应用场景,也为缓解城市间碳排放不平等提供了可能。数字经济发展可以从多个方面缓解碳排放不平等:①数字经济发展可以加快改造、升级高碳城市碳减排企业的内部业务流程与生产方式^[33],实现二氧化碳的资源化处理,改善企业能耗模式,并通过推进减排偏向性技术进步和生产工艺优化来减少碳排放。②当面对较大的碳减排压力时,相对于低碳城市而言,高碳城市的地方政府和企业更有动机借助数字技术对碳排放进行实时监测,以精准干预降碳流程,引导资源要素流向节能技术、减排技术等碳减排关键技术领域,驱动能源

消耗量和碳排放量随技术进步而降低^[22]。③数字经济发展创造的新业态(虚拟电厂、电动汽车灵活充电等)可以加快引导高碳城市能源结构和产业结构低碳转型,强化高碳城市的清洁能源消费,降低区域内企业对传统能源的依赖,通过结构效应达到降碳目标^[34]。由此可见,相对于低碳城市而言,数字经济可以加快推动高碳城市碳减排,缓解城市间碳排放不平等,且技术进步在此进程中具有重要作用。

数字经济发展所推动的技术进步是高碳城市碳减排的重要驱动力。创新理论和内生增长理论认为,研发与创新活动所形成的技术进步是经济增长的内生因素,这些活动发挥的“创造性破坏”作用推动了技术进步和经济高质量增长。创新活动的有效性依赖于创新要素的高效配置,而以大数据、云计算、人工智能和区块链为代表的数字技术的推广和应用,汇聚了大量的资本、高技能劳动、现代化技术等创新要素,为技术进步提供了基础支撑。数字经济发展还强化了数字技术的渗透性,使生产要素和生产关系逐渐数字化,有效降低技术进步的搜索成本、要素配置成本、复制成本和验证成本等,推动清洁技术研发与应用的关键资源整合优化,提高各城市尤其是高碳城市具有比较优势的要素在技术进步中贡献度,进而强化技术进步的要 素偏向性,激发高碳城市碳减排的技术优势。

数字经济发展会通过影响不同类型的偏向性技术进步来缓解碳排放不平等。第一,数字经济发展可以改变要素相对供给规模和价格,使技术进步偏向于使用或节约某类要素,从而对其他要素形成替代,使技术进步表现出要素偏向特征^[8]。数字技术的推广和应用对劳动力技能水平提出了更高要求,提高了劳动力尤其是技能型劳动力的需求和工资水平,促使高技能劳动力逐渐替代低技能劳动力,进而优化企业人力资本结构并提高高技能人力资本密集度,推动技能偏向性技术进步和碳减排。而由于高碳城市低碳技术进步空间和数字经济发展空间大,根据边际报酬递减规律,此时数字经济发展对劳动尤其是技能劳动偏向性技术进步的边际效应更高,这与发展中国家技术追赶发达国家的情形具有相似性。第二,源头防治和末端治理是高碳企业实现碳减排的两个抓手,但末端治理难以解决能源资源利用效率低、要素投入产出比不高等问题,而源头防治在提高要素利用效率的同时,可以推动能源结构低碳转型,改变以煤炭等化石能源为主的传统能源结构。在碳达峰碳中和目标约束下,高碳城市迫切需要探寻更有效的降碳工具加快碳减排进程,因此,数字技术的要素配置优势可能会引导生产要素流向最有利于技术进步和减排的生产环节,即引导生产要素流向节能端。此外,二氧化碳和大气污染物具有同



根同源同过程的特点^[39],源头防治能从根本上推动减污降碳协同治理,为城市带来更大的环境效益,有效缓解高碳城市的减排压力。

基于以上理论分析,提出研究假设H1、H2。

H1:数字经济发展能够缓解碳排放不平等。

H2:数字经济发展可以加快推动高碳城市劳动偏向性特别是技能劳动偏向性技术进步,并促使环境偏向性技术进步更多表现出节能偏向,进而更好缓解城市间碳排放不平等问题。

3 数据与方法

3.1 变量选择

(1)被解释变量:碳排放不平等(I)。碳排放不平等是区域间发展水平、要素禀赋等差异所导致的碳排放量差异,这主要是由产业转移尤其是工业部门在各区域的非均衡分布导致的。变异系数、基尼系数和泰尔指数等是衡量不平等程度的主要方法。变异系数用于衡量不同构成部分的平均水平与总体水平的差异,而基尼系数侧重于度量总体不平等水平,强调每个维度不均等程度在全体不均等程度中所占的比重,但这两种方法的测算结果存在不确定性、不全面性和不可比性等缺点。泰尔指数能够进行无残差的可加性分解,将区域间的总体差异分解为组内差异和组间差异两部分,从而为观察和揭示组内差异和组间差异各自的变动方向、变动幅度以及各自在总差异中的重要性贡献率提供了可能。本研究参考Theil的测算方法^[40],使用Theil指数衡量碳排放不平等(I)。具体测算公式如下:

$$T_p = \sum_i p_i \ln(\bar{c}/c_i) \quad (1)$$

式中: p_i 表示城市*i*人口占全国总人口的比重, c_i 表示城市*i*人均二氧化碳排放量, $\bar{c}$ 是全国二氧化碳排放量的平均值。泰尔指数越小,表明城市间碳排放不平等程度越小。整体来看,中国碳排放不平等水平呈现出先上升后下降的趋势,2016年以来的碳排放不平等水平有明显下降,这在一定程度上说明中国各城市尤其是高碳排放城市的碳减排取得了良好效果。

