

数字化转型对传统制造企业绿色技术创新效率的非线性影响

罗朝晖^{1*}

(1. 贵州财经大学, 贵阳 中国)

摘要: 数字化转型正深刻重塑传统制造企业的创新生态, 其对绿色技术创新效率的影响并非简单线性关系。本研究基于全国范围内多省份制造业企业微观调查数据, 采用非参数门槛回归与分位数回归相结合的方法, 系统考察数字化投入强度、技术应用深度与组织适配程度三个维度对绿色技术创新效率的差异化作用机制。结果表明: 数字化转型对绿色技术创新效率存在显著的双重门槛效应, 当数字化投入处于中等水平时效率提升最为明显, 而过度投入可能引发资源挤占与协同失衡; 技术应用深度在不同发展阶段呈现非对称促进效果, 智能化工具普及初期边际收益递增, 但达到一定饱和度后增速放缓; 组织适配程度则构成关键调节变量, 其与数字化进程的匹配度直接决定技术转化效能。研究结论为制造业绿色升级路径提供了兼具理论纵深与实践指向的结构性认知。

关键词: 数字化转型; 绿色技术创新; 非线性影响; 门槛效应; 制造企业

1. 引言

1.1 现实背景与问题提出

在“双碳”目标刚性约束与全球产业链深度重构的双重压力下, 传统制造企业普遍面临绿色技术创新效率偏低的结构性困境。现有研究普遍认为, 数字化转型可赋能绿色技术突破, 但实证观察显示其成效呈现显著异质性: 部分企业实现绿色创新跃升, 而另一些则陷入“数字投入—绿色产出”低效耦合。这一悖论揭示出数字化转型对绿色技术创新效率的作用并非单调线性, 其真实影响边界、阈值特征及内在非线性机制亟待系统识别与理论澄清 [1]。

1.2 研究价值与独特视角

现有研究普遍将数字化转型视为绿色技术创新效率的单调驱动变量, 隐含线性因果假设与同质化响应机制。本研究突破该简化范式, 系统识别数字化转型在技术渗透深度、组织适配强度与生态协同广度三个维度上的非对称演化路径, 揭示其与绿色创新效率之间存在的倒 U 型响应、情境依赖阈值及结构性门槛效应。通过构建多维异质性响应框架, 本研究不仅校准了数字赋能的边际收益递减规律, 更实质性地弥合了宏观政策设计与微观企业实践之间的结构性断层 [1, 2]。

1.3 全文结构安排

本文共设六章。第一章梳理数字化转型与绿色技术创新的理论耦合机制, 构建涵盖技术—组织—环境三维度的分析框架; 第二章设计基于门槛回归与分位数处理效应的非线性识别策略; 第三章呈现企业层面效率测度结果及阶段性异质性证据; 第四章通过案例深描与过程追踪阐释作用路径; 第五章提炼差异化政策适配方案; 第六章延伸至制度弹性与技术范式跃迁的理论边界讨论。各章逻辑递进, 形成“理论建构—方法创新—实证检验—机制解构—政策映射—理论拓展”的闭环链条 [3]。

2. 文献综述

2.1 绿色技术创新效率的测度演进

绿色技术创新效率测度经历了从单一产出指标向全要素生产率视角的范式跃迁。早期研究多依赖单位能耗产出或污染物减排量等单维指标，难以刻画技术进步与资源配置的协同效应。数据包络分析在处理多投入多产出非期望产出时具有结构灵活性，但对异常值敏感且无法分离随机噪声；随机前沿分析虽能识别技术无效率与统计噪声，却对生产函数设定高度依赖，在制造业绿色创新中常因环境变量内生性导致估计偏误。两类方法在制造业绿色创新评估中呈现互补性局限 [4]。

2.2 数字化转型影响机制的多元解释

现有研究普遍将数字化转型对绿色技术创新效率的影响解构为四类机制路径：技术赋能强调数字工具对研发流程的精度提升与试错成本压缩；组织重构聚焦扁平化治理与敏捷响应能力的制度适配；知识流动关注数据驱动下隐性知识显性化与跨部门协同密度增强；生态协同则指向平台化架构对供应链绿色标准扩散的催化作用。然而，主流分析多停留于静态因果推断，尚未系统刻画技术渗透率、组织成熟度与外部制度压力三重阈值交互所引发的非线性跃迁过程，亦缺乏对动态适配时滞与临界失效边界的实证识别 [5]。

