

智能化转型、绿色技术创新和全要素生产率： 基于光伏企业的实证研究

徐楚杰， 张爱琴， 张雯杰

(中北大学 经济与管理学院, 太原 030051)

摘要：在数字经济与实体经济加速融合、“双碳”目标持续推进的背景下,探究智能化转型如何推动企业绿色升级与效率提升,已成为实现高质量发展的关键议题。光伏产业作为绿色低碳转型的战略性新兴产业,同时具备技术密集、资本密集和绿色导向等特征,是观察智能化转型经济效应的重要窗口。基于2011—2024年中国A股光伏上市公司的面板数据,从“智能化投资”和“智能技术应用”两个维度构建智能化转型综合指标体系:一方面纳入企业智能化软硬件投入,另一方面通过对上市公司年报文本的关键词识别与语义分析提取智能技术应用指标,并采用熵值法加权合成智能化转型指数。同时,采用Levinsohn-Petrin(LP)方法测算企业全要素生产率(TFP),以有效缓解同时性偏误与测量误差引发的内生性问题。在此基础上,运用双向固定效应模型、工具变量法及机制检验模型,系统考察智能化转型对光伏企业全要素生产率的影响。研究发现,智能化转型显著提高了光伏企业的全要素生产率。机制分析表明,绿色技术创新在智能化转型与全要素生产率之间同时发挥了中介和调节作用,整体上强化了智能化转型对全要素生产率的促进效果,说明“智能+绿色”协同发展是实现效率跃升的关键路径。异质性分析结果显示,智能化转型的生产率提升效应在不同情况下存在显著差异:从企业所有制结构看,非国有企业比国有企业受益明显;从产业链分工环节看,中游企业生产率提升幅度高于上游和下游企业;从政策环境看,补贴退坡前的正向影响更为显著。研究揭示了绿色技术创新在智能化转型中的双重机制,拓展了企业数字化与绿色化融合研究的理论边界,并为差异化政策制定与企业实践提供了分层分类的实证依据。

关键词：智能化转型; 绿色技术创新; 光伏企业; 全要素生产率

中图分类号：F272; F42

文献标志码：A

文章编号：1004-3918(2026)02-0462-11

Intelligent Transformation, Green Technological Innovation, and Total Factor Productivity: Empirical Evidence from Photovoltaic Enterprises

XU Chujie, ZHANG Aiqin, ZHANG Wenjie

(College of Economics and Management, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Against the backdrop of the accelerating integration of the digital economy and the real economy, together with the continuous advancement of the “dual carbon” goals, exploring how intelligent transformation promotes corporate green upgrading and productivity improvement has become a crucial issue for achieving high-quality economic development. As a strategic emerging industry supporting the green and low-carbon transition, the photovoltaic (PV) sector is characterized by high technological intensity, substantial capital investment, and a strong

收稿日期: 2025-09-18

修回日期: 2026-01-11

接受日期: 2026-02-27

基金项目：教育部人文社会科学研究规划基金项目(24YJA630124); 山西省研究生教育创新计划研究生学术创新项目(2025XS446)

作者简介：徐楚杰(2002-),男,硕士研究生,主要研究方向为技术创新管理

通信作者：张爱琴(1975-),女,教授,博士,主要研究方向为技术创新管理,E-mail:zhangaiqin1975@163.com

引用格式：徐楚杰,张爱琴,张雯杰. 智能化转型、绿色技术创新和全要素生产率:基于光伏企业的实证研究[J]. 河南科学,2026,44(2): 462-472.

Xu C J, Zhang A Q, Zhang W J. Intelligent transformation, green technological innovation, and total factor productivity: Empirical evidence from photovoltaic enterprises[J]. Henan Science, 2026, 44(2): 462-472.

environmental orientation. These distinctive features make it an ideal empirical context for examining the economic consequences of intelligent transformation. Based on panel data of Chinese A-share listed photovoltaic enterprises from 2011 to 2024, this study constructs a comprehensive measurement system for intelligent transformation from two dimensions: intelligent investment and intelligent technology application. Specifically, the measurement incorporates firms' tangible investment in intelligent software and hardware assets, and further extracts detailed indicators of intelligent technology adoption through precise keyword identification and in-depth semantic analysis of annual reports. The entropy method is employed to synthesize these indicators into a composite index of intelligent transformation. Meanwhile, firm-level total factor productivity (TFP) is estimated using the Levinsohn-Petrin (LP) method, which effectively mitigates endogeneity concerns arising from simultaneity bias and measurement errors. On this basis, two-way fixed effect models, instrumental variable approaches, and mechanism analysis models are applied to systematically examine the impact of intelligent transformation on the TFP of photovoltaic enterprises. The empirical results demonstrate that intelligent transformation significantly enhances the total factor productivity of PV firms. Mechanism analysis reveals that green technological innovation plays both mediating and moderating roles in the relationship between intelligent transformation and TFP. On the one hand, intelligent transformation promotes green R&D activities and accelerates the application of environmentally friendly technologies, thereby indirectly improving productivity through green innovation. On the other hand, higher levels of green technological innovation strengthen the positive effect of intelligent transformation on productivity, suggesting that the synergistic development of "intelligence + greenness" constitutes a key pathway for achieving efficiency upgrading. Heterogeneity analysis further indicates that the productivity-enhancing effect of intelligent transformation varies across different contexts. From the perspective of ownership structure, the positive effect is more pronounced among non-state-owned enterprises than state-owned enterprises. From the viewpoint of value chain segmentation, firms located in the midstream segment experience greater productivity gains from intelligent transformation compared with upstream and downstream firms. In terms of policy environment, the positive impact of intelligent transformation on TFP is stronger before the phase-out of government subsidies than afterward. Overall, this study uncovers the dual mechanism of green technological innovation in the process of intelligent transformation and extends the theoretical boundaries of research on the integration of digitalization and green development. The findings provide differentiated empirical evidence for policy formulation and enterprise practice across ownership types, value chain positions, and policy cycles.