(2)解释变量:数字经济(D)。数字经济是重构经济发展与治理模式的新型经济形态,以数字化的知识和信息为关键生产要素,以数字技术和现代信息网络为驱动力和载体,通过数字技术与实体经济深度融合来提高经济社会的数字化和智能化水平。本研究利用数字经济指数来刻画数字经济发展水平。本研究构建的数字经济发展评价指标体系,包括以下5个指标:电信业务收入、信息传输计算机服务和软件业从业人员、互联网宽带接入用户数、移动电话用户数、数字普惠金融指数。其中,数字普惠金

融指数数据来自北京大学数字金融研究中心,其他数据来自《中国城市统计年鉴》、Wind资讯数据库和各地级市统计局网站。基于熵权TOPSIS模型,计算样本值与最大值和最小值之间的距离,得到评价目标与最优方案的接近程度,即数字经济发展水平。整体来看,北京、天津、上海、江苏、浙江等地区的数字经济发展水平较高,成为拉动区域经济增长的重要力量;从数字经济发展水平的增长速度来看,贵州、四川、江西、山西等地区的增长速度较快,超过全国平均水平。

(3)控制变量。参考Bianco等^[16]和Dong等^[17]的变量选择标准,选取以下控制变量:以工业用电量来衡量数字技术应用空间(A),工业是数字技术应用的重点行业,也是碳排放和碳减排的主体,工业规模越大,数字技术的应用空间也就越大。以第三产业就业人员数量占全部就业人员数量的比重来衡量产业结构(S),现阶段该比重上升,则产业发展的环境损害将下降。建成区绿化覆盖率(N)越高,城市固碳能力越强,生态环境质量也越好。以绿色实用新型专利申请量占实用新型专利申请总量的比重来衡量绿色技术创新(G),绿色技术创新是促进碳减排的核心手段,也是诸多城市强化追赶效应的主要抓手。以教育支出占财政支出的比重来衡量人力资本投入(H),人力资本投入有助于推动能源结构低碳转型,加速企业技术升级和改造步伐,提高碳减排效率。以制造业从业人员数量来衡量制造业规模(M),制造业是碳排放的主要来源,制造业规模越大,该城市面临的减排压力也越大。

3.2 模型构建

为识别数字经济能否强化高碳城市碳减排的比较优势,检验数字经济对碳排放不平等的影响,建立如下双向固定效应模型:

$$I_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 \ln D_{it} + \alpha_2 B_{it} + \mu_i + \varphi_t + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

式中: α_0 为截距项, α_1 为解释变量的回归系数。 B 表示控制变量的集合, α_2 为控制变量的回归系数。 μ_i 为城市固定效应, φ_t 为年份固定效应, ε_{it} 为随机扰动项。 i 为城市, t 为时间, I 是以泰尔指数来衡量的碳排放不平等, D 是以数字经济指数来衡量的数字经济发展水平。

3.3 数据来源与描述性统计

本研究利用2011—2019年中国278个地级及以上城市面板数据,研究数字经济发展对碳排放不平等的影响。其中,各城市二氧化碳排放量数据来自CEADs数据库,控制变量指标测算数据来自《中国城市统计年鉴》和Wind资讯数据库。数字经济指数数据来自北京大学数字金融研究中心、《中国城市统计年鉴》等。变量的描述性统计结果见表1。

表 1 描述性统计结果

变量	符号	均值	标准差	最小值	最大值	样本量
碳排放不平等	I	0.248	0.153	0.000	0.807	1 897
数字经济	D	0.101	0.061	0.018	0.820	2 018
数字技术应用空间	A	13.080	1.311	7.560	16.323	1 844
产业结构	S	51.534	13.033	15.390	90.050	1 896
建成区绿化覆盖率	N	40.127	6.568	32.000	75.293	1 853
绿色技术创新	G	10.117	3.331	0.000	37.500	1 895
人力资本投入	H	17.963	4.003	1.038	35.621	1 897
制造业规模	M	616.156	757.207	12.704	10 141.890	1 874

4 回归结果分析

4.1 基准回归和收敛性分析

表 2 列(1)为在计量模型中仅加入年份固定效应和控制变量的回归结果,列(2)为进一步控制城市固定效应后的回归结果。研究发现,数字经济发展能够显著缓解碳排放不平等,回归系数为 -0.020 ,且在 1% 的水平上通过显著性检验。由此可见,数字经济发展在促进各城市碳减排的同时,强化了高碳城市碳减排的比较优势,加速了高碳城市绿色技术、高技能劳动力等要素集聚,进而带来更高的技术进步率和边际减排效应。同时,数字经济的发展扩大了数字技术在碳减排领域的应用场景,有助于加快推进高碳城市生产方式低碳化与信息化协同^[41],改进生产工艺流程,进一步提高降碳设备运转效率和生产管理精准度。从而使得高碳城市相对于低碳城市而言拥有更为完善的产业数字生态和碳减排的数字化应用场景,为缩小城市间碳排放差距提供了有效支撑。

表 2 基准回归和收敛性分析的回归结果

变量	(1)	(2)	(3)
D	-0.029^{**} (0.012)	-0.020^{***} (0.006)	-0.025^{**} (0.012)
控制变量	Yes	Yes	Yes
年份固定效应	Yes	Yes	Yes
城市固定效应	No	Yes	Yes
样本量	1 778	1 778	1 448
R^2	0.037	0.835	0.050

