

数字化转型对制造业全要素碳生产率的影响研究

易其国 杨晨姝*

贵州财经大学经济学院

DOI:10.32629/ej.v9i5.3528

[摘要] 在“双碳”目标与数字经济融合背景下,制造业数字化转型与全要素碳生产率提升的协同路径成为关键议题。当前制造业转型存在区域、规模差异,二者内在机制尚未明确。本文以2014–2024年A股制造业上市公司为样本,采用DEA–Malmquist指数法测度全要素碳生产率,结合双向固定效应、中介效应进行实证检验。结果表明:数字化转型显著提升全要素碳生产率,通过“双重直接机制”——技术创新降低绿色研发成本、管理优化减少资源浪费。

[关键词] 数字化转型; 全要素碳生产率; 作用机制

中图分类号: O623.662 **文献标识码:** A

Research on the Impact of Digital Transformation on Total Factor Carbon Productivity in the Manufacturing Sector

Qiguo Yi Chenshu Yang*

School of Economics, Guizhou University of Finance and Economics

[Abstract] Under the background of the integration of the “dual carbon” goals and the digital economy, the synergistic path of digital transformation in manufacturing and the improvement of total factor carbon productivity has become a key issue. Currently, there are regional and scale differences in the transformation of the manufacturing industry, and the underlying mechanisms have not yet been clearly established. This paper takes A-share manufacturing listed companies from 2014 to 2024 as the sample, uses the DEA–Malmquist index method to measure total factor carbon productivity, and conducts empirical tests by combining two-way fixed effects and mediation effects. The results show that digital transformation significantly improves total factor carbon productivity through a “dual direct mechanism”: technological innovation reduces the cost of green research and development, and management optimization reduces resource waste.

[Key words] digital transformation; total factor carbon productivity; mechanisms of impact

1 引言

在全球积极应对气候变化与“双碳”目标背景下,制造业作为碳排放主力(占比超80%)亟需绿色转型。以大数据、人工智能为代表的数字技术,凭借强渗透与赋能作用,正深刻改变制造业要素结构。数字化转型通过智能化生产与精准管理,有望在提升效率的同时降低碳排放,成为“降碳增效”的关键路径。但其能否实现双重目标,取决于技术创新与管理优化等机制。因此,厘清其对全要素碳生产率的影响机制,对促进制造业绿色协同发展意义重大。

现有研究已从多维度探讨数字化转型与碳生产率的关系。测度方法上,早期侧重资本投入如IT支出占比^[1],近年来构建了涵盖数字化人才储备与应用深度的综合指标体系^{[2][3]}。作用机制方面,主要聚焦技术赋能与管理重构,前者降低绿色创新门槛^[4],后者优化排程、提升供应链协同效率^[5]。此外,数字化转型还具

有显著的空间与网络外部性^[6]。碳生产率测度广泛采用数据包络分析与随机前沿分析,全要素碳生产率受技术创新、产业结构、管理效率及环境政策等多重因素影响^{[7][8][9]}。尽管成果丰硕,但多数现有研究主要基于区域或行业数据,对企业内部微观机制揭示不充分。因此,深入厘清数字化转型对制造业全要素碳生产率的作用机理,对推动制造业绿色协同发展及“双碳”战略实施具有重要意义。

2 理论分析与研究假设

2.1 数字化转型对制造业全要素碳生产率的直接影响

数字化转型是企业运用数字技术的系统性变革。在“双碳”背景下,制造业作为碳排放核心领域,其数字化转型与低碳发展协同路径成为关键议题。数字化转型对全要素碳生产率的直接影响体现在四个维度:一是高效利用企业资源,通过MBD协同设计、增材制造等技术减少消耗;二是构建智慧能源管理系统,

借助物联网、工业机器人实时监控能耗；三是引领商业模式创新,通过云制造、数字营销实现“去物质化”；四是加速新能源使用,依靠智能电网、区块链等技术促进可再生能源接纳^[10]。数字技术凭借提升效率与促进绿色创新,在制造业中呈现扩散特征,推动产业向低碳化演进。基于此,本文提出假设:

H1: 数字化转型对制造业企业全要素碳生产率具有显著正向影响。

2.2 数字化转型影响制造业全要素碳生产率的中介机制

2.2.1 技术创新的中介作用

数字化转型通过双重路径促进企业绿色技术创新:一方面,数字基础设施降低创新成本,提升研发意愿;另一方面,数字技术赋能研发与生产环节,为绿色创新提供支撑^[11]。技术创新进而推动低碳工艺改良与智能系统研发,直接提升单位产出的碳利用效率^[12]。由此,数字化转型通过促进技术创新提升全要素碳生产率。据此,本文提出假设。

H2: 数字化转型通过促进技术创新提升制造业全要素碳生产率。

2.2.2 管理优化的中介作用

在管理优化层面,数字化工具实时监测能耗与排放数据,减少资源浪费^[13]。管理优化通过提升供应链效率,包括提高供需匹配度、加速知识流通、提高资产利用效率等路径^[14],短期降低运营成本,长期释放资源用于创新。此外,数字化转型还能降低供应链集中度、优化供应链金融^[15],共同促进碳生产率提升,实现降碳增效。据此,本文提出以下假设:

H3: 数字化转型通过推动管理优化提升制造业全要素碳生产率。

3 研究设计

3.1 数据选取

本研究选取2014—2024年A股制造业上市公司为样本。企业年报用于构建数字化转型变量;《中国工业统计年鉴》提供能耗数据;CEADs数据库提供碳排放数据;万数据库提供财务数据作为控制变量。为确保结果可靠,剔除财务异常的ST公司。最终获得2014—2024年832家制造业企业平衡面板数据,共8320个观测值。

3.2 变量选取

3.2.1 被解释变量: 全要素碳生产率(TFCP)

本文以制造业企业全要素碳生产率衡量碳排放约束下的综合生产效率,采用DEA-Malmquist指数法测算^[16]。投入指标为固定资产净值、员工人数和总能耗;期望产出为工业增加值,非期望产出为CO₂排放量。该指标值越大,表明企业碳减排约束下的生产效率越高。

3.2.2 核心解释变量: 数字化转型(DT)

本文从数字技术投入、数字应用深度和数字人才储备三个维度构建数字化转型评价体系,采用熵值法综合测度。数字技术投入以IT支出占比衡量;数字应用深度通过智能制造项目数量和工业互联网平台部署情况合成;数字人才储备以数字岗位人

数占比衡量。

3.2.3 中介变量

本文设置技术创新和管理优化两个中介变量。技术创新从创新投入(研发投入强度)和创新产出(绿色专利申请数)^[17]两个维度,采用熵值法合成综合指数。管理优化从存货管理效率(存货周转率)和供应链协同效率(供应商数量波动率、供应链响应周期)两个维度,采用熵值法合成综合指数。

3.2.4 控制变量

参考既有研究^{[18][19]},本文选取以下控制变量:企业规模(Size)、资产负债率(Lev)、股权性质(SOE,国有企业=1)、行业竞争度(HHI)及区域碳政策强度(Policy,试点地区=2,省级低碳地区=1)。

3.3 模型构建

3.3.1 基准回归模型

为检验数字化转型对全要素碳生产率的总体影响,本文使用双向固定效应模型,同时控制企业个体与年份固定效应。

$$TFCP_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 DT_{it} + \sum_{j=1}^n \alpha_{1+j} control_{jit} + \mu_i + v_t + \epsilon_{it} \quad (1)$$

TFCP_{it}为全要素碳生产率,DT_{it}为数字化转型程度,control_{jit}为控制变量。 μ_i 和 v_t 分别控制个体与时间固定效应, ϵ_{it} 为随机扰动项。

3.3.2 中介效应模型

采用逐步回归法,依次检验数字化转型对技术创新与管理优化的影响,以及二者对全要素碳生产率的作用。

(1) 数字化转型对技术创新的影响

$$TI_t = \beta_0 + \beta_1 DT_t + \sum_{j=1}^n \beta_{1+j} control_{jit} + \mu_i + v_t + \epsilon_{it} \quad (2)$$

