

数字技术对江苏低碳经济的影响研究

陈晓虹¹, 江越伟², 贺铭凯³

(1. 南京工程学院经济与管理学院, 江苏 南京, 211167; 2. 中兴微电子有限公司, 江苏 南京, 210012;
3. 南京理工大学公共事务学院, 江苏 南京, 210094)

摘要:在碳达峰、碳中和的重大战略决策背景下,江苏作为能源消耗和碳排放大省,是全国碳减排的重点区域和潜力地区。以江苏省城市层面的面板数据为例,构建实证模型可以测度数字技术对低碳经济的影响及作用路径。研究表明,首先,数字技术对城市人均碳排放强度具有显著的负向影响,但对人均碳排放量具有显著的促增效应。数字技术对清洁能源供求产生的碳排效应具有显著的促进作用,但对总电力消费、工业用电消费产生的碳排效应没有显著影响。其次,数字技术对江苏省人均碳排放强度和人均碳排放量的影响具有高低碳排放特征和地理区域的异质性效应。在作用机制方面,数字技术能通过调整产业结构影响人均碳排放强度水平,通过改变清洁能源消费的碳排作用于人均碳排放量。政府应当因地制宜施策,强化试点低碳生态园区带动效应,构建清洁能源供求智能化服务体系。

关键词:数字技术;低碳经济;产业结构;清洁能源;碳排放

中图分类号:F49; F124.5

习近平总书记指出,要坚持不懈推动绿色低碳发展。“十四五”是碳达峰的关键期、窗口期。现阶段我国生态文明建设进入了以降碳为重点战略方向、推动减污降碳协同增效、促进经济社会发展全面绿色转型、实现生态环境质量改善由量变到质变的关键时期。在党中央、国务院关于碳达峰、碳中和的重大战略决策背景下,江苏省作为能源消耗和碳排放大省,是全国碳减排的重点区域和潜力地区。

近年来,江苏省碳排放强度持续下降,但碳排放总量仍然很大,同时还在小幅增长。《江苏省“十四五”应对气候变化规划》(以下简称《规划》)显示,江苏省碳排放量位居全国第三,仅次于山东、河北,高于广东、浙江。《规划》指出,江苏省人均二氧化碳排放约 8.7 吨,高于全国人均水平 30% 左右,超过欧盟人均水平,明显高于同等经济体;单位二氧化碳排放产出地区生产总值领先全国 40% 以上,但比欧盟平均水平低 45% 左右。江苏省高耗能、高排放行业体量大,钢铁、石化化工和建材行业碳排放量占全省的 40% 以上,“十三五”期间焦炭消费量增长约 40%;全省的非化石能源比重低于全国

平均和浙江、广东,单位国土面积耗煤量是全国平均水平的 5 倍多^①。

然而,随着信息基础建设的深入发展,我国依托现代大数据、云计算、人工智能等数字技术,将数据作为生产要素与低碳经济的目标充分结合与应用,促使用数字技术的路径助力实现“双碳”目标和绿色发展成为可能。有学者从资源流和能源流两个视角完善了低碳经济发展理论,认为我国低碳发展能够与经济社会发展协同共赢^[1]。数字技术加强与各经济领域的融合并在此过程中转变经济增长方式,有效体现了绿色发展的理念,与低碳经济倡导的“低成本高产出、低资源高效益”目标不谋而合。《江苏省“十四五”数字经济发展规划》明确指出,要加快推动智慧能源建设应用,促进能源生产、运输、消费等各环节智能化升级,推动能源行业低碳转型。《规划》明确提出,到 2025 年,单位国内生产总值能源消耗比 2020 年下降 14%,非化石能源占能源消费总量的比重提高到 18% 左右,煤炭占能源消费总量的比重下降至 50% 左右,单位工业增加值二氧化碳排放比 2020 年下降 20%^②。当前,数字技术已成为高质量经济发展不可或缺的重要

收稿日期:2024-05-12;修回日期:2024-06-09

基金项目:江苏省高校哲学社会科学研究项目(2023SJYB0439);南京工程学院科研基金项目(YKJ202119);南京工程学院产业经济与创新管理研究院开放基金项目(JGKB202207)

作者简介:陈晓虹,博士,讲师,研究方向为资源环境经济学、低碳经济。

E-mail: chenxh27@njit.edu.cn

引文格式:陈晓虹,江越伟,贺铭凯. 数字技术对江苏低碳经济的影响研究[J]. 南京工程学院学报(社会科学版),2024,24(2):57-65.

