

数字经济驱动绿色低碳产业发展

——基于中介效应模型分析

赵超, 王传会

曲阜师范大学经济学院, 山东 日照

收稿日期: 2024年3月15日; 录用日期: 2024年3月25日; 发布日期: 2024年4月30日

摘要

“双碳”目标的实现离不开低碳产业的发展, 而数字经济在助力企业实现低碳转型的过程中发挥着重要作用。本文通过运用2011~2020年中国31个省级面板数据建立模型, 通过熵权法对指标进行客观赋权并计算数字经济和低碳产业的发展水平, 分析我国数字经济与低碳产业的发展情况, 并验证数字经济对低碳产业发展的驱动效应和中介效应, 最后通过模型的内生性检验和稳健性检验来确保结果的准确性。研究与分析结果表明, 从整体上看, 我国省级数字经济和低碳产业发展水平在2011~2020年间均呈现上升趋势; 在回归分析中, 数字经济对低碳产业发展具有明显的正向驱动作用; 在中介效应中, 本文通过数字科技发展这个中介效应可以有效推动低碳产业的发展。因此, 根据这些结论, 要重视科技的发展, 加强数字经济对低碳产业的驱动作用, 推动经济社会的绿色、低碳和可持续发展。

关键词

数字经济, 低碳产业, 驱动效应, 中介效应

Digital Economy Drives the Development of Green and Low-Carbon Industries

—Based on the Analysis of Intermediary Effect Model

Chao Zhao, Chuanhui Wang

School of Economics, Qufu Normal University, Rizhao Shandong

Received: Mar. 15th, 2024; accepted: Mar. 25th, 2024; published: Apr. 30th, 2024

Abstract

The realization of “double carbon” goal can not be separated from the development of low-carbon

industry, and the digital economy plays an important role in helping enterprises to achieve low-carbon transformation. This paper uses the panel data of 31 provincial levels in China from 2011 to 2020 to establish a model, uses the entropy method to objectively empower the indicators and calculate the development level of digital economy and low-carbon industry, analyzes the development of digital economy and low-carbon industry in China, and verifies the driving effect and intermediary effect of digital economy on the development of low-carbon industry. Finally, the endogeneity and robustness of the model are tested to ensure the accuracy of the results. The research and analysis results show that, on the whole, the development level of digital economy and low-carbon industry at the provincial level in China shows an upward trend from 2011 to 2020. In the regression analysis, digital economy has a significant positive driving effect on the development of low-carbon industry. In the intermediary effect, this paper can effectively promote the development of low-carbon industry through the intermediary effect of digital technology. Therefore, according to these conclusions, we should attach importance to the development of science and technology, strengthen the driving role of digital economy in low-carbon industries, and promote the green, low-carbon and sustainable development of economy and society.

Keywords

Digital Economy, Low-Carbon Industry, Driving Effect, Intermediary Effect

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 研究背景

随着数字经济在全球范围的迅速发展,其在社会经济中的作用以及对碳排放的潜在影响逐渐成为焦点。在“双碳”目标下,如何在推进我国数字经济发展的同时,有效控制其碳排放、推动数字产业低碳发展是数字产业的责任与担当。低碳发展是全球气候变暖下各国探索并需要实现的目标。“碳中和、碳达峰”在2021年两会首次列入政府工作报告,力争于2030年达到碳排放峰值,并在2060年前实现“碳中和”。因此,实施碳强度控制,辅以碳排放总量控制是非常必要的,对经济增长实施碳约束是中国未来实现可持续发展的内在要求。

党的二十大明确指出,完善支持绿色发展的财税、金融、投资、价格政策和标准体系,发展绿色低碳产业,健全资源环境要素市场化配置体系,加快节能降碳先进技术研发和推广应用,倡导绿色消费,推动形成绿色低碳的生产方式和生活方式。此外,还要积极稳妥推进碳达峰碳中和。实现碳达峰碳中和是一场广泛而深刻的经济社会系统性变革。要立足我国能源资源禀赋,坚持先立后破,有计划分步骤实施碳达峰行动。完善能源消耗总量和强度调控,重点控制化石能源消费,逐步转向碳排放总量和强度“双控”制度。推动能源清洁低碳高效利用,推进工业、建筑、交通等领域清洁低碳转型[1]。因此,在全球气候变化愈演愈烈的背景下,在推动我国经济实现高质量发展的同时,要大力发展绿色低碳产业,实现经济社会的绿色低碳、可持续发展。

1.2. 研究意义

本文的研究目标是研究数字经济对低碳产业发展的影响,揭示其内在驱动作用机制并进行实证检验,

具有一定的研究意义, 下面将围绕其理论及实际意义展开。

目前来看, 数字经济和低碳产业发展都具有广阔的未来发展前景。国内许多学者大多集中于单一的数字经济、数字金融等方面对低碳产业发展的影响, 少有学者直接研究数字经济对低碳产业发展的驱动作用, 但随着我国经济的发展和科技的进步, 尤其是数字经济的发展对低碳产业带来了巨大的影响。因此, 从理论角度研究数字经济对低碳产业发展的影响, 可以深化人们对数字经济和低碳产业的内在影响, 使人们更好地认识到发展经济与环境保护之间的关系, 对低碳产业和数字经济相关理论建设具有学术的补充价值与优化作用。

