

数字经济、技术创新与制造业绿色转型

李绍东, 刘永庆

(聊城大学 商学院, 山东 聊城 252001)

摘要: 数字经济的高创新性、高渗透性、高协同性可有效驱动制造业从传统发展模式转变为低碳、协调、可持续的绿色发展模式。使用我国 2006~2020 年 30 个省(市、自治区)的面板数据, 实证研究数字经济发展水平对制造业绿色转型的作用机制、影响路径及异质表现。研究发现: 数字经济发展水平对制造业绿色转型具有显著的直接促进作用, 且表现为较明显的区域异质性。同时, 技术创新在该过程中表现出部分中介效应。为推动制造业绿色转型, 应加快推进数字产业化, 提升产业数字化水平; 构建绿色低碳技术评估与交易体系, 打造数字经济治理新模式; 深入实施工业互联网创新发展战略; 实施区域差异化战略的同时兼顾区域协调发展。

关键词: 制造业绿色转型; 数字经济; 技术创新; SBM 模型; ML 指数

中图分类号: F424.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-1217 (2024) 04-0114-10

收稿日期: 2024-04-10

基金项目: 国家社会科学基金项目 (22BJY131); “双碳”目标下数字经济驱动我国制造业绿色转型的机制与路径研究。

作者简介: 李绍东 (1983-), 男, 山东聊城人, 聊城大学商学院副教授, 硕士生导师;

刘永庆 (2001-), 男, 山东德州人, 聊城大学商学院硕士研究生。

DOI:10.16284/j.cnki.cn37-1401/c.2024.04.005

随着 2020 年“双碳”目标的提出, 制造业绿色转型成为我国经济高质量发展的重要内容。我国制造业虽高速、高效、高质发展, 但是面临的资源配置不均、能源利用低下、环境污染严重等问题制约着制造业的绿色转型。数字经济通过信息网络的驱动、数字资源的整合、产业结构的优化与实体经济深度融合, 在供给及需求端形成规模经济效应、范围经济效应和长尾效应, 助推制造业高质量发展, 也为制造业绿色转型提供了明确的路径选择。因此, 本研究基于“双碳”目标, 以我国 2006~2020 年 30 个省(市、自治区)的制造业绿色转型为研究对象, 探究数字经济发展水平对制造业绿色转型的影响, 并选取技术创新作为中介变量, 考察技术创新在数字经济助推制造业绿色转型过程中的作用机制, 以期为我国制造业的绿色转型提供参考依据。

一、文献综述

随着我国经济进入新发展阶段, 数字经济与制造业绿色转型成为学术界关注的热点问题。梳理现有文献发现, 多数研究集中在数字经济赋能制造业高质量发展和数字经济驱动制造业绿色转型的路径机制等方面:

一是数字经济赋能制造业高质量发展的研究。现有文献主要集中在改善资本投入、优化要素结构、提升创新水平等方面。一方面, 数字技术的导入促进设备设施更新改造^①, 不断要求劳动者提升自身数字素养^②, 进而驱动制造业转型升级。另一方面, 数字经济通过改变传统生产制造模式, 再造企业组织模式和

①戴翔、杨双至:《数字赋能、数字投入来源与制造业绿色化转型》,《中国工业经济》2022 年第 9 期。

②陈南旭、李益:《数字经济对人力资本水平提升的影响研究》,《西北人口》2022 年第 6 期。

生产流程^①，缓解要素配置扭曲^②，促进产业转型升级。此外，数字经济的发展推动信息与知识的全面整合^③，在宏观提高管理能力、微观催生信息溢出两方面推动区域创新能力^④，进而促进技术变革，壮大新兴制造业，不断向高级化、智能化发展。

二是数字经济驱动制造业绿色转型的路径机制研究。新一代信息技术催生的脱硫脱硝、生态修复、污染源监测等绿色技术，可有效改善生产流程、工艺，增强产品及服务的市场吻合度^⑤，促使制造业向节能减排、降碳减污、节约集约方向转型升级。其中，技术创新作为制造业绿色转型的内生动力起到了不可替代的作用，技术变革有利于制造业整合要素资源、优化能源结构、改进生产效率^⑥。而数字经济可通过促进技术进步推动制造业绿色转型，也会扩大技术差距抑制绿色增长^⑦。因此，时刻关注区域环境变化，将制造业转型升级的负面影响降到最低，将是实现传统制造业“低碳发展与产业升级”双转型的关键路径。