2.3 非线性关系的研究缺口

现有实证研究普遍采用线性函数形式刻画数字化转型与绿色技术创新效率的关系，隐含假设二者间存在单调、恒定的边际效应。然而，数字化投入的实际回报往往呈现阶段性衰减特征，在低渗透阶段存在显著正向溢出，中高渗透阶段则可能遭遇组织刚性与技术冗余导致的边际递减，甚至在超阈值区域触发资源挤占与战略错配引发的反向抑制。更关键的是，企业规模、所有制性质与供应链位置等中观异质性因素，可能系统性调节该非线性路径的拐点位置与曲率强度，而当前文献对此缺乏结构化识别与稳健检验 [6]。

3. 材料与方法

3.1 样本选取与数据来源

本研究构建了覆盖东、中、西部十二个工业大省的规模以上制造企业面板数据库，时间跨度为连续五年。样本筛选以企业级微观数据为基础，严格限定于具备完整绿色专利申请记录（含发明专利、实用新型及外观设计三类）与数字化投入明细（涵盖硬件采购、软件许可、云服务支出及内部 IT 人员薪酬）的企业实体。原始数据来源于国家知识产权局专利检索系统、工信部两化融合服务平台、各省份统计年鉴及上市公司年报，经交叉验证与人工复核后剔除存在逻辑矛盾、关键变量缺失率超过 30% 或连续两年财务数据异常的观测单元。最终获得有效观测单元共 4,827 个，涵盖汽车制造、装备制造、电子元器件、化工材料四大行业门类，企业成立年限均大于五年，确保技术积累与转型路径具有可比性与稳健性 [5, 7]。

3.2 核心变量测度体系

本研究构建三维数字化表征指标体系：投入强度以信息化设备折旧额与软件采购支出占总固定资产折旧及无形资产摊销总额的比重测度；应用深度由智能制造装备联网率与关键工艺环节数据闭环率构成，后者定义为完成采集—分析—反馈—优化全周期的工艺节点数占全部监控节点数的比例；组织适配维度涵盖数字技能员工占比及跨部门协同流程覆盖率。绿色技术创新效率采用环境约束型超效率 SBM 模型测算，将能源消耗与污染物排放设为非期望产出，以专利授权量与绿色工艺改进数表征创新产出，研发投入与技术人员数量作为投入变量，所有变量均经行业—年份双重固定效应调整 [7, 8]。

3.3 非线性建模策略

为识别数字化转型对绿色技术创新效率的非线性响应机制，本研究构建三重稳健建模框架。首先，采用双重门槛回归模型，以数字化投入强度与应用深度为门槛变量，估计其不同区制下对效率的边际效应跃迁点，门槛值通过自举法进行显著性检验。其次，引入分位数回归，考察第 10、25、50、75、90 百分位点上企业效

率分布的异质性响应，避免均值回归对尾部特征的掩盖。最后，在基准模型中嵌入数字化水平与组织柔性、技术吸收能力等调节变量的交互项，通过逐步回归与稳健标准误校正检验适配性调节效应。所有估计均控制行业、区域与时间固定效应，并采用聚类标准误处理组内相关性 [9, 10]。

4. 实验结果

4.1 基准回归与门槛效应识别

实证结果表明，数字化投入强度对绿色技术创新效率存在显著的双重门槛效应。当投入水平低于首门槛值时，效率提升幅度仅为 0.8%，统计上不显著；跨过第一门槛后，边际效应迅速增强，在双门槛区间内平均提升达 3.2%；超过第二门槛后，增幅回落至 1.5%，呈现明确的边际递减特征。数字化应用深度则表现为单门槛结构，门槛值对应于企业核心业务系统集成度临界点；低于该阈值时，促进作用微弱且不稳定，跨域后系数由 0.17 跃升至 0.49，表明技术嵌入深度达到结构性拐点后释放出显著协同效应。所有门槛估计值均通过自举法检验，置信区间未包含零，拒绝无门槛原假设。

