工业互联网平台对制造业绿色创新效率的影响

吕明元，曾 怡

（天津商业大学经济学院，天津 300133）

摘要：工业互联网平台作为新一代信息通信技术与工业经济深度融合的全新工业生态，对制造业高质量发展至关重要。基于2012—2023年省级面板数据，使用固定效应模型实证检验工业互联网平台对制造业绿色创新效率的影响，以及创新资源配置系数和区域经济发展水平在两者关系中的中介作用。结果表明：工业互联网平台对制造业绿色创新效率具有显著的正向推动作用；工业互联网平台通过显著降低创新资源错配率，推动区域经济发展水平上升，进而推动制造业绿色创新效率的提升；工业互联网平台对制造业绿色创新效率的影响存在明显的区域异质性，其中，两者之间的影响在东部地区最显著，在中西部地区不显著。研究结论可为工业互联网平台发展和制造业高质量发展相关政策的制定提供理论指导。

关键词：工业互联网；绿色创新效率；制造业

中图分类号：F49；F124 **文献标志码**：A **文章编号**：1671－1807(2026)01－0145－11

历经40多年改革开放，中国已成为制造业第一大国，但如何实现制造业从“大”到“强”的突破，续写高质量发展新篇章？新一代科技革命提供了历史性机遇，推动新一代信息技术与传统产业融合发展已成为各国共识。工业互联网平台作为数实深度融合的产物，正逐步渗透到制造业的各个领域，对制造业的绿色创新效率产生深远影响，为制造业的高质量发展提供源源动力。受此影响，传统的如美、日、德等的发达国家带动了全球市场竞争模式的转变，创新能力强、可持续发展的竞争优势逐步取缔过去的产量和成本等优势。近年来中国劳动力成本不断上升，资源环境压力不断加强，加上印度、越南等周边国家劳动力低廉的现状，导致其在国际市场上的市场份额不断被压缩。为了改变这种受制于人的国际态势，制造业急需转变传统的发展模式，实现从“世界工厂”到“创新引擎”的跃升。探究工业互联网平台对制造业绿色创新效率的影响，揭示其作用机制，对推动工业互联网发展，形成以创新为主要引领和支撑的新工业体系具有重要意义。

1 文献述评

目前，国内外学者对工业互联网平台的研究更多集中于其内涵、度量方式以及赋能制造业转型升级、可持续发展方面。2012年，美国通用电气公司正式提出工业互联网，从技术层面将其定义为一个将人、数据与机器连接起来的开放的、全球化的网络，其核心要素为智能设备、先进的数据分析工具以及人与设备的交互接口。陈武等[1]综合国内外学者相关概念的界定，从功能角度将其定义为能将物理世界和虚拟世界业务抽象化后进行数字链接，满足用户个性化需求的，具有系统性、互动性、个性化特征的新一代信息技术集成载体。

从现有文献来看，与本文相关的研究成果主要分为以下3个主题。

(1)度量工业互联网平台发展水平的研究成果主要分为3类：一是通过提取关键词，构建企业是否应用工业互联网平台的虚拟变量，如王玉荣等利用DID(differences-in-differences，双重差分)和PSM-DID(倾向得分匹配和双重差分)方法论证表明企业加入工业互联网平台后其数字创新水平得到了显著的提高；二是通过相关关键词的词频代理工业互联网平台，如Hui和Xie[3]研究发现，工业互联网平台可以通过重新配置资源，进而增强企业的风险承担能力；三是在平台经济的基础上根据工业互联网平台的内涵、性质构建综合指标体系衡量其发展水平。例如，李君等[4]从基础保障、关键能力和价值效

收稿日期：2025-08-02

基金项目：国家社会科学基金重点项目(20AJY007)

作者简介：吕明元(1966—)，男，山东胶南人，博士，教授，硕士研究生导师，研究方向为数字经济与产业结构转型升级；曾怡(1999—)，女，四川德阳人，硕士研究生，研究方向为数字经济。