综上所述，现有研究主要集中于微观数据的经验分析，侧重促进制造业高质量发展或转型升级，较少采用宏观数据开展区域数字经济的发展对制造业绿色转型的实证研究。据此，本文着重探究数字经济发展对制造业绿色转型的影响机制，并应用省级面板数据进行经验分析。与现有文献相比，可能的边际贡献在于：一是研究视角方面，基于“双碳”目标的视角，从数字经济出发，探究制造业绿色转型的影响路径，打造“数字中国”，助力“制造强国”建设。二是指标体系方面，从数字经济基础设施、应用程度和发展规模三个层面构建指标体系衡量数字经济发展水平，另外，采用考虑非期望产出的超效率 SBM 模型测算制造业绿色全要素生产率，作为制造业绿色转型的度量指标开展实证研究。三是研究内容方面，将技术创新作为中介变量，探究数字经济发展水平通过创新投入和创新产出对制造业绿色转型的作用机制，进一步从区位差异、数字经济发展差异等角度进行异质性分析。

二、理论分析与研究假设

数字经济以数字技术为驱动力，依托高创新性、高协同性、高渗透性的特点，为制造业绿色转型提供新工艺、新模式、新业态，不仅通过要素集约节约、产品实时监控及规模网络效应产生直接影响，还通过加大技术创新投入与优化技术创新产出实现间接影响。

（一）数字经济对制造业绿色转型的直接作用机制

数字经济发展迅猛的今天，信息、数据、知识融入生产、消费的各个阶段，准确应用数字经济可有效促进制造业绿色转型。首先，5G、物联网等数字经济基础设施可优化资源要素集约、节约化配置，以新技术为传统产业赋能提效。其次，数字经济应用程度的提升可以保证实时监控生产销售的各个环节，提高企业的品控能力，同时，数字经济衍生品的出现不断鼓励消费者直接参与产业设计、生产等阶段，打造产品全生命周期服务体系^⑧。最后，数字经济发展规模的扩大，触发网络效应，带来数字经济价值的指数型增长，不断替代和淘汰传统高污染和高耗能的落后产业，进而对产业进行全方位、全链条的智能化、清洁化改造，

① Heo, Pil Sun, and D. H. Lee, “Evolution of the linkage structure of ICT industry and its role in the economic system: the case of Korea”, *Information Technology for Development*, Vol.25, 2019, pp.424-454.

② 马中东、宁朝山：《数字经济、要素配置与制造业质量升级》，《经济体制改革》2020年第3期。

③ 付文字、李彦、赵景峰：《数字经济如何赋能中国制造业优化升级？》，《经济问题探索》2022年第11期。

④ 贺立龙、张馨月：《数字经济发展与城市制造业技术升级：影响机理与经验证据》，《当代经济研究》2022年第7期。

⑤ 刘丽、丁涛：《数字经济与产业绿色高质量发展——作用机制及区域异质研究》，《技术经济与管理研究》2022年第3期。

⑥ 张平淡、屠西伟：《制造业集聚、技术进步与企业全要素能源效率》，《中国工业经济》2022年第7期。

⑦ 李健旋、姚伟之：《数字基础设施投入对中国制造业绿色增长的影响：空间效应与机制分析》，《科学学与科学技术管理》2022年第8期。

⑧ 汪立鑫、孟彩霞：《创新能力、劳动力成本与地区制造业智能化转型》，《科学学研究》2023年第8期。

实现生产效率和节能减排“双提升”。

基于此，提出如下研究假设：

H1：数字经济发展水平对制造业绿色转型具有显著的促进作用。

（二）数字经济对制造业绿色转型的间接作用机制

数字经济通过“加大创新投入—提升创新效率—优化创新产出”驱动制造业实现绿色转型。一方面，创新活动本身需要企业投入大量人员、资金等要素，基于数字经济的创新活动可有效配置要素投入，不断改善企业结构，建立高度互联互通的网络化机制，提高企业全要素生产率，同时，创新效应不断向上下游延伸，通过关联效应不断形成创新生态系统，实现产业链供应链协同创新。另一方面，数字经济本身具有的高创新性使其成为制造业技术创新的重要引擎，通过扩散效应产生创新激励，加速推动制造业领域的绿色低碳技术实现突破。另外，数字经济的高渗透性带动企业创新不断深入产品生产、销售服务、风险管理等各个方面，促进企业高质、高效、绿色发展，同时，数字经济的高协同性带动的绿色技术创新在制造业绿色转型进程中不断发挥作用，助力实现效益最大、能耗最低的绿色化生产制造。