组成部分,不仅有助于构建低碳经济基础,也有助于推进低碳绿色发展。

那么,数字技术的发展如何影响江苏省低碳经济发展?它能否解释江苏省目前面临的碳排强度降低而碳排总量趋增的现实问题?其中是否有不同的作用机理?对初始碳排特征不同的城市,数字技术是否总能发挥作用?本文在“双碳”目标和经济高质量发展背景下探讨以上问题的逻辑机理,以期江苏省乃至全国推进生态文明建设、实现绿色低碳协同发展提供理论决策依据。

一、文献综述

英国发布的能源白皮书《我们能源的未来:创建低碳经济》指出,低碳经济通过更少的自然资源消耗和更少的环境污染,获得更多的经济产出。处于自我衍生和创新的数字技术能够从多种角度为低碳经济的构建奠定一定基础并给予广泛的支撑。

探讨数字技术与低碳经济的关系必然涉及能源消费、污染减排等方面的研究。现有文献指出,数字技术对能源消费的影响存在正向和负向双重作用。例如,Lange等发现,总体上信息技术增加了能源消耗,其中信息技术生产、使用及由于劳动力和能源生产率带来的经济增长会增加能源消费,信息技术引发的能源效率提升和区域结构变化会减少能源消费^[2]。一方面,相关研究认为,从长远来看,互联网的使用和经济增长会增加电力消耗,且该因果联系是单向的^[3-4]。同时,数字经济与能源强度间呈现U形曲线关系,其中数字经济引起的收入效应和对电力消费依赖性偏高是导致能源回弹的主要原因^[5]。另一方面,还有学者指出,信息技术产业有助于减少中国的二氧化碳排放,对中部地区二氧化碳排放的影响大于东部地区,而对西部地区的影响不显著^[6]。

数字技术还能借助市场化进程、科学技术升级与提升人力资本等渠道有效提高我国生态效率及工业绿色生产效率^[7-8]。数字经济对城市生态效率的提升效用存在显著的区域异质性,呈现中部最高、东部次之、西部最低的不平衡空间结构特征^[9]。有研究认为,我国数字经济发展有利于推动绿色经济发展,而且该效应呈现明显的正向空间外溢性,能够有效弥补资源依赖所产生的负面影响^[10]。数字金融的发展通过提高创新效率、扩大技术溢出和促进产业结构升级的中介机制提高我国绿色发展水平^[11]。中国省际数字经济与绿色经济尽管发展

水平稳步提升,但从区域内部来看差异显著,特别是中西部数字经济与绿色经济发展尚未形成良性互动^[12]。

在污染减排方面,数字经济发展对二氧化碳排放的影响具有倒U型非线性特征,且数字经济发展能够通过创新效率进而对碳排放产生间接影响^[13-14]。数字经济发展也能促进环境污染物SO₂减排,且减少污染效应具有明显的“厚积薄发”特征^[15]。有学者探究了碳排空间效应,发现数字技术能够在空间外溢上形成碳减排格局,降低相邻地区碳排强度,直接作用中介是降低能源消耗强度,间接作用中介包含促进产业结构升级和提高区域技术创新水平^[16]。

虽然学界对数字技术背景下能源消费、生态效率、绿色发展和污染减排进行了广泛的探讨,为本文提供了部分理论支撑,然而现有文献仍未能较好完善数字技术影响城市低碳经济的分析框架及评估其异质性作用机理,且忽略了数字技术对具有不同碳排特征和地理区位的城市可能产生的差异化影响,相关研究视角、因果联系和实证检验也亟待完善。综上,为丰富学界研究、解答引言中的疑问,本文以江苏省为研究对象,系统剖析数字技术对城市低碳经济发展的影响、作用路径及差异化特征,相关研究为本文提供了相应的理论支撑和可借鉴的方法。

鉴于此,本文的边际贡献主要如下:首先,本文参照现有研究从城市层面对数字技术和低碳经济进行了较为全面的测度并构建了分析框架,进而探讨数字技术主要通过何种路径影响低碳经济发展的问题,以期能够探究和解释江苏省近年来碳排强度降低而碳排总量小幅增长的现状,不仅深化了已有文献,也对现实情况进行综合评估,从而更好为绿色低碳发展提供针对性的政策建议。其次,本文针对数字技术对城市清洁能源及电力能源供求变化产生的碳排影响进行了评估,并分别探讨了人均碳排强度和人均碳排量影响的差异化作用路径。最后,本文还按照碳排高低特征和地理区位进行城市划分,相比以往研究更能够准确测度数字技术产生的异质性效应,以期能够为不同碳排特征和地理区位的城市提供更为精准的政策建议。本文相关研究成果对我国促进节能减排、建设数字化强国、实现高质量发展具有重要现实意义,同时也能为江苏省实现双碳目标、构建绿色发展体系、促进数字经济高质量发展等宏观政策的构建提供参考和借鉴。