益3个维度综合构建工业互联网平台评价指标体系；肖琳琳等[5]从关键能力和应用水平两个维度综合构建工业互联网平台发展指数指标体系，研究表明样本期间中国工业互联网平台发展总体呈现良好态势。基于以上文献，为确保度量方式的全面、有效和科学性，采取构建综合指标体系的方式衡量工业互联网平台发展水平。

(2)对制造业绿色创新效率的研究。相对于传统的创新而言，绿色创新强调在创新过程中考虑环境保护和可持续发展的因素。绿色创新效率是指在进行创新的过程中，资源耗用的最小化以及产生效益的最大化，同时，产生的废弃污染物也应最小化，它兼具了“绿色”和“创新”两大特征，兼顾了“经济”和“环境”的双重效益。学者们对于绿色创新效率的研究普遍集中于其测度以及影响因素上。任耀等[6]在相关研究的基础上，构建了体现绿色发展和创新驱动理念，包含经济、绿色及创新3大效率的绿色创新效率模型；陈瑶[7]基于R&D驱动理论，构建了包含R&D的DDF(方向距离函数)模型和ML(Malmquist-Luenberger)指数来评估各区域工业绿色创新效率水平及其波动趋势；聂名华和齐昊[8]将绿色创新分为技术研发和成果转化两阶段，发现对外直接投资显著促进了技术研发阶段的工业绿色创新效率，但对成果转化阶段的工业绿色创新效率影响不显著，综合来看，其与工业绿色创新效率之间存在倒“U”关系；Bai等[9]利用三阶段SBM-DEA(基于松弛变量的数据包络分析)模型衡量各地区绿色创新效率，研究发现碳交易机制对绿色创新效率具有正向影响；Lin和Xie[10]构建投入指标包含固定资产、员工人数和研发投入，产出指标包括绿色专利和营业收入的度量体系，基于Super-SBM(超效率SBM模型)衡量微观企业层面的绿色创新效率水平，研究结果表明数字化通过提高管理效率从而影响制造业企业绿色创新效率；王惠等[11]研究证明产业集聚水平显著提升了工业绿色创新效率，并且此作用存在明显的空间外溢性。

(3)工业互联网平台对制造业绿色创新效率的影响研究。Onu等[12]提出，工业互联网对整个制造业甚至是全球经济都带来了重大的挑战和机遇；王一晨[13]发现通过优化资源配置模式、生产制造流程、运营管理决策和商业模式，工业互联网平台推动了制造业的转型升级；蔡呈伟和戚聿东[14]研究表明工业互联网平台在推动企业生产数字化、产业链平台化的基础上，实现智能制造、平衡个性化定制和规模化生产，并通过服务产品化提高其附加值，实现制造业的升级；Yu和Chen[15]提出通过利用各种模型和算法，工业互联网平台帮助企业优化资源配置、加速资金周转，从而优化其制造服务；Guo和Liu[16]基于中国重污染行业A股上市公司样本，研究发现通过提高企业的组织能力，工业互联网平台的应用提高了企业的绿色技术创新水平，且该影响在国有企业中更显著。对于工业互联网平台对制造业绿色创新效率的影响方面，当前相关的研究还比较缺乏。有学者研究了工业互联网平台对创新效率的影响。例如，李爱国等[17]发现工业互联网的发展利用生产性服务业的虚拟集聚，促进了区域创新效率的提升[17]；伍先福和李欣宇[18]证明工业互联网有助于提高企业创新绩效，而企业知识吸收能力、企业融资约束和风险承担能力在其中发挥作用；Yu和Chen[15]研究发现工业互联网平台可以提高企业的绿色创新效率，而创新能力在两者之间发挥中介作用。

综合来看，目前研究工业互联网平台对制造业绿色创新效率影响的文献较少，且集中于企业层面，缺乏中观层面的实证研究。基于此，本文的贡献在于从中观层面实证研究工业互联网平台对制造业绿色创新效率的作用，并探讨两者之间的影响机制，在此基础上，为制造业的高质量可持续发展提出贴合实际的政策建议。