基于此，提出如下研究假设：

H2：数字经济发展水平可有效提高创新投入、优化创新产出，进而促进制造业绿色转型。

三、模型设计与变量选择

（一）模型构建

基于上文理论分析，为探究数字经济发展水平对制造业绿色转型的影响机制，构建以下基本计量模型：

$$GTFP_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 DEL_{it} + \alpha_2 controls_{it} + \epsilon_{it} \quad (1)$$

其中， $GTFP_{it}$ 表示 i 省份在第 t 年的制造业绿色全要素生产率，以此衡量各地区制造业绿色转型水平； DEL_{it} 表示 i 省份在第 t 年的数字经济发展水平； $controls_{it}$ 表示一系列产业和区域层面的控制变量； ϵ_{it} 表示随个体和时间而独立变化的随机变量； i 表示省份； t 表示年份。在此基础上，为了进一步检验数字经济发展是否通过提高产业技术创新进而影响制造业绿色转型，参考温忠麟（2004）^①关于中介效应检验机制的做法，构建如下计量模型：

$$TI_{it} = \beta_0 + \beta_1 DEL_{it} + \beta_2 controls_{it} + \epsilon_{it} \quad (2)$$

$$GTFP_{it} = \gamma_0 + \gamma_1 DEL_{it} + \gamma_2 TI_{it} + \gamma_3 controls_{it} + \epsilon_{it} \quad (3)$$

（二）变量界定

1. 被解释变量

制造业绿色转型（GTFP）。由于绿色全要素生产率与传统的全要素生产率相比，考虑了制造业快速发展带来的环境代价，可以有效评价制造业绿色转型水平，故选其作为被解释变量的代理指标。

本文参考 Chung 等（1997）^②研究方法，运用方向性距离函数计算 Malmquist-Luenberger 指数（ML 指数），即采用非径向、非角度的 SBM 距离函数下的 ML 指数测算“双碳”目标下中国制造业绿色全要素生产率。

2. 核心解释变量

数字经济发展水平（DEL）。目前，学术界对数字经济的发展尚未形成统一的评价体系，考虑到数字经济的本质是通过数据要素，催生组织生产及商业模式变革，基于这一理念，本文参考李文君（2003）等学者的相关研究从数字经济基础设施（Dei）、应用程度（Dea）和发展规模（Des）三个维度构建综合评价指标体系，并采用全局熵值法测算出各省（市、自治区）数字经济发展综合水平，如表 1 所示。

^①温忠麟、张雷、侯杰泰、刘红云：《中介效应检验程序及其应用》，《心理学报》2004 年第 5 期。

^②Chung Y, Fare R, “Productivity and Undesirable Outputs: A Directional Distance Function Approach”, *Journal of Environmental Management*, Vol. 51, No.3, 1997, pp.229-240.

表 1 数字经济发展水平综合评价指标体系

目标层	一级指标	二级指标	单位	属性	来源
数字经济 发展水平	数字经济 基础设施	互联网宽带接入端口	万个	正向	李文君 ^①
		长途光缆线路长度	公里	正向	汪晓文等 ^②
		移动电话交换机容量	万户	正向	陈晓峰 ^③
	数字经济 应用程度	移动电话普及率	部/百人	正向	李文君 ^②
		互联网宽带接入用户	万户	正向	汪晓文等 ^③
		移动短信业务量	亿条	正向	李治国等 ^④
	数字经济 发展规模	主营业务收入	亿元	正向	范晓莉和李秋芳 ^⑤
		人均电信业务量	亿元	正向	余东华和王梅娟 ^⑥
		固定资产投资	亿元	正向	——
		从业人员占比	%	正向	李文君 ^②

注：①李文君：《数字经济发展对创新能力的空间溢出效应分析——基于省际面板数据的实证研究》，《大连理工大学学报（社会科学版）》2023年第6期。②汪晓文、陈明月、陈南旭：《数字经济、绿色技术创新与产业结构升级》，《经济问题》2023年第1期。③陈晓峰：《数字经济发展对我国制造业升级的影响——基于省际面板数据的经验考察》，《南通大学学报（社会科学版）》2022年第3期。④李治国、霍冉、周行：《数字经济、能源生产率与高质量发展——基于黄河流域面板数据的实证研究》，《河南师范大学学报（自然科学版）》2023年第2期。⑤范晓莉、李秋芳：《数字经济对产业结构转型升级的影响——基于中国省级面板数据的实证分析》，《现代管理科学》2021年第7期。⑥余东华、王梅娟：《数字经济、企业家精神与制造业高质量发展》，《改革》2022年第7期。