从国家发展层面, 研究数字经济对低碳产业发展的驱动作用符合当今时代发展的主题, 当今世界各国都积极推动全球环境气候治理, 我国更是坚定不移地实现“碳中和”的目标, 研究这一理论机制可以更好地制定国家发展战略与规划, 实现经济社会绿色低碳发展。

从企业发展层面来看, 随着数字经济的发展, 许多企业都是互联企业, 研究数字经济对低碳产业发展可以使企业更好地从需求供给端实现低碳循环发展, 推动企业低碳转型, 更好地保护环境, 使之符合当今时代发展的主题。

2. 文献综述

2.1. 数字经济发展相关研究

对于“数字经济”的概念最早出现在《数字经济: 联网智力时代的承诺和风险》中, 由美国“数字经济之父”Tapscoot (1996)首次提出, 他归纳概括了数字经济一共有12个特征, 他认为数字经济正在逐步成为人类智力联网的新经济形态, 是经济发展的新趋势, 但并未明确给出数字经济具体含义[2]。宋洋(2019)认为, 数字经济有助于提高创新能力, 并且能满足我国产业绿色发展的要求[3]。张雪玲、吴恬恬(2019)从数字基础设施、数字化产业变革以及数字化的应用三大维度构建指标体系, 在此基础上评价与测算中国数字经济发展水平[4]。万晓榆、罗焱卿(2022)从数字基础设施、数字产业和数字融合三个层面出发, 建立评价指标体系测算数字经济发展水平[5]。居桦等(2022)从资源配置、市场结构、创新发展等方面分析数字经济的作用机制, 发现其本质是以数字技术方式进行生产[6]。Jiang Liu、Qianyu Zhao (2024)研究了在数字经济(DE)时代产业绿色转型升级的新路径, 基于2008~2021年省际工业数据, 构建双重差分(DID)模型对环境与经济效益进行分析, DE降低了污染排放强度, 提升了全要素生产率(TFP), 有助于推动工业绿色转型升级[7]。

2.2. 低碳产业发展相关研究

邹玉娟(2010)认为, 狭义的低碳产业是指新能源产业和环保产业, 如水力发电、新能源车、环境保护等; 广义的低碳产业是指具有低污染、低排放和低能耗等特征的一类总称, 如低碳交通工具、低碳能源、低碳建筑、第三产业和高端制造业等[8]。张友国等(2020)运用时空极差熵权法从发展动力、生产系统、生活系统和发展效益四个维度全面立体地测度绿色低碳发展评价指标体系[9]。郭彩霞(2021)从能源流和资源流两个角度完善低碳经济理论, 并构建低碳发展指标体系[10]。刘蓉等(2022)认为, 促进低碳经济发展的重要环节在于绿色低碳产业的形成与发展, 低碳经济的提出是绿色低碳产业发展的基础, 而发展绿色低碳产业需要新的财税政策体系的支持, 保障其有持续发展的动力, 推行绿色低碳产业的发展离不开财税政策的支持[11]。

2.3. 数字经济影响低碳产业相关研究

郭彩霞、高媛(2020)认为, 数字经济作为经济社会发展的新驱动力, 随着其发展水平的提高, 发现其

对低碳产业的发展具有正向的驱动效应,且这一效应具有稳健性;数字经济能够通过提升能源使用效率、优化能源结构、提升资源利用率和优化产业结构促进低碳产业发展[12]。胡颖、李倩男(2022)认为,数字经济能够显著推动低碳经济的发展,且数字经济对低碳经济发展的影响效应具有区域的异质性差异[13]。Jinning Zhang等(2022)认为,数字经济有力地促进了低碳发展,数字经济成为区域低碳发展的重要驱动力,环境治理、产业结构升级和技术创新是数字经济影响低碳发展的三大渠道[14]。江元、徐林(2023)认为,数字经济可以有效抑制碳排放,可以通过提高能源生产转化效率和降低能源消费强度的中介效应来抑制碳排放。此外,数字经济对于能源生产结构优化具有调节效应,数字经济可以增强能源生产结构优化对碳排放的抑制作用[15]。陈福中、蒋国海(2023)发现,数字经济与碳排放显著负相关,即数字经济的发展具有显著的减排效应。通过路径分析发现,数字经济通过提高研发强度、改善能源效率并优化产业结构实现减排[16]。Huanyue Jiang等(2024)采用空间计量方法,结果表明,数字经济每增加1%,碳排放量减少0.082%~0.092%,数字经济的发展对消费升级产生了积极影响,还降低了邻近省份的碳排放。随着世界各国越来越重视环境可持续性,该研究为利用数字经济和管理消费需求杠杆服务于减排目标提供了见解[17]。

2.4. 文献述评

学者的研究为本文数字经济驱动低碳产业发展探讨提供了依据,数字经济的发展对低碳产业发展具有一定的促进作用,虽然学者在数字经济、低碳产业发展方面进行了深入研究,但构建一定的指标体系对数字经济驱动低碳产业发展相关文献较为缺乏,本文将使用省级面板数据借助熵值法、中介效应模型对数字经济驱动低碳产业发展的机制进行研究。

