

doi:10.13582/j.cnki.1672-7835.2025.02.015

数字经济、绿色技术创新与区域碳减排

王俊¹, 杨林燕²

(1.湖南科技大学商学院,湖南湘潭411201;2.龙岩学院经济与管理学院,福建龙岩364012)

摘要:数字经济与绿色技术创新不仅是碳减排的重要途径,还能相互促进并产生有利于碳减排的协同效应。通过分析数字经济与绿色技术创新协同发展促进区域碳减排的影响机制及作用路径,并结合2006—2021年我国省级面板数据进行实证检验,研究发现:(1)数字经济与绿色技术创新协同发展能显著降低区域碳排放强度,且其影响显著强于两者单独对碳减排的作用;(2)与东部地区相比,中部和西部地区在发展数字经济、绿色技术创新和促进区域碳减排等方面具有显著的后发优势;(3)数字经济与绿色技术创新协同发展主要通过提高现有能源利用效率和优化能源消费结构,进而促进区域碳减排;(4)数字经济与绿色技术创新协同发展对区域碳减排的影响存在显著的空间溢出效应,即对邻近地区的碳减排产生正向影响。

关键词:数字经济;绿色技术创新;协同发展;碳减排

中图分类号:F062.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-7835(2025)02-0122-11

一、引言及文献综述

“双碳”目标的提出不仅表明了中国积极推进碳减排的决心,而且也符合中国经济转向高质量发展的内在要求。一方面,绿色技术创新为降低碳排放提供重要的技术支撑,推动绿色技术创新是实现“双碳”目标的必由之路。但绿色技术创新通常受到研发资金、人才、创新基础设施等多种资源和要素制约。《全球数字经济竞争力发展报告(2023)》指出,数字经济在全球要素资源重组中已成为关键力量。另一方面,发展和应用数字技术能为各地区提供节能降碳的新动能。但数字基础设施的运行需要消耗大量电力,如果忽视数字经济的“绿色盲区”,可能会导致碳排放增加。因此,在推动实现“双碳”目标的过程中,必须重视数字经济与绿色技术创新的协同发展,形成“数字+绿色”的组合拳^①。那么,数字经济与绿色技术创新的协同发展能否优于各自单独作用于碳减排?二者协同促进碳减排的机制是什么?厘清上述问题,对于制定适宜的节能减排政策、助力实现“双碳”目标具有重要现实意义。

学者们广泛关注数字经济与绿色技术创新对碳排放的各自影响。在数字经济对碳排放的影响方面,主要形成了三种观点:一是发展数字经济有利于减少碳排放。互联网和信息通信技术的快速发展有助于促进碳减排^②。数字经济不仅能直接抑制碳排放,还能通过促进产业结构升级、提升能源效率^③、降低能耗强度^④、改善能源结构^⑤等方式间接抑制碳排放。二是数字经济的发展加剧了能源消耗和碳排放。一些学者认为,信息通信技术行业属于能源密集型行业,互联网产业快速发展以大量电能消耗为支

收稿日期:2024-11-12

基金项目:国家社会科学基金一般项目(23BJL108);福建省社会科学基金一般项目(FJ2022B092)

作者简介:王俊(1978—),男,湖北应城人,博士,副教授,博士生导师,主要从事技术创新与环境经济研究。

①刘伟丽,陈腾鹏:《数字贸易与企业绿色技术创新》,《暨南学报(哲学社会科学版)》2024年第4期。

②Lin B Q, Zhou Y C. “Does the Internet Development Affect Energy and Carbon Emission Performance?”, *Sustainable Production and Consumption*, 2021(28): 1-10.

③谢云飞:《数字经济对区域碳排放强度的影响效应及作用机制》,《当代经济管理》2022年第2期。

④余群芝,吴柳:《数字经济发展的碳减排效应》,《经济经纬》2022年第5期。

⑤王芳,董战峰:《数字经济对我国碳排放的影响——基于省级面板数据的实证检验》,《改革》2023年第3期。

撑,从而增加了碳排放^{①②}。国内学者蒋金荷认为,当前的“环境债务”和二氧化碳排放问题与数字经济产业发展的环境影响有很大关系,云计算、区块链、数据中心等数字基础设施都需要消耗大量电力,能源消耗的增加将带来碳排放问题^③。三是数字经济发展与碳排放之间存在非线性关系。一些学者在索洛增长模型中引入数字经济作为一种技术进步,研究发现,数字经济对碳排放存在显著的先促进后抑制的倒“U”型影响效应^④。在绿色技术创新对碳排放的影响方面,学者们主要形成了两种看法:一是绿色技术创新可以显著促进碳减排。有研究认为,与环境或节能减排相关的绿色技术创新对基于消费产生的二氧化碳排放有显著抑制作用^⑤,绿色技术创新能在长期和短期内显著降低碳排放^⑥。绿色技术创新能通过提高能源利用率^⑦、增加可再生能源消费^⑧等途径降低区域碳排放。二是绿色技术创新与碳排放的关系是非线性的。有学者研究认为,绿色技术创新与碳排放强度存在倒“U”型关系^⑨。

综上所述,国内外学者关于数字经济对碳减排的影响研究结论存在一定分歧,关于绿色技术创新对碳减排的影响效应研究也未达成一致的观点,这些分歧表明,单独分析数字经济或者绿色技术创新对碳减排的影响存在局限性,需考虑将二者有效结合进行研究。因此,本文将深入分析数字经济与绿色技术创新的协同发展对区域碳减排的作用机制,并利用省级数据进行实证检验。本文的边际贡献主要体现在:一是区别于已有单独分析数字经济或者绿色技术创新对碳排放的影响研究,本研究将数字经济与绿色技术创新共同纳入分析框架,基于协同学理论,从资源整合和优势互补两个维度深入探析了二者的协同效应,补充了现有研究的不足。二是从能源利用效率和能源消费结构两个方面,探讨了数字经济与绿色技术创新的协同发展促进区域碳减排的作用机制,并从实证层面进行了检验,以期精准把脉促进碳减排的有效途径。三是从能源资源与数据资源调配及共享、技术研发合作与推广、产业关联及减碳示范等维度,讨论了数字经济与绿色技术创新的协同发展对碳减排的空间溢出效应,为有针对性地制定碳减排政策提供决策参考。