3. 控制变量

参考何凌云等^①、余东华等^②和陈晓峰^③相关研究，本文纳入以下产业层面的控制变量：产业发展规模（Sid），采用制造业年末从业人数取对数衡量；产业资产负债率（Iar），采用产业负债总计与资产总计的比值衡量；产业盈利水平（Pil），采用产业利润总额与营业收入的比值衡量。此外，为使实证结果不受区域层面差异的影响，本文进一步纳入区域层面的控制变量：城镇化水平（Url），采用城镇人口数占总人口数的比重衡量；基础设施水平（Inl），采用公路和铁路营业里程数之和与区域面积的比值衡量；政府参与程度（Dgi），采用地方一般公共服务预算支出占地区生产总值的比重衡量；外贸依存度（Ftd），采用货物进出口总额占GDP的比重衡量。

4. 中介变量

技术创新（TI）。参考李健等的研究，从创新投入（Inin）和创新产出（Inout）两个方面衡量企业技术创新能力。本文借鉴傅为忠等的研究^④，选取研发经费投入强度（R&D经费支出/工业主营业务收入）作为衡量创新投入的指标，选取新产品销售收入（ln）作为衡量创新产出的指标。

（三）数据来源

本文使用的数据主要来源于历年的《中国统计年鉴》《中国工业统计年鉴》《中国科技统计年鉴》《中国人口和就业统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国能源统计年鉴》和《中国区域经济统计年鉴》以及各省份的统计年鉴、统计公报。考虑到统计的科学性和口径的一致性及数据的可获得性，将面板数据的时间跨度设定为2006~2020年。由于港、澳、台数据难以获取且西藏地区多个指标数据缺失，最终的地区样本为除

①何凌云、祁晓凤：《环境规制与绿色全要素生产率——来自中国工业企业的证据》，《经济学动态》2022年第6期。

②余东华、王梅娟：《数字经济、企业家精神与制造业高质量发展》，《改革》2022年第7期。

③陈晓峰：《数字经济发展对我国制造业升级的影响——基于省际面板数据的经验考察》，《南通大学学报（社会科学版）》2022年第3期。

④傅为忠、刘瑶：《产业数字化与制造业高质量发展耦合协调研究——基于长三角区域的实证分析》，《华东经济管理》2021年第12期。

港、澳、台、西藏之外的 30 个省（市、自治区），并对少量的缺失数据采用插值法进行填补。

（四）变量统计结果

使用 stata15.0 对上述变量进行描述性统计，如表 2 所示，变量结果趋于平稳，可进行后续分析。

表 2 变量的描述性统计结果

变量	Variable	Mean	Std.	Min	Max	Observations
制造业绿色转型	GTFP	4.579	5.140	1.023	41.025	450
数字经济发展水平	DEL	0.174	0.121	0.025	0.722	450
数字经济基础设施	Dei	0.215	0.158	0.013	0.892	450
数字经济应用程度	Dea	0.218	0.157	0.014	0.897	450
数字经济发展规模	Des	0.136	0.113	0.022	0.806	450
创新投入	Inin	0.721	0.353	0.059	1.900	450
创新产出	Inout	16.556	1.603	11.358	19.909	450
产业发展规模	Sid	13.648	1.055	11.114	16.138	450
产业资产负债率	Iar	0.582	0.055	0.389	0.761	450
产业盈利水平	Pil	0.068	0.031	-0.221	0.220	450
城镇化水平	Url	55.769	13.726	27.460	89.600	450
基础设施水平	Inl	0.924	0.503	0.068	2.223	450
政府参与程度	Dgi	0.154	0.100	0.053	0.643	450
外贸依存度	Ftd	0.110	0.168	0.005	1.053	450

四、基准回归分析

（一）基准回归结果

对（1）式进行基准回归，如表 3 所示，F 检验的值为 13.31 等， $p<0.01$ ，则在 1% 的显著性水平下，舍弃混合效应模型，选择固定效应模型；Hausman 检验的值为 47.99 等， $p<0.01$ ，故在 1% 的显著性水平下，舍弃随机效应模型，选择固定效应模型。