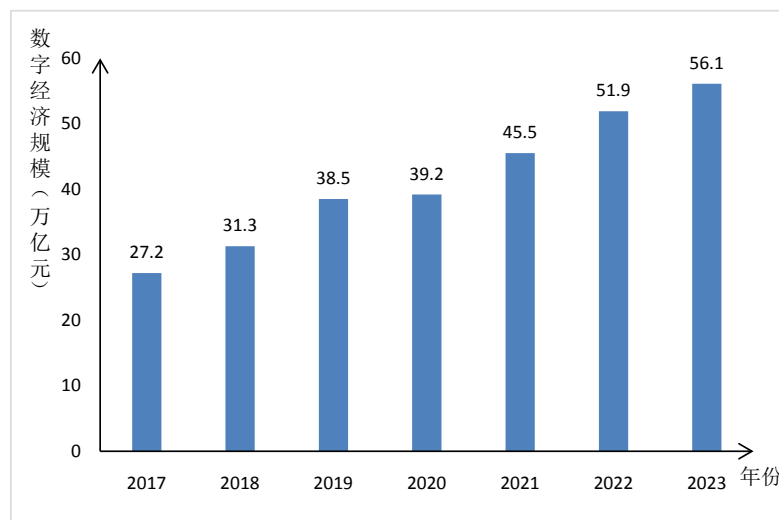
3. 理论基础及研究假设

3.1. 研究现状

1) 数字经济发展现状分析

近年来,国家已经陆续出台相关政策鼓励数字经济的发展。2021年3月,我国发布的《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》中提议加快建设数字经济、促进数字技术与实体经济深度融合,赋能传统产业转型升级。2022年2月,国务院发布《“十四五”数字经济发展规划》(以下简称《规划》),《规划》明确数字经济是继农业经济、工业经济之后的主要经济形态,并且提出到2025年,数字经济迈向全面扩展期,数字经济核心产业增加值占GDP比重达到10%的发展目标。《规划》提出数字经济是继农业经济、工业经济之后的主要经济形态,是以数据资源为关键要素;以现代信息网络为主要载体;以信息通信技术融合应用;促进公平与效率更加统一的新经济形态。2021年,中国信息通信研究院发布了《中国数字经济发展白皮书》,显示2020年我国数字经济规模达到39.2万亿元,占GDP比重为38.6%;数字经济增速达到GDP增速3倍以上,成为稳定经济增长的关键动力。地方上,已有广东、江苏、山东等13个省市数字经济规模超过1万亿元;北京、上海数字经济GDP占比超过50%。

由图1可知,近年来,随着经济社会尤其是数字经济的迅速发展,数字化与智能化发展成为推动全球经济和产业转型的重要推动力,数字经济的规模也正在逐年上升并且占比规模越来越大。2023年我国数字经济规模达56.1万亿元,占GDP比重将超过44%。2024年是新中国成立75周年,也是落实“十四五规划”“数字中国建设规划”的关键之年。未来,在数字经济的各个领域都充满了机遇和挑战,在对数据要素市场做了三年布局之后,2024年会是中国社会经济系统全面激活数据要素的一年,是各产业全面开展数字化转型的一年,数字经济将在更多领域发挥重要作用。



数据来源: 中国信息通信研究院。

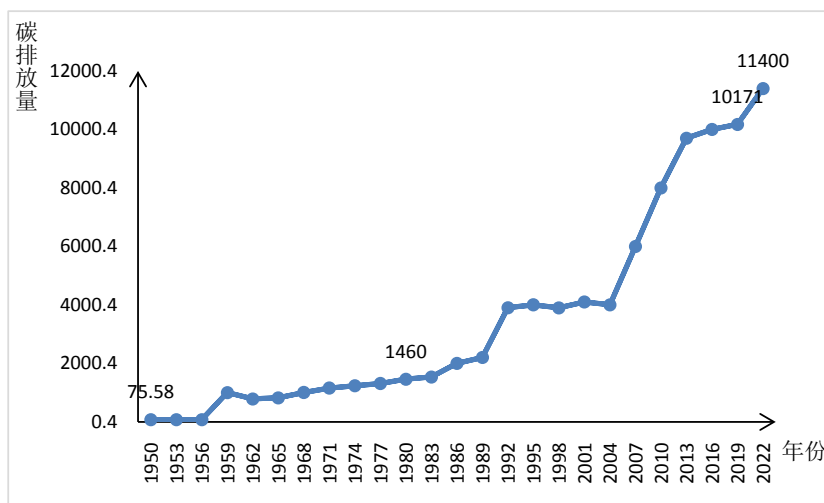
Figure 1. Changes in the size of the digital economy from 2017 and 2023

图 1. 2017~2023 年数字经济规模变化

2) 低碳产业发现状分析

从建国以来我国集中主要力量发展重工业,我国各行各业基本处于以“高排放、高消耗、高污染、高投入”为主要特征的粗放型生产发展模式,这种发展模式污染和破坏生态环境,也制约着行业的可持续发展。2021年10月,国务院发布《2030年前碳达峰行动方案》,提出要推进工业领域数字化智能化绿色化融合发展。在碳达峰、碳中和的背景下,高能耗行业亟需转型,生活消费方式有待优化,数字经济与绿色发展的深度融合已成为实现“双碳”目标、推动经济高质量发展的必然要求和重要支撑。

由图2可知,我国碳排放量情况从建国初7858万吨到改革开放14.6亿吨,呈缓慢增长。进入2000年以后,快速增长,到2019年根据数据显示我国碳排放量已达到101.7亿吨。2020年尽管受到疫情影响,但我国经济快速恢复,碳排放量增长0.08%,达102.51亿吨[15]。