二、理论分析与研究假设

(一)数字经济与绿色技术创新的协同发展对区域碳减排的直接影响机制

协同理论认为,两个或多个系统相互影响与相互合作形成的协同关系能推动整个系统朝有序状态发展。数字经济与绿色技术创新作为促进区域碳减排的两个子系统,相互影响、渗透,其协同作用将产生优于各个系统单独作用于区域碳减排的效应。

一是数字经济与绿色技术创新通过资源整合协同促进碳减排。数字经济和绿色技术创新都能促进区域碳排放减量,但二者对碳排放减量的具体作用存在一定差异。数字经济通过数字技术强化对现有化石能源消费的碳排放约束。从企业生产层面来看,企业利用数字化技术对全流程进行自动化改造,提升设备运行效率并实时采集与预测化石能源消费数据,从而节约能源、减少消费,促进碳减排。从消费

①Hamdi H, Shbia R, Shahbaz M. “The Nexus Between Electricity Consumption and Economic Growth in Bahrain”, *Economic Modelling*, 2014, 38(2):227-237.

②Salahuddin M, Alam K. “Internet Usage, Electricity Consumption and Economic Growth in Australia: A Time Series Evidence”, *Telematics and Informatics*, 2015, 32(4):862-878.

③蒋金荷:《可持续数字时代:数字经济与绿色经济高质量融合发展》,《企业经济》2021年第7期。

④金飞,徐长乐:《数字经济发展对碳排放的非线性影响研究》,《现代经济探讨》2022年第11期。

⑤Xu L, Fan M, Yang L, et al. “Heterogeneous Green Innovations and Carbon Emission Performance: Evidence at China’s City Level”, *Energy Economics*, 2021(99):105269.

⑥Meirun T, Mihadjo L W, Haseeb M, et al. “The Dynamics Effect of Green Technology Innovation on Economic Growth and CO2 Emission in Singapore: New Evidence from Bootstrap Ardl Approach”, *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(4):4184-4194.

⑦Jiang Q, Rahman Z U, Zhang X, et al. “An Assessment of the Effect of Green Innovation, Income, and Energy Use on Consumption-Based CO2 Emissions: Empirical Evidence from Emerging Nations BRICS”, *Journal of cleaner production*, 2022(365):132636.

⑧Shan S, Gen S Y, Kamran H W, et al. “Role of Green Technology Innovation and Renewable Energy in Carbon Neutrality: A Sustainable Investigation from Turkey”, *Journal of Environmental Management*, 2021(294):113004.

⑨Dauda L, Long X, Mensah C N, et al. “Innovation, Trade Openness and CO2 Emissions in Selected Countries in Africa-Science Direct”, *Journal of Cleaner Production*, 2020(281):125143.

层面来看,线上教育、办公和医疗等新业态的发展大幅度降低了通勤环节的化石能源消费和碳排放。通过技术迭代升级,绿色技术创新推动了清洁能源应用技术的进步^①,降低了可再生能源和非碳能源的使用成本(如太阳能、水能、生物质能、风能、潮汐能等),提高了其稳定性,加速了对传统化石能源的替代,从源头上减少了生产和消费层面的碳排放^②。数字技术的应用加速了绿色技术创新成果在传统高耗能行业的渗透,高碳排放的生产方式将逐步转型为绿色低碳化,降低了单位产值的能源消耗,实现了总产量不变的情况下碳排放总量下降^③。此外,绿色技术创新推动了人工碳汇技术的进步,从而优化了碳排放末端治理,进一步降低碳排放。基于此,数字经济与绿色技术创新的协同发展作用于碳减排的不同方面,形成了“减少化石能源消费”“增加清洁能源应用”“数字碳汇”等资源整合协同减碳效应。

二是数字经济与绿色技术创新通过优势互补协同推动碳减排。一方面,绿色技术创新面临较多的不确定性,创新研发投入成本较高且周期较长,而数字经济凭借其共享特征和优势,能打破时间与空间的限制,大幅减少绿色技术创新过程中信息不对称与不完全的情况。数字经济依托开放性和共享性的平台,推动绿色技术创新研发合作,加速研发资金、创新人才、低碳技术、环保材料等创新要素的跨区域、跨行业和跨企业对接^④。数字化供应链管理能优化企业资源配置、增强要素匹配、降低生产成本并提升生产效率,不断优化绿色技术创新方案,为企业提高绿色技术创新水平提供重要支撑^⑤。此外,数字平台不仅为面临绿色技术创新应用瓶颈的企业提供信息支持,加速成果转化,还能帮助更多有意愿进行绿色技术创新研发的企业及时获取相关信息,促进创新成果的推广^⑥。另一方面,数字经济发展需要数字基础设施支撑,而这些基础设施的运行需要消耗大量能源,数字经济产业发展面临高能耗困境。绿色技术创新有助于数字基础设施向绿色低碳方向转型。绿色技术创新可有效降低各类数据中心能耗,提升数字基础设施能源使用效率,如5G网络、云计算、大数据中心等,帮助创建绿色数据中心,实现“绿色计算”,促进数字基础设施建设提质升级。此外,绿色技术创新促使计算机、通信设备、数字媒体设备、智能设备等数字产品在研发与生产等环节重视绿色低碳化,丰富数字产品种类并扩大生产规模,推动数字产品制造业向绿色低碳化发展^⑦。因此,数字经济与绿色技术创新能通过优势互补协同夯实碳减排基础,推动区域形成节能降碳发展模式。