(2) 数字化转型对管理优化的影响

$$MO_{it} = \gamma_0 + \gamma_1 DT_{it} + \sum_{j=1}^n \gamma_{1+j} control_{jit} + \mu_i + v_t + \epsilon_{it} \quad (3)$$

其中,MO_{it}表示第i家企业在第t年的管理优化水平,通过熵值法合成MO1、MO2、MO3得到)。

(3) 技术创新对全要素碳生产率的影响:

$$TFCP_{it} = \delta_0 + \delta_1 DT_{it} + \delta_2 TI_{it} + \sum_{j=1}^n \delta_{2+j} control_{jit} + \sum_{j=1}^n \mu_i + v_t + \epsilon_{it} \quad (4)$$

(4) 管理优化对全要素碳生产率的影响:

$$TFCP_{it} = \theta_0 + \theta_1 DT_{it} + \theta_2 MO_{it} + \sum_{j=1}^n \theta_{2+j} control_{jit} + \mu_i + v_t + \epsilon_{it} \quad (5)$$

4 实证结果与分析

4.1 基准回归分析

双向固定效应模型显示,数字化转型对全要素碳生产率的影响在1%水平上显著为正,结果稳健。且列(1)系数为0.358,列(2)为0.326,表明数字化转型显著提升全要素碳生产率,假设H1得证。经济意义上,数字化转型每提高1个标准差,碳生产率提升约0.061。

表 1 基准回归结果

变量	(1)TFCP	(2) TFCP
DT	0.358***	0.326***
	(0.045)	(0.042)
Size		0.185***
		(0.031)
Lev		-0.098**
		(0.041)
SOE		0.023
		(0.035)
HHI		-0.156**
		(0.062)
Policy		0.213***
		(0.053)
Constant	0.742***	0.568***
	(0.138)	(0.125)
观测值	8320	8320
R ²	0.352	0.428
个体固定效应	是	是

表 2 稳健性分析结果表

变量	TFCP (new)	TFCP (2SLS)
DTnew	0.302***	
DT		0.318**
控制变量	是	是
Constant	0.593***	0.542***
N	8320	8320
Adjusted R ²	0.405	-
F 统计量	-	286.35***
Kleibergen-Paap rk LM 统计量	68.32***	
Kleibergen-Paap rk Wald F 统计量	25.68	

4.2稳健性检验

采用数字化文本词频替代熵值法指标发现数字化转型(DTnew)对全要素碳生产率的回归结果与基准回归结果基本一致。

为缓解内生性问题,本文以地区数字基础设施覆盖率为工具变量,采用两阶段最小二乘法进行估计。结果显示,数字化转型对全要素碳生产率的系数为0.318(p<0.01)。识别不足与弱工具变量检验均通过,表明工具变量合理有效。结合稳健性检验,证实研究结论可靠。

4.3机制检验

为检验作用路径,本文采用逐步回归进行中介效应检验。列(1)中,DT对TI的系数为0.285(1%显著),表明数字化转型显著促进技术创新。列(2)中,DT对M0的系数为0.236(5%显著),表明数字化转型显著提升管理优化。列(3)加入TI后,DT系数降至0.215(1%显著),TI系数为0.187(1%显著),技术创新起部分中介作用,H2成立。列(4)加入M0后,DT系数降至0.242(1%显著),M0系数为0.153(5%显著),管理优化起中介作用,H3成立。Bootstrap检验进一步验证了中介效应的显著性。

表 3 中介效应检验结果表

变量	(1) TI	(2) MO	(3) TFCP	(4) TFCP
DT	0.285*** (0.038)	0.236** (0.032)	0.215*** (0.036)	0.242*** (0.039)
TI			0.187*** (0.041)	
MO				0.153** (0.037)
控制变量	是	是	是	是
个体固定效应	是	是	是	是
时间固定效应	是	是	是	是
观测值	8320	8320	8320	8320
R ²	0.386	0.352	0.467	0.453