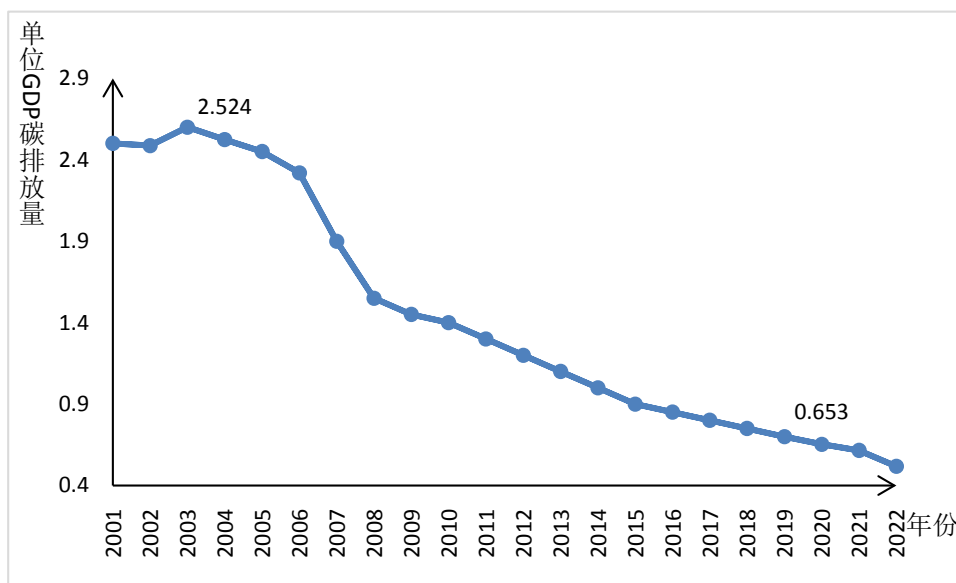


数据来源: Our World in Data 前瞻产业研究院整理。

Figure 2. Chart of China's carbon emissions from 1950 to 2022 (unit: million tons)

图 2. 1950~2022 年中国碳排放量走势图(单位: 百万吨)

为节能减排,我国从“十一五”阶段就开始提出相应要求。由图3可知,随着2005年以后我国在节能减排方面,尤其是工业领域的不断加大管控力度,我国单位GDP的碳排放量从2.524千克/美元迅速下降至2010年的1.39千克/美元,说明“十一五”以来我国节能减排效果明显,2020年我国单位GDP的碳排放量仅为0.653千克/美元,仅为2005年的四分之一左右[18]。《中国应对气候变化的政策与行动2022年度报告》数据显示,2021年单位国内生产总值(GDP)二氧化碳排放比2020年降低3.8%,比2005年累计下降50.8%。



数据来源: Our World in Data 前瞻产业研究院整理。

Figure 3. China's carbon emissions per unit of GDP from 2001 to 2022 (unit: kg/US \$)

图3. 2001~2022年我国单位GDP碳排放量(单位: 千克/美元)

3.2. 研究假设

在对数字经济驱动低碳产业发展影响效果分析后,对其作用机制已有了初步的推测并提出两方面的假设,具体假设如下。

1) 假设1: 数字经济对低碳产业发展具有直接影响

在“双碳”背景驱动和数字经济快速发展的当今时代,数字经济驱动低碳产业发展的作用明显。一方面,数字经济通过互联网、人工智能等方面促进传统产业转型升级,推动各种产业朝绿色、低碳产业方面发展。另一方面,数字经济以其便捷迅速的特征,打破区域之间的界限,提高资源能源利用效率和企业生产效率。因此,提出数字经济对低碳产业发展有直接影响的假设。

2) 假设2: 数字经济对低碳产业发展有间接影响效应

数字经济可以通过数字科技发展与进步来驱动低碳产业的发展。首先,数字经济可以促进数字科技的发展与进步。依托于网络基础设施等数字经济的发展与完善,人们之间的沟通更加便捷,促进数字科技不断进步。其次,数字科技水平的提升可以促进低碳产业的发展,科技是第一生产力,通过科技的创新与升级,可以促进企业或政府对低碳技术的研究,促进传统产业的转型升级,减少能源消耗,向高端低碳产业发展,最终实现数字经济驱动低碳产业的发展。所以推测数字科技进步在数字经济驱动低碳产业发展的过程中存在中介效应,即数字经济对驱动低碳产业发展有间接影响。其影响机制如图4所示。

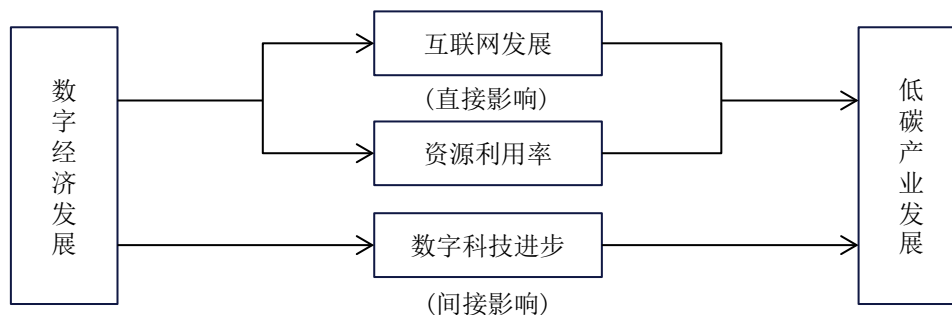


Figure 4. Mechanism of digital economy driving the development of low-carbon industry
图 4. 数字经济驱动低碳产业发展的作用机制图