二、研究方法

(一) 理论机制与模型构建

由文献综述可知,数字技术发展对江苏省城市的低碳经济具有双重效应,最终取决于正负效应的综合效果。一方面,以信息通信行业为代表的数字技术通过促进产业发展扩张,从收入效应和企业能源需求两方面产生能源回弹效应会加剧碳排放数量^[2,5],从而不利于低碳消费。另一方面,数字技术通过数字要素投入降低净产出的污染弹性,对碳排放产生积极的改善作用^[17]。基于前文提到的江苏省具有“碳排强度领先全国 40% 以上而人均碳排量却高于全国 30%”的特征性事实和环境库兹涅茨曲线,尽管数字技术促进江苏省产业扩张和碳排双重提升,且产业优化和能源结构优化效应逐渐增强使得碳排强度减少,但数字技术引起的收入扩需效应和较高的能源消费依赖性也会促使人均碳排放量的持续增加。据此,本文提出假说 1:数字技术的发展能够显著降低江苏省城市的人均碳排强度,但会增加江苏省城市的人均碳排量。

此外,现有研究认为,数字技术可以通过数据等生产要素优化生产结构和资源效率配置,以技术赋能能源结构优化,调节污染物排放,从而提升绿色生态效率和实现资源循环利用^[8]。产业结构转型升级构成了数字技术背景下推动经济高质量发展、赋能城市低碳转型、促进生态效率提升的主要因素^[16,18]。从产业结构优化视角看,数字技术的应用促进了企业智能生产、精准管理的发展,提高了企业的生产效率,推动了传统高耗能行业向绿色低碳方向转型。从能源结构转型视角看,智能电网、物联网、新能源等技术的数字化应用,借助能源供应链管理优化、能源生产流程改造,既能减少浪费,也能促进清洁能源的广泛应用,有助于低碳经济的实现。据此,本文提出假说 2:数字技术通过促进产业结构优化升级、推动清洁能源利用,对江苏省城市的低碳经济产生显著影响。

为验证上述假说,下文借助江苏省城市层面的面板数据模型考察数字技术发展对低碳经济的影响,具体采用以下计量模型展开分析:

$$Lowcarbon_{it} = \alpha_0 + \beta_1 Digitaltec_{it} + \beta_2 X_{it} + \gamma_i + \sigma_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

式中: $Lowcarbon_{it}$ 为低碳经济,是被解释变量;下标 i 代表城市, t 表示年份; $Digitaltec_{it}$ 为数字技术,是核心解释变量; X_{it} 为其他控制变量; γ_i 为城市固定

效应; σ_t 为年份固定效应; ε_{it} 为随机误差项。

模型还将控制城市和年份的固定效应,并采用聚类稳健标准差以消除序列相关和异方差等问题的影响。

为讨论数字技术对低碳经济可能存在的作用机制,本文基于模型(1)加入中介变量进行检验。检验方法是分别构建数字技术对中介变量的线性回归方程以及数字技术与中介变量对因变量低碳经济的回归方程,具体模型设定为:

$$Med_{it} = \alpha_1 + \beta_3 Digitaltec_{it} + \beta_4 X_{it} + \gamma_i + \sigma_t + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

$$Lowcarbon_{it} = \alpha_2 + \beta_5 Digitaltec_{it} + \tau Med_{it} + \beta_6 X_{it} + \gamma_i + \sigma_t + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

式中: Med_{it} 表示中介变量,其余变量的含义与式(1)相同。

(二) 变量说明和数据来源

1. 因变量

本文从污染强度和资源消耗两个方面构建低碳经济发展指标^③。污染强度用人均碳排强度衡量,用各城市碳排放总量与实际人均地区生产总值的比值表示;资源消耗用人均碳排量度量,用各城市碳排放总量与人口总数的比值表示。借鉴现有文献,城市的碳排总量采用各种能源消费总量×折标煤系数×碳排放系数进行核算,折标煤系数参照《中国能源统计年鉴》,碳排放系数根据《IPCC 2006 年国家温室气体清单指南》标准进行测算。此外,模型中因变量还将替换为反映能源结构的清洁能源供求和电力消费产生的碳排放量,这样就能够测度数字技术在清洁能源供给与消费中的作用,同时也将检验具有较高电力能源消耗特征的数字技术发展水平对城市电力消费碳排效应的影响。本文也将在模型中加入数字技术的二次项形式以探究可能存在的非线性的低碳效应影响。

2. 核心解释变量

本文参照赵涛等^[19]的方法从互联网普及率(用百人中互联网宽带接入用户数测度)、互联网从业人员情况(用计算机服务和软件业从业人员占比城镇单位从业人员测度)、相关产出情况(用人均电信业务总量测度)、移动电话普及率(用百人中移动电话用户数测度)和普惠金融发展程度(用数字普惠金融指数测度)五个方面构建数字技术指标,借助熵值法进行标准化及降维得到数字技术指数。

3. 控制变量

参照已有文献,控制变量主要考虑金融发展、

城市化程度、外商投资(FDI)、工业化规模、废气排放等作为影响低碳经济发展的主要因素^[8,20]。其中,本文通过机构存贷款余额占比地区生产总值测度金融发展;借助城市人口密度反映城市化水平;使用当年实际使用外资和地区生产总值占比度量外商投资;基于各城市规模以上工业企业数构建工业化水平;采用各城市的废气排放量衡量废气排放。