注: $^{**} P<0.05$, $^{***} P<0.01$;括号内数值为标准误。

有学者认为数字经济本身具有高碳特征,部分数字经济产业是“碳排放大户”^[42-43]。因此,城市间碳排放差距缩小的可能原因之一是低碳城市发展数字经济产业导致碳排放量更快增长,进而缩小了城市间碳排放不平等。例如,ICT的发展需要大量能源投入,在产业发展的同时造成了大量的能源资源消耗和碳排放。根据国际绿色和

平组织预测,到 2030 年 ICT 行业全球耗电量可较 2022 年增长 61%,达到约 3.2 万亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$;若不加以控制,到 2040 年,全球 ICT 行业的温室气体排放量占排放总量的比重可能从 2007 年的 1%~1.6% 增长到 14% 以上^[44]。由此可见,相对于高碳城市而言,若低碳城市的 ICT 行业发展更为迅速,则城市间碳排放差距仍然可能会缩小。

那么,城市间碳排放不平等缓解究竟是高碳城市碳减排的追赶效应还是低碳城市加速碳排放导致的?为了回答这一问题,本研究利用 β 收敛模型中的条件收敛模型,在加入控制变量的情况下,考察数字经济发展能否使高碳城市拥有更高的碳减排速度。在条件收敛模型中,根据模型性质可知数字经济发展水平的回归系数如果是负值,则说明数字经济发展可以使高碳城市有更高的碳减排速度。由表 2 列(3)可知,将碳排放量的相对增长 $\ln(\text{carbon}_i/\text{carbon}_0)$ 作为被解释变量的衡量指标时,数字经济的回归系数为 -0.025 ,且在 5% 的水平上显著。由此可见,相对于低碳城市而言,数字经济发展可以使高碳城市拥有更高的碳减排速度,进而显著缩小城市间碳排放差距。该结果验证了前文分析结论。

4.2 机制检验——偏向性技术进步

数字经济如何更快推动高碳城市碳减排,进而缓解城市间碳排放不平等?技术进步尤其是要素比较优势下的偏向性技术进步是重要的传导机制,也是破解经济增长和碳减排内在矛盾的动力源泉^[45]。偏向性技术进步是技术进步的一种类型,鉴于已有大量研究验证了技术进步对碳减排的积极效应,本研究借鉴江艇^[46]的分析思路,不再检验偏向性技术进步与高碳、低碳城市碳减排的关系,而是分别从城市层面与企业层面,研究不同类型城市数字经济发展对要素偏向性技术进步和环境偏向性技术进步的影响,进而验证数字经济能否通过促进偏向性技术进步来缓解碳排放不平等。如果数字经济可以对高碳城市偏向性技术进步产生更显著的积极效应,则可以推断偏向性技术进步是数字经济发展缓解碳排放不平等的重要机制。



4.2.1 要素偏向性技术进步机制

要素偏向性技术进步是在要素投入比不变的条件下,引起使某一生产要素的相对边际产出增加的技术变革^[6,8],即技术进步偏向于边际产出增加更多的生产要素。劳动偏向性和技能劳动偏向性技术进步是要素偏向性技术进步的重要组成部分,前者强调要素间的结构调整(如劳动、资本、能源等),后者则强调要素内部的结构调整(高技能劳动、低技能劳动等)。

本研究借鉴 Weber 等^[47]的测算方法,将资本(K)、劳动(L)和能源(E)作为投入要素,国内生产总值作为期望产出,二氧化碳和污染物排放量作为非期望产出。基于 Malmquist 投入偏向生产率指数,将 TFP 变化分解为总技术效率变化和技术变化,为进一步区分中性技术进步和偏向性技术进步,技术变化可以被分解为产出偏向技术变化、投入偏向技术变化(C)和技术规模变化。其中, C 指数用于度量偏向性技术进步。基于要素比例在 $t+1$ 期和 t 期的变化,根据 C 与 1 的大小的不同组合来判别技术进步的要 素偏向,具体见表 3。例如,当 $(x_2/x_1)^{t+1} < (x_2/x_1)^t$ 时, $C > 1$ 表示技术进步偏向要素 x_1 ;反之, $C < 1$ 表示技术进步偏向要素 x_2 ;当 $C = 1$ 时,表示技术进步是中性的。为了直观观察两种要素替代造成的技术进步偏向性,本研究基于不变替代弹性生产函数,利用单方程模型测算了劳动偏向性技术进步,检验数字经济对高碳和低碳城市劳动偏向性技术进步的影响差异。表 4 列(1)—列(2)是将劳动要素和能源要素的边际产出进行比较得到的劳动偏向性技术进步作为被解释变量时的回归结果,列(3)—列(4)则是将劳动要素和资本要素的边际产出进行比较得到的劳动偏向性技术进步作为被解释变量时的回归结果。综合来看,数字经济发展能够更好地促进高碳城市的劳动偏向性技术进步,数字经济对高碳城市劳动偏向性技术进步的影响系数分别为 1.513 和 1.518,均在 1% 的水平上显著,而低碳城市样本中数字经济的回归系数并不显著。

表 3 要素偏向性技术进步的判断标准

	$C < 1$	$C > 1$
$(K/L)^{t+1} < (K/L)^t$	资本偏向	劳动偏向
$(K/L)^{t+1} > (K/L)^t$	劳动偏向	资本偏向
$(E/L)^{t+1} < (E/L)^t$	能源偏向	劳动偏向
$(E/L)^{t+1} > (E/L)^t$	劳动偏向	能源偏向
$(E/K)^{t+1} < (E/K)^t$	能源偏向	资本偏向
$(E/K)^{t+1} > (E/K)^t$	资本偏向	能源偏向