Key words: intelligent transformation; green technological innovation; photovoltaic enterprises; total factor productivity

0 引言

智能化转型是中国实现高质量发展目标的必由之路。2024年《中共中央 国务院关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见》指出:“支持企业利用数字智能技术实现产业转型升级”,为新时期产业智能化发展奠定了政策基础。在此基础上,党的二十届四中全会提出,建设现代化产业体系,巩固壮大实体经济根基。坚持把发展经济的着力点放在实体经济上,坚持智能化、绿色化、融合化方向。“十五五”发展规划的前瞻性研究与部署亦将智能化、绿色化、融合

化作为产业体系演进的重要方向,尤其是通过智能技术推动制造业向质量效率型发展。在此背景下,光伏企业成为观测智能化转型经济效应的重要切入点。一方面,作为绿色低碳转型战略的关键支撑,光伏企业在我国“双碳”目标与可再生能源结构优化中承担着重要任务,其发展水平与技术路径直接关系到国家能源安全与生态文明建设^[1];另一方面,光伏产业具有典型的技术密集型和资本密集型特征,对生产效率、创新能力与产业协同提出了更高要求。当前,光伏企业正处于由高速增长迈向高质量发展的关键阶段,智能化转型成为其实现成本控制、效率提

升与产品升级的核心驱动力。相比其他行业,光伏企业表现出更强的绿色导向、政策驱动与技术密集三重特征,集中体现了新兴制造业在智能化转型过程中的重要趋势与核心挑战,具有较强的行业代表性与研究典型性。因此,聚焦光伏企业,不仅有助于剖析智能技术与绿色理念融合驱动产业升级的内在机制,更能够深入揭示智能化转型如何通过绿色技术创新提升全要素生产率,从而为推动制造业高质量发展提供典型样本与实践依据。

智能化转型是指利用网络、大数据、物联网、人工智能等技术,将产业链和价值链上分散或孤立的设备、产品、生产者和企业连接起来,促进协同运作与发展^[2]。其核心特征在于实现覆盖整个供应链的协同作用,而非局限于机器人对劳动力的简单替代^[3]。现有研究探讨了智能化转型对企业全要素生产率的影响,但尚未达成一致结论。一些学者认为,智能化转型并未显著提高企业的全要素生产率。一方面,“IT生产力悖论”指出,尽管信息技术在企业生产和管理过程中被广泛引入和应用,但其对生产率的提升作用并未在统计结果中得到充分体现^[4]。另一方面,由于管理能力落后,企业实施智能化后的绩效增长并不显著^[5]。与此相对,一些学者认为智能化转型对全要素生产率具有显著的正向影响。首先,智能化通过整合技术和业务流程,优化了资本等要素的配置效率,从而提高了全要素生产率^[6];其次,智能化通过替代部分人力资本投入和降低运营成本来提高全要素生产率^[7];最后,数字技术还能通过增强企业创新能力、扩大技术溢出效应以及推动产业结构升级,为全要素生产率的持续增长提供动力。尽管影响全要素生产率的各类因素和智能化的经济效应已经得到了广泛的研究,但关于智能化转型对企业全要素生产率的具体作用机制,仍需进一步深入探讨。

与现有研究相比,本文的边际贡献主要体现在四个方面。第一,从研究视角来看,与现有研究聚焦于一般企业或者传统行业的全要素生产率不同,本文重点关注光伏这一典型的绿色技术密集型产业,深入考察智能化转型与全要素生产率之间的关系,为理解数智驱动下的绿色产业升级提供了新的视角。第二,在数据处理方面,本文综合运用上市公司年报的文本数据和基于财务报表构建的智能化投资指标,多维度衡量企业智能化转型程度,为相关研究

提供了更丰富的微观证据。第三,在研究机制方面,本研究构建了“智能化转型—绿色技术创新—全要素生产率”理论分析框架,系统探究了绿色技术创新在光伏企业的智能化转型和全要素生产率之间的中介和调节效应,揭示了“智能+绿色”协同驱动效率提升的内在机制。第四,通过对企业所有制、产业链位置及政策周期等方面的异质性分析,从多个维度揭示了智能化转型对光伏企业全要素生产率影响的差异化特征。

1 理论分析与研究假设

1.1 智能化转型与光伏企业全要素生产率

智能化转型在提高光伏企业全要素生产率方面发挥着关键作用。全要素生产率(Total Factor Productivity, TFP)是指总产出中不能由要素投入(资本、劳动等)数量增长所解释的部分,反映投入转化为最终产出的总体效率。通过引入包含人工智能、大数据在内的先进信息技术方法,智能化转型优化了资源配置,提高了生产效率,最终促进了光伏企业全要素生产率的提高^[8]。本文从几个关键角度提供了理论解释。第一,技术进步和创新视角。智能化转型激励光伏企业加大研发投入,促进技术创新^[9]。通过引入先进的智能制造技术、自动化生产线和智能控制系统,光伏企业不仅提高了生产效率和产品质量,还降低了生产成本。这种技术进步提高了技术效率,从而提高了全要素生产率。第二,资源配置优化视角。智能化转型通过优化资源配置来提高要素配置效率。光伏企业通过引入智能物流系统、自动化仓库管理等手段,缩短生产环节之间、生产与流通之间的距离,降低物流成本,提高生产效率。第三,管理模式创新视角^[10]。光伏企业利用数字化技术构建数字化管理平台,实现运营数据的全面收集、分析和应用。通过数据分析,企业可以更准确地了解市场需求、生产条件和运营效率,为决策提供强有力的支持。这种数字化管理模式创新有助于提高企业的管理水平和决策效率,从而提高全要素生产率。基于此,本文提出假设:

假设 H1: 智能化转型能够显著促进光伏企业全要素生产率提升。

1.2 绿色技术创新、智能化转型与全要素生产率

智能化转型是绿色技术创新的重要催化剂。企业通过引入人工智能、物联网、大数据、云计算等先

进数字技术,重塑其业务流程、资源配置和管理模式,实现运营管理的自动化、精细化与智能化,同时也为绿色技术创新提供了技术土壤、数据支持与决策驱动^[11]。这一作用在技术密集型、资本密集型和强绿色导向的光伏企业中尤为突出。第一,从技术路径看,光伏企业高度依赖物理学、材料科学、电子科学、机械工程与能源工程等多学科交叉融合,而智能化转型恰好为此提供了“数据感知—分析—反馈—控制”的一体化系统支持。在智能制造系统中,绿色技术的研发与应用可通过数字孪生、机器学习等方式进行建模、仿真与工艺迭代,从而显著缩短绿色技术从实验室研发到规模化量产的周期,大幅提升绿色研发效率。第二,从技术创新扩散与协同机制看,光伏产业具有链条长、上下游联动强的特点。从硅材料冶炼、电池片制造到组件封装、系统集成与运维,各个环节的绿色化水平共同影响整体环境绩效。智能化转型不仅优化单个企业内部资源配置效率,更通过供应链协同系统和工业互联网平台等载体,推动绿色技术在产业链中的横向扩散与纵向协同^[12]。第三,从绿色合规响应能力看,光伏企业高度依赖于政府的财政补贴、绿色认证和政策扶持,而绿色技术创新通常与政府监管和绿色认证标准等密切相关^[13]。智能化转型通过环保数据采集系统、碳排放监测平台等手段提升企业绿色合规能力,降低政策执行过程中的信息不对称与响应滞后,有助于企业借助数字化工具高效完成绿色创新指标的核查、跟踪与反馈,强化其在政策支持获取中的话语权和信誉度。第四,从终端绿色消费需求的敏捷响应来看,智能化转型强化了光伏企业对市场需求变化的感知能力和快速反应能力,使得绿色技术创新摆脱“技术导向为主、市场适配滞后”的困境,转向“市场需求牵引、敏捷响应”的新模式。进一步地,光伏企业通过智能平台搭建绿色用户社群,基于用户反馈共同设计绿色产品功能,形成“需求—设计—迭代”的绿色创新链条,推动绿色技术创新从“工艺改进”向“用户共创”演进。基于此,本文提出假设:

假设 H2:绿色技术创新在智能化转型促进全要素生产率提升过程中发挥中介作用。

绿色技术创新对光伏企业智能化转型具有多重赋能效应,为全要素生产率提升与可持续发展奠定坚实基础^[14]。首先,绿色技术创新作为中介,通过清洁能源技术研发与应用承接技术进步动能,优化智能化转型的技术基础,助力光伏企业提升产品能源

效率、降低生产环境影响,增强全球市场竞争力^[15]。其次,绿色技术创新承担调节角色,能够缓解智能化转型过程中可能带来的资源和环境压力,绿色制造技术的应用使智能化生产兼顾高效与环保,在提升全要素生产率的同时保障环境绩效^[16-17]。最后,绿色技术创新作为杠杆支点,推动现有光伏产品效能升级,还催生新兴市场需求,实现智能化转型与绿色技术创新的良性循环,同时带动产业链上下游协同,为转型提供全方位支持,显著提升企业综合生产率^[18]。基于此,本文提出假设:

假设 H3:绿色技术创新正向调节智能化转型对全要素生产率的积极影响。

2 研究设计

2.1 样本选择与数据来源

本文以 2011—2024 年中国沪深 A 股 140 家光伏上市公司的数据为研究样本,并按照以下方式进行处理:①剔除 ST、*ST 的公司样本;②剔除在考察年限中完成首次公开发行(Initial Public Offering, IPO)的企业,避免 IPO 引发的经营财务特征结构性突变、财务数据包装及转型逻辑差异,从而保障数据的一致性、变量测度的真实性与实证结果的稳健性;③仅保留至少连续 5 年不存在数据缺失的样本。本文的企业智能化技术应用数据主要通过文本分析法,基于上市公司年报中与智能化转型相关的关键词和语义内容构建指标,其余数据(包括控制变量)来源于国泰安数据库(CSMAR)、万得数据库(Wind)和中国研究数据服务平台(CNRDS)。

2.2 变量定义与测度

全要素生产率(TFP)。参照鲁晓东和连玉君^[19]、Levinsohn 和 Petrin^[20]的方法,采用 Levinsohn-Petrin(LP)估计法测算全要素生产率。LP 法是经济学中用于测算全要素生产率的先进方法,能够有效地处理内生性问题。因此,本文选择 LP 测算的结果作为全要素生产率的核心指标。

智能化转型(Int)。本文构建的企业智能化转型指标体系包含“智能化投资”和“智能技术应用”两个核心维度。“智能化投资”参照已有研究^[21-22],从软硬件投入视角测度企业智能化转型水平。其中,“软件投资”通过与智能化转型相关的无形资产项目占年末总资产比重测算;“硬件投资”通过与智能化转型相关的固定资产项目占年末总资产比重测算。“智能技术应用”借鉴现有测度方法^[23],结合《中国制造

2025》《“十四五”智能制造发展规划》等国家层面政策文件,并通过咨询智能化转型领域专家团队意见,筛选出涵盖“智能技术应用”的关键词集合。基于该词库,本文利用 Python 语言中的 jieba 分词工具,对上市公司年报文本数据进行中文分词、关键词匹配及频率统计,进而构建智能化转型的多维度指标体系。其中,“智能技术水平”通过公司年报文本中与人工智能技术相关的关键词数量测算;“智能技术应用深度”通过公司年报文本中与智能化业务相关的关键词数量测算。最后,对各项指标进行标准化处理,并采用熵值法确定指标权重,合成企业智能化转型指数,将其作为实证分析中的核心自变量。智能化转型指标体系的具体测算指标如表 1 所示。