4. 中介变量

本文将中介变量设定为产业结构和反映能源消费的清洁能源消费碳排放量,借助模型(2)和(3)进行分析。产业结构测度借鉴已有文献采用第二产业和第三产业增加值占实际 GDP 之比^[16]。鉴于

数据可获性,清洁能源消费碳排放量则采用城市家庭天然气和液化石油气消费产生碳排进行衡量。

本文收集了 2011—2019 年江苏 13 个地级城市的数据,对形成的 117 个城市-年的均衡面板数据并展开分析。除中国数字普惠金融指数来源于北京大学数字金融研究中心和蚂蚁金服集团外,其余变量数据均来自中国碳核算数据库(CEADs)、《中国统计年鉴》《中国城市统计年鉴》《中国区域经济统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《江苏省统计年鉴》、部分江苏地级市统计年报和 Wind 资讯数据库。表 1 是本文主要变量的描述性统计结果。结果显示,江苏省城市的人均碳排强度为 0.263 吨/万元,人均碳排放量为 1.61 吨/人。

表 1 变量定义与描述性统计

变量名称	变量描述	平均值	标准差
人均碳排强度/(吨·万元 ⁻¹)	二氧化碳排放量/人均地区生产总值	0.263	0.098
人均碳排放量/(吨·人 ⁻¹)	二氧化碳排放量/人口总数	1.610	0.830
数字技术	熵值法构建的数字经济指数	0.124	0.063
金融发展/%	机构存贷款余额/地区生产总值	2.250	0.763
城市化程度/(万人·平方公里 ⁻¹)	人口总量/行政区域土地面积	8.290	2.920
FDI/%	外商实际使用外资/地区生产总值	0.027	0.013
工业化规模/个	规模以上工业企业数	0.360	0.225
废气排放/亿标立方米	废气排放量	0.512	0.390
产业结构/%	第二产业和第三产业增加值占实际 GDP 之比	0.978	0.194
清洁能源供给碳排放量/万吨	城市天然气和液化石油气供给量产生的二氧化碳量	107	92
清洁能源消费碳排放量/万吨	城市家庭天然气和液化石油气消费产生的二氧化碳量	28	23
总电量消费碳排放量/万吨	城市全社会用电量消费产生的二氧化碳量	276	227
工业电量消费碳排放量/万吨	城市工业电力消费产生的二氧化碳量	204	184

三、实证结果及分析

(一) 基础模型结果

表 2 第(1)~(2)列为数字技术对江苏低碳经济影响的基础模型回归结果。为避免数字技术和碳排放强度之间关系可能具有潜在的遗漏变量及内生性问题,考虑到数字技术发展对低碳经济影响可能存在时滞效应,本文将数字技术的滞后 1 期作为核心解释变量进行回归,结果见表 2 第(3)~(4)列。

第(1)列结果表明,数字技术对江苏省人均碳排强度具有显著的负向影响,即数字技术每增加 1 个单位,人均碳排强度水平会显著降低 0.623。第(2)列结果显示数字技术的估计系数显著为正,即数字技术每增加 1 个单位,人均碳排放量会增加

0.403。第(3)~(4)列的结果同样稳健地支持上述结论,即数字技术具有降低人均碳排强度的作用,但对人均碳排放量具有增加效应。王军等也认为数字金融发展能够通过支付便利性和消费规模扩张而显著增加家庭消费的碳排放^[21]。近年来,统计数据显示,江苏省的碳排放强度呈现下降态势,而其碳排放总量仍然较大且小幅增长,这意味着数字技术在一定程度上解释了江苏省低碳经济呈现碳排强度减少而人均碳排放量增加的现状。

在其他控制变量方面,城市化会增加人均碳排强度,但能减少人均碳排放量,说明城市规模扩张不利于碳排强度的减少,但人口规模扩大有利于降低人均碳排放量。此外,估计结果还显示,工业化发展也会增加城市的人均碳排放量,暗示了工业化规模扩张可能产生直接碳排效应及引起消费的间接碳排效应。

表 2 数字技术对江苏省低碳经济影响的模型结果

变量名称	(1) 人均碳排强度	(2) 人均碳排量	(3) 人均碳排强度	(4) 人均碳排量
数字技术	-0.623*** (0.192)	0.403** (0.161)	— —	— —
数字技术滞后 1 期	— —	— —	-0.513* (0.273)	0.459* (0.235)
金融发展/%	0.040 (0.044)	0.016 (0.040)	0.027 (0.051)	-0.018 (0.041)
城市化程度/(万人·平方公里 ⁻¹)	0.124*** (0.039)	-0.358*** (0.090)	0.195*** (0.054)	-0.012 (0.036)
FDI/%	-0.165 (0.359)	-0.780 (0.548)	0.112 (0.631)	-0.263 (0.566)
工业化规模/个	0.176 (0.136)	0.277* (0.132)	0.112 (0.154)	0.224** (0.094)
废气排放/亿标立方米	0.026 (0.034)	-0.029 (0.045)	0.013 (0.032)	-0.045 (0.044)
年份固定效应	控制	控制	控制	控制
城市固定效应	控制	控制	控制	控制
R ²	0.510	0.708	0.488	0.495
N	117	117	104	104