4. 实证分析

4.1. 指标构建

1) 指标体系构建及数据来源

数字经济与低碳产业的发展趋势无法直接用单一指标来表示, 需要通过建立指标评价体系来进一步分析。本文在目前研究基础上遵循典型性、系统性、可取性的原则, 构建出评价数字经济与低碳产业的综合体系, 如表 1 和表 2 所示。

Table 1. Digital economy development evaluation index system
表 1. 数字经济发展评价指标体系

一级指标	二级指标	三级指标	指标属性
数字经济发展水平	互联网普及率	每百人国际互联网用户数	正向
	互联网相关从业人员数	信息传输、计算机服务和软件从业人员占年末单位从业人员比重	正向
	互联网相关产出	人均电信业务总量	正向
	移动电话普及率	每百人移动电话用户数	正向

Table 2. Low-carbon industry development evaluation index system
表 2. 低碳产业发展评价指标体系

一级指标	二级指标	三级指标	指标属性
低碳产业发展水平	能源消耗	能源消费弹性系数	负向
	环境保护	二氧化碳排放量	负向
	低碳技术应用	垃圾无害化处理厂	正向

对于数字经济发展水平的测度, 借鉴黄群慧等(2019)的方法, 采用互联网普及率、相关从业人员情况、相关产出情况和移动电话普及率四个方面的指标。以上 4 个指标对应的实际内容是: 百人中互联网宽带接入用户数、计算机服务和软件业从业人员占城镇单位从业人员比重、人均电信业务总量和百人中移动电话用户数[19]。以上指标的原始数据均可从《中国城市统计年鉴》中获得。

对于低碳产业发展水平的测度, 分为能源消耗、环境保护、低碳技术三方面来测度。对于能源消耗方面的测度, 本文借鉴邬彩霞、高媛(2020)方法, 选取单位能碳排放强度进行衡量, 具体的用二氧化碳排放量与能源消耗总量的比值来计算[12]。其他方面则借鉴许益玮(2023)在数字经济对低碳产业发展的影响研究中的方法在衡量[20]。

根据以上指标的选取, 本文采用赋权方式较为客观的客观赋权法则利用数据自身分布和包含的信息来计算权重, 在客观赋权方法中, 运用熵权法进行赋权能够将各项指标值的变异程度考虑其中, 以此来确定指标权重, 相较于层次分析法等主观赋权法而言具有一定的客观性和准确性。

熵权法(EWA)是一种客观确定权重的方法, 通过信息熵理论对指标的重要性进行量化, 从而实现多指标间权重的分配。其主要优点是能够反映数据本身信息, 且人为干预少, 客观性强; 缺点是该方法应用范围有限, 仅适用于计算指标的权重。熵权法的基本原理是, 对于一组指标, 如果其中一个指标的信息熵越大, 说明该指标的不确定性越高, 其在决策中的重要性就越大。因此, 熵权法可以通过计算指标值的熵值大小来确定各指标的权重, 能够考虑指标间的相互关系, 同时避免传统加权平均方法的缺陷, 由此可以得到较为客观的指标权重。具体而言, 熵权法的实现步骤如下:

假设有 m 个评价对象, 每个对象有 n 个评价指标, 可以构造一个 $X = (x_{ij})_{mn}$ 的矩阵, 其中 x_{ij} 为第 i 个评价对象在第 j 个评价指标下的数值。原始数据矩阵为:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{m4} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

为了消除指标量纲以及原始数据间的变异和互相影响, 本文首先要对原始数据进行无量纲化处理。根据所选取的指标, 通常采用正向化或逆向化处理。如果选取的是越大越好的指标数据, 则采用式(4.2)的方式进行正向化处理:

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (4.2)$$

如果选取的指标是逆向的, 即数值越小越好的指标数据, 则采取式(4.3)的方式进行逆向化处理:

$$x'_{ij} = \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (4.3)$$

本文对标准化后的数据做替换处理, 具体为将标准化后数值为 0 的数据替换为 0.00001, 以此来消除零值对后续计算的影响。利用经过替换处理后的标准化数据, 本文通过计算各指标的熵权重从而得到数字经济和低碳产业的发展水平。具体过程如下:

首先计算第 i 个评价对象在第 j 项评价指标下的比重 p_{ij} 。

$$p_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sum_{i=1}^m x'_{ij}} \quad (4.4)$$

然后计算第 j 项指标的信息熵 e_j :

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln(p_{ij}) \quad (4.5)$$

接着计算第 j 项指标的信息效应值 d_j 。熵值越小, 信息效用值就越大, 意味着指标的重要程度就越高。

$$d_j = 1 - e_j \quad (4.6)$$

由此可以确定出各个指标的熵权重 W_j :

$$W_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n W_j x'_{ij}} \quad (4.7)$$

最后, 计算出各个评价对象的综合得分 Q_{ij} :

$$Q_{ij} = \sum_{j=1}^n W_j - x'_{ij} \quad (4.8)$$

经过上述理论步骤后, 将数字经济与低碳产业指标代入熵权法进行分析, 可以得出其综合评价测算值。

2) 变量的选取与数据来源

通过第三章对数字经济驱动低碳产业发展的理论分析以及第四章对数字经济与低碳产业发展的指标分析为基础。本文选取低碳产业发展水平作为被解释变量, 选取数字经济发展水平和数字科技进步为核心解释变量和中介变量, 并在对相关文献进行研究的基础上, 选取其他控制变量进行实证研究。

