

“双碳”背景下数字经济对制造业绿色发展的影响机制与路径研究

董 瑞, 刘 洁

江苏大学财经学院, 江苏 镇江

收稿日期: 2024年8月6日; 录用日期: 2024年11月22日; 发布日期: 2024年11月29日

摘 要

绿色发展已成为制造业高质量发展的必然要求,而数字经济正逐渐成为推动制造业绿色发展的重要动力。基于2013~2023年中国省级面板数据,运用双固定效应模型、中介效应模型和调节效应模型,探究数字经济对制造业绿色发展的影响和作用机制。研究表明:数字经济能够显著推动制造业绿色发展水平,并通过推动产业结构升级提升制造业绿色发展水平;绿色技术创新在数字经济和制造业绿色发展的关系中起正向调节作用;数字经济对制造业绿色发展的影响存在不同区域、不同数字经济水平和不同收入水平的差异性。探究数字经济对制造业绿色发展的影响有利于深化认识制造业绿色发展的影响因素,为进一步推动制造业绿色发展具有重要的理论意义。

关键词

数字经济, 制造业绿色发展, 产业结构, 绿色技术创新

Research on the Influencing Mechanism and Path of Digital Economy on the Green Development of Manufacturing Industry under the Background of “Double Carbon”

Rui Dong, Jie Liu

School of Finance and Economics, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu

Received: Aug. 6th, 2024; accepted: Nov. 22nd, 2024; published: Nov. 29th, 2024

Abstract

Green development has become an inevitable requirement for the high-quality development of the manufacturing industry, and the digital economy is gradually becoming an important driving force for the green development of the manufacturing industry. Based on China's provincial panel data from 2013 to 2023, the dual fixed effect model, intermediary effect model and moderating effect model were used to explore the impact and mechanism of digital economy on the green development of manufacturing industry. The results show that the digital economy can significantly promote the green development level of the manufacturing industry, and improve the green development level of the manufacturing industry through industrial structure upgrading. Green technology innovation plays a positive regulating role in the relationship between digital economy and green development of manufacturing industry. The impact of digital economy on the green development of manufacturing industry varies from region to region, to different digital economy levels and to different income levels. Exploring the impact of digital economy on the green development of manufacturing industry is conducive to deepening the understanding of the influencing factors of green development of manufacturing industry, and has important theoretical significance for further promoting the green development of manufacturing industry.

Keywords

Digital Economy, Green Development of Manufacturing Industry, Industrial Structure, Green Technology Innovation

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

党的二十大报告强调, 加速实现制造强国、质量强国和数字中国的目标, 推进制造业朝着高端、智能、绿色发展方向迈进, 同时推动经济和社会实现绿色低碳转型是实现高质量发展的关键环节。自改革开放以来, 中国制造业在规模和技术创新等方面取得了引人瞩目的成就。据工信部公布的数据显示, 2023年, 我国制造业增加值占 GDP 比重为 26.2%, 占全球比重近 30%, 制造业规模已经连续 13 年位居世界首位, 为我国经济做出了突出贡献。然而, 制造业的快速发展也产生了一系列负面影响, 比如我国环境污染、资源消耗等问题日益加剧, “大而不强” 问题突出, 其高污染、高能耗、高排放的问题仍然是制造业发展面临的严峻挑战[1]。在此背景下, 我国积极贯彻绿色发展理念, 推动制造业绿色转型升级。制造业绿色发展不仅符合绿色发展理念, 更是新时代实现可持续发展和“双碳”目标的必然要求。因此, 推动制造业绿色发展、实现制造业绿色转型升级是当前阶段的重要任务。

随着信息技术的不断发展, 数字经济正以一种新的经济形态推动全球经济和社会的发展。数字经济可以加强技术创新、通过要素融合提升生产要素的经济效应和环境效益, 促进企业成长和产业优化[2]。数字技术能够提升社会整体创新水平、提升经济效益、降低能源消耗, 从而促进绿色高质量发展。2023 年, 我国数字经济规模超过 55 万亿元, 总量稳居世界第二。由此而论, 数字经济是赋能制造业绿色发展的全新引擎, 且具有广阔的发展前景。具体来看, 数字化水平的提升为企业提供了诸多便利, 比如促进企业在生产阶段和污染治理环节的要素合理配置, 提供便利的基础设施, 有利于企业提高绿色技术创新水平,

以使生产过程变得更加环保, 实现生产工艺的低碳化和绿色化, 最终推动整个制造业绿色转型[3]。由此可见, 数字经济正日益成为推动制造业绿色发展不可或缺的力量, 因此, 深入研究数字经济与制造业绿色发展之间的关系变得越来越重要。

在当前资源环境日益紧张的背景下, 实现“制造强国”和“双碳”目标具有重要的理论和现实意义。因此, 本文旨在探讨数字经济与制造业绿色发展之间的关系以及它们之间可能存在的路径机制。为了验证这一问题, 本文利用 2013 年~2023 年的面板数据, 运用多种模型研究数字经济和制造业绿色发展之间的关系, 并提出切实可行的政策建议, 这对我国实现制造业绿色转型升级, 实现高质量发展目标具有重要的战略性意义。