上述理论分析表明,数字经济与绿色技术创新能够通过资源整合协同作用于碳减排的不同方面,并且通过优势互补协同筑牢碳减排基础。数字经济能打破时空地域限制,加速促进各类绿色技术创新资源及要素的流动与整合,推动绿色技术创新。绿色技术创新也能促进数字产业低碳化发展,为数字经济高质量发展提供“绿色动能”。因此,数字经济与绿色技术创新的相互影响及促进机制协同推动区域碳减排。基于此,本研究提出如下假设:

H1:数字经济与绿色技术创新的协同发展能促进区域碳减排。

(二)数字经济与绿色技术创新的协同发展对区域碳减排的间接影响机制

提高能效是实现碳减排的重要途径。数字经济推动了企业生产方式的数字化转型,而绿色技术创新推动了绿色节能技术进步和能源绿色化转型。数字经济与绿色技术创新协同发展不仅能提高生产运营效率,还能提升能源利用效率。能源需求企业通过绿色节能技术创新不断改进生产方式,并广泛应用

①Ding Q, Khattak S I, Ahmad M. “Towards Sustainable Production and Consumption: Assessing the Impact of Energy Productivity and Eco-Innovation on Consumption-Based Carbon Dioxide Emissions (CO₂) in G-7 Nations”, *Sustainable Production and Consumption*, 2021(27):254-268.

②田虹,秦喜亮:《绿色技术创新对城市碳减排影响的区域差异和收敛性》,《财经理论与实践》2024年第1期。

③吕桁宇,马春爱,汤桐,等:《财税激励政策、绿色技术创新与工业企业碳强度》,《统计与信息论坛》2024年第5期。

④张三峰,魏下海:《信息与通信技术是否降低了企业能源消耗——来自中国制造业企业调查数据的证据》,《中国工业经济》2019年第2期。

⑤Jiang Q, Rahman Z U, Zhang X, et al. “An Assessment of the Effect of Green Innovation, Income, and Energy Use on Consumption-Based CO₂ Emissions: Empirical Evidence from Emerging Nations BRICS”, *Journal of cleaner production*, 2022(365):132636.

⑥冯兰刚,阳文丽,王忠,等:《中国数字经济与城市碳排放强度:时空演化与作用机制》,《中国人口·资源与环境》2023年第1期。

⑦Chen H, Yi J, Chen A, et al. “Green Technology Innovation and CO₂ Emission in China: Evidence from a Spatial Temporal Analysis and a Nonlinear Spatial Durbin Model”, *Energy Policy*, 2023(172):113338.

数字孪生技术对各生产流程的能源消费进行精准监测及数据分析,从而及时优化工艺流程,提高能源利用效率,降低单位产出碳排放^①。能源供给部门通过数字化平台加强对能源需求行业的用能监测,推动能源向高效行业或部门流动,优化能源资源配置^②。数字化技术推动企业的绿色节能技术创新,进而有效提升能源使用效率,并在不降低产量的情况下降低碳排放,在生产和运营环节发挥重要作用。数字化改造与绿色节能技术创新融合,使企业能精准预测能源需求量,提前规划节能和储能,同时根据能源消费量优化生产流程,淘汰低效产能,最大化能源利用效率,降低碳排放强度。大数据、云计算和 5G 技术的应用能优化能源生产、检测、运行、传输等各个流程,绿色技术创新推动生产线节能改造升级,二者协同实现能源集约化生产、管理和利用。因此,数字经济与绿色技术创新的协同发展有助于提高能源利用效率,为区域碳减排提供重要支撑。基于此,本研究提出如下假设:

H2a:数字经济与绿色技术创新的协同发展能够通过提高能源利用效率促进区域碳减排。

随着清洁能源消费比重的提高和传统化石能源消费比重的下降,碳排放量也呈现逐步减少的趋势。数字经济与绿色技术创新的协同发展能够促进清洁能源的应用,从而持续优化能源消费结构。首先,绿色技术创新丰富了清洁低碳能源产品的供给种类,扩大了清洁能源的使用范围,推动了能源消费革命,为政府、企业和家庭等能源需求方提供多元化的能源消费选择^③。相较于传统化石能源,风能、太阳能、潮汐能等清洁能源受地形、季节和气候等因素的影响,其发电状态具有波动性和不稳定性。其次,数字技术的广泛应用能够有效监测和科学预测上述清洁能源的发电量,并结合智能化能源存储技术,显著增强各类清洁能源发电系统的稳定性。同时,数字经济的发展能够加速各类清洁能源利用信息的推广和共享,提高清洁能源的普及率。数字技术不仅能够为传统化石能源和清洁能源的供给变动提供实时信息查询,还能为能源需求部门的消费情况提供实时动态监测,并有助于实现清洁能源的跨区域调配,帮助能源需求部门及时改变能源使用计划,扩大清洁能源的应用范围和占比^④。因此,绿色技术创新与数字经济的协同发展能够增强清洁能源对传统化石能源的替代作用,优化能源消费结构,从而降低产业对传统化石能源的依赖,实现碳减排目标。基于此,本研究提出如下假设:

H2b:数字经济与绿色技术创新的协同发展能够通过优化能源消费结构促进区域碳减排。

(三)数字经济与绿色技术创新的协同发展对区域碳减排的空间溢出影响

数字经济的发展突破了时间和空间的限制,加速了区域间信息的传播,便利了知识共享,优化了资源要素的配置,不仅减少了本地区碳排放,还可能降低邻近地区的能源消耗。研究表明,绿色技术创新具有显著的空间溢出效应,绿色技术创新活跃地区更容易影响并带动周边地区的企业参与绿色技术创新相关的研发活动^⑤。数字经济与绿色技术创新协同促进本地区碳减排的效应也可能影响邻近地区,促使其关注并重视区域内数字经济与绿色技术创新的协同水平对碳排放的影响。首先,数字经济与绿色技术创新的协同发展促进碳减排的路径主要有两个:能源资源调配共享和数据资源跨区域流通。绿色技术创新推动清洁能源资源丰富地区合理开发和利用各类清洁能源,通过数字智能电网和能源管理系统实现跨区域共享能源储备与供应信息,类似于“西电东送”工程,推动能源的高效跨区域调配,提高能源利用效率,进而降低区域碳排放。此外,数字技术促进了数据资源的跨区域流动,东部地区的企业可将数据存储和处理业务外包给中西部地区的数据中心,利用中西部地区相对丰富的清洁能源和土地资源,降低能源消耗,实现跨区域碳减排合作。其次,数字经济与绿色技术创新协同通过跨区域的技术研发合作、推广与应用促进碳减排。企业、高校和科研机构可以通过在线协作平台、虚拟