注:***、**和*分别表示在 1%、5%和 10%的显著性水平下显著。括号中的数字为标准差。

(二) 异质性效应分析

数字技术发展与污染排放之间的关系会因资源禀赋和经济发展的差异而产生异质性效应^[16]。数字技术能否产生作用可能与城市自身具备的碳排特征及地理区域有关。借鉴相关文献^[22],本文以江苏省 13 个城市的人均碳排强度均值和人均碳排量均值为界限划分为高/低碳排强度城市和高/

低碳排量城市分别进行回归,结果见表 3 第(1)~(4)列,分别为高碳排强度城市人均碳排强度、低碳排强度城市人均碳排强度、高碳排量城市人均碳排量、低碳排量城市人均碳排量;按照地理区域划分苏南和苏北进行回归,结果见表 3 第(5)~(8)列,分别为苏南人均碳排强度、苏北人均碳排强度、苏南人均碳排量、苏北人均碳排量。

表 3 分样本的异质性分析估计结果

变量名称	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
数字技术	-0.437** (0.142)	-0.058 (0.330)	0.661** (0.248)	-0.364 (0.212)	-0.691*** (0.106)	-0.641* (0.274)	0.511** (0.240)	-0.106 (0.085)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制	控制	控制	控制
年份固定效应	控制	控制	控制	控制	控制	控制	控制	控制
城市固定效应	控制	控制	控制	控制	控制	控制	控制	控制
R ²	0.857	0.574	0.819	0.755	0.659	0.755	0.770	0.749
N	63	54	63	54	72	45	72	45

注:***、**和*分别表示在 1%、5%和 10%的显著性水平下显著。括号中的数字为标准差。

第(1)~(2)列结果显示,一方面,数字技术每提高 1 个单位,高碳排强度城市的人均碳排强度水平显著降低 0.437,但高碳排量城市的人均碳排量会增加 0.661。另一方面,数字技术对低碳排强度城市的人均碳排强度和低碳排量城市的人均碳排量均没有表现出显著作用。第(5)~(6)列估计结果表明,数字技术对苏南地区和苏北地区的人均碳

排强度均表现为显著的降低作用,数字技术每提高 1 个单位,苏南和苏北的人均碳排强度分别减少 0.691 和 0.641。然而,数字技术对苏南地区的人均碳排量有显著的正向影响,但对苏北地区的影响不显著。这些结论意味着,数字技术对江苏省人均碳排强度和人均碳排量的影响具有碳排特征和地理区域的异质性。数字技术效应表现在本身具有

高碳排特征的城市尤为显著,但对低碳排特征的城市作用不显著。数字技术产生的碳排强度降低效应不区分苏南和苏北,而碳排量增加效应仅表现在苏南地区。这也暗示在苏北地区,充分利用数字技术发展能够起到降低碳排强度但不增加人均碳排放量的效果。

(三) 能源消费碳排效应分析

表 4 为基于基础模型将因变量替换为城市能源消费碳排放量的模型回归结果,第(1)~(2)列为清洁能源供给碳排放量的估计结果,第(3)~(4)列为总电量和工业电量碳排放量的估计结果。第(1)~(2)列结果显示,数字技术对江苏省清洁能源供给和消费产生的碳排量具有显著的促进作用,数字技术每

增加 1 个单位,清洁能源供给和消费产生的碳排量分别增加 0.515 和 0.198。该结果暗示了数字技术可能通过提升能源使用效率对清洁能源供给和消费碳排产生积极促进作用。第(3)~(4)列结果显示,数字技术对二次能源总电力消费和工业用电消费产生的碳排量没有显著影响。可能的原因在于数字技术本身是建立在电力基础上的,数字基建的开发和运营具有能源密集型特征,直接能耗体现在生产、使用、处置方面,而间接能耗表现在数字经济引发的能源引致需求方面^[23-24]。数据显示,2021 年中国国内数据中心总耗电量达到 2 166 亿千瓦时,仅占社会用电量的 2.6%。可见,数字技术本身在电力消费及其碳排放量的作用上并不明显。