表 3 基准回归结果

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
DEL	16.033 ***	12.097 **						
	(4.26)	(2.12)						
Dei			2.253	-3.262				
			(0.75)	(-1.00)				
Dea					5.919 **	-1.819		
					(2.01)	(-0.51)		
Des							18.307 ***	36.469 ***
							(5.70)	(6.01)
Controls	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Year FE	No	Yes	No	Yes	No	Yes	No	Yes
Constant	76.741 ***	80.346 ***	83.816 ***	66.554 ***	83.598 ***	68.725 ***	59.407 ***	77.630 ***
	(6.63)	(5.20)	(6.89)	(4.27)	(7.11)	(4.39)	(4.96)	(5.42)

Obs	450	450	450	450	450	450	450	450
R ²	0.555	0.573	0.536	0.569	0.540	0.568	0.570	0.604
F	13.31***	9.03***	14.39***	9.78***	15.08***	9.76***	15.71***	9.05***
Hausman	47.99***	23.62***	63.64***	21.67**	57.25***	21.57**	75.10***	30.72***
	[0.0000]	[0.0049]	[0.0000]	[0.0100]	[0.0000]	[0.0103]	[0.0000]	[0.0003]

注：***、**、*分别表示 $p < 0.01$ 、 $p < 0.05$ 、 $p < 0.1$ ；() 内为 t 值；[] 内为 p 值。

表 3 中第 (1) 列的回归结果显示，数字经济发展水平对制造业绿色转型具有正向的促进作用，且通过了 1% 的显著性检验。为了保证回归的结果的准确性，在 (1) 式的基础上控制年份固定效应，并进行回归估计如表 4 第 (2) 列所示，虽然数字经济对绿色转型水平的回归系数较 (1) 列有所下降，但仍在 1% 的水平下显著，说明数字经济的发展确实能有效提高制造业绿色转型效率，假设 H1 得到验证。进一步，将数字经济发展水平划分为基础设施水平、应用程度水平和发展规模水平，如表 3 第 (3) ~ (8) 列所示，数字经济基础设施水平对制造业绿色转型不管是否控制年份固定效应，回归结果均不显著；数字经济应用程度水平对制造业绿色转型的影响在不控制年份固定效应时通过了 5% 的显著性检验；数字经济发展规模水平对制造业绿色转型的影响均通过了 1% 的显著性检验，且在控制年份固定效应后，回归系数显著提升。总之，数字经济发展水平对提升制造业绿色转型效率的作用机制主要来源于数字经济发展规模，较少来源于数字经济应用程度，由于数字经济基础设施的建设为数字经济的应用和发展提供了重要保障，而制造业绿色转型效率的提升主要取决于在已有基础上的创新，受数字经济基础设施建设的水平影响较小，但易受数字经济发展规模的影响。目前，大部分制造业企业均有一定的制造基础和数字水平，其绿色全要素生产率的提升主要靠制造业企业转型升级，这必然依赖于数字经济的应用与发展，数字经济可以借助数智化改造传统生产要素的投入，不断探索最佳要素组合，提高生产效率，还可以通过污染物监控、资源回收利用等技术减少生产过程中的非期望产出，稳定并降低碳排放，助力制造业绿色转型。

(二) 稳健性分析

1. 更换变量

考虑到回归结果可能存在偏差，为保证数据的可靠性，采用更换变量法对模型进行稳健性检验。一是更换被解释变量，参考张鹤等^①的做法，绿色全要素生产率的测算中资本投入采用“永续盘存法”进行估计，借鉴单豪杰的做法^②，各省资本存量的计算公式为 $K_{it} = K_{it-1}(1 - \delta_{it}) + I_{it}$ ，其中，基期资本存量 K_{i0} 采用各省 2001 年的实际资本形成额比上平均折旧率 10.96% 与 2001—2005 年间投资增长率的平均值之和；当期投资额 I_{it} 选用“固定资本形成总额”来衡量，2017 年之后的数据使用增长指数计算投资数据；经济折旧率 δ 使用 10.96%。二是更换解释变量，选择“移动电话普及率 (Dea_1)”和“从业人员占比 (Des_1)”作为数字经济发展水平的代理变量。

表 4 稳健性检验结果

	(1)	(2)	(3)
DEL	12.224***		
	(4.02)		
Dea_1		2.035*	
		(1.75)	
Des_1			5.970***
			(5.84)
Controls	Yes	Yes	Yes