2. 文献综述

2.1. 数字经济的研究现状

随着数字经济的蓬勃发展, 对其进行相关研究的领域也逐渐扩大, 并涌现出大量的研究成果。数字经济的概念自诞生以来, 内涵不断丰富, 其概念最早是由美国学者 Don Tapscott 提出的, 即数字经济是由信息通讯行业以及企业和个人的电子商务组成[4]。随后, 国内外专家学者纷纷对数字经济的内涵进行诠释, 但目前尚未形成统一论。Beomsoo Kim 指出数字经济是一种以数字化的产品和服务进行交易的一种新的经济的特殊形式[5]。Bukht & Heeks 从涵盖范围角度对数字经济的内涵进行了界定, 认为数字经济不仅包括数字产业这一部分, 同时应当包括应用数字技术、数字服务和数字产品等带来的产出部分[6]。与此同时, 国内学者也相继提出了数字经济的概念与内涵。数字经济的概念是由信息经济、互联网经济发展而来, 其核心驱动力是信息技术, 是现代数字化技术与国民经济运行各方面紧密结合的产物[7]。欧阳日辉通过对基础设施、生态环境、生产要素、形态创新和转型发展五个方面的论述, 提出了数字经济的内涵, 并进行了分层解释。他强调数字经济以数据为核心资源, 以数字平台及其生态系统为主要载体, 通过数字化和智能化技术实现高效互联, 从而在实体世界和数字空间中创造价值, 成为一种崭新的经济形态[8]。

对于数字经济的评价体系, 现有文献主要从省市层面进行测算, 且目前未形成统一的测算方法。数字产业化、产业数字化、互联网基础设施、数字化运用这四个方面被广泛纳入综合指标体系, 学者从自身研究内容出发, 构建数字经济指标体系并进行数字经济发展水平的测度。Haltiwanger *et al* 从电子商务、IT 设施、产业结构和劳动力特征等方面衡量数字经济发展水平, 但是并未提供具体的测度方法[9]。Jordanoski *et al* 以欧盟推出的数字经济和社会指数为基础, 测量了数字化转型对数字经济和数字生活的影响[10]。赵涛等从互联网普及率、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, 利用主成分分析的方法对原始数据进行标准化处理并进行降维, 从而获得了数字经济综合发展指数[11]。夏子慧等使用熵值法构建了数字经济指标体系, 从数字基础设施、数字产业发展、数字创新能力、数字普惠金融角度衡量数字经济发展水平, 对数据进行标准化处理后运用线性加权法计算出各年份的数字经济指数[12]。

2.2. 数字经济对制造业绿色发展影响的研究现状

目前, 关于数字经济和制造业绿色发展之间的关系尚未进行充分的研究, 仅有一些学者聚焦于数字经济和绿色全要素生产率方面进行了研究。

数字经济主要通过推动技术创新、促进产业结构升级和实现成本降低等方式提高绿色全要素生产率水平。第一, 在推动技术创新方面, 数字技术的产生使得创新主体之间的交流突破了时间和空间限制, 给不同创新活动主体带来巨大的便利[13]。同样的, 数字经济能够通过产品创新和流程创新来提高制造业

绿色全要素生产率, 企业利用信息技术收集客户信息, 利用大数据挖掘客户的产品反馈, 进而对企业的产品进行改造[14]。数据作为核心要素, 它可以改变原有生产要素的利用效率, 创新传统产业的生产流程。第二, 在产业结构升级方面, 数字经济的高渗透性、高带动性和创新融合性, 使得其与其他产业融合的过程中, 更有利于发挥知识外溢效果的优势, 在推动传统产业结构升级方面发挥了很大作用, 能够有效推动制造业绿色化发展[15]。随着数字技术的不断进步, 传统产业的发展日益智能化, 特别是第三产业的发展, 为制造业的绿色发展提供了有利条件[16]。第三, 在成本降低方面, 数字平台可以以更高的效率搜索产品及服务信息, 降低产品交易成本, 促进交易尽快达成[17]。此外, 数字化转型有助于降低企业的信息传递成本、外部搜寻成本以及沟通成本, 并提高企业的绩效和效益水平。这为制造业企业的绿色创新提供了实质性支持, 进而促进了制造业的绿色发展[18]。

现有文献已对数字经济和制造业绿色发展进行了很多有价值的研究, 但仍存在一定的研究空间。因此, 基于已有文献的基础, 本研究主要聚焦于探讨数字经济对制造业绿色发展的影响。相对于已有的文献, 本文可能在以下几个方面存在边际贡献: 第一, 从研究的角度来看, 将数字经济和制造业绿色发展纳入一个研究框架, 从理论和实证两个层面深入探讨数字经济能否对制造业绿色发展产生影响及其影响路径, 并且考虑不同区域、不同数字经济水平和不同收入水平可能存在的异质性影响; 第二, 在研究内容上, 本文除了研究数字经济对制造业绿色发展的影响外, 还讨论了其中可能的作用机制, 基于产业结构升级路径识别数字经济对制造业绿色发展的潜在机制和路径; 第三, 在研究方法上, 从数字基础设施和数字产业发展两个维度更全面地测算各省的数字经济发展水平。此外, 本研究还建立了一个调节效应模型, 引入调节变量绿色技术创新, 以验证其在数字经济对制造业绿色发展影响中的积极调节作用。