2 影响逻辑、理论机制及研究假设

2.1 工业互联网平台对制造业绿色创新效率影响的3个层面

工业互联网平台是新一代信息技术如云计算、大数据、人工智能等和实体经济深度融合的新态势，对制造业的绿色创新效率具有深远的影响。智能制造是发展工业互联网平台的核心所在[19]。基于此，将工业互联网平台对制造业绿色创新效率的影响分为数字化、网络化和智能化3个层面(图1)。

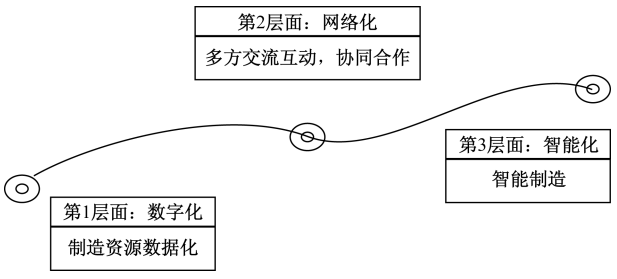


图1 影响层面

一是数字化层面,数字化是工业互联网平台的基础。传统的制造模式具有制造资源数据化程度低、标准化难度大的特点,导致其管理混乱[20];工业互联网平台通过在制造业企业建立产品全生命周期的数据库,利用传感器等设备实现人-机-物-环的实时感知与数据信息采集[21],为网络化的实施提供数据来源。二是网络化层面,网络化是工业互联网平台的支撑。借助新一代信息技术,可以搭建制造业企业和客户之间的双向交流机制,从而推动个性化定制模式的形成、提升制造业企业售后服务并有效预测未来市场发展态势[22];同时,还能构建制造行业的资源共享平台,强化行业内部的协同合作[23]。三是智能化层面,智能化是工业互联网平台的目标。在数字化和网络化的基础上,利用数据分析、模型搭建以及决策工具,形成更加优化的决策指令,实现全系统的自运行、自决策,减少人工干预[20]。由此可见,工业互联网平台在数字化、网络化、智能化的综合作用下,最终影响制造业的绿色创新效率。

2.2 工业互联网平台对制造业绿色创新效率影响的理论机制及研究假设

(1)工业互联网平台通过降低搜索成本有效匹配信息,从而提高供应链的协作效率[24]。工业互联网平台打破了传统意义上由于时空限制所产生的信息壁垒,实现了信息的实时共享和协同,提高信息透明度,增强了多方协同合作创新的可能。与此同时,工业互联网平台利用相关技术,可以帮助制造业企业对其生产制造全流程进行更好的监督管理,如利用远程控制设备提高可视性,并且可以通过更复杂的服务去消除人为行为因素的影响,减少人工干预[12]。开展一系列业务运营优化服务,实现生产全流程的自动化,从而减少其生产过程中不必要的资源消耗,推动制造业企业的生产方式向绿色化转变,提高能源的利用效率,减少污染物的排放[25]。

(2)工业互联网平台提升了制造业企业创新能力。在制造业企业升级、创新产品的传统流程中,往往是基于经验准则进行作业的,而工业互联网平台为制造业企业提供了与消费者有关的需求侧信息和与产品相关的评价信息,从而使得企业在对产品进行创新、升级设计时,更具有针对性,提升了产品更新、设计环节消费者的参与程度,减少了不必要的能源消耗[19];并且,工业互联网平台为其用户提供了相关的设计模型工具,大大缩短了产品的研发周期,降低废品率、库存率。

(3)工业互联网平台提升了制造业企业的管理决策能力[26]。对于普通的制造业企业来讲,随着生产交易活动的进行,其产生的数据规模会逐步扩大,获取难度也会逐步上升,在对其进行采集、存储和分析时,会受到企业本身的资金规模、存储能力以及算力的限制,而工业互联网平台的出现解决了这一问题,并且,基于大量的数据信息,工业互联网平台将其进行处理后得到更易消化理解的知识,从而为其用户提供相关的经验借鉴,供管理层使用进行决策制定,优化决策流程,帮助管理层识别绿色创新的机会,从而提高其绿色创新效率。由此提出如下假设。