此外,本研究进一步探讨劳动要素内部结构调整引致的技能劳动偏向性技术进步的传导效果。随着中国技术创新能力提升及其与发达国家创新差距持续缩小,技术创新模式逐渐由引进模仿转向自主研发,创新投入由资本要素转向劳动要素^[48]。数字经济是部分城市经济“弯道超车”的新赛道,数字经济竞争激发了技术进步对劳动要素尤其是高技能劳动的需求,促使诸多城市注重培养和引进高技能劳动并推动人才集聚,强化了技术进步的技能劳动偏向性。与此同时,数字经济发展促进了现代信息技术的应用,进一步提高了城市内部的技能劳动需求和工资水平^[24],使得高技能劳动逐渐对低技能劳动形成替代,城市和企业人力资本结构不断升级,从而提升了技能劳动在技术进步中的贡献度和边际产出,推动技能劳动偏向性技术进步。在此,以上市公司数据为例,将劳动要素区分为高技能和低技能劳动,并基于上述要素偏向性技术进步测算方法,计算得到各个上市公司的技能劳动偏向性技术进步水平,用以检验技能劳动偏向性技术进步的传导效应。表 4 列(5)数字经济的回归系数为 0.206,表明数字经济发展可以显著促进技能劳动偏向性技术进步。该结果丰富了高碳城市依靠要素偏向性技术进步来加速碳减排并缩小与低碳城市碳排放差距的解释逻辑。

4.2.4 环境偏向性技术进步机制

环境偏向性技术进步是指通过改变要素之间的边际

表 4 要素偏向性技术进步的回归结果

变量	(1) 高碳城市	(2) 低碳城市	(3) 高碳城市	(4) 低碳城市	(5) 技能偏向
D	1.513*** (0.588)	0.095 (0.168)	1.518*** (0.591)	0.024 (0.030)	0.206*** (0.097)
控制变量	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
年份固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
地区/行业固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
样本量	354	965	354	965	18 884
R^2	0.130	0.018	0.123	0.015	0.030

注:*** $P < 0.01$;括号内数值为标准误。

替代率,对环境要素的边际产出产生非对称性影响,从而使技术进步表现出环境偏向特征。本质上来看,这种技术进步是一种能够实现节能减排的技术形态,主要包括节能偏向性和减排偏向性技术进步两种类型。节能偏向性技术进步意味着期望产出保持不变或增加而能耗减少。减排偏向性技术进步意味着在同等要素投入下,期望产出增加,非期望产出减少。节能偏向性和减排偏向性技术进步的测算有其特殊性,大部分行业企业的碳排放、污染物排放和能源消费数据难以获取,因此,本研究以上市企业中的电力企业为样本,采用 Malmquist 指数进行测算得到节能和减排偏向性技术进步水平。投入要素包括企业员工数量、装机容量和能源消耗量,期望产出为发电量,鉴于减污和降碳的同根同源特征,非期望产出为二氧化碳排放量、工业废水、工业二氧化硫和工业固体废弃物排放量。为了便于比较,本研究最终以节能偏向性技术进步水平与减排偏向性技术进步水平的比值来刻画技术进步的环境偏向性,将其作为被解释变量的测度指标。比值越大,说明技术进步的节能偏向性越强。在此,将样本企业划分为高碳企业和低碳企业,并分别赋值为 1 和 0,生成关于碳属性特征的新变量 W ,并建立环境偏向性技术进步对碳属性特征和数字经济交互项的双向固定效应模型,识别相对于低碳企业而言,数字化转型能否加快推动高碳企业环境偏向性技术进步。表 5 列(1)—列(2)是将二氧化碳和工业二氧化硫两种主要排放物作为非期望产出时的回归结果。列(3)—列(4)是将二氧化碳、工业废水、工业二氧化硫和工业固体废弃物作为非期望产出时的回归结果。在控制各类固定效应后发现,交互项的回归系数为 0.108 和 0.103,且分别在 5% 和 10% 的水平上显著。由此可见,相对于低碳企业而言,高碳企业数字化转型更能够推动环境偏向性技术进步特别是节能偏向性技术进步。原因在于大部分高碳排放企业碳减排的主要手段是成本和技术复杂度相对较低的节能改造,即源头降碳,而碳捕集利用与封存技术等受成本等因素限制缺乏大规模应用的现实场景。

4.3 异质性分析

4.3.1 数字技术应用空间

工业是能源的主要消耗产业,也是碳排放的主要来源,具有高消耗、高排放的特征。随着近年来国家对碳减排和环境治理的日益重视,如何提高能源资源利用效率和碳全要素生产率成为工业可持续发展面临的难题。数字技术的推广和应用为工业尤其是制造业碳减排提供了新的突围路径,本研究将考察数字技术应用空间差异下数字经济发展对碳排放不平等的影响。在此,以工业用电量来衡量工业规模,工业规模越大,数字技术应用空间

表 5 环境偏向性技术进步的回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
$W \times D$	0.101** (0.044)	0.108** (0.046)	0.097* (0.058)	0.103* (0.060)
控制变量	Yes	Yes	Yes	Yes
年份固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes
地区固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes
企业固定效应	No	Yes	No	Yes
样本量	197	197	197	197
R^2	0.194	0.162	0.184	0.167