3. 理论分析与研究假设

数字技术是数字经济时代中的一项重大创新, 它成为推动绿色发展的核心动力。首先, 通过 5G、大数据、云计算、区块链等数字技术, 实时监测制造业的生产过程, 加强制造业生产监督管理, 精准把握生产过程中的资源损耗情况、碳排放情况等, 减少资源浪费和污染情况, 提升制造业绿色发展水平; 其次, 通过数字技术优化生产流程, 将新技术运用到传统制造业中, 改变传统制造业的发展模式。通过有效整合制造业生产过程中的各个环节, 对工艺流程进行优化, 提高物料调度效率, 进行现场计划排程的优化等措施, 持续革新工艺、升级设备、优化管理, 实现生产过程的智能化, 从而提高能源和资源的有效利用, 减少生产中的资源浪费[19]。让企业在利用新技术提高经济效益的同时, 自觉承担起保护环境的社会责任, 缓解制造业高耗能、高污染等问题; 最后, 通过数字技术可以快速捕捉消费者需求, 实现生产端和消费端的有效对接, 将数字技术贯穿于产品的采购、研发、生产和销售的全过程。据此, 本文提出如下假设:

假设 1: 数字经济能够有效赋能制造业绿色发展。

数字经济以数据为核心生产要素, 在产业结构升级方面有着显著优势。它不仅具备高效、清洁、可复制和低成本传输等特点, 还通过数字技术的渗透, 引导产业向高技术化和低能耗方向发展, 从而推动产业结构的升级[20], 进而可以推动制造业向绿色化、低碳化方向发展。随着数字经济的蓬勃发展, 数字经济对产业结构升级的影响主要体现在投入端和产出端两个方面。从投入端来看, 数字技术虽然有很多优势, 但它也存在较高的固定成本等弊端, 然而, 同时它也具备持续降低制造业企业生产成本的优势[21]。数字经济有助于生产要素跨行业跨部门流动, 实现资源的有效配置, 促进不同部门间的信息传递和技术共享, 降低企业的信息搜寻成本, 提高制造业企业的污染治理能力和污染治理技术, 从而降低企业的生产成本和交易成本, 有利于制造业企业集中资金开发绿色清洁产品, 进而推动产业结构升级, 推动制造业绿色发展。从产出端来看, 数字经济有助于改善绿色生产工艺和清洁技术, 实现生产效率提高和节能

减排的双重增长。数字技术能够推动制造业传统生产方式的变革, 催生出符合绿色发展的新业态、新模式, 持续推进产业结构优化, 推动制造业企业的生产效率和产品质量提高, 进而推动制造业绿色发展。

由此, 提出如下假设:

假设 2: 数字经济能够通过推动产业结构升级促进制造业绿色发展。

在我国制造业的发展过程中, 绿色技术创新发挥着日益重要的作用。绿色技术创新本质上是指以环境保护为目标的技术和管理创新, 将生态学、环境学与传统技术创新相结合[22]。与先前传统的技术创新活动相比, 绿色技术创新的一个显著优点是其环保功能。随着数字化技术的不断革新和数字经济的不断发展, 企业能够更有效的汲取先进绿色技术的价值, 从而进行绿色产品、工艺和管理模式等方面的创新[23]。投资于绿色技术创新可以为企业带来新的市场机会和竞争优势, 在数字经济中发展过程中, 消费者对环境友好产品的需求逐渐增加, 而制造业企业通过采用可持续的生产方法和材料, 能够在市场上获得更大的认可 and 市场份额[24], 并减少污染物排放, 降低能源消耗。综上所述, 绿色技术创新不仅有助于减少环境负荷和资源消耗, 还能提升制造业的竞争力和数字经济的发展速度。通过技术进步和市场需求的结合, 绿色技术创新正向调节着数字经济与制造业之间的关系, 推动两者朝着更加可持续和繁荣的方向发展。基于此, 本文提出如下假设:

假设 3: 绿色技术创新正向调节着数字经济与制造业绿色发展之间的关系。

4. 研究设计

4.1. 模型构建

4.1.1. 基准回归模型

为了验证假设 1, 首先使用双固定效应模型验证数字经济对制造业绿色发展的影响, 设定基准模型(1):

$$GTFP_{i,t} = \alpha_0 + \alpha_1 DE_{i,t} + \alpha_2 Controls_{i,t} + \lambda_i + \mu_t + \varepsilon_{i,t} \quad (1)$$

其中, i 表示省份, t 表示年份, $GTFP_{i,t}$ 解释变量, 表示省份 i 在 t 时期的制造业绿色发展水平(用绿色全要素生产率衡量); $DE_{i,t}$ 解释变量, 表示省份 i 在 t 时期的数字经济指数; $Controls_{i,t}$ 响制造业绿色发展的控制变量; λ_i 和 μ_t 表示个体固定效应和时间固定效应, $\varepsilon_{i,t}$ 机扰动项。

4.1.2. 中介效应模型

本文引入中介效应模型讨论具体的影响机制, 参考已有文献的做法, 结合式(1)构建下列中介效应模型:

$$GTFP_{i,t} = \alpha_0 + \alpha_1 DE_{i,t} + \alpha_2 Controls_{i,t} + \lambda_i + \mu_t + \varepsilon_{i,t} \quad (2)$$

$$Mediator_{i,t} = \beta_0 + \beta_1 DE_{i,t} + \beta_2 Controls_{i,t} + \lambda_i + \mu_t + \varepsilon_{i,t} \quad (3)$$

$$GTFP_{i,t} = \gamma_0 + \gamma_1 DE_{i,t} + \gamma_2 Mediator_{i,t} + \gamma_3 Controls_{i,t} + \lambda_i + \mu_t + \varepsilon_{i,t} \quad (4)$$