①张鹤、杨雪梅、郑跃朋：《环境规制对绿色全要素生产率影响研究》，《价格理论与实践》2022 年第 10 期。

②单豪杰：《中国资本存量 K 的再估算：1952~2006 年》，《数量经济技术经济研究》2008 年第 10 期。

Constant	72.325***	87.233***	82.871***
	(7.74)	(7.16)	(7.33)
Obs	450	450	450
R ²	0.538	0.539	0.571

注：***、**、*分别表示 $p < 0.01$ 、 $p < 0.05$ 、 $p < 0.1$ ；（）内为 t 值。

从表 4 的回归结果中可以看出，不管是更换解释变量还是被解释变量，数字经济发展水平对制造业绿色转型的影响系数为正，且通过了显著性检验，与前文结果一致，表明上述回归结果稳健。

2.内生性检验

在基准回归分析中通过控制年份固定效应，在一定程度上减少了内生性的影响，但仍存在双向因果关系和遗漏变量等内生性估计偏误，因此，本文采用以下方法检验是否存在内生性问题：第一，考虑数字经济发展对制造业绿色转型的影响在时间上存在滞后性，对解释变量进行滞后一期处理，重新回归；第二，采用工具变量法检验内生性引起的估计偏误，借鉴柏培文等^①的思路，使用 1984 年各省邮局数乘以互联网端口数作为工具变量（IV），使用两阶段最小二乘法（2SLS）进行估计。回归估计结果如表 5 所示。

表 5 内生性检验结果

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)		(6)
					第一阶段	第二阶段	
L.DEL	16.239***						
	(3.55)						
L.Dei		4.495					
		(1.37)					
L.Dea			6.273*				
			(1.75)				
L.Des				18.938***			
				(4.51)			
DEL						71.299***	12.097**
						(9.09)	(2.12)
第一阶段 IV					0.039***		
					(9.64)		
Made in China 2025							3.956**
							(1.78)
Controls	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Constant	83.450***	89.673***	89.083***	68.299***	53.571***	53.571***	80.346***
	(6.71)	(6.93)	(7.00)	(5.30)	(6.82)	(6.82)	(5.20)
Obs	420	420	420	420	450	450	450
R ²	0.544	0.531	0.532	0.553	0.048	0.048	0.573
Robust F						65.861***	

注：***、**、*分别表示 $p < 0.01$ 、 $p < 0.05$ 、 $p < 0.1$ ；（）内为 t 值。

表 5 第（1）～（4）列显示了解释变量进行滞后一期的回归结果，数字经济发展水平对制造业绿色转型效率的回归系数为正，且通过了 1% 的显著性检验；表 5 第（5）列显示了利用工具变量的 2SLS 估计结果，解释变量的回归系数显著为正，且工具变量通过了识别不足和弱工具变量的检验。综上所述，数字经济发展水平对制造业绿色转型的影响显著为正，与基准回归结果一致，即在克服内生性问题后，本文的结果依然保持稳健。

^①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》，《中国工业经济》2021 年第 11 期。

3.外生冲击

上文提到我国于 2015 年提出《中国制造 2025》，部分企业意识打造具有国际竞争力的制造业对于自身发展的重要性，一定程度上影响了制造业企业的战略目标，而报告指出未来需大力推进制造业结构调整、提高技术创新能力、全面推行绿色制造，这对制造业企业实施绿色转型具有一定的促进作用。据此，生成文件出台的虚拟变量，将《中国制造 2025》印发之前设定为 0，印发之后设定为 1，并将该虚拟变量带入回归方程，回归结果如表 5 第（6）列所示，《中国制造 2025》的出台确实促进了制造业绿色转型。

总之，基于上述各类稳健性检验的结果，可以认为数字经济的发展可以有效促进制造业绿色转型，进一步验证了前文的假设。

（三）机制分析

以上分析详细阐述了数字经济的发展对制造业绿色转型效率的直接影响，进一步，为探究数字经济发展水平是否通过影响技术创新作用于制造业绿色转型，对（2）、（3）式进行回归估计，如表 6 所示。