①胡士华,黄天鉴,王楷:《数字经济与绿色经济协同发展:时空分异、动态演进与收敛特征》,《现代财经》2022年第9期。

②杨昕,赵守国:《数字经济赋能区域绿色发展的低碳减排效应》,《经济与管理研究》2022年第12期。

③徐斌,陈宇芳,沈小波:《清洁能源发展、二氧化碳减排与区域经济增长》,《经济研究》2019年第7期。

④Li X, Liu J, Ni P. "The Impact of the Digital Economy on CO₂ Emissions: A Theoretical and Empirical Analysis", *Sustainability*, 2021, 13(13):7267.

⑤胡雪萍,乐冬:《绿色技术创新促进了经济高质量发展吗?——基于空间溢出效应的视角》,《福建论坛(人文社会科学版)》2023年第1期。

实验室等数字化工具,联合开展跨区域的绿色低碳技术创新研发合作,共享创新成果与技术经验。与此同时,绿色技术创新成果可以通过数字平台和网络迅速在区域间推广与应用。一方面,数字经济平台为绿色低碳技术的供需双方提供对接服务,促进其交易与应用。技术提供方可以通过在线培训、远程指导等方式,将绿色低碳技术传授给其他区域的需求方,帮助其提升绿色低碳化生产管理水平。另一方面,数字经济为绿色低碳技术标准的制定与推广提供支持。通过建立技术标准数据库、在线标准认证平台等,推动不同区域采用统一的技术标准,降低技术交流与合作的成本,提高技术流动效率。最后,数字经济与绿色技术创新协同通过示范效应与产业关联效应促进跨区域碳减排。一方面,碳排放具有较强的时空依赖效应^①,本地区数字经济与绿色技术创新协同推进碳减排的成功案例、经验总结及典型做法为邻近地区提供重要的参考与示范,降低了邻近地区模仿与学习成本,使其能够更快速、准确、全面地提升数字经济与绿色技术创新协同降低碳排放的水平。另一方面,地理空间上邻近地区具有相似的资源禀赋和产业关联性,在数字技术支持下,有利于地方政府制定有效的区域协同减碳政策。例如,开展绿色低碳技术创新跨区域合作,有助于减少本区域与邻近区域的碳排放。基于此,本研究提出如下假设3:

H3:数字经济与绿色技术创新的协同发展对区域碳减排具有空间溢出影响。

三、模型构建

(一) 基准模型设定

为了考察数字经济和绿色技术创新的协同发展对区域碳减排的直接影响,根据前文的理论分析和研究假设,设定了如下的基准模型:

$$Y_{it} = \beta_0 + \beta_1 SYN_{it} + \varphi_i X_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

式(1)中, i 代表省份, t 代表年份, Y 为区域碳排放水平, SYN 为数字经济与绿色技术创新的协同发展水平, X 为可能影响区域碳排放的一系列控制变量的集合; β_0 、 β_1 、 φ_i 为模型待估参数; μ_i 为个体效应, λ_t 为时间效应, ε_{it} 为随机扰动项。

(二) 变量测度与说明

1. 被解释变量

本文以区域碳排放水平(Y)为被解释变量,采用中国碳排放数据库(CEADs)测算的省级碳排放数据与各省(自治区、直辖市)实际GDP的比值即碳排放强度,以此来衡量区域碳排放水平。

2. 核心解释变量

本文的核心解释变量为数字经济与绿色技术创新的协同发展水平(SYN)。首先,分别构建省级层面数字经济与绿色技术创新评价指标体系,并采用熵值法为各指标赋权;其次,分别计算数字经济和绿色技术创新两个子系统的综合评价指数;最后,使用耦合协调度模型对二者的协同发展水平进行量化测度。

(1)数字经济子系统(U_1)。目前,对于省级层面数字经济发展水平的测度,学界尚未形成一致的看法,学者们通常结合研究目的自行构建综合评价指标体系。参考王芳和董战峰^②的研究,从数字化的基础设施、应用范围及产出三个维度构建数字经济发展水平的评价指标体系,具体如表1所示。

(2)绿色技术创新子系统(U_2)。从投入与产出两个维度构建绿色技术创新评价指标体系,投入维度包括研发人员和研发经费两个二级指标,产出维度包括绿色发明专利和绿色实用新型两个二级指标。鉴于绿色专利从申请到授权的周期性,结合绿色技术创新活动的时效性与实质性,借鉴孙博文和张友国^③的研究方法,将专利申请数与授权数同时纳入评价指标体系,具体内容详见表2。

^①邵帅,张可,豆建民:《经济集聚的节能减排效应:理论与中国经验》,《管理世界》2019年第1期。

^②王芳,董战峰:《数字经济对我国碳排放的影响——基于省级面板数据的实证检验》,《改革》2023年第3期。

^③孙博文,张友国:《中国绿色创新指数的分布动态演进与区域差异》,《数量经济技术经济研究》2022年第1期。

表 1 数字经济发展水平评价指标体系

一级指标	二级指标	指标说明	指标属性
数字化设施	信息传输与承载	每平方千米长途光缆长度(公里/平方千米)	正向
		每人移动电话交换机容量(户/人)	正向
	网络基础设施	每人互联网宽带接入端口数(个/人)	正向
数字化应用	移动通信应用	移动电话普及率(%)	正向
	互联网应用	每百人拥有的域名数(个/百人)	正向
数字化产出	数字就业规模	信息传输、软件和信息技术服务业城镇单位就业人员比重(%)	正向
	数字设备制造量	通信设备计算机及其电子设备制造业主营业务收入占 GDP 比重(%)	正向
	数字业务量	电信业务总量占 GDP 比重(%) 软件业务收入占 GDP 比重(%)	正向 正向