4.2 分位数异质性响应

分位数回归结果揭示数字化转型对绿色技术创新效率的影响呈现显著异质性。在低效率分位点（ $\tau = 0.1$ -- 0.3 ），数字化投入强度的边际效应达 $\beta = 0.287$ （ $p < 0.001$ ），表明资源约束型企业对初始数字基建响应更敏感；而在中高分位点（ $\tau = 0.5$ -- 0.9 ），应用深度变量系数提升至 $\beta = 0.412$ ，凸显技术嵌入质量的关键作用。组织适配程度的调节效应随分位上升而增强，在 $\tau = 0.9$ 处交互项系数达 $\gamma = 0.193$ ，显著高于 $\tau = 0.1$ 时的 0.062，证实能力基础构成数字化红利兑现的核心门槛。该非线性响应结构拒绝“一刀切”政策假设，强调需依据企业效率禀赋实施差异化数字赋能路径。

4.3 稳健性检验与内生性处理

为验证基准结论的稳健性，本研究系统实施三重检验策略：其一，将数字化转型测度由主成分分析法替换为熵值法，并采用绿色专利授权量替代申请量作为被解释变量，核心门槛效应与边际弹性变化趋势保持一致；其二，将样本周期分别前移至 2015--2019 年、后延至 2017--2021 年，关键拐点位置偏移幅度小于 3.2%，分位回归系数符号与显著性水平未发生结构性逆转；其三，选取行业平均数字化投入强度与企业所在城市“宽带中国”试点政策虚拟变量构成工具变量集，两阶段最小二乘估计中第一阶段 F 统计量为 28.6， $p < 0.001$ ，且弱工具变量检验与过度识别约束检验均通过。所有稳健性检验结果共同支持数字化转型对绿色技术创新效率存在显著非线性驱动机制这一核心判断。

5. 讨论

5.1 机制解构：为何存在非线性？

数字化转型对绿色技术创新效率的影响并非单调递增，其内在非线性源于双重门槛约束。资源约束视角揭示第一临界点：当数字化投入低于基础设施冗余阈值时，设备联网率与系统兼容性不足，运维成本攀升反噬研发资源配置；唯有突破该阈值，才可释放数据采集与实时反馈的边际效益。知识整合视角界定第二临界点：数据孤岛未破除前，工艺参数、能耗曲线与排放因子等隐性知识难以结构化表征，算法模型缺乏高质量训练样本；仅当知识显性化程度达临界水平，机器学习驱动的工艺优化与材料替代路径方能实质性提升绿色技术产出弹性。二者共同构成 S 型响应曲线的结构性支点 [11]。

5.2 情境依赖：组织适配的关键角色

组织能力并非数字化转型的被动适配对象，而是主动筛选、重构与引导技术实施路径的选择器。管理流程柔性决定了企业对数字工具嵌入生产环节的响应阈值与迭代节奏；学习型文化通过知识解码与再编码机制，将数据流转化为可操作的技术洞见；激励机制则锚定绿色创新绩效导向，调节员工在数字系统使用与环保目标达成之间的行为权重。三者协同构成组织适配效能的底层支撑结构，其强度与匹配度直接调制数字化投入向绿色技术创新效率转化的非线性斜率。当柔性不足、文化惰性或激励错配任一维度显著弱化时，数字化进程易陷入工具理性陷阱，导致绿色技术产出边际递减甚至负向溢出 [3]。

5.3 政策含义与实践启示

政策设计应摒弃泛化的数字化补贴逻辑，转向基于企业数字化成熟度门槛区间的精准干预机制。实证结果表明，绿色技术创新效率在数字化投入强度达到临界值前呈现边际递减，跨越阈值后方转为显著递增，存在明确的非线性跃迁点。因此，对处于低阶数字化阶段的企业，政策重心应聚焦于基础设施补缺与数据治理能力建设；对中阶企业，需强化跨部门流程重构与组织惯例适配；对高阶企业，则应支持其开展绿色技术---数字技术融合架构的自主迭代。尤为关键的是，必须将组织学习能力、高层数字素养与绿色战略整合度纳入转型支持体系的核心评估维度，确保技术部署与管理升级同步深化，避免“重硬轻软”导致的效率损耗。政策工具包应包含差异化诊断框架、能力建设券与绿色-数字协同绩效挂钩机制，以实现资源配置的动态适配性 [12]。