绿色技术创新(GT)。根据刘海曼等^[24]的研究方法,本文采用绿色专利申请数量来衡量绿色技术创新水平。具体而言,绿色专利数据根据世界知识产权组织(World Intellectual Property Organization, WIPO)发布的国际专利绿色分类清单(IPC Green Inventory)中的绿色专利 IPC 分类号,在国家知识产权局专利数据库中进行检索获取。绿色专利作为衡量绿色技术创新的重要指标,能够反映出企业在环保技术、能源节约、污染治理等方面的创新成果。其数量不仅体现了技术进步的速度,也揭示出绿色技术在不同经济体和行业中的渗透与发展水平。

控制变量(Control)。借鉴已有文献[25],本文控制了光伏企业的特征变量和治理变量,包括:公司

规模(size)、资产负债率(lev)、现金流比率(cash-flow)、独立董事比例(indep)和固定资产占比(fixed)。此外,模型引入了个体(id)和年份(year)的双向固定效应,以控制不可观测的个体异质性与时间趋势因素。各变量的定义和符号如表 2 所示。

2.3 模型设定

为了探讨智能化转型是否促进了光伏企业全要素生产率的提升,本文构建了如下基准回归模型:

$$TFP_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 Int_{it} + \alpha_2 Controls_{it} + \varepsilon_{it}。$$
 (1)

为进一步检验绿色技术创新在智能化转型与全要素生产率之间的中介效应和调节效应,本文分别构建以下模型:

$$GT_{it} = \beta_0 + \beta_1 Int_{it} + \beta_2 Controls_{it} + \varphi_{it}，$$
 (2)

$$TFP_{it} = \gamma_0 + \gamma_1 Int_{it} + \gamma_2 GT_{it} + \gamma_3 Controls_{it} + \eta_{it}，$$
 (3)

$$TFP_{it} = \delta_0 + \delta_1 Int_{it} + \delta_2 GT_{it} + \delta_3 Int_{it} \times GT_{it} + \delta_4 Controls_{it} + \sigma_{it}，$$
 (4)

式中:TFP_{it}表示全要素生产率;Int_{it}表示智能化转型;GT_{it}表示绿色技术创新;Controls_{it}表示控制变量;ε_{it}、φ_{it}、η_{it}、σ_{it}代表随机扰动项;i表示企业;t表示年份。

3 实证结果与分析

3.1 描述性统计

表 3 报告了主要变量的描述性统计信息。其中,光伏企业全要素生产率的最大值为 11.079,均值为 8.427,标准差为 1.241,表明样本企业的全要素生产率水平存在较大差异。智能化转型指数的最大值

表 1 智能化转型指标体系

Tab.1 Indicator system for intelligent transformation

一级指标		二级指标	测度方法
智能化转型	智能化投资	软件投资	与智能化转型相关的无形资产项目占年末总资产比重
		硬件投资	与智能化转型相关的固定资产项目占年末总资产比重
	智能技术应用	智能技术水平 智能技术应用深度	公司年报文本中与人工智能技术相关的关键词数量 公司年报文本中与智能化业务相关的关键词数量

表 2 变量说明

Tab.2 Variable description

类型	名称	符号	说明
被解释变量	全要素生产率	TFP	LP法计算的全要素生产率
核心解释变量	智能化转型	Int	熵值法计算的智能化转型综合指标
中介/调节变量	绿色技术创新	GT	绿色专利申请数量
控制变量	公司规模	size	年末总资产的自然对数
	资产负债率	lev	年末总负债除以年末总资产
	现金流比率	cashflow	经营活动产生的现金流量净额除以年末总资产
	独立董事比例	indep	独立董事除以董事人数
	固定资产占比	fixed	固定资产净额除以年末总资产

为0.597,均值为0.445,标准差为0.054,说明光伏企业在智能化转型程度上也存在一定分化。描述性统计信息揭示了各变量在样本中具有明显的差异性。

表3 变量描述性统计

Tab.3 Descriptive statistics of variables						
变量名称	样本量/个	均值	标准差	中位数	最小值	最大值
TFP	1820	8.427	1.241	8.497	3.935	11.079
Int	1820	0.445	0.054	0.430	0.327	0.597
size	1820	22.565	1.641	22.481	18.302	26.413
lev	1820	0.441	0.265	0.480	-0.680	0.927
cashflow	1820	0.046	0.123	0.046	-0.529	0.487
indep	1820	0.367	0.057	0.333	0.125	0.515
fixed	1820	0.250	0.216	0.229	-0.447	0.711

3.2 基准回归

表4展示了智能化转型对光伏企业全要素生产率的回归结果。其中列(1)、(2)和(3)分别对应仅控制时间固定效应、仅控制个体固定效应以及同时控制时间和个体的双向固定效应的回归结果。回归结果显示,智能化转型的回归系数分别为2.014、2.498和2.179,且均在1%的水平上显著为正,表明智能化转型对光伏企业全要素生产率具有显著的促进作用。根据列(3),在控制企业个体异质性与时间趋势

表4 基准回归结果

Tab.4 Baseline regression results			
变量	TFP		
	(1)	(2)	(3)
Int	2.014*** (0.508)	2.498*** (0.761)	2.179*** (0.765)
size	0.558*** (0.018)	0.563*** (0.022)	0.517*** (0.032)
lev	0.655*** (0.197)	0.784*** (0.153)	0.794*** (0.150)
cashflow	0.208 (0.148)	0.286** (0.123)	0.278** (0.123)
indep	1.026** (0.464)	1.303*** (0.425)	1.251*** (0.432)
fixed	-1.428*** (0.157)	-1.349*** (0.165)	-1.303*** (0.161)
_cons	-5.360*** (0.436)	-5.817*** (0.664)	-4.568*** (0.910)
个体固定效应	NO	YES	YES
时间固定效应	YES	NO	YES
样本数/个	1820	1820	1820
R ²	0.566	0.814	0.814