表 2 绿色技术创新水平评价指标体系

一级指标	二级指标	指标说明	指标属性
绿色技术创新投入	研发经费投入	各地区研发经费占 GDP 比重(%)	正向
		规模以上工业企业研发经费内部支出占主营业务收入比重(%)	正向
	研发人员投入	R&D 人员全时当量占城镇就业人口比重(%)	正向
绿色技术创新产出	绿色发明专利	每万人绿色发明专利申请数(件/万人)	正向
		每万人绿色发明专利授权数(件/万人)	正向
	绿色实用新型	每万人绿色实用新型申请数(件/万人) 每万人绿色实用新型授权数(件/万人)	正向 正向

(3) 协同发展水平的测度。借鉴张欢等^①的研究方法,采用耦合协调模型来测度数字经济与绿色技术创新的协同发展水平,该模型被广泛应用于衡量区域发展、产业结构、绿色创新、资源环境等多个子系统间的协同、均衡及融合发展程度。在经济高质量发展背景下,数字经济与绿色技术创新的协同发展需以高水平发展为基础,为避免低水平发展条件下的伪协同问题,将整体发展水平的相关指标纳入研究。因此,根据数字经济与绿色技术创新两个子系统的综合评价指数,构建“数字经济—绿色技术创新”耦合协调度模型:

$$C = 2 [(U_1 \times U_2) / (U_1 + U_2)^2]^{1/2} \quad (2)$$

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (3)$$

$$T = \alpha U_1 + \beta U_2 \quad (4)$$

式(2)中, C 为数字经济与绿色技术创新两个子系统的耦合度, U_1 为数字经济系统的评价指数, U_2 为绿色技术创新系统的评价指数。式(3)中 D 为耦合协调度,取值在 0-1 之间,较大值对应较高的耦合协调度。式(4)中, T 为数字经济与绿色技术创新的综合协调指数, α, β 为子系统贡献系数,假设数字经济与绿色技术创新对于协同发展的重要程度相同,即 $\alpha = \beta = 0.5$ 。

3. 控制变量

为减少遗漏变量可能导致的估计偏误,结合相关理论和已有文献,设定如下控制变量。(1) 贸易开放水平 ($OPEN$): 贸易开放会影响地区工业生产规模及生产方式,进而影响地区碳排放,选择以各省(自治区、直辖市)对外贸易总额占 GDP 的比重衡量。(2) 受教育程度 (EDU): 地区居民的受教育水平在一定程度上影响绿色低碳意识,本文采用各省(自治区、直辖市)的平均受教育年限衡量。(3) 人口密度 (POP): 人口密度的增加会提高区域人类活动规模和能源消费需求,进而增加碳排放,选择以各省(自治区、直辖市)年末常住人口总数与行政区面积之比衡量。(4) 产业结构 ($STRU$): 传统产业向绿色低碳

^①张欢,汤尚颖,耿志润:《长三角城市群宜业与生态宜居融合协同发展水平、动态轨迹及其收敛性》,《数量经济技术经济研究》2019 年第 2 期。

化转型和高技术升级,能够提升生产效率并减少碳排放,选择以各省(自治区、直辖市)二、三产增加值之和占GDP比重衡量。(5)公共交通设施(PUB):完善的公共交通基础设施有利于降低区域交通出行压力并减少碳排放,本文以各省(自治区、直辖市)年末常住人口总量与公共汽电车数量之比衡量。(6)环境规制强度(ER):环境规制可激励企业向绿色低碳化生产转型,选择以各省(自治区、直辖市)工业污染治理完成投资额与工业增加值的比值衡量。

(三)数据来源

本文研究对象为30个中国内地省级行政区(不包含西藏),研究期限为2006—2021年。数字经济发展指标的数据来源包括《中国信息产业统计年鉴》《中国工业统计年鉴》《中国统计年鉴》及电子信息制造业年度统计数据;绿色技术创新投入指标数据主要来源于《中国科技统计年鉴》和《中国统计年鉴》;绿色技术创新产出数据依据世界知识产权组织发布的《绿色专利清单》,在中国国家知识产权局专利数据库中匹配检索得到。能源消费量数据主要来自《中国能源统计年鉴》及各省(自治区、直辖市)统计年鉴。控制变量数据来源于《中国统计年鉴》及各地区统计年鉴,对个别缺失值采用插值法补充。

四、实证结果与分析

(一)基准回归分析

由于各省(自治区、直辖市)的地理区位、资源禀赋、环境规制政策等方面存在差异,因此,本文采用省份和年份双固定效应模型进行计量分析。表3报告了数字经济与绿色技术创新协同促进碳减排的基准回归结果。

表3 基准模型的回归结果

变量	(1)	(2)	(3)
SYN	-2.797*** (0.104)	-2.374*** (0.233)	
U_1			-2.148*** (0.254)
U_2			-1.778*** (0.249)
控制变量	否	是	是
省份效应	是	是	是
年份效应	是	是	是
常数项	8.679*** (0.036)	7.011*** (1.259)	4.672*** (1.252)
R ²	0.616	0.654	0.691
样本数	480	480	480