表 4 能源消费碳排效应分析的估计结果

变量名称	(1) 清洁能源供给碳排放量	(2) 清洁能源消费碳排放量	(3) 总电量消费碳排放量	(4) 工业电量消费碳排放量
数字技术	0.515*** (0.162)	0.198*** (0.052)	0.562 (0.367)	0.447 (0.279)
控制变量	控制	控制	控制	控制
年份固定效应	控制	控制	控制	控制
城市固定效应	控制	控制	控制	控制
R ²	0.528	0.754	0.198	0.240
N	117	117	117	117

注:***、**和*分别表示在 1%、5%和 10%的显著性水平下显著。括号中的数字为标准差。

(四) 作用机制分析

基于上述结果,本文基于模型(1),分别以产业结构和清洁能源消费碳排放量为中介变量构建中介效应模型验证数字技术影响低碳经济的作用机理,结果见表 5。第(1)列结果表明,数字技术对产业结构具有正向作用,即数字技术发展能够促进产业结构的积极转型。第(2)列显示产业结构的绿色转

型又能促使城市人均碳排强度降低,且数字技术对人均碳排强度的估计系数的绝对值相对表 2 变小。该结果意味着数字技术能通过调整产业结构影响人均碳排强度,即城市第二、三产业转型升级的结构变化构成了数字技术影响江苏省碳排强度路径中的间接中介。然而,第(3)列表明产业结构转型升级对人均碳排量没有显著的促进作用。

表 5 中介效应模型的估计结果

变量名称	(1) 产业结构	(2) 人均碳排强度	(3) 人均碳排量	(4) 清洁能源消费碳排放量	(5) 人均碳排强度	(6) 人均碳排量
数字技术	0.886** (0.310)	-0.532** (0.206)	0.417** (0.178)	0.173*** (0.029)	-0.656** (0.219)	0.007 (0.234)
产业结构/%	—	-0.103* (0.058)	-0.016 (0.070)	0.029** (0.011)	—	—
清洁能源消费 碳排量/万吨	—	—	—	—	0.165 (0.911)	1.998* (1.061)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制	控制
年份固定效应	控制	控制	控制	控制	控制	控制
城市固定效应	控制	控制	控制	控制	控制	控制
R ²	0.886	0.562	0.708	0.771	0.510	0.741
N	117	117	117	117	117	117

注:***、**和*分别表示在 1%、5%和 10%的显著性水平下显著。括号中的数字为标准差。

从表 4 第(2)列可知,数字技术能增加清洁能源消费的碳排量。表 5 第(4)列显示,产业结构转型升级对清洁能源消费产生的碳排量具有正向影响。结合这两列回归结果可知,数字技术发展通过产业结构调整影响城市清洁能源消费的碳排量。表 5 第(6)列中数字技术的估计系数不显著,结合上述结论可知清洁能源消费的碳排量构成了数字技术影响江苏省人均碳排量路径中的完全中介。该结果也说明数字技术既能够通过清洁能源消费的碳排量作用于人均碳排量,也能通过产业结构调整影响清洁能源消费碳排量从而对人均碳排量的增加发挥间接影响。

(五) 稳健性检验及拓展分析

表 6 为替换第(1)~(4)列因变量和替换第(5)~(6)列自变量后,数字技术对江苏低碳经济影响的稳健性检验结果。第(1)列显示,如果将被解释变量替换为二氧化硫排放,估计结果与表 2 第(1)列人均碳排强度相似,均为负显著。第(2)列因变量替换为碳排量与国内生产总值构成的碳排强度后,估计系数也为负显著,同样与表 2 第(1)列

相似。第(3)列因变量替换为碳排量/地理面积构成的碳排密度水平后,数字技术对其影响为正显著,与表 2 第(2)列相似,这些结论暗示了以上结果具有稳健性。值得注意的是,数字技术在循环经济方面也表现出积极作用,根据第(4)列拓展分析,数字技术对江苏省城市的废物综合利用率估计系数为 0.683,表现出显著的正向影响。如果划分为高/低碳排城市和苏南苏北地理区域,结果表明数字技术对高碳排城市和苏南地区的废物综合利用率积极影响更为显著,对低碳排城市和苏北地区影响不显著^④。第(5)~(6)列结果显示,如果替换自变量数字技术为城市电信业务水平,即以电信发展为代表的数字经济发展,尽管其对人均碳排强度具有降低效应,但对人均碳排量却表现出增加的影响,结合表 2 第(1)~(2)列的系数,再次有效证实了本文结果的稳健性。此外,本文也将数字技术的二次项加入模型以度量可能存在的二次非线性效应,结果发现二次项对人均碳排强度和人均碳排的估计系数均不显著,即数字技术对江苏省低碳经济的影响不存在由二次项所表征的非线性效应^⑤。