注:括号内为稳健标准误,***、**和*分别表示在1%、5%和10%的水平上显著。

后,智能化转型指数每提高一个单位,光伏企业的全要素生产率平均提升约2.179个单位。综上,该实证结果支持本文的研究假设H1。

3.3 稳健性和内生性检验

基准回归结果表明,智能化转型显著提升了光伏企业的全要素生产率,但该结论可能受到极端值、变量截断或内生性因素的干扰。为增强研究结论的可靠性,本文进一步通过Tobit回归、缩尾处理和工具变量法进行稳健性和内生性检验。

1)Tobit回归稳健性检验。被解释变量——全要素生产率在部分样本中可能存在0值,呈现出左截断的特征,因此本文采用Tobit回归进行稳健性检验。表5列(1)的结果显示,智能化转型对光伏企业全要素生产率仍呈显著的正相关关系,证明了基准回归结果具有良好的稳健性。

2)缩尾处理稳健性检验。为减少极端值对统计结果的潜在影响,本文对所有连续变量进行1%的双向缩尾处理。表5列(2)的结果显示,智能化转型

表5 稳健性检验

Tab.5 Robustness tests		
变量	TFP	
	(1)	(2)
Int	2.179*** (0.497)	1.776*** (0.561)
size	0.517*** (0.024)	0.590*** (0.026)
lev	0.794*** (0.081)	0.758*** (0.088)
cashflow	0.278** (0.112)	0.229* (0.138)
indep	1.251*** (0.316)	1.000*** (0.344)
fixed	-1.303*** (0.110)	-1.328*** (0.117)
_cons	-4.568*** (0.643)	-5.941*** (0.681)
sigma_u	0.000 (0.013)	
sigma_e	0.536*** (0.009)	
个体固定效应	YES	YES
时间固定效应	YES	YES
样本数/个	1820	1820
R ²	0.739	0.834

注:括号内为稳健标准误,***、**和*分别表示在1%、5%和10%的水平上显著。

对光伏企业全要素生产率仍然具有显著的正向影响。通过对比缩尾处理前后的回归结果,表明基准回归结果在排除了极端值的影响后仍然稳健。

3)工具变量内生性检验。为有效解决智能化转型与光伏企业全要素生产率之间潜在的反向因果关系,本文选择企业所在行业同一年度其他光伏企业的智能化转型平均水平作为智能化转型工具变量^[19]进行内生性检验。一方面,行业内智能化转型的平均水平对单个企业的智能化过程具有示范效应与技术溢出作用,满足了工具变量与内生解释变量的相关性;另一方面,该平均值由同行业其他企业决定,不受单个企业自身全要素生产率影响,与误差项不相关,满足外生性要求。回归结果如表6所示。其中,列(2)显示了在控制其他潜在影响因素后,智能化转型对光伏企业全要素生产率仍具有正向影响,智能化转型回归系数在1%水平上显著,与基准回归模型的结果一致,进一步支持了智能化转型在提高光伏企业全要素生产率方面的积极作用。

表6 内生性检验:工具变量法

Tab.6 Endogeneity tests: instrumental variable method		
变量	第一阶段Int	第二阶段TFP
GT	0.924*** (0.137)	
Int		77.315*** (12.095)
个体固定效应/时间固定效应/控制变量	YES	YES
样本数/个	1820	1820
Anderson canon. corr.		45.032 [<i>p</i> =0.000]
LM statistic		
Cragg-Donald Wald <i>F</i> statistic		46.330 [<i>p</i> =0.000]

注:括号内为稳健标准误,***、**和*分别表示在1%、5%和10%的水平上显著。

3.4 中介效应与调节效应

表7中列(1)和列(2)分别展示了中介效应模型的回归分析结果。其中,列(1)显示了智能化转型对绿色技术创新具有正向影响,回归系数为6.712,且在1%水平上显著,表明智能化转型显著促进了企业绿色技术创新。列(2)则显示了绿色技术创新对全要素生产率的影响,回归系数为0.035,同样在1%水平上显著,表明绿色技术创新对提升全要素生产率具有显著的正向作用。结合两项结果可知,绿色技术创新在智能化转型影响全要素生产率的过程中发挥了中介作用,从而支持研究假设H2。

进一步地,列(3)的回归结果显示,绿色技术创新在智能化转型对全要素生产率的影响过程中具有正向调节效应。智能化转型与绿色技术创新的交互项系数为0.809,且在1%的水平上显著,表明随着绿色技术创新水平的提升,智能化转型对全要素生产率的促进作用也进一步增强,从而验证了调节效应的存在,并支持了研究假设H3。

表7 绿色技术创新作为中介的调节效应模型回归结果

Tab.7 Regression results of the moderation effect model with green technological innovation as a mediator			
变量	GT	TFP	
	(1)	(2)	(3)
Int	6.712*** (1.133)	1.343*** (0.506)	1.403*** (0.502)
size	0.119* (0.061)	0.507*** (0.027)	0.524*** (0.027)
lev	-0.967*** (0.209)	0.963*** (0.092)	0.920*** (0.092)
cashflow	0.117 (0.284)	0.257** (0.126)	0.229* (0.124)
indep	3.588*** (0.790)	1.080*** (0.351)	1.216*** (0.348)
fixed	-0.608** (0.275)	-1.178*** (0.122)	-1.018*** (0.124)
GT		0.035*** (0.011)	0.054*** (0.012)
Int*GT			0.809*** (0.147)
_cons	(1.133)	(0.506)	(0.501)
个体固定效应/时间固定效应	YES	YES	YES
样本数/个	1820	1820	1820
<i>R</i> ²	0.758	0.806	0.773