其中, $Mediator_{i,t}$ 表示产业结构这个中介变量, 其余变量的含义同式(1)。

4.1.3. 调节效应模型

本文引入调节变量绿色技术创新验证其是否存在调节作用, 构建调节效应模型如下:

$$GTFP_{i,t} = \delta_0 + \delta_1 DE_{i,t} + \delta_2 Controls_{i,t} + \lambda_i + \mu_t + \varepsilon_{i,t} \quad (5)$$

$$GTFP_{i,t} = \varphi_0 + \varphi_1 DE_{i,t} + \varphi_2 GreenIT_{i,t} + \varphi_3 DE_{i,t} * GreenIT_{i,t} + \varphi_4 Controls_{i,t} + \lambda_i + \mu_t + \varepsilon_{i,t} \quad (6)$$

其中, $GreenIT_{i,t}$ 绿色技术创新, 其他变量含义与式(1)相同。

4.2. 变量选取与测度

4.2.1. 被解释变量

本文以制造业绿色发展水平作为被解释变量,采用绿色全要素生产率(GTFP)衡量,并利用基于 SBM 距离函数计算的 GML 指数进行测算。

测算绿色全要素生产率,需要考虑三类指标:投入、期望产出和非期望产出。投入指标包含劳动投入、资本投入和能源消耗。其中,劳动投入用各省份年末就业人员数衡量;资本投入采用规模以上工业企业固定资产总值来衡量,并采用永续盘存法计算制造业的物质资本存量,以 2013 年为基期,参考张军等的做法,基期的固定资本形成总额用各省市 2013 年固定资本形成总额除以 10%作为基期资本存量[25],公式如下:

$$K_1 = I_1 \times 10 \tag{7}$$

其中, K_1 表示基期资本存量, I_1 表示基期固定资本形成总额。

物质资本存量的计算公式为:

$$K_{i,t} = I_{i,t} + (1 - \delta_{i,t}) K_{i,t-1} \tag{8}$$

其中, i 表示第 i 个省市, t 表示第 t 年, K 表示固定资本存量, I 表示投资额, δ 为固定资本折旧率,参考张军等的做法,本文的固定资本折旧率选取 9.6%。

能源投入用各省市能源消费总量衡量;期望产出采用各省市工业增加值衡量;非期望产出采用工业废水中化学需氧量、工业二氧化硫排放量衡量。

4.2.2. 核心解释变量

数字经济作为一个复杂且多层次的体系,涵盖了广泛的领域和多个层面的互动。各类政策文件如《“十四五”数字经济发展规划》《数字经济发展白皮书》和《数字经济创新发展行动计划》等提供了详尽的理论框架和发展目标,这些文件为制定数字经济发展水平的指标体系奠定了基础。在对数字经济进行全面衡量时,考虑到数据的可获得性和指标的实用性,本文在借鉴柏培文和喻理以及何地等研究的基础上,从数字基础设施和数字产业发展两个维度制定了一套综合性的指标体系[26][27]:首先是数字基础设施的发展,涵盖了网络覆盖、信息服务、移动通信等关键要素;其次是数字产业的发展,关注电子商务、数字服务、企业数字化水平等领域的扩展和深化。为了对我国各省份的数字经济发展水平进行科学的评价和比较,本文采用了熵值法测算各省份的数字经济发展水平指数,指标体系见表 1。

Table 1. Digital economy indicator system and weights

表 1. 数字经济指标体系及权重

一级指标	二级指标	三级指标	单位	权重
数字基础设施	互联网基础设施	互联网宽带接入端口数	万个	0.0434
		网页数	万个	0.1589
		域名数	万个	0.0987
		互联网普及率	%	0.0149
	通信业基础设施	长途光缆线路长度	公里	0.0268
		移动电话普及率	%	0.0178
		移动电话基站数	万个	0.0443
		移动电话年末用户数	万户	0.0355

续表

数字产业发展	数字产业化	软件业务收入	亿元	0.1319
		邮政业务总量	亿元	0.1448
		电信业务总量	亿元	0.0888
		快递业务收入	万元	0.1446
	产业数字化	每百人使用计算机数	台	0.0270
		每百家企业拥有网站数	个	0.0067
		有电子商务交易活动企业占总企业数比重	%	0.0070
		电子商务销售额	亿元	0.0081

4.2.3. 控制变量

为了更精确地评估数字经济对制造业绿色发展的全面影响，参考已有研究，本文选用以下控制变量：

① 城镇化水平(URB)，采用城镇人口数量占总人口数量的比重衡量；② 人力资本水平(HUM)，采用高等学校在校生人数与总人口的比值衡量；③ 对外开放程度(OPEN)，采用货物贸易总额占地区生产总值的比重衡量。④ 能源结构(ENE)，采用折合标煤后的各行业煤炭消费量占行业能源消费总量的比重衡量；⑤ 政府支出强度(GOV)，采用财政支出和地区生产总值的比值衡量。