表 6 中介效应检验及结果

	(1)	(2)	(3)	(4)
	Inin	GTFP	Inout	GTFP
DEL	1.818***	11.418***	1.459***	14.739***
	(11.81)	(2.63)	(3.56)	(3.87)
Inin		2.539**		
		(2.12)		
Inout				0.887**
				(1.97)
Controls	Yes	Yes	Yes	Yes
Constant	-1.034**	79.366***	4.267***	72.955***
	(-2.19)	(6.85)	(3.39)	(6.24)
中介效应（效应大小）	部分中介效应（0.288）		部分中介效应（0.081）	
Bootstrap 检验	Z= 2.13, P=0.033		Z=2.23, P=0.026	
置信区间（BCa）	[1.026, 9.715]		[0.653, 8.986]	
Obs	450	450	450	450
R ²	0.777	0.560	0.760	0.559

注：***、**、* 分别表示 $p<0.01$ 、 $p<0.05$ 、 $p<0.1$ ；（）内为 t 值。

由表 6 中介效应的检验结果可知，创新投入与创新产出在数字经济影响制造业绿色转型中起到了部分中介效应。具体来看：

表 6 第（1）列结果显示，数字经济可以促进企业加大创新投入。第（2）列结果表明，创新投入对制造业绿色转型具有正向的促进作用，且通过了 5% 的显著性检验。进一步，采用 Bootstrap 检验自助抽样 500 次检验中介效应是否显著，检验结果拒绝原假设，中介效应显著，BCa 法测算的置信区间同样可以验证中介效应的显著性，即数字经济发展水平将提高企业创新投入力度助力制造业绿色转型，假说 H2 部分得证。同时，经检验中介效应的占比大小为 28.8%，数字经济的快速发展在提高创新投入力度的同时，不断增强产业主体的创新意识和效率，而制造业通过数字经济赋能，促进自身的绿色性变革。

表 6 第（3）列结果显示，数字经济可以培养企业创新产出能力。第（4）列结果表明，创新产出对制造业绿色转型同样具有正向的促进作用，进一步，由 Bootstrap 检验结果可知，创新产出的中介效应显著，同样的，置信区间保持在合理范围内，即数字经济的发展可以通过提高企业创新产出进而促进制造业绿色转型，假设 H2 得证。同时，中介效应的占比大小为 8.1%，数字经济赋能制造业绿色转型之际，提高自身数智化水平，打通国内国际产业链供应链，不断以低成本、高质量、高利润的水准快速占领市场。

（四）异质性分析

考虑到区域外部环境与数字经济发展水平的差异化，本文从区位因素、数字经济发展（基础设施、应用程度、发展规模）等维度进行异质性检验，回归估计结果如表 7 所示。

表 7 区位及数字经济的异质性检验结果

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
	东部地区	中部地区	西部地区	低 Dei	高 Dei	低 Dea	高 Dea	低 Des	高 Des
DEL	48.290***	15.628	20.745***	49.901***	0.265	25.485*	31.329***	7.953	37.171***
	(6.44)	(0.72)	(2.85)	(9.50)	(0.02)	(1.69)	(3.16)	(1.04)	(3.63)
Controls	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Year FE	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Constant	166.905***	74.281*	-29.509	45.983***	-1.436	29.261	143.075***	25.499**	166.808***
	(7.22)	(1.70)	(-1.07)	(5.26)	(-0.03)	(1.65)	(5.98)	(2.38)	(7.09)
Obs	165	150	135	278	172	284	166	300	150
R ²	0.735	0.586	0.815	0.777	0.632	0.514	0.741	0.536	0.742

注：***、**、* 分别表示 $p < 0.01$ 、 $p < 0.05$ 、 $p < 0.1$ ；() 内为 t 值。

由表 7 第 (1) ~ (3) 列可知，在控制时间固定效应之后，区位差异影响数字经济对制造业绿色转型的促进作用，且影响效果与陈晓峰（2022）的研究结论基本一致。具体来看：数字经济对制造业绿色转型的影响主要在东部和西部地区显著，在中部地区不显著，原因可能是：一方面，东部地区产业基础雄厚、数字化程度高，有利于助力企业绿色转型；一方面，由于像西部大开发战略等一系列政策偏移，使得西部地区更好的抓住风口浪尖，大力发展优势产业；另一方面，对于中部地区而言，人才储备不足、政策缺乏引导、市场一体化程度低导致难以适应数字经济的迅速发展，尤其是制造业企业，存在产业结构不合理、技术创新落后等问题，较难把握机遇实施绿色转型。进一步，东部地区的影响系数相较于西部地区高达一倍之多，造成这种差异的结果不言而喻，虽然国家政策上一致在往西部地偏移，但是由于东部地区基础雄厚、高科技人才东漂以及沿海地区对外开放便捷，使得东部地区较快落实国家政策，技术创新水平走在全国前列，对数字经济的敏感性更高，且生产效率具有更大的升级空间，可以更加准确有效的适应当前形势，以更高水平发展绿色、节能、环保、高效、高质的制造业。