注:***、**、*分别代表1%、5%、10%的显著性水平,括号内为标准误。因篇幅有限,未报告控制变量回归结果,下同。

表3第(1)列未引入控制变量,固定效应模型回归结果显示,数字经济与绿色技术创新协同发展(SYN)的回归估计系数显著为负。第(2)列在第(1)列的基础上加入贸易开放水平、受教育水平、环境规制等控制变量,回归结果显示,数字经济与绿色技术创新协同发展(SYN)的回归估计系数在1%的显著性水平下为负,表明其协同发展水平的提高显著降低了区域碳排放强度。第(3)列为数字经济发展(U_1)和绿色技术创新(U_2)分别对区域碳减排影响的回归结果。通过对比第(2)列和第(3)列的回归结果可以看出,数字经济与绿色技术创新协同发展的回归系数绝对值显著大于数字经济的回归系数和绿色技术创新的回归系数的绝对值。这表明二者协同发展能更好地发挥降低区域碳排放强度的作用。一方面,数字经济与绿色技术创新通过资源整合协同作用于碳减排的不同方面。数字经济具有共享化的特征和优势,通过应用数字信息技术形成“数据+算法+算力”的模式,打破时间与空间限制,在优化企业生产规模效率和要素配置效率的同时,有效降低单位产出能耗,进而促进区域碳减排。例如,节能环保

与清洁能源开发利用等领域的绿色技术创新,可有效减少工业生产与居民生活对化石燃料的依赖,从而降低二氧化碳等温室气体排放。另一方面,数字经济与绿色技术创新通过优势互补进一步强化协同效应,推进区域碳减排。数字经济发展有利于缓解绿色技术创新过程中的信息不对称、加快绿色技术创新成果推广与应用;绿色技术创新则助力数字产业低碳化和产业数字化转型,为数字经济高质量发展注入“绿色动能”。因此,数字经济与绿色技术的协同发展对碳减排的促进作用强于二者单独作用的效果,研究假设 H1 得到验证。

(二) 稳健性检验

一是替换被解释变量,以各省(自治区、直辖市)人均碳排放量的对数值取代区域碳排放水平。二是替换核心解释变量测度方法,采用全局主成分分析法替换前文的熵值法,对省级层面数字经济与绿色技术创新两个子系统进行综合得分测算,并据此计算耦合协调度以开展稳健性检验。三是使用工具变量,借鉴黄群慧等^①研究,利用各省(自治区、直辖市)1984年邮电业务量与滞后期一期的绿色技术创新综合评价指数值构造交互项,作为数字经济与绿色技术创新协同发展的工具变量,并采用两阶段最小二乘法进行回归^②。以上检验结果均与基准回归结果一致。

(三) 区域差异性检验

基准回归结果表明,数字经济与绿色技术创新协同发展能够显著促进区域碳减排。那么,这种碳减排效应是否会因各地区的资源禀赋和数字经济发展水平差异而存在差异性吗?为探讨这一问题,参考沈小波等^③的区域划分方法,将研究样本进一步划分为东部、中部和西部三个区域,分别进行分组回归分析。同时,为比较三个区域子样本中核心解释变量回归系数的差异,参考杨忠海等^④的研究,对核心解释变量回归系数的差异进行似无相关模型 SUR(Seemingly Unrelated Regressions) 检验。

从回归结果来看^⑤,数字经济与绿色技术创新的协同发展对东、中、西部地区均表现出显著的碳减排效应。组间回归系数差异检验 $CHI2$ 统计量结果表明,东、中、西部三组样本的协同发展(SYN)回归系数存在显著差异。具体而言,中部地区的协同发展回归系数绝对值最大,西部地区次之,而东部地区最小,这一结果表明在促进碳减排方面,中西部地区数字经济和绿色技术创新协同发展具有更大的边际效用。通过对比样本期间内东、中、西部各地区碳排放强度平均值发现,东部碳排放强度最低,中部地区次之,西部地区最高。相对于东部地区而言,中西部地区传统产业、高能耗产业所占比重相对较高,且传统产业普遍存在能源使用效率偏低的问题。近年来,中西部地区充分把握数字经济快速发展的态势,借鉴东部地区发展数字经济的经验,推动传统产业向数字化、绿色化转型升级,同时加快数字经济新高地建设,开展绿色低碳技术创新。数字化技术的广泛应用,使生产企业能够在不断提高能效、降低碳排放强度的同时,更好地优化资源配置。中部、西部地区在发展数字经济和实现“双碳”目标的实践过程中拥有显著的后发优势。

(四) 作用机制检验

前文理论分析表明,数字经济与绿色技术创新的协同发展能通过提高能源利用效率和优化能源消费结构促进区域碳减排。由于中介效应模型需要识别三个方程,该做法有可能产生多个内生变量^⑥。因此,本文借鉴 Chen 等^⑦的方法,在基准回归模型检验的基础上,构建以下回归模型直接检验数字经济与绿色技术创新协同发展对作用机制变量的影响。

^①黄群慧,余泳泽,张松林:《互联网发展与制造业生产率提升:内在机制与中国经验》,《中国工业经济》2019年第8期。

^②因篇幅所限制,结果留存备案。

^③沈小波,陈语,林伯强:《技术进步和产业结构扭曲对中国能源强度的影响》,《经济研究》2021年第2期。

^④杨忠海,党春晓,李瑛玫:《数字化转型能提升企业全员劳动生产率吗?——基于人力资本与二元创新的中介效应》,《科学学与科学技术管理》2023年第9期。

^⑤因篇幅所限,结果留存备案。

^⑥江艇:《因果推断经验研究中的中介效应与调节效应》,《中国工业经济》2022年第5期。

^⑦Chen Y, Fan Z Y, Gu X M, et al. “Arrival of Young Talent: The Send-Down Movement and Rural Education in China”, *American Economic Review*, 2020, 110(11): 3393-3430.

$$M_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 SYN_{it} + \varphi_i X_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \quad (5)$$

式(5), M 是作用机制变量,包括能源利用效率(M_1)和能源消费结构(M_2), α_1 为数字经济与绿色技术创新协同发展对机制变量影响的回归系数。借鉴杨昕和赵守国^①的研究,以各省(自治区、直辖市)能源消费总量与实际 GDP 的比值来衡量各地区的能源利用效率情况。参照谢云飞^②的研究,以各省(自治区、直辖市)的煤炭类消费量占比来衡量能源消费结构情况。表 4 报告了具体检验结果。