4.2.4. 中介变量

本文选择产业结构(IS)作为中介变量。产业结构一般可以用非农产业的比重、产业结构层次系数、第三产业与第二产业产值的比重、Moore 结构变动指数、高新技术产业比重等指标来衡量。本文借鉴徐敏和姜勇[28]的研究，利用产业结构层次系数衡量产业结构这一中介变量。具体计算方式如下：

$$IS = \sum_{i=1}^3 q_i \times i = q_1 \times 1 + q_2 \times 2 + q_3 \times 3 \quad (9)$$

其中， q_i 为第 i 产业产值占总产值的比重。

4.2.5. 调节变量

本文引入绿色技术创新作为调节变量。本文选用绿色发明专利申请量和绿色实用新型专利申请量度量各省绿色技术创新水平，并取对数处理，分别用 $\ln INV$ 和 $\ln UTY$ 表示。各变量的描述性统计见表 2。

Table 2. Descriptive statistics table for variables

表 2. 变量的描述性统计表

变量类型	变量名称	样本量	均值	中位数	标准差	最小值	最大值
被解释变量	GTFP	330	1.070	1.038	0.083	0.932	1.465
核心解释变量	DE	330	0.119	0.083	0.108	0.018	0.742
控制变量	URB	330	0.596	0.581	0.121	0.350	0.896
	HUM	330	0.020	0.020	0.006	0.008	0.042
	OPEN	330	0.265	0.142	0.291	0.008	1.548
	ENE	330	0.033	0.026	0.023	0.004	0.095
	GOV	330	0.249	0.226	0.103	0.107	0.643
中介变量	IS	330	2.397	2.389	0.123	2.132	2.834
调节变量	$\ln INV$	330	7.390	7.486	1.470	0.693	10.38
	$\ln UTY$	330	7.234	7.314	1.436	2.773	10.60

4.3. 数据来源与处理

鉴于数据的可得性, 本文选取中国 30 个省级地区 2013~2023 年的面板数据作为研究样本检验相关假设, 由于西藏地区的数据缺失较多, 因此在分析中排除了西藏地区的样本。数据主要来源于《中国统计年鉴》《中国工业统计年鉴》《中国科技统计年鉴》《中国环境统计年鉴》和部分省级统计年鉴, 地区绿色发明专利申请量和绿色实用新型专利申请量源于中国国家知识产权局专利数据库和 WIPO 的国际专利分类绿色清单, 少量缺失数据用线性插值法补齐。

5. 实证结果分析

5.1. 基准回归

豪斯曼检验的结果显示通过了显著性检验。因此, 选用双向固定效应模型进行回归分析, 得到的结果见表 3。其中, 列(1)仅加入核心解释变量数字经济(DE)考察其对绿色全要素生产率的影响, 列(2)加入了全部控制变量进行进一步估计, 但尚未对省份和时间进行控制; 为保证回归的准确性, 列(3)在列(2)的基础上进一步控制了省份和时间的固定效应, 得到的结果如列(3)所示。可以看出, 从列(1)到列(3), 模型的拟合优度不断提高, 且本文的核心解释变量数字经济(DE)始终在 1%的水平下显著为正, 说明数字经济显著推动了绿色全要素生产率水平。由此, 假设 1 得到了验证。

Table 3. Regression results
表 3. 基准回归结果

变量	(1)	(2)	(3)
DE	0.446*** (12.86)	0.558*** (14.44)	0.813*** (13.89)
Controls	控制	控制	控制
常数项	1.017*** (188.51)	0.917*** (35.42)	0.0180 (0.16)
省份固定	是	否	是
时间固定	是	否	是
N	330	330	330
R ²	0.335	0.653	0.893

注: **、*、*分别表示在 1%、5%和 10%的水平上显著, 括号内的数值代表 t 统计量, 以下各表同。

5.2. 稳健性检验与内生性讨论

5.2.1. 稳健性检验

本文进一步进行了如下的稳健性检验, 结果见表 4。

第一, 数字经济的发展需要一定的时间发挥它的影响, 因此, 本文将数字经济分别滞后一期和滞后二期处理后再次进行回归, 结果如列(1)和列(2)所示, 数字经济对绿色全要素生产率依然存在着显著的积极影响。第二, 由表 2 可知, 各变量的最大值与最小值差异较大, 为避免极大值和极小值对实证结果的影响, 对各变量进行 2.5%的缩尾处理, 回归结果如列(3)所示, 可以看出, 数字经济的估计系数和显著性与基准回归结果一致, 说明实证结果通过了稳健性检验。

Table 4. Robustness test results
表 4. 稳健性检验结果

变量	(1) 滞后一期	(2) 滞后两期	(3) 缩尾处理
DE	0.676*** (10.86)	0.567*** (7.96)	0.813*** (13.89)
Controls	控制	控制	控制
省份固定	YES	YES	YES
年份固定	YES	YES	YES
N	300	270	330
R ²	0.889	0.890	0.893

5.2.2. 内生性处理

参考已有研究，本文采用工具变量法，构造了 1984 年每万人电话机数量(截面数据)与上一年信息技术服务收入(时间序列数据)作为数字经济的工具变量。表 5 报告了工具变量的估计结果，列(1)和列(2)分别表示不考虑控制变量和加入控制变量的回归结果。结果表明，在纳入工具变量后，核心解释变量数字经济(DE)分别在 1%的水平下显著为正，说明数字经济能够显著赋能绿色全要素生产率的提升，进一步佐证了基准回归的显著性。