注: * $P < 0.10$, ** $P < 0.05$; 括号内数值为标准误。

也就越大。由表 6 列(1)—列(2)可知,在数字技术应用空间较大的城市,数字经济发展可以更好地缓解碳排放不平等,即数字经济发展更有助于推动工业规模较大的高碳城市碳减排。一方面,这得益于数字经济的资源配置效应和智慧治理效应。工业行业有广泛的数字技术应用场景,数字经济发展可以更快地推动工业城市传统产业的智能化和数字化转型,在提升能源资源利用效率的同时,以低碳、创新与可持续性为导向推动企业绿色生产。工业企业可以充分利用数字技术精确掌握生产环境的实时变化,实时监测并及时改进高碳排放、高能耗的生产环节,提高能源要素投入产出比,推动传统工业高端化、智能化和绿色化发展^[49-50]。另一方面,这也得益于数字经济的绿色技术创新效应。工业尤其是制造业是绿色技术创新的主体,在当前严格的环境约束下,工业规模越大,绿色创新产出激励越大。在工业发展规模较大的城市,高质量发展约束下数字技术可以更好助力碳中和技术研发与推广,激励企业革新传统的产品服务生产方式,加快推动企业碳减排和区域低碳发展。

4.3.2 数字经济发展禀赋

数字经济对碳排放不平等的影响不仅受制于数字技术的应用空间,还依赖于数字经济发展禀赋。良好的数字经济发展禀赋可以提高数字技术的渗透性、规模效应和网络效应,使相关主体根据经济体内部禀赋及外部环境变化来调整数字经济对实体经济的作用形态。而且较高的数字经济发展禀赋有助于促进数字技术的持续创新,增强数字经济发展潜力,加快升级和重塑社会生产方式和消费方式^[51]。本研究以电信业务收入规模来刻画数字经济发展禀赋,这是考虑到数字经济发展依托的数字技术与电信业务息息相关,例如固定互联网宽带接入业务、移动数据流量业务、语音业务等,电信业务发展为数字技术推广和应用奠定了良好基础。因此,电信业务发展较好的城市也极有可能享受数字技术发展的先期红利。表 6 列(3)—列(4)是将样本划分为高数字经济发展禀赋组和低数字经济发



表6 异质性检验结果

变量	(1) 应用空间大	(2) 应用空间小	(3) 数字禀赋高	(4) 数字禀赋低	(5) 人力资本水平高	(6) 人力资本水平低
<i>D</i>	-0.025*** (0.004)	-0.014 (0.009)	-0.022** (0.011)	-0.015* (0.008)	-0.026*** (0.009)	-0.012* (0.007)
控制变量	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
年份固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
城市固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
样本量	931	847	817	961	778	1 000
<i>R</i> ²	0.800	0.879	0.857	0.836	0.774	0.930

注: * $P<0.10$, ** $P<0.05$, *** $P<0.01$;括号内数值为标准误。

展禀赋组后的回归结果,发现较高的数字经济发展禀赋有助于更好发挥数字经济对碳排放不平等的缓解作用。这是因为,良好的数字经济发展基础可以加快拓展降碳城市数字技术的应用场景并增强边际降碳效应,推动企业资源配置优化,提高生产管理精细化管理决策科学化水平,减少生产过程中的能源消耗和碳排放。

4.3.3 人力资本水平

数字经济的碳减排效应在一定程度上还依赖于城市人力资本水平。数字技术是一种现代信息技术,有着较高的技能劳动需求,其推广和应用离不开高技能人才。高等学校在校学生数量可以反映城市高等教育资源的丰富程度,一般来说,高等学校在校学生数量越多,城市人力资本水平越高,例如北京、上海、南京、武汉等城市。因此,本研究以高等学校在校学生数量来衡量人力资本水平,并根据其均值将样本分为两组,检验较高的人力资本水平能否强化数字经济发展对碳排放不平等的缓解作用。由表6列(5)一列(6)可知,在人力资本水平较高的组别中,数字经济对碳排放不平等的回归系数为-0.026,且在1%的水平上显著。而在人力资本水平较低的城市,该效应相对较弱。该结果表明,高碳城市要想持续缩小与低碳城市之间的碳排放差距,不仅需要大力发展数字经济,也应不断提升本地区人力资本水平。

4.4 内生性处理和稳健性检验

4.4.1 内生性处理

考虑到模型估计的准确性,本研究使用两阶段最小二乘法(2SLS)来处理模型内生性问题。选取的工具变量(IV)是1984年各城市邮电业务量和每百人固定电话数量分别与全国数字经济发展水平年度均值的乘积,工具变量符合与数字经济相关且与随机扰动项不相关的假定。这是因为数字经济发展依托的数字技术与互联网发展密切相关,而互联网的最初形态又是以电话线拨号接入的形式为主且受到邮电业务发展的直接影响,因此数字经济发展水平与固定电话数量和邮电业务量均显著正相

关。此外,历史上的邮电业务量和固定电话数量难以直接影响当前的碳排放不平等,工具变量满足外生性假定。2SLS的回归结果见表7。第二阶段中数字经济的回归系数分别为-0.343和-0.611,且均在1%的水平上显著。Wald test值为124.100和82.690,*F*值为210.420和208.290,这表明所选取的工具变量是有效的。回归结果表明数字经济发展可以显著缓解碳排放不平等,该结论与前文分析结论一致。