注:括号内为稳健标准误,***、**和*分别表示在1%、5%和10%的水平上显著。

3.5 异质性检验

根据企业产权性质,可以将企业划分为国有企业和非国有企业。对企业性质进行分组回归检验,结果如表8的列(1)和列(2)所示。异质性分析表明,国有企业和非国有企业的智能化转型系数分别为-2.218和3.066,非国有企业的系数在1%水平上显著为正,国有企业的系数为负且不显著。可能的原因在于:第一,国有企业引进智能技术后,若缺乏有效的消化吸收能力或技术适配机制,难以将技术

表8 基于产权性质、产业链和补贴退坡前后的异质性检验

Tab.8 Heterogeneity tests based on property rights, industrial chain, and pre- and post-subsidy withdrawal periods							
变量	TFP						
	(1)国有企业	(2)非国有企业	(3)产业链上游	(4)产业链中游	(5)产业链下游	(6)补贴退坡前	(7)补贴退坡后
Int	-2.218	3.066***	3.775**	2.166***	-0.811	1.876***	1.625*
	(1.397)	(0.883)	(1.769)	(0.782)	(2.161)	(0.411)	(0.836)
size	0.406***	0.564***	0.216**	0.573***	0.482***	0.626***	0.488***
	(0.032)	(0.050)	(0.101)	(0.044)	(0.043)	(0.019)	(0.029)
lev	0.732***	0.764***	2.041***	0.676***	2.033***	0.468***	0.783***
	(0.224)	(0.178)	(0.434)	(0.167)	(0.242)	(0.147)	(0.246)
cashflow	1.939***	0.205	2.282**	0.211	0.686***	0.588	0.280*
	(0.376)	(0.135)	(1.118)	(0.152)	(0.236)	(0.406)	(0.166)
indep	-1.004	1.256**	-2.605**	0.189	3.885***	0.112	1.303**
	(0.647)	(0.493)	(1.237)	(0.369)	(0.834)	(0.348)	(0.617)
fixed	-1.611***	-1.307***	0.342	-1.582***	-1.558***	-1.902***	-1.089***
	(0.252)	(0.206)	(0.380)	(0.223)	(0.292)	(0.156)	(0.246)
_cons	0.592	-6.005***	2.431	-4.531***	-3.870***	-6.290***	-3.935***
	(0.987)	(1.333)	(2.412)	(1.086)	(1.486)	(0.485)	(0.721)
个体固定效应	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
时间固定效应	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
样本数/个	492	1328	104	1404	312	840	980
R ²	0.883	0.791	0.800	0.784	0.920	0.763	0.434

注:括号内为稳健标准误,***、**和*分别表示在1%、5%和10%的水平上显著。

投入转化为实际生产力,反而可能因转型成本或管理摩擦导致全要素生产率下降;第二,国有企业通常具有较为复杂的组织结构和管理体系,信息传递效率较低,在一定程度上阻碍了智能化转型的实施效率;第三,国有企业往往承担就业稳定、区域协调发展等多重非经济目标,资源配置可能向非生产性领域倾斜,从而挤占智能化转型所需的研发投入、人才培养等核心资源;第四,委托代理关系下,管理层激励机制多聚焦短期业绩,与智能化转型的长期收益不匹配,导致其对转型投入的持续动力不足,难以形成智能化转型“投入—产出”的良性循环。

产业链上、中、下游的异质性主要体现在生产要素密集度、技术迭代周期和竞争格局等方面。上游环节(如硅料、硅片制造)高度依赖资本与技术密集型投入,中游环节(如电池片、组件制造)强调规模化生产与工艺集成,而下游环节(如系统集成、运维服务)则更注重市场营销和品牌建设。实证结果如表8中列(3)、(4)和(5)所示,产业链上、中、下游智能化转型系数分别为3.775、2.166和-0.811。虽然产业链上游的系数数值较高,但其显著性水平低于中游,可见中游企业的智能化转型对全要素生产率的

促进作用最为稳健且显著;而下游的系数为负,说明其在提升智能化转型时,全要素生产率却有所降低,可能因为下游业务仍依赖于传统工艺与人力,若智能化改造未能与现有流程有效融合,反而可能引发协调成本上升或操作效率下降。

为促进光伏产业健康有序发展,政策补贴是一种常见的政策工具。本文以2018年“531新政”(即光伏补贴退坡政策)为自然实验节点,比较政策补贴削减前后光伏产业的智能化转型对全要素生产率的影响差异。实证结果如表8列(6)和列(7)所示:在补贴削减之前,智能化转型的系数为1.876,且在1%水平上显著;补贴削减后,智能化转型对全要素生产率的影响虽仍然为正,但显著性明显降低,表明政策调整加剧了光伏企业推进智能化转型的外部约束与内部挑战。这一差异的核心逻辑在于补贴退坡前后企业面临的资源约束与激励导向变化:补贴退坡前,企业依托政策红利获得稳定现金流,资金压力较小,有充足资源投入智能化转型,且补贴政策往往与绿色技术创新、智能化投入挂钩,形成“政策激励—资源投入—效率提升”的正向循环;补贴退坡后,行业进入“去补贴化”的市场竞争阶段,企业面临组件价

格下跌、成本压力上升的双重冲击,不得不压缩非核心业务投入,智能化转型的资金优先级下降,导致其对生产率的提升作用被削弱。

4 结论与政策建议

智能化转型能够促进光伏企业全要素生产率的提升。在对光伏企业未来发展战略路径的深入探索中,智能化转型无疑是推动光伏企业全要素生产率显著提高的关键驱动力。绿色技术创新在光伏企业智能化转型与全要素生产率之间发挥中介和调节作用。异质性分析结果显示,与国有企业相比,非国有企业进行智能化转型对提升光伏企业全要素生产率的影响更显著;与上、下游产业链相比,中游企业智能化转型对提升光伏企业全要素生产率的影响更明显;与补贴退坡后相比,补贴退坡前智能化转型对光伏企业全要素生产率的影响更显著。