表 4 作用机制检验结果

变量	(1)Y	(2) M_1	(3) M_2
SYN	-2.374*** (0.233)	-1.456*** (0.137)	-0.547*** (0.055)
控制变量	是	是	是
省份效应	是	是	是
年份效应	是	是	是
常数项	7.011*** (1.259)	5.919*** (0.745)	1.080*** (0.299)
R ²	0.654	0.835	0.705
样本数	480	480	480

表 4 第(1)列是式(1)的回归结果,数字经济与绿色技术创新协同发展(SYN)的回归系数显著为负,系数值(-2.374)反映了数字经济与绿色技术创新协同发展对区域碳减排的总效应。根据式(5)进行回归分析,被解释变量是能源利用效率(M_1),数字经济与绿色技术创新协同发展(SYN)的回归系数显著为负,表明协同发展降低了区域每单位实际 GDP 的能源消费量,即提升了区域能源利用效率。数字经济发展不仅加快了企业数字化转型升级步伐,而且有利于绿色技术创新理念和成果等信息共享,二者协同作用于生产运营过程中各类能源消费。人工智能等数字技术的应用能减少生产过程中的人为出错率,有效提高生产运营效率,绿色技术创新有利于优化生产流程和改进生产工艺,二者协同能大幅度降低单位产值能源消耗。数字经济能有效推动与节能增效技术相关的绿色创新成果转化,数字化技术能对各环节能源消费进行精准监测,二者协同提升能源利用效率。这验证了研究假设 H2a。第(3)列被解释变量是能源消费结构(M_2),数字经济与绿色技术创新协同发展(SYN)的回归系数显著为负,表明协同发展降低了区域煤炭消费在能源消费中的比重,即优化了能源消费结构。绿色技术创新促进了各类清洁能源的开发,拓展了清洁能源应用场景,并降低了清洁能源使用成本。数字经济能有效缓解清洁能源应用及推广过程中的信息不对称问题,并根据不同地区的清洁能源需求和供应能力实现灵活调配。数字化技术的应用还能提升各类清洁能源的稳定性,并加速清洁能源应用的规模化发展。因此,数字经济与绿色技术创新的协同发展能够有效促进清洁能源供给方和需求方精准对接,推动清洁能源的广泛应用与普及,进而提高清洁能源消费占比,优化区域能源消费结构。这验证了研究假设 H2b。

(五) 空间溢出效应

为检验数字经济与绿色技术创新协同发展对区域碳减排的空间溢出效应,本文进一步构建了空间计量模型。根据前文理论分析,各地区碳排放水平不仅受到邻近地区碳排放的影响,还可能会受到邻近地区数字经济与绿色技术创新协同发展的影响。为此,在基准模型基础上考虑空间因素,构建空间杜宾模型:

$$Y_{it} = \eta_0 + \rho W \times Y_{it} + \eta_1 SYN_{it} + \gamma W \times SYN_{ij} + \varphi_i X_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \quad (6)$$

式(6)中, W 表示空间权重矩阵; $W \times Y_{it}$ 是区域碳减排的空间滞后项, ρ 是反映区域碳减排空间自相关的空间自回归系数; $W \times SYN_{ij}$ 是数字经济与绿色技术创新协同发展的空间滞后项, γ 是其对应的回归系数,反映空间关联地区协同发展对本地区碳减排的影响;其余变量的含义与式(1)一致。

^①杨昕,赵守国:《数字经济赋能区域绿色发展的低碳减排效应》,《经济与管理研究》2022年第12期。

^②谢云飞:《数字经济对区域碳排放强度的影响效应及作用机制》,《当代经济管理》2022年第2期。

展开空间计量分析之前需要构建空间权重矩阵,利用全局 Moran's I 指数法对区域碳排放进行空间自相关性检验。在地理距离矩阵、邻接矩阵和经济距离矩阵三种空间权重矩阵下,全局 Moran's I 指数检验结果均通过了 5% 以上的显著性水平检验,拒绝“不存在空间自相关”的原假设^①。这表明碳排放放在区域间存在显著的空间相关性,适宜进行空间计量实证分析。为确定最优回归模型,对空间杜宾模型进行了 Hausman 检验,结果显著拒绝“随机效应”假设。进一步进行 LR 检验,结果显著拒绝地区固定或时间固定效应优于双固定效应的原假设。最后,进行 Wald 检验,结果显著拒绝空间杜宾模型退化为空间滞后或空间误差模型的假设。因此,本文采用地区和时间双固定效应模型开展实证检验^②。地理距离空间权重矩阵下的模型回归结果显示,空间自回归系数显著为正,说明各地区碳排放之间存在正向空间关联效应。这表明,一个地区在促进碳减排方面取得的成效可能通过示范效应对周边邻近地区产生积极影响。数字经济与绿色技术创新协同发展空间滞后项($W \times SYN$)的回归系数显著为负,表明其对区域碳排放存在显著的负向空间溢出效应。进一步,本文将数字经济与绿色技术创新协同发展对区域碳减排的总效应进行分解。直接效应反映数字经济与绿色技术创新协同发展对本地区碳减排的影响,间接效应则代表其对邻近地区碳减排的影响。分解结果显示,直接效应和间接效应的数字经济与绿色技术创新协同发展系数均显著为负。这表明,数字经济与绿色技术创新的协同发展既能促进本区域碳减排,也能显著抑制邻近区域的碳排放。空间邻近地区之间在数字经济发展和绿色技术创新方面呈现一定的趋同性,特别是发展基础较相似的邻近地区更易开展经济交流与合作,进而提升数字经济与绿色技术创新协同发展水平,促进邻近地区的碳减排。从邻接矩阵和经济距离空间权重矩阵下的回归结果可知,空间自回归系数、协同发展及协同发展空间滞后项系数的符号与显著性均一致,直接效应与间接效应的结果也基本相同,由此验证上述模型回归的稳健性。综上,数字经济与绿色技术创新协同发展对区域碳减排的影响存在显著的空间溢出效应,研究假设 H3 得到验证。