表7 内生性处理结果

变量	邮电业务		固定电话	
	第一阶段	第二阶段	第一阶段	第二阶段
<i>D</i>		-0.343*** (0.109)		-0.611*** (0.187)
IV	0.007*** (0.001)		0.037*** (0.010)	
控制变量	Yes	Yes	Yes	Yes
年份固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes
样本量	1 778	1 778	1 778	1 778
Wald test	124.100		82.690	
<i>F</i> 值	210.420		208.290	

注: *** $P<0.01$;括号内数值为标准误。

4.4.2 稳健性检验

采用以下5种方法进行稳健性检验:①加入控制变量时间趋势。在计量模型中加入了控制变量的时间趋势项,进一步检验基准回归结果的稳健性。②替换解释变量。利用主成分分析法重新测算数字经济指数,再次检验数字经济发展能否缓解碳排放不平等。③广义最小二乘法。使用广义最小二乘法来避免模型扰动项干扰引致的模型估计偏误。④分位数回归。利用分位数回归模型,在被解释变量的0.10、0.50和0.90分位点上检验数字经济对碳排放不平等的影

表 8 其他稳健性检验结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
	控制变量时间趋势	替换解释变量	广义最小二乘	0.10分位点	0.50分位点	0.90分位点	样本剔除
<i>D</i>	-0.019*** (0.006)	-0.018*** (0.004)	-0.012*** (0.003)	-0.062*** (0.013)	-0.098*** (0.014)	-0.095*** (0.020)	0.019*** (0.007)
控制变量	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
年份固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
城市固定效应	Yes	Yes	Yes	No	No	No	Yes
样本量	1 778	1 769	1 778	1 778	1 778	1 778	1 555
<i>R</i> ²	0.849	0.835		0.080	0.049	0.112	0.831

注:****P*<0.01;括号内数值为标准误。

检验结果均表明数字经济发展可以显著缓解碳排放不平等,前文基准回归结果稳健。

5 结论与建议

本研究以中国“双碳”目标和第28届联合国气候变化大会强调的能源公正转型为背景,基于中国278个地级及以上城市的面板数据,研究数字经济发展如何缓解碳排放不平等,以及要素偏向性和环境偏向性技术进步的传导效应。研究发现:①数字经济发展可以显著缓解碳排放不平等。经过内生性处理和稳健性检验后该结论仍然成立。条件收敛模型结果也显示数字经济发展有助于推动高碳城市的碳排放强度快速下降,显著缩小其与低碳城市之间的碳排放差距,即相对于低碳城市而言,数字经济发展使高碳城市拥有了更高的碳减排速度。②从传导机制来看,数字经济发展可以更好地促进高碳城市的劳动偏向性技术进步,且逐渐使高碳城市劳动偏向性技术进步转向依靠高技能劳动,进而缓解城市间碳排放不平等。数字化转型可以加快推动高碳企业的节能偏向性技术进步,实现源头降碳,从而更好缩小不同碳排放主体之间的碳排放差距。③当面临较大的数字技术应用空间、较高的人力资本水平、较好的数字经济发展禀赋时,数字经济发展可以更好地缓解碳排放不平等。

为了进一步激发数字经济在缓解碳排放不平等和促进能源公正转型中的积极作用,本研究提出如下政策建议:①推动政策功能多元化,从数据要素市场和技术要素市场建设、政策目标协同能力、碳减排成效等方面完善政策体系,强化不同政策之间的叠加效果,加快拓展高碳城市碳减排的数字化场景,通过智慧城市、低碳交通、低碳生活等多种渠道推动碳减排。②加快推动高碳城市数字化转型和技术要素市场产权制度建设,根据要素密集度差异确定数字技术的着力点和技术进步方向,同时集聚更多高质量创新要素,营造有利于技术进步的良好环境,推动产业高端化、绿色化和零碳化。此外,要引导数字技术布局

到最有利于企业低碳生产的环节,建设企业内外部环境信息共享平台和新型产学研创新开放平台,推动资源要素跨部门流动,提升企业环境技术创新效率。③优化数字经济治理体系,充分发挥中西部高碳城市的资源优势,推进“东数西算”工程(东部地区数据传输到西部地区进行计算和处理)和西部地区绿色数据中心建设和运维,拓展高碳城市数字产业上下游产业链,协同推进数字化治理和低碳治理,借助数字经济的高渗透性来支持中西部地区的经济发展和技术进步,进而缩小地区间的碳减排效率差距,实现真正意义上的能源公正转型和碳正义。

参考文献

- [1] ARACHCHI J I, MANAGI S. Social capital, household income and carbon dioxide emissions: a multicountry analysis[J]. Environmental impact assessment review, 2022, 96(9): 106838.
- [2] 曹裕, 李想, 胡韩莉, 等. 数字化如何推动制造企业绿色转型: 资源编排理论视角下的探索性案例研究[J]. 管理世界, 2023, 39(3): 96-112.
- [3] RANTA V, AARIKKA-STENROOS L, VAISANEN J. Digital technologies catalyzing business model innovation for circular economy: multiple case study[J]. Resources, conservation and recycling, 2021, 164(1): 105155.
- [4] DECANIO S J. Robots and humans-complements or substitutes? [J]. Journal of macroeconomics, 2016(49): 280-291.
- [5] PAN W, XIE T, WANG Z, et al. Digital economy: an innovation driver for total factor productivity[J]. Journal of business research, 2022, 139(2): 303-311.
- [6] 李小平, 李小克. 偏向性技术进步与中国工业全要素生产率增长[J]. 经济研究, 2018, 53(10): 82-96.
- [7] LI G, WU H, JIANG J, et al. Digital finance and the low-carbon energy transition (LCET) from the perspective of capital-biased technical progress[J]. Energy economics, 2023, 120(3): 106623.
- [8] ACEMOGLU D. Labor- and capital-augmenting technical change [J]. Journal of the European Economic Association, 2003, 1(1): 1-37.
- [9] SONG M, CAO S, WANG S. The impact of knowledge trade on sustainable development and environment-biased technical progress