表 6 稳健性检验的估计结果

变量名称	(1) 二氧化硫	(2) 碳排量/GDP	(3) 碳排量/地理面积	(4) 废物综合利用率	(5) 人均碳排强度	(6) 人均碳排量
数字技术	-5.074*** (1.522)	-0.634* (0.315)	0.753*** (0.158)	0.683*** (0.184)	— —	— —
电信业务	— —	— —	— —	— —	-0.023* (0.012)	0.021*** (0.006)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制	控制
年份固定效应	控制	控制	控制	控制	控制	控制
城市固定效应	控制	控制	控制	控制	控制	控制
R ²	0.799	0.571	0.589	0.405	0.483	0.718
N	117	117	117	117	117	117

注:***、**和*分别表示在 1%、5%和 10%的显著性水平下显著。括号中的数字为标准差。

四、结论与启示

本文基于 2011—2019 年江苏省城市层面的面板数据,构建实证模型测度数字技术发展对江苏省低碳经济的影响及作用路径。主要结论如下:

首先,数字技术对江苏省人均碳排强度具有显著的负向影响,数字技术每增加 1 个单位使得碳排强度水平显著降低 0.623。另外,数字技术对人均碳排量具有显著的促进的作用,数字技术每增加 1 个单位促使人均碳排量显著增加 0.403。数字技术对江苏省清洁能源供给和消费产生的碳排量具有

显著的促进作用,但对二次能源电力消费和工业用电消费产生的碳排量没有显著影响。

其次,数字技术对江苏省人均碳排强度和人均碳排量的影响具有碳排特征和地理区域的异质性。数字技术效应对于本身具有高碳排特征的城市尤为显著,但对低碳排特征的城市作用不显著。数字技术产生的碳排强度降低效应不区分苏南和苏北,而人均碳排量增加效应仅表现在苏南地区。这也表明,在苏北地区,充分利用数字技术发展能够起到降低碳排强度但不增加人均碳排量的效果。

再次,在作用机制方面,数字技术能通过调整产业结构影响碳排强度水平,即城市第二、三产业

转型升级的结构变化构成了数字技术影响江苏省碳排强度路径中的间接中介。数字技术既能够直接通过改变清洁能源消费的碳排量作用于人均碳排量,也能通过产业结构调整影响到清洁能源消费碳排量从而对人均碳排量增加发挥间接影响。

最后,在循环经济方面,数字技术对城市的废物综合利用率表现出积极的影响,但数字技术对江苏省低碳经济的影响不存在由二次项所表征的非线性效应。

基于理论分析和实证结果,本文得出以下政策启示:

第一,政府应当因地施策,强化试点低碳生态园区带动效应。政府可在碳排强度及碳排量相对较高的地区(如苏南)建立包容性低碳经济发展试验园区。例如,上海市“5+X”(氢能、高端能源装备、低碳冶金、绿色材料、节能环保)绿色低碳特色园区的建设,结合长三角城市圈与国家区域一体化战略,构建“低碳试验园区+城市协同区+辐射带动区”格局,推进绿色低碳领域创新主体培育和平台建设;借鉴上海智能终端产业与绿色低碳结合、广东以“全生命周期数字低碳园区”为定位的数字低碳园区等经验,在碳排强度及碳排量相对较小的地区(例如苏北)探索建设具有江苏特色的数字化低碳生产模式。

第二,政府应当深化多产业融合与转型,推动能源数字化以构建清洁能源供求智能化服务体系。政府可借助数字化模式推动城市形成第一、二、三产业融合发展新模式,引导高耗能产业调整转型,推动建立生态产品大数据库和价值转化平台;加快构建以数字化平台为基础的智慧创新能源产业新生态,有序引导和提升天然气、液化石油气等清洁能源供给和消费,优化利用结构,合理引导工业用气和化工原料用气,推动企业转变用能方式;增强城乡居民的低碳消费意识,为其提供以循环低碳为主题的教育培训和各项绿色减排服务。

注释:

- ①② 数据来源于《江苏省“十四五”应对气候变化规划》。
- ③ 本文在稳健性检验中汇报了基于循环经济思想的废物利用变量的估计结果作为拓展性分析。
- ④⑤ 鉴于篇幅限制,如有需要估计结果可联系作者获取。

参考文献:

- [1] 郭彩霞. 中国低碳经济发展的协同效应研究[J]. 管理世界, 2021, 37(8): 105-117.
- [2] Lange S, Santarius T, Pohl J. Digitalization and energy consump-

tion. Does ICT reduce energy demand? [J]. Ecological Economics, 2020, 176: 106760(文献号).