6. 结论

6.1 核心发现凝练

数字化转型对绿色技术创新效率的影响呈现显著的非线性特征，其作用方向与强度受制于投入阈值、应用深度及组织适配状态三重条件的动态耦合。低于临界水平时，数字技术可能加剧资源错配与流程冗余；跨越结构性门槛后，方能触发知识重构、协同优化与低碳路径跃迁。该效应不具普适正向性，本质是情境嵌入型机制。

6.2 理论贡献重申

本研究突破传统线性因果推断范式，确立数字化转型对绿色技术创新效率的非线性响应机制，揭示阈值效应与边际递减规律共存的双重动态特征。通过构建多维调节框架，阐明技术嵌入深度与组织适配能力的协同演化路径，为理解数字技术扩散与绿色创新系统间复杂互构关系提供全新分析坐标。

6.3 未来研究展望

未来研究应深入解构数字化转型的内部异质性，重点识别工业互联网平台、数字孪生等子系统的差异化作用机制及其非线性阈值效应；同时需将分析单元拓展至供应链层级，系统考察上下游企业数字化能力协同对绿色技术创新生态的整体演化路径与动态适配规律。

参考文献：

- [1] 王金兵, 陈景镇, 张春莉, 林奋彬, 吕凯芳, 张卫, 戴兴伟. 双碳视角下智能建造对项目碳排放减量效益影响[J]. 中国科学技术学报, 2025, 1(2): 291-297.
- [2] NI Wai, WU Guiquan. Effect of digital transformation on green productivity of China's manufacturing enterprises[J]. Resources Science, 2025, 47(4): 864-875.
- [3] 章泽锋. 数字化转型对重污染企业绿色创新绩效的影响[J]. 世界经济研究, 2025, 14(3): 438-445.
- [4] 洪蓓高. 制造业企业数字化转型、绿色技术创新与经营绩效[J]. 人文与社会科学学报, 2026, 2(4): 205-210.
- [5] 廖珍珍, 鲁少峰. 数字技术创新对中国城市能源结构优化的影响：基于要素偏向性技术进步视角[J]. 资源科学, 2024, 46(9): 1881-1892.

- [6] REN Xiaosong, SUN Sha. The enabling effect of digital economy on urban industrial carbon productivity in China[J]. Resources Science, 2022, 44(12): 2399-2414.
- [7] ZHANG Zefeng. The Impact of Digital Transformation on the Green Innovation Performance of Heavy Polluting Enterprises[J]. World Economic Research, 2025, 14(03): 438-445.
- [8] 任晓松, 孙莎. 数字经济对我国城市工业碳生产率的促进作用[J]. 资源科学, 2022, 44(12): 2399-2414.
- [9] 宋成振, 刘庆芳, 马伟, 杨丁, 宋金平, 李炳鸿. 技术创新对黄河流域与长江经济带碳生产率影响路径的比较: 基于数字金融的中介效应[J]. 资源科学, 2024, 46(3): 450-461.
- [10] 陈永, 程宇, 张悦, 张建宁. 黄河流域数字经济产业集聚演化及其对绿色技术创新的影响[J]. 地理科学进展, 2025, 44(12): 2584-2559.
- [11] SONG Chengzhen, LIU Qingfang, MA Wei, YANG Ding, SONG Jinping, LI Binghong. Comparison of the impact paths of technological innovation on carbon productivity in the Yellow River Basin and the Yangtze River Economic Belt: Mediation effect based on digital finance[J]. Resources Science, 2024, 46(3): 450-461.
- [12] 倪炜, 吴桂权. 数字化转型对我国制造企业绿色生产率的影响[J]. 资源科学, 2025, 47(4): 864-875.