基于上述结论,本研究提供了以下重要的政策和实践启示:

1)以绿色技术创新作为协同抓手,推进智能化转型战略。智能化转型能够显著提升光伏企业全要素生产率,将智能化转型上升为系统性战略目标,并与绿色技术创新实现深度融合,能够释放出智能化转型的效率红利。光伏企业应将智能化转型战略纳入企业中长期发展规划,从研发、生产、管理、营销等全链条系统布局,构建面向未来的智能运营体系。同时,智能化需依托绿色技术创新作为关键协同机制。在智能制造与数字化平台的赋能下,企业可加快绿色技术的设计、试验与应用进程,有效提升绿色产品开发效率与资源利用效率,实现“智能+绿色”的双轮驱动。

2)因企制宜推进智能化转型,避免“一刀切”路径依赖。不同类型光伏企业在智能化转型中的绩效表现存在显著差异。企业在推进智能化转型时,应充分结合自身产权结构、资源禀赋和产业链位置,选择与自身发展阶段和能力结构相匹配的转型路径。非国有企业通常表现出更强的市场敏感性、组织灵活性和资源配置效率,在生产流程自动化、数字化运营等方面已取得初步成效,可以在已有转型优势的基础上,尝试由“数字连接”迈向“数据智能”、强化绿色技术创新与专利战略布局,解决转型深度不足、绿色技术基础薄弱等问题,进一步加强企业竞争力。国有企业应注重提升对智能化技术的吸收转化能力,强化“从投资到产出”的能力建设,尤其在管理流

程优化、组织结构扁平化、数据驱动决策等方面建立配套机制,解决“重投入、轻运营”的问题。与此同时,应鼓励探索混合所有制改革,引入市场化机制以激发内生动力。光伏组件、电池制造等中游企业具有生产链条长、自动化空间大的特点,是当前智能化转型收益最集中的环节。应进一步强化其在智能制造与绿色工艺融合方面的先发优势,推动打造行业“智能示范样本”。系统集成商、终端销售等下游企业的智能化转型重点应由“生产自动化”转向“市场智能化”,如加强基于AI的市场分析系统建设、个性化绿色产品推荐机制、智能化售后服务等,打造差异化用户体验。硅料和多晶硅生产商等上游企业因资本密集、技术更新周期长,短期内可能面临转型适配难度大、收益不确定性高等问题。应稳步推进智能化转型,优先聚焦流程优化与资源回收效率提升等“低风险、高回报”模块,逐步积累数据基础与转型能力。

3)优化政策结构,提升智能化转型的资源配置效率。在补贴退坡的背景下,智能化转型的生产率效应显著减弱,暴露出当前政策体系在稳定企业预期和激励持续转型方面的局限性。因此,政府在未来政策设计中,应坚持“有区分、有重点、有梯度”的精准施策逻辑,从财政支持方式出发,系统优化补贴结构与政策工具组合。一方面,应推动补贴机制从“普惠式补贴”向“精准化支持”转变。在财政资源有限的情况下,传统“投资即补”的方式易导致资源浪费与企业路径依赖,削弱政策效率。建议优先将财政资金投向智能化与绿色技术交叉融合的关键环节,例如核心算法研发、智能制造平台搭建、高性能绿色材料与装备制造等。同时,需加强高端人才引进与协同创新平台建设,提升政策引导企业高质量转型的能力。另一方面,应构建多样化、可持续的间接激励机制,例如绿色税收减免、绿色金融工具支持、转型绩效奖补等,进一步激发企业的内生创新动力与资源配置效率,推动企业由“政策驱动”向“创新驱动”转变。

4)优化分类引导机制,增强智能化转型的适配性与韧性。在政策适配路径上,应强化分类施策机制,结合企业的产权性质、产业链位置、资源禀赋等异质性特征,制定差异化支持策略,提升政策针对性和有效性。具体而言,国有光伏企业应重点推动制度改革与治理能力建设,增强其在智能化转型中的执行力与资源整合能力;非国有企业应通过强化创

新激励、拓展融资渠道等方式,进一步释放其灵活机制优势;中游企业在技术升级与绿色制造中发挥核心作用,应列为重点扶持对象,打造智能制造示范标杆;下游企业应引导其构建以市场和用户需求为导向的智能服务体系,探索更具适配性的数字化转型路径;上游企业可设立专项引导资金,支持其在高能耗流程上的绿色智能改造,夯实智能化转型基础。通过优化财政政策结构与分类支持机制,可有效提升光伏企业智能化转型的整体效率与抗风险能力,推动全行业迈向“技术高端化、过程绿色化、治理智能化”的高质量发展阶段。

参考文献:

- [1] Zhang A Q, Guo X Q, Liu K C. Adopting green and intelligent strategies to enhance productivity and competitiveness: Evidence from China's photovoltaic industry [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2025, 537: 147169.
- [2] Han F, Mao X. Impact of intelligent transformation on the green innovation quality of Chinese enterprises: Evidence from corporate green patent citation data[J]. *Applied Economics*, 2024, 56(45): 5342–5359.
- [3] Wang L H, Wang H, Cao Z, et al. Can industrial intellectualization reduce carbon emissions? —Empirical evidence from the perspective of carbon total factor productivity in China[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2022, 184: 121969.
- [4] Yorukoglu M. The information technology productivity paradox[J]. *Review of Economic Dynamics*, 1998, 1(2): 551–592.
- [5] Heavin C, Power D J. Challenges for digital transformation—towards a conceptual decision support guide for managers[J]. *Journal of Decision Systems*, 2018, 27(S1): 38–45.
- [6] 张万里, 宣旸, 张澄, 等. 智能化能否提升企业全要素生产率和技术创新[J]. *科研管理*, 2022, 43(12): 107–116.
- [7] Zhang W L, Xuan Y, Zhang C, et al. Can intelligent technology improve the total factor productivity and technological innovation of enterprises?[J]. *Science Research Management*, 2022, 43(12): 107–116.
- [8] Pan W, Xie T, Wang Z, et al. Digital economy: An innovation driver for total factor productivity[J]. *Journal of Business Research*, 2022, 139: 303–311.
- [9] Zhao J, Wang X, Yao X L, et al. Digital–intelligence transformation, for better or worse? The roles of pace, scope and rhythm[J]. *Internet Research*, 2025, 35(4): 1465–1507.
- [10] 张琦, 蒋军锋, 贾窦洁. 工业智能化对绿色创新效率的影响研究——基于政府干预的调节效应分析[J]. *贵州财经大学学报*, 2023(5): 101–110.
- [11] Zhang Q, Jiang J F, Jia D J. Research on the influence of industrial intelligence on green innovation efficiency—Analysis of the moderating effect based on government intervention[J]. *Journal of Guizhou University of Finance and Economics*, 2023(5): 101–110.
- [12] Endres H, Huesig S, Pesch R. Digital innovation management for entrepreneurial ecosystems: Services and functionalities as drivers of innovation management software adoption[J]. *Review of Managerial Science*, 2022, 16(1): 135–156.
- [13] 朱金生, 李文波, 王恕立. 数字技术创新、竞争新优势与企业对外投资[J]. *经济学动态*, 2025(7): 21–38.
- [14] Zhu J S, Li W B, Wang S L. Digital technology innovation, new competitive advantages, and outward foreign direct investment of firms[J]. *Economic Perspectives*, 2025(7): 21–38.
- [15] Khan S A R, Ahmad Z, Sheikh A A, et al. Digital transformation, smart technologies, and eco-innovation are paving the way toward sustainable supply chain performance[J]. *Science Progress*, 2022, 105(4): 00368504221145648.
- [16] Chen F, Wu B, Lou W. An evolutionary analysis on the effect of government policies on green R&D of photovoltaic industry diffusion in complex network[J]. *Energy Policy*, 2021, 152: 112217.
- [17] 张雯杰, 张爱琴, 宋戈. 数据要素对新质生产力的影响研究: 基于政府科技支持的中介效应[J]. *河南科学*, 2025, 43(5): 706–715.
- [18] Zhang W J, Zhang A Q, Song G. The impact of data elements on new quality productive forces: Based on the mediating effect of government science and technology support[J]. *Henan Science*, 2025, 43(5): 706–715.
- [19] Shen Y, Zhang X W. Intelligent manufacturing, green technological innovation and environmental pollution[J]. *Journal of Innovation & Knowledge*, 2023, 8(3): 100384.
- [20] 王静文, 武勇杰, 杜升宣. 绿色技术创新对工业碳生产率的影响研究——以黄河流域为例[J]. *河南科学*, 2025, 43(12): 1843–1853.
- [21] Wang J W, Wu Y J, Du S X. The impacts of green technology innovation on industrial carbon productivity in the Yellow River Basin[J]. *Henan Science*, 2025, 43(12): 1843–1853.
- [22] Chen Y X, Jin S Y. Artificial intelligence and carbon emis-

- sions in manufacturing firms: The moderating role of green innovation[J]. Processes, 2023, 11(9): 2705.
- [18] Zhu L, Luo J, Dong Q L, et al. Green technology innovation efficiency of energy-intensive industries in China from the perspective of shared resources: Dynamic change and improvement path[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2021, 170: 120890.
- [19] 鲁晓东, 连玉君. 中国工业企业全要素生产率估计: 1999—2007[J]. 经济学(季刊), 2012, 12(2): 541—558.
Lu X D, Lian Y J. Estimation of total factor productivity of industrial enterprises in China: 1999—2007 [J]. China Economic Quarterly, 2012, 12(2): 541—558.
- [20] Levinsohn J, Petrin A. Estimating production functions using inputs to control for unobservables[J]. The Review of Economic Studies, 2003, 70(2): 317—341.
- [21] 张远, 李焕杰. 企业智能化转型对内部劳动力结构转换的影响研究[J]. 中国人力资源开发, 2022, 39(1): 98—118.
Zhang Y, Li H J. Research on the impact of enterprise intelligent transformation on the transformation of internal labor structure [J]. Chinese Human Resources Development, 2022, 39(1): 98—118.
- [22] 许玉云, 王军, 王霄飞, 等. 智能化转型对制造企业技术创新效率的影响[J]. 统计与决策, 2024, 40(10): 184—188.
Xu Y Y, Wang J, Wang X F, et al. The impact of intelligent transformation on the efficiency of technological innovation in manufacturing enterprises[J]. Statistics & Decision, 2024, 40(10): 184—188.
- [23] 李婉红, 李娜. 绿色技术创新、智能化转型与制造企业环境绩效——基于门槛效应的实证研究[J]. 管理评论, 2023, 35(11): 90—101.
Li W H, Li N. Green technology innovation, intelligent transformation and manufacturing companies' environmental performance: Empirical research based on threshold effect[J]. Management Review, 2023, 35(11): 90—101.
- [24] 刘海曼, 龙建成, 申尊焕, 等. 数字化转型对企业绿色创新的影响研究[J]. 科研管理, 2023, 44(10): 22—34.
Liu H M, Long J C, Shen Z H, et al. Research on impact of digital transformation on the green innovation of enterprises[J]. Science Research Management, 2023, 44(10): 22—34.
- [25] 吴金柯, 卫晓明, 任晓姝. 企业绿色化转型与劳动收入份额: 促进抑或挤出[J]. 产业经济研究, 2023(6): 100—113.
Wu J K, Wei X M, Ren X S. Green transformation of enterprises and labor income share: Promotion or extrusion[J]. Industrial Economics Research, 2023(6): 100—113.

(编辑 关欣佳)