- [J]. Technological forecasting and social change, 2019, 144(7): 512-523.
- [10] BRULLE R J, PELLOW D N. Environmental justice: human health and environmental inequalities [J]. Annual review of public health, 2006(27): 103-124.
- [11] DURO J A, PADILLA E. International inequalities in per capita CO₂ emissions: a decomposition methodology by Kaya factors [J]. Energy economics, 2006, 28(2): 170-187.
- [12] SRI P, BANERJEE R. Characteristics, temporal trends, and driving factors of household carbon inequality in India [J]. Sustainable production and consumption, 2023(35): 668-683.
- [13] WANG Y, XIONG S, MA X. Carbon inequality in global trade: evidence from the mismatch between embodied carbon emissions and value added [J]. Ecological economics (series A), 2022(195): 107398.
- [14] KUMAR P, CAGGIANO H, SHWOM R, et al. Saving from home! How income, efficiency, and curtailment behaviors shape energy consumption dynamics in US households? [J]. Energy, 2023, 271(10): 126988.
- [15] WANG K, CUI Y, ZHANG H, et al. Household carbon footprints inequality in China: drivers, components and dynamics [J]. Energy economics (series B), 2022, 115(11): 106334.
- [16] BIANCO V, CASCETTA F, MARINO A. Understanding energy consumption and carbon emissions in Europe: a focus on inequality issues [J]. Energy, 2019(170): 120-130.
- [17] DONG K, NI G, TAGHIZADEH-HESARY F, et al. Does smart transportation matter in inhibiting carbon inequality? [J]. Energy economics, 2023, 126(10): 106952.
- [18] SALMAN M Y, HASAR H. Review on environmental aspects in smart city concept: water, waste, air pollution and transportation smart applications using IoT techniques [J]. Sustainable cities and society, 2023, 94(7): 104567.
- [19] AKIMOTO K, SANO F, ODA J. Impacts of ride and car-sharing associated with fully autonomous cars on global energy consumptions and carbon dioxide emissions [J]. Technological forecasting and social change, 2022, 174(11): 121311.
- [20] 魏丽莉, 侯宇琦. 数字经济对中国城市绿色发展的影响作用研究 [J]. 数量经济技术经济研究, 2022, 39(8): 60-79.
- [21] 徐伟呈, 周田, 郑雪梅. 数字经济如何赋能产业结构优化升级: 基于 ICT 对三大产业全要素生产率贡献的视角 [J]. 中国软科学, 2022(9): 27-38.
- [22] ACEMOGLU D, AGHION P, BURSZTYN L, et al. The environment and directed technical change [J]. American economic review, 2012, 102(1): 131-166.
- [23] 戴翔, 杨双至. 数字赋能: 数字投入来源与制造业绿色化转型 [J]. 中国工业经济, 2022(9): 83-101.
- [24] 杨蕙馨, 李春梅. 中国信息产业技术进步对劳动力就业及工资差距的影响 [J]. 中国工业经济, 2013(1): 51-63.
- [25] 邱斌, 叶龙凤, 孙少勤. 参与全球生产网络对我国制造业价值链提升影响的实证研究: 基于出口复杂度的分析 [J]. 中国工业经济, 2012(1): 57-67.
- [26] SHAPIRO A F, MANDELMAN F S. Digital adoption, automation, and labor markets in developing countries [J]. Journal of development economics, 2021, 151(6): 102656.
- [27] 蔡跃洲, 张钧南. 信息通信技术对中国经济增长的替代效应与渗透效应 [J]. 经济研究, 2015, 50(12): 100-114.
- [28] SCHULTE P, WELSCH H, REXHAUSER S. ICT and the demand for energy: evidence from OECD countries [J]. Environmental and resource economics, 2016, 63(1): 119-146.
- [29] YANG Z, HAO C, SHAO S, et al. Appropriate technology and energy security: from the perspective of biased technological change [J]. Technological forecasting and social change, 2022(177): 121530.
- [30] 韩晶, 姜如玥. 数字经济赋能低碳发展: 理论逻辑与实践路径 [J]. 统计研究, 2024, 41(4): 54-67.
- [31] 吴传清, 邓明亮. 数字经济发展对中国工业碳生产率的影响研究 [J]. 中国软科学, 2023(11): 189-200.
- [32] 王凤婷, 王浩, 孔凡斌. 农村数字化发展对农业全要素碳生产率的提升效应 [J]. 中国人口·资源与环境, 2024, 34(3): 79-90.
- [33] VERHOEF P C, BROEKHUIZEN T, BART Y, et al. Digital transformation: a multidisciplinary reflection and research agenda [J]. Journal of business research, 2021, 122(1): 889-901.
- [34] ADEYEMI O I, HUNT L C. Modelling OECD industrial energy demand: asymmetric price responses and energy-saving technical change [J]. Energy economics, 2007, 29(4): 693-709.
- [35] WANG L, CHEN Q, DONG Z, et al. The role of industrial intelligence in peaking carbon emissions in China [J]. Technological forecasting and social change, 2024, 199(2): 123005.
- [36] 徐佳, 崔静波. 低碳城市和企业绿色技术创新 [J]. 中国工业经济, 2020(12): 178-196.
- [37] 刘金科, 刘霁萱, 晁颖. 绿色信贷与低碳转型: 资本整合还是技术创新: 来自准自然实验的证据 [J]. 数量经济技术经济研究, 2024, 41(6): 151-171.
- [38] WINSKEL M, KATTIRTZI M. Transitions, disruptions and revolutions: expert views on prospects for a smart and local energy revolution in the UK [J]. Energy policy, 2020, 147(12): 111815.
- [39] 张瑜, 孙倩, 薛进军等. 减污降碳的协同效应分析及其路径探究 [J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(5): 1-13.
- [40] THEIL H, URIBE P. The information approach to the aggregation of input-output tables [J]. Review of economics and statistics, 1967: 451-462.
- [41] YANG G, NIE Y, LI H, et al. Digital transformation and low-carbon technology innovation in manufacturing firms: the mediating role of dynamic capabilities [J]. International journal of production economics, 2023, 263(9): 108969.
- [42] PU Z, FEI J. The impact of digital finance on residential carbon emissions: evidence from China [J]. Structural change and economic dynamics, 2022, 63(4): 515-527.
- [43] CHARFEDDINE L, UMLAI M. ICT sector, digitization and environmental sustainability: a systematic review of the literature from 2000 to 2022 [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2023, 184(9): 113482.
- [44] 王帅龙. 数字经济之于城市碳排放: “加速器”抑或“减速带”?