① 被解释变量

低碳产业发展水平。利用第四章公式(4.1)~(4.8)所测算出的省级 2011 到 2020 年的低碳产业发展水平数据进行实证研究, 记为 *lcd*。

② 核心解释变量

数字经济发展水平。利用第四章公式(4.1)~(4.8)所测算出的省级 2011 到 2020 年的数字经济发展水平数据进行实证研究, 记为 *ded*。

③ 其他控制变量

a) 数字科技进步。科技成果是衡量科技进步水平的关键指标, 而专利申请量可以直接体现一个地区科技创新水平的高低。因此, 本文采用商标专利申请量来衡量地区科技进步水平的高低程度, 并取对数, 符号记为 *Intec*。

b) 工业化程度。工业化比较发达的城市必然会排放大量的污染气体或液体从而破坏生态环境, 阻碍低碳产业的发展。本文借鉴许益玮(2023)在数字经济对低碳产业发展的影响研究中运用规模以上工业企业数来衡量工业化程度, 并取对数[18], 符号记为 *lnind*。

3) 变量的描述性分析

对本文模型中所研究的主要变量进行简单的描述性统计分析, 对各变量的样本量、均值、标准差、最大值以及最小值进行统计分析, 整理后的统计结果如表 3 所示, 可以看出: 在各变量的统计中, 数字经济发展水平的最大值为 0.490, 最小值为 0.001, 较大的差值表明我国地区间的数字经济发展差距明显。低碳产业发展水平的最大值为 0.776, 最小值为 0.600, 可以发现我国 31 个省的低碳产业发展具有一定的差距, 地区发展不平衡。其余变量的统计表明, 不同省级之间在科技创新和工业化程度上也都存在一定的差距, 这符合我国当前处于发展不平衡的阶段。

Table 3. Descriptive statistical table of variables

表 3. 变量的描述性统计表

变量名	样本量	均值	标准差	最小值	最大值
<i>ded</i>	310	0.138	0.125	0.001	0.490
<i>lcd</i>	310	0.725	0.038	0.600	0.776
<i>Intec</i>	310	7.665	1.600	2.892	12.367
<i>lnind</i>	310	6.570	1.082	2.892	9.209

4.2. 数字经济对低碳产业发展的影响分析

1) 面板数据模型

为验证数字经济对低碳产业发展存在驱动效应, 本文基于此构建基准回归模型表达式, 如下所示:

$$lcd_{it} = \beta_0 + \beta_1 ded_{it} + \beta_2 ln tec_{it} + \beta_3 ln ind_{it} + \varepsilon_{it}$$

其中, 公式中 it 表示个体单元, 即全国各省份, t 表示年份; lcd_{it} 表示第 i 个省第 t 年的低碳产业发展水平; ded_{it} 表示第 i 个省份第 t 年的数字经济发展水平, 为本文的核心解释变量; β_0 表示截距项, β_1 表示核心解释变量数字经济发展的估计参数。 $ln tec_{it}$ 、 $ln ind_{it}$ 分别表示 i 个省份第 t 年的数字科技进步和工业化程度。 β_1 、 β_2 、 β_3 其余各变量的回归系数, ε_{it} 为该模型的随机扰动项。

2) 实证结果及分析

本文在构建面板数据模型的基础上, 进行 OLS 基础回归, 并进行豪斯曼检验, 根据计量模型检验结果发现, 与随机效应模型相比, *Hausman* 检验更支持固定效应模型估计, 因此决定选取固定效应模型进行分析。为保证实证模型的严谨性, 本文在使用数据进行回归时依次加入各控制变量, 通过采用面板固定效应模型对基本模型进行估计。

为了全面定量分析数字经济对低碳产业发展的影响, 本文运用 EViews13 软件对数字经济影响低碳产业的发展进行回归分析, 得到面板数据模型的回归结果, 如表 4 所示。

Table 4. OLS regression results of digital economy on low-carbon industry development

表 4. 数字经济对低碳产业发展的 OLS 回归结果

变量名	系数	SE	T 值	P 值	95%置信区间	显著水平
<i>ded</i>	0.0139	0.0174	0.8047	0.4216	0.034	**
<i>ln tec</i>	0.017	0.0021	1.89	0.5600	0.104	**
<i>ln ind</i>	-0.0105	0.0033	-1.2	0.2309	-0.300	**
		时间固定效应			yes	
		个体固定效应			yes	
<i>Number of obs</i>		310		<i>R-squared</i>		0.4968

注: *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$ 。

从基准回归结果来看, 在表 4 中, 在控制其他变量不变的情况下, 数字经济发展水平每提高一个单位, 低碳产业发展水平在 95% 的显著性下提高 0.013 个单位, 由此可以证明数字经济对低碳产业发展有显著的正向驱动效应, 即数字经济可以助推低碳产业的发展。因此, 数字经济对低碳产业发展的正向驱动效应得到了验证。对于其他控制变量而言, 从其他各控制变量的回归结果来看, 我们可以发现: 随着科技创新(*ln tec*)能力的不断提高, 科技进步回归系数在 95% 的显著性水平下为正, 科技创新水平每提高一个单位, 低碳产业的发展水平就会在 95% 的显著性下提高 0.017 个单位, 充分说明了科技进步能够显著地促进低碳产业的发展; 工业化程度(*ln ind*)回归系数在 95% 的显著性水平下为负, 这说明随着工业化程度的提高会显著抑制低碳产业的发展。从以上结果, 我们可以看出中介变量以及各控制变量对低碳产业的发展都存在一定的促进或抑制作用。