Table 5. Endogeneity test results
表 5. 内生性检验结果

变量	(1)	(2)
DE	0.207*** (2.63)	1.099*** (4.48)
Controls	控制	控制
LM 统计量	72.973 [0.000]	19.398 [0.000]
Wald F 统计量	93.124 [16.38]	17.737 [16.38]
省份固定	YES	YES
年份固定	YES	YES
N	330	330
R ²	0.234	0.842

注：[]内代表 p 值，下同。

5.3. 异质性分析

5.3.1. 基于不同区域的异质性分析

各地区由于资源禀赋、宏观政策、经济发展水平等方面的差别，数字经济对制造业绿色发展水平可能存在着不同的影响，为考察数字经济对制造业绿色发展水平影响的区域异质性，本文按照国家统计局对地区的划分，将全国 30 个省份划分为东部、中部、西部三个地区，分别分析数字经济对东部、中部、

西部地区的异质性影响。

异质性分析结果见表 6。对回归结果进行分析,可以观察到数字经济对制造业绿色发展在不同地区存在差异。具体而言,东部和西部地区的数字经济均能显著提升绿色全要素生产率水平,且东部地区的促进效应高于西部地区。可能的原因是东部地区的经济发展水平较西部地区更高,在科研和人才方面存在优势,且数字技术的创新能力更强,产业结构更加完善,因此数字经济综合实力更强,由此,东部地区的数字经济对制造业绿色发展水平的提升作用更为明显。西部地区由于其独特的地理位置和自然条件,决定其更适宜发展风能、太阳能等清洁能源,而数字经济为西部地区发展新能源提供了有力支撑,能够加快西部地区产业结构升级,进而对西部地区制造业绿色发展发挥了较大的边际效应。因此,西部地区的数字经济能够显著提升制造业绿色发展水平。

中部地区的数字经济对绿色全要素生产率的系数为正,但未起到显著的提升作用,可能的原因是中部地区电子通信设备制造业较少,数字化投入少,经济发展水平和生态环境双双落后,对制造业绿色发展水平的溢出效果不明显[29],因此未能显著提升制造业绿色发展水平。

5.3.2. 基于数字经济发展水平的异质性分析

基于 30 个省份数字经济发展水平的高低,将全国分为高发达地区、较发达地区及欠发达地区,以考察不同水平的数字经济对绿色全要素生产率的影响,回归结果如表 6 第(4)~(6)列所示。可以看出,高发达和欠发达地区的数字经济对绿色全要素生产率均存在显著正向影响,且数字经济具有普惠性的特点;受到种种因素的影响,较发达地区的数字经济系数为正,但并不显著。

5.3.3. 基于收入水平的异质性分析

鉴于各省份收入水平不同,参考余咏泽等的做法,采用二分法将 30 个省份分为两组,将 GDP 大于 2023 年全国平均 GDP 的省份定义为高收入地区,否则定义为中低收入地区[30]。表中第(7)列和第(8)列显示了数字经济对不同收入水平地区的绿色全要素生产率的影响,可以观察到,对于高收入地区和中低收入地区而言,数字经济对绿色全要素生产率的影响均在 1%的水平下显著为正,这表明高收入地区和中低收入地区的数字经济均能显著赋能地区绿色全要素生产率的提升,且中低收入地区的数字经济的提升效果更为明显。

Table 6. Heterogeneity analysis
表 6. 异质性分析

变量	(1) 东部	(2) 中部	(3) 西部	(4) 高发达	(5) 较发达	(6) 欠发达	(7) 高收入	(8) 中低收入
DE	0.940*** (11.28)	0.408 (1.20)	0.699*** (4.90)	0.548*** (4.47)	0.264 (0.75)	1.429*** (4.29)	0.679*** (7.69)	0.948*** (7.51)
Controls	控制	控制	控制	控制	控制	控制	控制	控制
省份固定	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
年份固定	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
N	110	66	154	110	88	132	121	209
R ²	0.941	0.953	0.886	0.876	0.938	0.870	0.932	0.893

5.4. 中介效应检验

上文分析了数字经济可能通过产业结构升级的途径影响制造业绿色发展水平,为了验证假设是否成

立，本文选用产业结构层次系数衡量产业结构，并将其作为中介变量代入回归模型，衡量数字经济对制造业绿色发展的影响机制，结果如表 7 的列(1)~列(3)所示。由此可见，数字经济与产业结构的系数在 1% 的水平下显著为正，说明数字经济能够显著促进产业结构升级；在纳入中介变量产业结构后，数字经济与产业结构的回归系数仍然显著为正，也就是说，产业结构在数字经济赋能制造业绿色发展中起到了中介作用，假设 2 得到了验证。

Table 7. Mechanism test of industrial structure upgrading
表 7. 产业结构升级的作用机制检验

指标	(1) GTFP	(2) IS	(3) GTFP
DE	0.813*** (13.89)	0.152*** (3.59)	0.657*** (11.27)
IS			0.181** (2.37)
Controls	控制	控制	控制
常数项	0.0180 (0.16)	2.484*** (31.23)	-0.263* (-1.70)
省份固定	YES	YES	YES
年份固定	YES	YES	YES
N	330	330	330
R ²	0.893	0.977	0.861