- [3] Sadorsky P. Information communication technology and electricity consumption in emerging economies [J]. Energy Policy, 2012, 48(9): 130-136.
- [4] Salahuddin M, Alam K. Internet usage, electricity consumption and economic growth in Australia: A time series evidence [J]. Telematics & Informatics, 2015, 32(4): 862-878.
- [5] 樊铁侠, 徐昊. 中国数字经济发展能带来经济绿色化吗? ——来自我国省际面板数据的经验证据 [J]. 经济问题探索, 2021(9): 15-29.
- [6] Zhang C G, Liu C. The impact of ICT industry on CO₂ emissions: A regional analysis in China [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015(44): 12-19.
- [7] 肖远飞, 姜瑶. 数字经济对工业绿色生产效率的影响研究 [J]. 现代管理科学, 2021(8): 100-109.
- [8] 何维达, 温家隆, 张满银. 数字经济发展对中国绿色生态效率的影响研究——基于双向固定效应模型 [J]. 经济问题, 2022(1): 1-8.
- [9] 梁琦, 肖素萍, 李梦欣. 数字经济发展、空间外溢与区域创新质量提升——兼论市场化的门槛效应 [J]. 上海经济研究, 2021(9): 44-56.
- [10] 徐昊, 马丽君. 数字经济、资源依赖与绿色经济发展 [J]. 金融与经济, 2022(1): 45-54.
- [11] 杨宇, 张彩虹. 数字金融对我国绿色发展水平的影响研究 [J]. 北京林业大学学报(社会科学版), 2022, 21(3): 28-36.
- [12] 徐军委, 刘志华. 我国省域数字经济与绿色经济测度及协同互动效应研究 [J]. 生态经济, 2023, 39(3): 57-62.
- [13] Chen L. How CO₂ emissions respond to changes in government size and level of digitalization? Evidence from the BRICS countries [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022(29): 457-467.
- [14] 缪陆军, 陈静, 范天正, 等. 数字经济发展对碳排放的影响——基于278个地级市的面板数据分析 [J]. 南方金融, 2022(2): 45-57.
- [15] 李广昊, 周小亮. 推动数字经济发展能否改善中国的环境污染——基于“宽带中国”战略的准自然实验 [J]. 宏观经济研究, 2021(7): 146-160.
- [16] 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.
- [17] 孙铭, 王茗旭. 中国数字经济发展对碳排放的影响 [J]. 西安交通大学学报(社会科学版), 2024, 44(3): 102-114.
- [18] 张杰, 付奎, 刘炳荣. 数字经济如何赋能城市低碳转型——基于双重目标约束视角 [J]. 现代财经(天津财经大学学报), 2022, 42(8): 3-23.
- [19] 赵涛, 张智, 梁上坤. 数字经济、创业活跃度与高质量发展——来自中国城市的经验证据 [J]. 管理世界, 2020, 36(10): 65-76.
- [20] 周新, 马丁. 我国低碳经济发展效率提升路径研究——基于模糊集的定性比较分析 [J]. 管理现代化, 2020, 40(5): 78-81.
- [21] 王军, 王杰, 李治国. 数字金融发展与家庭消费碳排放 [J]. 财经科学, 2022(4): 118-132.

- [22] 柴彦威,肖作鹏,刘志林. 基于空间行为约束的北京市居民家庭日常出行碳排放的比较分析[J]. 地理科学, 2011, 31(7): 843-849.
- [23] 郑晓云,陈金燕,苏义坤. 绿色经济与数字经济协同发展研究——基于修正耦合模型的实证分析[J]. 价格理论与实践, 2021(8): 164-167, 187.
- [24] 王蕾,朱彤. 数字经济是否增加能源消费? ——基于 ICT 应用研究的分析[J]. 城市与环境研究, 2021(3): 93-108.

A Study on the Impact of Digital Technology on Low Carbon Economy in Jiangsu Province

CHEN Xiaohong¹, JIANG Yuewei², HE Mingkai³

(1. School of Economics and Management, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;

2. Sanechips Technology Co., Ltd, Nanjing 210012, China;

3. School of Public Affairs, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In the context of the significant strategic decisions surrounding carbon peaking and carbon neutrality, Jiangsu, as a major province in terms of energy consumption and carbon emissions, stands out as a key region with significant potential for carbon reduction in China. Taking the panel data at the city level in Jiangsu Province as an example, this study constructs an empirical model to measure the impact and pathways of digital technology on the low-carbon economy. First, digital economy has a significant negative effect on the urban per capita carbon emission intensity, while has a significant increasing effect on per capita carbon emissions. Digital technology plays a significant role in promoting carbon reduction effect related to the supply and demand of clean energy, but has no significant impact on carbon emissions from total electricity consumption and industrial electricity consumption. Second, the impact of digital technology on the per capita carbon intensity and per capita carbon emissions varies with initial carbon emission in Jiangsu Province exhibits heterogeneity in terms of both high and low carbon emissions and geographical regions. In terms of the mechanism of action, digital technology can influence the level of per capita carbon intensity by adjusting the industrial structure and affect per capita carbon emissions by changing the carbon emissions from clean energy consumption. To sum up, the government should apply policies according to local conditions, strengthen the driving effect of pilot low-carbon ecological parks, and build an intelligent service system for the supply and demand of clean energy.

Key words: digital technology; low carbon economy; industrial structure; clean energy; carbon emission