4.3. 模型的稳健性检验

考虑到当前数字经济的发展会对未来低碳产业发展的影响, 因此将数字经济发展水平及其他控制变量设置为滞后一期的数据。可以从表 5 的回归结果中看出, 滞后一期的数字经济发展水平不仅可以显著影响低碳产业发展, 同时滞后一期的科技发展进步作为中介变量也能显著影响低碳产业发展水平。因此, 数字经济促进低碳产业发展的影响较为稳健。

Table 5. Robustness test

表 5. 稳健性检验

变量名	系数	SE	T 值	P 值	95%置信区间	显著水平
<i>ded</i>	0.2125	0.0196	0.9600	0.2164	0.034	***
<i>Intec</i>	0.0108	0.0011	2.2200	0.6543	0.104	**
<i>lnind</i>	-0.0139	0.0012	-1.32	0.2309	-0.300	**
		时间固定效应			yes	
		个体固定效应			yes	
<i>Number of obs</i>		93		<i>R-squared</i>		0.2691

注: *** $p < 0.01$, ** $p < 0.05$, * $p < 0.1$ 。

4.4. 数字经济对低碳产业发展的中介效应分析

1) 中介效应模型

中介效应是指一个变量对于两个其他变量之间的关系具有部分中介作用, 即这个变量解释了这两个变量之间关系的一部分, 同时又被这两个变量所解释。在解释变量 X 与被解释变量 Y 的关系中, 若考虑变量 X 对变量 Y 的影响时, 发现 X 对 Y 的影响至少有一部分是通过第三个变量 M 来间接影响 Y , 则称 M 为中介变量。中介效应通常是通过回归分析来评估的, 它是一种重要的统计方法, 可以帮助更好地理解变量之间的关系, 并确定影响这些关系的机制。中介效应模型可以用以下三个方程来说明变量之间的关系:

$$Y = cX + e_1 \quad (4.9)$$

$$M = aX + e_2 \quad (4.10)$$

$$Y = c'X + bM + e_3 \quad (4.11)$$

其中, 公式(4.9)中 c 为自变量 X 对被解释变量 Y 的总效应估计参数, 公式(4.10)中 a 为自变量 X 对中介变量 M 的估计系数, 公式(4.11)中系数 b 为在控制 X 的影响后 M 对 Y 的效应, 系数 c' 则是在控制 M 的影响后 X 对 Y 的直接效应。

通过中介效应模型可以分析出, 数字经济发展不仅可以直接作用于低碳产业发展, 数字经济发展是否还能够通过科技发展进步进而对低碳产业发展产生间接影响。

2) 实证结果及分析

根据本文的研究理论机制分析可知, 数字经济可以通过科技进步这个路径来进而影响低碳产业的发展。为更深入探讨数字经济对低碳产业发展的影响机理, 本文通过回归三步法把科技发展进步作为中介变量, 实证检验数字经济通过科技进步这个路径进而作用于低碳产业发展的影响机制, 来验证科技发展进步中介效应的存在。检验结果如表 6 所示。

Table 6. Regression results of intermediary effect (scientific and technological development and progress)

表 6. 中介效应(科技发展进步)回归结果

变量名	<i>lcd(1)</i>	<i>Intec(2)</i>	<i>Lcd(3)</i>
<i>ded</i>	0.2241	5.8800	0.1400
<i>Intec</i>	/	/	0.0143
<i>lnind</i>	-0.0031	0.5290	-0.0106
F	89.0987	221.2345	94.0876
R^2	0.4564	0.6790	0.4909
N	310	310	310

表 6 中的三列结果分别展示了数字经济对低碳产业发展的效应、数字经济对科技进步发展的影响、数字经济和科技进步对低碳产业发展的影响。观察表 6 中 $lcd(1)$, 发现数字经济(ded)对低碳产业发展(lcd)的回归系数为 0.2241, 说明数字经济(ded)对低碳产业发展(lcd)的效应在 95%的水平上是显著的; 接着分析 $Intec(2)$, 数字经济(ded)对科技创新发展($Intec$)的回归系数为 5.8800, 说明数字经济(ded)对科技创新发展($Intec$)的效应也是显著的, 说明数字经济能够显著提高科技发展水平; 最后再分析 $lcd(3)$, 在数字经济(ded)对低碳产业发展(lcd)的影响中加入科技进步($Intec$)这一变量后, 数字经济对低碳产业发展的影响系数有所下降, 但中介效应的显著性 0.0143 仍然小于预先设定的显著性水平 0.05, 拒绝原假设, 中介效应存在, 即科技进步($Intec$)对低碳产业发展(lcd)的影响依然显著, 说明数字经济可以通过科技发展进步来间接地促进低碳产业的发展。

5. 结论与政策建议

5.1. 研究结论

在全球气候问题显著的世界背景下, 为了更好地助力“双碳”目标的实现, 本文将研究重点聚焦于数字经济这一发展新动力。从上述章节可知, 本文首先从研究数字经济影响低碳产业发展的背景和意义出发, 接着通过两者的相关文献以及理论机制分析, 根据两者的主要特点构建了指标体系分别测算数字经济与低碳产业的发展水平。其次, 分析了数字经济和低碳产业发展的现状。最后, 分别运用 OLS 回归和中介效应模型, 对数字经济影响低碳产业发展进行了实证分析。因此, 本文通过从理论和实证两方面总结已有的研究, 得到以下结论:

第一, 由数字经济和低碳产业发展的测度分析结果可得: 从全国整体上看, 我国数字经济和低碳产业的发展水平均呈现出逐年持续上升的趋势; 从省级层面上看, 我国各省的数字经济发展水平存在显著的地域不平衡现象, 且经济发展水平高、基础设施完善的城市其数值要高。

第二, 根据数字经济对低碳产业发展的实证结果可以发现, 数字经济对低碳产业发展的影响具有显著的正向驱动效应, 随着数字经济发展水平的提高, 可以有效促进低碳产业的发展。此外, 数字经济可以通过科技发展进步这个路径来间接地带动低碳产业的发展。

5.2. 政策建议

根据上述研究分析所得, 为有效促进我国低碳产业的发展, 推动经济社会的绿色低碳、可持续发展, 本文提出以下政策建议:

第一, 加大数字经济对低碳产业的发展力度。数字经济不仅可以促进经济增长, 还能促进社会绿色高质量发展。所以要加大对互联网、人工智能等新一代信息技术和网络基础设施的发展建设力度, 将数字技术运用到行业发展中, 积极发挥数字技术的正面推动作用。同时, 政府应加大对数字经济发展的财政支出, 提升数字经济发展总体水平, 加快我国低碳产业向数字化转型升级, 营造低碳产业发展的良好氛围, 加大国家及地方财政对数字经济和低碳产业发展的扶持力度。

第二, 重视科技的发展与进步。在促进数字经济发展的同时, 更要重视科技的发展, 加快推进地区的科技研发, 促进科技成果转化, 科技进步赋能低碳产业的发展。同时, 各地区应出台相关政策鼓励企业对低碳产业发展的研发投入, 加强数字化低碳技术的开发, 通过数字化创新技术赋能传统能源企业转型升级, 优化低碳产业结构, 提高能源综合利用率, 促进产业的技术创新提高发展质量, 逐步转向清洁能源消费, 减少不必要的资源浪费, 实现低碳资源的最大化利用, 促进社会的绿色低碳和可持续发展。

基金项目

教育部人文社会科学项目(22YJJCZH087), 山东省自然科学基金青年项目(ZR2020QG054)。

参考文献

- [1] 习近平. 高举中国特色社会主义伟大旗帜, 为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗[N]. 人民日报, 2022-10-26(001).
- [2] Crawford, W. (1996) The Digital Economy: Promise and Peril in the Age of Networked Intelligence—Tapscott, D. *Journal of Academic Librarianship*, **22**, 397-397.
- [3] 宋洋. 经济发展质量理论视角下的数字经济与高质量发展[J]. 贵州社会科学, 2019(11): 102-108.
- [4] 张雪玲, 吴恬恬. 中国省域数字经济发展空间分化格局研究[J]. 调研世界, 2019(10): 34-40.
- [5] 万晓榆, 罗焱卿. 数字经济发展水平测度及其对全要素生产率的影响效应[J]. 改革, 2022(1): 101-118.
- [6] 居桦, 崔馨方, 居占杰. 数字经济的基本内涵、作用机理及发展趋势[J]. 产业与科技论坛, 2022, 21(13): 12-14.
- [7] Liu, J. and Zhao, Q. (2024) Mechanism Testing of the Empowerment of Green Transformation and Upgrading of Industry by the Digital Economy in China. *Frontiers in Environmental Science*, **11**, Article 1292795. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1292795>
- [8] 邹玉娟. “低碳化”与中国经济可持续发展[J]. 生态经济, 2010(7): 28-31, 74.
- [9] 张友国, 窦若愚, 白羽洁. 中国绿色低碳循环发展经济体系建设水平测度[J]. 数量经济技术经济研究, 2020, 37(8): 83-102.
- [10] 邬彩霞. 中国低碳经济发展的协同效应研究[J]. 管理世界, 2021, 37(8): 105-116.
- [11] 刘蓉, 余英杰, 刘若水. 绿色低碳产业发展与财税政策支持[J]. 税务研究, 2022(6): 97-101.
- [12] 邬彩霞, 高媛. 数字经济驱动低碳产业发展的机制与效应研究[J]. 贵州社会科学, 2020, 37(11): 155-161.
- [13] 胡颖, 李倩男. 数字经济对低碳经济发展的驱动效应研究[J]. 对外经贸实务, 2022(6): 15-20.
- [14] Zhang, J., Lyu, Y., Li, Y. and Geng, Y. (2022) Digital Economy: An Innovation Driving Factor for Low-Carbon Development. *Environmental Impact Assessment Review*, **96**, Article ID: 106821. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106821>
- [15] 江元, 徐林. 数字经济、能源效率和碳排放——基于省级面板数据的实证[J]. 统计与决策, 2023, 39(21): 58-63.
- [16] 陈福中, 蒋国海. 数字经济的减排效应——基于 285 个地级市的空间面板数据[J]. 兰州学刊, 2023(5): 75-93.
- [17] Jiang, H., Elahi, E., Gao, M., et al. (2024) Digital Economy to Encourage Sustainable Consumption and Reduce Carbon Emissions. *Journal of Cleaner Production*, **443**, Article ID: 140867. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140867>
- [18] 胡鞍钢. 中国实现 2030 年前碳达峰目标及主要途径[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2021, 21(3): 1-15.
- [19] 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[J]. 中国工业经济, 2019(8): 5-23.
- [20] 许益玮. 数字经济对低碳产业发展的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 山西财经大学, 2023.