5.5. 调节效应检验

表 8 报告了绿色技术创新对数字经济与制造业绿色发展关系的调节效应。其中，列(1)和列(3)显示，数字经济的估计系数在 1%水平下显著为正，说明数字经济能够显著推动制造业绿色发展，主效应得到了验证。列(2)和列(4)分别纳入了数字经济和绿色发明专利申请量与绿色实用新型专利申请量的交互项。列(2)表示绿色发明专利申请量(lnINV)调节效应回归结果。结果显示，数字经济与绿色发明专利申请量的交互项(DE×lnINV)系数显著为正，说明绿色发明专利申请量在数字经济影响制造业绿色发展的过程中起正向强化作用。列(4)报告了绿色实用新型专利申请量(lnUTY)的调节效应回归结果。结果显示，数字经济与绿色实用新型专利申请量的交互项(DE×lnUTY)的系数为正，且通过了 1%水平下的显著性检验，说明绿色实用新型专利申请量显著增强了数字经济对制造业绿色发展的影响，具有正向的调节作用。以上验证了绿色技术创新的正向调节效应，假设 3 得到了验证。

6. 结论与政策建议

本文基于中国 2013~2023 年 30 个省市的面板数据，综合运用双固定效应模型、中介效应模型和调节效应模型，实证研究数字经济对制造业绿色发展的直接影响和间接影响及具体的作用机制。得出如下结论：第一，数字经济能够显著促进制造业绿色发展，已成为制造业绿色发展的重要推动力，这一结论在进行一系列稳健性检验后依旧成立；第二，数字经济对制造业绿色发展的影响存在着不同地区、不同数字经济水平、不同收入水平的异质性；第三，产业结构升级是数字经济推动制造业绿色发展的重要渠道。实证研究表明，产业结构对数字经济提升制造业绿色发展水平具有显著的中介效应。即数字经济能够

Table 8. Regression results of moderating effect test
表 8. 调节效应检验回归结果

指标	(1)	(2)	(3)	(4)
DE	0.492*** (10.73)	0.316*** (2.74)	0.540*** (11.75)	0.463*** (7.02)
lnINV	0.00910*** (2.61)	-0.00810 (-1.32)		
lnUTY			0.00571** (2.01)	0.000787 (0.25)
DE×lnINV		0.174*** (5.13)		
DE × lnUTY				0.117*** (6.56)
Controls	控制	控制	控制	控制
常数项	0.854*** (24.32)	-0.0212 (-0.20)	0.781*** (21.85)	-0.00948 (-0.15)
N	330	330	330	330
R ²	0.661	0.904	0.6276	0.878

通过产业结构升级推动制造业绿色发展；第四，绿色技术创新在数字经济和制造业绿色发展之间起着正向调节作用。

本文的研究发现为数字经济推动制造业绿色发展提供了理论依据和经验证据，结合上述结论，提出以下政策启示：

第一，大力推动数字经济和数字技术发展，加快完善数字化基础设施。本文的研究对于数字经济推动制造业绿色发展具有极为重要的意义。政府应进一步加大数字基础设施投入，加大对互联网、5G 基站等固定投资，加快数字化基础设施的全面覆盖；加快挖掘数字经济的发展潜力，拓展数字经济的发展空间，从而更好地赋能制造业绿色发展；加快将 5G、人工智能、区块链等数字技术应用到制造业传统产业中，搭建数字经济和制造业的桥梁，推动数字技术与制造业的深度融合，推动制造业传统产业向绿色化、低碳化发展；加强数字技术研发，将数字技术融入到制造业企业的采购、研发、生产和销售各个环节中，搭建数字经济平台 and 数据分析中心，从而推动制造业企业生产模式、组织结构等方面的变革。

第二，继续优化产业结构，提高绿色技术创新水平。加速数字经济与制造业深度融合，不断催生新业态、新模式；改造传统产业，淘汰落后产能，进一步推动产业结构高级化，发挥产业结构升级对于数字经济推动制造业绿色发展的中介作用以及绿色技术创新的调节作用；推动数字技术在制造业生产流程中的应用，精准匹配生产所需资源，提高能源利用效率，减少资源浪费；采用更加节能的设备和技术进行生产，使用清洁能源，减少对传统能源的依赖；加快制造业企业数字化转型，政府应给予充足的资金和政策支持企业进行绿色研发，鼓励企业在追求经济效益的同时，承担起保护环境的社会责任；企业应当响应国家政策，积极开展自主研发创新，主动将数字技术应用到制造业的生产营销过程中，积极采用先进的生产技术开发智能化、低碳化、绿色化产品。

第三，制定差异化发展路径，避免“数字鸿沟”的出现。研究发现，数字经济对制造业绿色发展的推

动作用存在着地区发展不平衡的问题, 应当推动各地区的协调发展, 制定差异化发展战略, 实现数字经济和制造业的全面协调发展。一方面, 政府应当将政策向欠发达地区倾斜, 推动资金、人才、技术等跨区域流动, 加快欠发达地区数字经济的发展速度, 缩小与发达地区的差距, 实现发达地区和欠发达地区的协调发展。另一方面, 加强区域间的帮扶与协作, 对于发达地区, 要发挥示范效应, 积极传授发展数字经济和制造业绿色化的经验; 对于欠发达地区, 应主动学习先进地区的数字技术。