- [J]. 中国人口·资源与环境, 2023, 33(6): 11–22.
- [45] FAN M, LI M, LIU J, et al. Is high natural resource dependence doomed to low carbon emission efficiency: evidence from 283 cities in China[J]. *Energy economics*, 2022, 115(11): 106328.
- [46] 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.
- [47] WEBER W L, DOMAZLICKY B R. Total factor productivity growth in manufacturing: a regional approach using linear programming [J]. *Regional science & urban economics*, 1999, 29(1): 105–122.
- [48] HU J, WANG Y, LIU S, et al. Mechanism of latecomer enterprises' technological catch-up in technical standards alliances: an ambidextrous innovation perspective [J]. *Journal of business research*, 2023(154): 113321.
- [49] GOLDBACH K, ROTARU A M, REICHERT S, et al. Which digital energy services improve energy efficiency: a multi-criteria investigation with European experts [J]. *Energy policy*, 2018, 115(4): 239–248.
- [50] 黄贇琳, 秦淑悦, 张雨朦. 数字经济如何驱动制造业升级[J]. *经济管理*, 2022, 44(4): 80–97.
- [51] OLIVEIRA L, FLEURY A, FLEURY M T. Digital power: value chain upgrading in an age of digitization [J]. *International business review*, 2021, 30(6): 101850.

Digital economy development mitigating carbon emission inequality: evidence from biased technical progress

SUN Qian^{1,6}, LI Guoxiang^{2,3}, XUE Jinjun^{4,5,6}

(1. School of Economics and Management, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. School of Business, Nanjing Normal University, Nanjing Jiangsu 210023, China;

3. Research Institute of Big Data and Digital Economy, Hubei University of Economics, Wuhan Hubei 430205, China;

4. School of Applied Economics, University of Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 102488, China;

5. School of Business and Economics, Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan 650500, China;

6. Collaborative Innovation Center for Emission Trading System Co-constructed by Province and Ministry, Wuhan Hubei 430205, China.)

Abstract Coordinated low-carbon transition across regions is an imperative pathway for China to address resource and environmental constraints and to bridge the gaps in its transition toward high-quality economic development. However, the spatial imbalances in carbon emissions and heterogeneous decarbonization strategies among regions pose significant challenges to achieving national “dual carbon” goals. Grounded in inequality theory, this study investigated the formation mechanisms behind interregional carbon emission disparities, systematically deconstructed the theoretical logic through which the digital economy mitigated carbon emission inequality, and elucidated its underlying mechanisms via dual pathways: factor allocation efficiency and biased technical progress. Using panel data from 278 prefecture-level and above Chinese cities from 2011 to 2019 and a two-way fixed effects model, this empirical study demonstrated that digital economy development significantly reduced intercity carbon emission inequality and accelerated emission reduction rates in high-carbon cities; these findings remained robust across rigorous sensitivity tests. Mechanistically, digital economy development optimized the allocation of innovative factors and amplified the skill premium effect, steering technological progress toward greater reliance on high-skilled labor. This process promoted labor-biased technical progress in high-carbon cities, thereby narrowing intercity carbon emission inequality. Compared to emission-reduction-biased technological progress, energy-saving-biased technical progress aligned more closely with the factor endowments of high-carbon cities, exhibiting superior efficacy in mitigating carbon emission inequality. Heterogeneity analysis revealed that digital economy development primarily mitigated carbon emission inequality in cities with high digital endowments, where expansive digital technology adoption potential and elevated human capital levels amplified its mitigating effects. Accordingly, this study proposes establishing a multidimensional collaborative policy system to promote interregional cooperation in digital technology and factor mobility, accelerate digital transformation and optimization of technological factor allocation in high-carbon cities, and leverage digital governance to synergize low-carbon transition efforts. These measures aim to systematically unleash the multiplier effects of the digital economy on enhancing emission reduction efficiency and mitigating carbon emission inequality.

Key words digital economy; biased technical progress; carbon emission reduction; carbon emission inequality

(责任编辑: 闫慧璐)