表 7 第 (4) ~ (9) 列分别为数字经济基础设施、应用程度、发展规模在划分高水平 and 低水平之后的回归估计结果。具体来看：数字经济基础设施发展水平越高，其对制造业绿色转型的影响越低，究其原因主要是数字经济的发展在促进制造业绿色转型中发挥作用的主要是其未来的发展潜力以及对技术创新的促进程度，而基础设施建设对于有一定产业基础和创新能力的企业来说，其发展水平的提高如果未能增加企业或社会期望，便会造成资源外溢，反而不利于企业提高绿色全要素生产率，换句话说，仅有高投入，没有高产出的企业不是绿色化的企业。相反，数字经济应用程度和发展规模就不存在这一问题，其发展水平越高，对制造业绿色转型的影响就越显著，其中，高水平的数字经济对制造业绿色转型的影响系数接近，可见，对于有一定基础和创新的企业来说，数字经济发展机遇的准确识别与数智化的正确导入对自身绿色转型的促进作用尤为突出。

五、研究结论与启示

本文从数字经济入手，探究了其对制造业绿色转型的直接影响和间接影响及作用机制，主要得出如下研究结论：第一，从整体看，数字经济发展水平对制造业绿色转型具有积极的促进作用，且影响效果主要来源于数字经济发展规模和数字经济应用程度；第二，从作用机制看，技术创新在数字经济助推制造业绿色转型的作用机制中起到了部分中介效应，数字经济可通过加大企业创新投入、提高企业创新产出助力制

制造业绿色转型；第三，从异质性来看，东部的数字经济发展效益更为显著，数字经济应用程度和发展规模的水平越高，越有利于企业进行绿色转型。

结合研究结论，本文得出如下研究启示：一是加快推进数字产业化，优化产业数字化水平。把握新一轮科技革命和产业变革新机遇，推动数字经济与实体经济深度融合，催生制造业形成新业态、新模式；二是打造数字经济治理体系。借助新一代信息技术，构建绿色低碳技术评估与交易体系，优化绿色低碳政策定位，形成新时代下数字经济治理模式，助力制造业健康、绿色、可持续发展；三是深入实施工业互联网创新发展战略。不断发挥数据的创新引擎作用，打好关键核心技术攻坚战，推动制造业企业生产工艺、模式、方式转型升级，助力质量变革、效率变革、动力变革；四是因地制宜，协调发展。统筹完善区域政策体系，促进要素合理流动和高效集聚，推动西部地区形成大保护、大开放的新格局，抓住政策机遇，大力发展高质量制造业，推进中部地区供给侧结构性改革，提高自主创新能力，承接新兴制造业产业布局与转移，鼓励东部地区加快推动制造业现代化，培育世界级先进制造业集群，优先推进制造业绿色转型。

Digital Economy, Technology Innovation and Green Transformation of Manufacturing Industry

LI Shao-dong, LIU Yong-qing

(School of Business, Liaocheng University, Liaocheng, 252001, China)

Abstract: The high innovation, penetration and synergy of the digital economy can effectively drive the transformation of the manufacturing industry from the traditional development model to a low-carbon, coordinated and sustainable green development model. This study uses panel data from 30 provinces (municipalities and autonomous regions) in China from 2006 to 2020 to empirically investigate the mechanisms, impact paths and heterogeneous performance of the level of development of the digital economy on the green transformation of the manufacturing industry. It is found that the level of digital economy development has a significant direct contribution to the green transformation of the manufacturing industry, and shows a more obvious regional heterogeneity. At the same time, technological innovation shows a partial mediating effect in the process. In order to promote the green transformation of the manufacturing industry, we should accelerate the digital industrialisation and enhance the level of industrial digitalization; build a green and low-carbon technology assessment and trading system and create a new mode of the digital economy governance; thoroughly implement the industrial internet innovation and development strategy; and implement regional differentiation strategies while taking into account the coordinated regional development.

Key words: green transformation of manufacturing; digital economy; technology innovation; SBM Model; Malmquist-Luenberger Index

[责任编辑 山阳]