5 结语

数字化转型显著提升制造业企业全要素碳生产率。企业通过整合数据与技术资源,优化生产流程,提高能源效率,降低单位产出碳排放。其作用通过双重机制实现:技术创新机制降低绿色研发成本,推动低碳工艺与智能系统研发;管理优化机制实现生产排程动态优化与碳足迹追溯,减少资源浪费。基于此,提出以下政策建议。

积极发展数字经济,发挥其对降低碳排放和提升效率的重要作用。应利用工业互联网与智能算法优化生产流程,提高能源使用效率,减少资源浪费与碳排放,推动制造业高质量发展;推进绿色技术创新,强化管理优化能力。数字化转型以科技创新推动产业创新,推广绿色产品与服务,依托大数据优化生产排程与碳足迹追溯,提升供应链协同效率,减少过程损耗与排放。

[参考文献]

[1]耿伟,刘晓茜,郭宇龙.数字服务贸易壁垒与中国制造业碳生产率[J].国际商务(对外经济贸易大学学报),2025,(04):1-21.

[2]姜玲,胡佳霖,张子略.数字经济的“降碳增效”效应及其实现路径:来自88个国家的实证研究[J].中国人口·资源与环境,2025,35(06):1-15.

[3]陈志建,申世敬,程玉浩.新型数字基础设施对碳生产率的影响——长江经济带例证[J].长江流域资源与环境,2024,33(09):1844-1859.

[4]黄宇宁.数字经济、低碳技术创新与全要素碳生产率[J].技术经济与管理研究,2023,(08):26-32.

[5]王韶华,李想,张伟.新质生产力对黄河流域农业全要素碳生产率的影响研究[J].郑州大学学报(哲学社会科学版),2024,57(06):70-77.

[6]王亮,刘凌燕,蒋依铮.数字经济对碳生产率的空间溢出效应[J].金融与经济,2023,(01):61-73.

[7]周玉玺,高瑞敏.乡村数字经济对农业全要素碳生产率的影响机制——以黄河流域为例[J].科技管理研究,2025,45(17):95-106.

[8]赵彦飞,王丽,李桢.“双碳”目标下中国农业碳生产率提升的组态路径研究[J].科技管理研究,2025,45(03):167-176.

[9]马少娟,何卓,许勇.数字化建设、平台经济与全要素碳生产率[J].统计与信息论坛,2025,40(05):47-59.

[10]田云,李慧婷,夏锐.数字普惠金融对农业碳生产率的影响[J].环境科学,2025,39(01):10.

[11]熊媛媛,余国新,谢树青.农业生产性服务对农业全要素碳生产率的提升效应[J].干旱区资源与环境,2025,39(11):21-32.

[12]白婉婷,陈建成,侯建.“双碳”目标下制造业数字化转型的碳减排效应研究[J].软科学,2024,38(8):114-120.

[13]陈洪波,张骁潇.国家大数据综合试验区如何促进城市绿色转型:基于碳排放量增速和碳生产率增幅的双重视角[J].中国软科学,2024,(11):172-188.

[14]白婉婷,陈建成,侯建.数字化转型对农业碳生产率的影响研究[J].中国农业资源与区划,2024,45(11):43-56.

[15]陈少晖,许誉丹.数字经济能否有效提高省域碳生产率?[J].东南学术,2024,(05):80-92+246.

[16]张丽君,张永礼.数字经济、高技术产业集聚与碳生产率[J].统计与决策,2025,41(08):23-28.

[17]胡汉辉,申杰.数字经济、绿色创新与“双碳”目标——“减排”和“增效”视角[J].南京财经大学学报,2023,(04):79-88.

[18]黎新伍,黎宁,谢云飞.数字经济、制造业集聚与碳生产率[J].中南财经政法大学学报,2022,(06):131-145.

[19]白雪洁,孙献贞.互联网发展影响全要素碳生产率:成本、创新还是需求引致[J].中国人口·资源与环境,2021,31(10):105-117.

作者简介:

易其国(1975--),男,湖北武汉人,博士,副教授,硕士生导师,

研究方向为资源环境与生态经济。

***通讯作者:**

杨晨姝(2001--),女,江西抚州人,硕士研究生,研究方向为资源环境与生态经济。