五、结论与启示

本研究从理论层面探讨了数字经济与绿色技术创新协同发展对区域碳减排的作用机制,并基于 2006—2021 年省级面板数据,对二者协同发展促进区域碳减排的研究假设进行了实证检验,得出以下结论:第一,数字经济与绿色技术创新协同发展能够显著减少区域碳排放,且减排效果显著优于二者单独作用的影响。第二,区域差异性检验结果表明,与东部地区相比,数字经济与绿色技术创新协同发展在中部和西部地区降低碳排放强度的作用更大,这表明中部和西部地区在发展数字经济、开展绿色技术创新和促进区域碳减排方面具备更强的后发优势。第三,关于数字经济与绿色技术创新协同发展促进碳减排的作用机制,各地区单位 GDP 能耗、煤炭消费比重起到了显著的部分中介作用,这表明提高现有能源利用效率和优化能源消费结构是协同发展促进区域碳减排的重要途径。第四,空间效应检验结果表明,数字经济与绿色技术创新协同发展对区域碳减排的影响存在显著的空间溢出效应,即二者协同发展不仅能降低本区域碳排放强度,还能促进邻近区域的碳减排。基于上述研究结论,可得到以下政策启示:

第一,着力推动数字经济与绿色技术创新的协同发展,为实现“双碳”目标提供有力支撑。通过制定政策措施,稳步提升数字经济与绿色技术创新的协同发展水平,打造“数字+绿色”协同发展的“组合拳”。一方面,要充分发挥数字技术对绿色技术创新的赋能作用,运用大数据、云计算等数字技术探索固碳、减碳、用碳等前沿技术,加速创新要素流动,优化创新资源配置,推动绿色低碳核心技术的突破与发展;另一方面,要合理利用绿色低碳技术推动产业数字化转型,充分发挥绿色技术对数字化的牵引作用,在扩大数字产业规模的同时,促进 5G、大数据中心、云计算服务器等数字基础设施节能降碳,推动数字产业低碳化发展。

第二,推动数字经济与绿色技术创新协同发展促进碳减排,应充分考虑区域差异。各地区应充分挖

①因篇幅所限,结果留存备案。

②因篇幅所限,结果留存备案。

掘资源禀赋优势与发展潜力,因地制宜地制定数字经济与绿色技术创新协同发展战略。东部地区人才、技术、资金等创新要素相对丰富,应在推动数字技术和绿色低碳技术创新发展,尤其是关键核心技术突破方面发挥领头羊作用,不断扩大数字经济与绿色技术创新协同促进节能降碳的成效,积极打造数字化与绿色低碳化协同发展的示范样板。中西部地区尽管碳排放强度较高,但在数字经济与绿色技术创新协同发展中释放“降碳”红利方面具有显著的后发优势。因此,中西部地区要充分抓住数字经济发展的机遇,适度超前布局数据中心、智能算力中心等数字基础设施,通过更先进的数字技术和更精准的绿色技术创新,协同推进区域节能降碳。

第三,充分发挥能源利用效率提升和能源消费结构优化在促进区域碳减排中的中介作用。首先,要完善数字基础设施,积极推进绿色节能技术创新,推动传统能耗产业向数字化、绿色低碳化转型升级,在降低单位产出能耗的同时,加速数字化技术在能耗监测中的广泛应用,提高生产全流程效率,大幅提升能源利用效率,助力实现碳减排目标。其次,充分利用互联网广泛推广清洁能源消费理念,鼓励绿色低碳技术创新,支持多样化清洁能源产品开发;同时,制定数字经济与清洁能源协同发展的促进政策,依托数字技术搭建清洁能源交易与管控平台,提升能源配置效率,推动清洁能源跨区交易,持续提高清洁能源消费比重,调整和优化现有能源消费结构,全面助力碳减排。

第四,充分发挥数字经济与绿色技术创新协同促进区域碳减排的空间溢出效应,加强区域协同减碳力度。首先,要搭建碳减排跨区域交流合作的数字化平台,实现能源消费、绿色节能创新和碳减排管理等信息共享,优化区域间资源配置,推动数字经济与绿色技术创新的深度协同发展,促进形成区域协同降碳新格局。其次,数字经济与绿色技术创新协同减碳成效显著的地区要充分发挥辐射带动作用,加强与周边地区的减碳成果交流和对口合作;而成效相对滞后的地区要积极借鉴先进经验,把握数字经济快速发展的有利契机,主动挖掘与邻近地区在数字化转型和绿色技术创新上的合作空间,进一步释放协同降碳潜力。

Digital Economy, Green Technology Innovation and Regional Carbon Emission Reduction

WANG Jun¹ & YANG Linyan²

(1. School of Business, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201;

2. School of Economics and Management, Longyan University, Longyan 364012, China)

Abstract: The digital economy and green technology innovation are not only crucial ways for carbon emission reduction, but also mutually influence and promote each other, generating synergistic effects beneficial to carbon emission reduction. This paper explores the mechanism of synergy between digital economy and green technology innovation in promoting regional carbon emission reduction from a theoretical level. Combining the empirical tests based on the provincial panel data from 2006 to 2021 in China, the results show that firstly, the synergy between digital economy and green technology innovation can significantly reduce regional carbon emission intensity, and its effect is better than the impact of the two on regional carbon emission reduction alone; secondly, compared with the eastern region, the central and western regions have stronger latecomer advantages in developing the digital economy, carrying out green technology innovation and promoting regional carbon emission reduction; thirdly, the synergy between digital economy and green technology innovation can promote regional carbon emission reduction by improving existing energy utilization efficiency and optimizing energy consumption structure, and fourthly, the synergy between digital economy and green technology innovation has a significant spatial spillover effect on regional carbon emission reduction, that is, the synergy reduces the carbon emission intensity of the region and promotes the carbon emission reduction of neighboring regions.

Key words: digital economy; green technology innovation; synergy development; carbon emission reduction

(责任校对 朱正余)