参考文献

- [1] 陈素梅, 李晓华. 数字经济驱动制造业绿色发展的作用机理[J]. 企业经济, 2022, 41(12): 140-150.
- [2] 韩晶, 陈曦. 数字经济赋能绿色发展: 内在机制与经验证据[J]. 经济社会体制比较, 2022(2): 73-84.
- [3] 周青, 王燕灵, 杨伟. 数字化水平对创新绩效影响的实证研究——基于浙江省 73 个县(区、市)的面板数据[J]. 科研管理, 2020, 41(7): 120-129.
- [4] Tapscott, D. (1996) *The Digital Economy: Promise and Peril in the Age of Networked Intelligence*. McGraw Hill.
- [5] Kim, B., Barua, A. and Whinston, A.B. (2002) Virtual Field Experiments for a Digital Economy: A New Research Methodology for Exploring an Information Economy. *Decision Support Systems*, 32, 215-231. [https://doi.org/10.1016/s0167-9236\(01\)00094-x](https://doi.org/10.1016/s0167-9236(01)00094-x)
- [6] Bukht, R. and Heeks, R. (2018) Defining, Conceptualising and Measuring the Digital Economy. *International Organizations Research Journal*, 13, 143-172. <https://doi.org/10.17323/1996-7845-2018-02-07>
- [7] 许宪春, 张美慧. 中国数字经济规模测算研究——基于国际比较的视角[J]. 中国工业经济, 2020(5): 23-41.
- [8] 欧阳日辉. 数字经济的理论演进、内涵特征和发展规律[J]. 广东社会科学, 2023(1): 25-35+286.
- [9] Haltiwanger, J. and Jarmin, R.S. (2000) Measuring the Digital Economy. In: Brynjolfsson, E. and Kahin, B., Eds., *Understanding the Digital Economy: Data, Tools and Research*, The MIT Press, 13-33. <https://doi.org/10.7551/mitpress/6986.003.0003>
- [10] Jordanoski, Z. and Meyerhoff Nielsen, M. (2021). Measuring the Digital Economy and Society: A Study on the Application of the Digital Economy and Society Index in the Western Balkans. *14th International Conference on Theory and Practice of Electronic Governance*, Athens, 6-8 October 2021, 190-197. <https://doi.org/10.1145/3494193.3494220>
- [11] 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.
- [12] 夏子惠, 古丽娜尔·玉素甫. 数字经济对中国绿色能源效率的影响——基于中介和门槛效应的分析[J]. 技术经济与管理研究, 2022(10): 3-9.
- [13] Nambisan, S., Lyytinen, K., Majchrzak, A. and Song, M. (2017) Digital Innovation Management: Reinventing Innovation Management Research in a Digital World. *MIS Quarterly*, 41, 223-238. <https://doi.org/10.25300/misq/2017/41:1.03>
- [14] 牛娜. 数字经济、技术创新与制造业绿色全要素生产率[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 河南大学, 2022.
- [15] 李凌杰. 数字经济发展对制造业绿色转型的影响研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2023.
- [16] 尚娟, 王珍梦. 数字经济赋能绿色经济发展的效应研究[J]. 生态经济, 2023, 39(3): 47-56.
- [17] Peitz, M. and Waldfogel, J. (2012) *The Oxford Handbook of the Digital Economy*. Oxford University Press.
- [18] 吴传清, 孟晓倩. 长江经济带数字化转型对制造业绿色发展影响研究[J]. 南通大学学报(社会科学版), 2022, 38(6): 37-47.
- [19] 韩树宇. 以数字技术赋能制造业绿色化转型[N]. 中国社会科学报, 2022-09-29(008).
- [20] 杨友才, 王玉聪, 魏涛. 数字经济是否提高了绿色全要素生产率? [J]. 学习与探索, 2022(12): 114-123.
- [21] 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.
- [22] 庄芹芹, 吴滨, 洪群联. 市场导向的绿色技术创新体系: 理论内涵、实践探索与推进策略[J]. 经济学家, 2020(11): 29-38.
- [23] 肖静, 曾萍, 章雷敏. 地区数字化水平、绿色技术创新与制造业绿色转型[J]. 华东经济管理, 2023, 37(4): 1-12.
- [24] 谢琨, 徐晓玲. 双重环境规制、绿色技术创新与制造业企业绿色全要素生产率[J]. 现代管理科学, 2023(3): 103-113.

- [25] 张军, 吴桂英, 张吉鹏. 中国省际物质资本存量估算: 1952-2000 [J]. 经济研究, 2004(10): 35-44.
- [26] 柏培文, 喻理. 数字经济发展与企业价格加成: 理论机制与经验事实[J]. 中国工业经济, 2021(11): 59-77.
- [27] 何地, 赵炫焯, 齐琦. 中国数字经济发展水平测度、时空格局与区域差异研究[J]. 工业技术经济, 2023, 42(3): 54-62.
- [28] 徐敏, 姜勇. 中国产业结构升级能缩小城乡消费差距吗? [J]. 数量经济技术经济研究, 2015, 32(3): 3-21.
- [29] 孙国锋, 潘珊珊, 徐瑾. 制造业投入数字化对绿色技术创新的影响——基于静态和动态的空间杜宾模型研究[J]. 中国软科学, 2022(10): 30-40.
- [30] 余泳泽, 郭梦华, 胡山. 社会失信环境与民营企业成长——来自城市失信人的经验证据[J]. 中国工业经济, 2020(9): 137-155.