H1:工业互联网平台能够促进制造业绿色创新效率的增长。

基于工业互联网平台的概念,可以看出工业互联网平台是在基本的互联网基础设施完善的情况下建立的,就中国而言,由于国土面积大,加之各个省份的经济发展水平、技术存在较大差异,导致区域间的互联网发展水平存在明显的异质性,数字鸿沟现象的显现,进一步加剧省际区域间的工业互联网平台水平的差异性;并且,由于各个地区的初始要素禀赋不同,加上政策环境以及人力资本水平和结构也存在较大的区别,造成不同地区的制造业产业结构也存在差异。例如,一些地区的制造业主导产业可能以高污染、高能耗为主,提升其绿色创新效率所面临的挑战可能更大,而一些地区制造业主导产业可能以低消耗、低排放为主,因此,工业互联网平台对制造业绿色创新效率的影响在不同的区域可能存在较大差异。基于此,提出如下假设。

H2:工业互联网平台对制造业绿色创新效率的影响存在区域异质性。

工业互联网平台能够通过优化创新要素的资源配置、提升区域经济发展水平,来提高制造业的绿色创新效率。工业互联网平台是一个将资源数字化,并在此基础上实现资源链接和资源配置的平台[27];它会以数据合作资源拓扑的方式汇集分散的数据价值节点,实现资源配置的升级转变[28];借助推动资源的“云化”,使其像各类原材料一样实现“按需分配”,进而更加高效和精准地配置资源[29];通过集成研发与制造资源、协同创新、统筹管理跨空间资源、优化研发和制造流程,进一步提升研发和生产效率[13],提升区域创新能力,从而推动经济

发展动力变革，提升经济发展水平。当创新资源错配时，意味着制造业内部面临着创新资源失衡的现象，部分有能力进行绿色创新的企业由于缺乏必要的资源而无法开展相关的研究，与此同时，部分企业拥有超出其能力范围的资源，导致资源浪费和效率低下，从而对制造业绿色创新效率产生负面影响。数字经济的发展能够改善资源和劳动力的错配程度，提高资源配置效率[30]；中国创新效率低下的主要原因是创新资源错配[31]；资源要素扭曲是抑制绿色创新效率提升的重要因素[32]；R&D 资源错配对绿色创新效率具有明显的抑制作用[33]；数字技术的应用有利于节能降耗，提高了资源的流通速度和配置效率，促进制造业的绿色发展[34]。经济发展水平的高低决定了该地区创新基础设施、环境以及相关创新条件的完备程度；具体来讲，经济发展水平的差异性会导致虹吸效应的产生，从而影响相关要素的流动方向；经济发展是科技创新的重要支撑，其水平的大小会影响创新效率[35]；区域经济发展水平的差异会影响其对绿色技术创新的驱动力度[36]；经济发展与绿色创新紧密联系[37-38]。总而言之，依托工业互联网平台，可以优化创新资源配置，改善区域经济发展水平，进而推动制造业绿色创新效率的提升。据此，提出如下假设

H3：优化创新资源配置在工业互联网平台对制造业绿色创新效率的影响中发挥中介作用；

H4：区域经济发展水平在工业互联网平台对制造业绿色创新效率的影响中发挥中介作用。

3　研究设计

3.1　实证模型构建

基于上文分析，为了考察工业互联网平台对制造业绿色创新效率的影响，验证上文提出的研究假设，构建如下实证模型：

$$MGIE_{it}=\alpha_0+\alpha_1 IIL_{it}+\beta_1 POP_{it}+\beta_2 URB_{it}+\beta_3 CYG_{it}+\beta_4 GOV_{it}+\beta_5 ER_{it}+\beta_6 FDI_{it}+\mu_i+\gamma_t+\varepsilon_{it} \quad (1)$$

式中：$MGIE_{it}$ 为第 i 个地区第 t 年的制造业绿色创新效率；IIL_{it} 为第 i 个地区第 t 年的工业互联网平台发展水平；POP 为人口密度；URB 为城市化水平；CYG 为产业结构；GOV 为政府干预；ER 为环境规制水平；FDI 为对外开放水平；μ_i 为个体效应；γ_t 为时间效应；ε_{it} 为随机扰动项；α_1、β_1～β_6 为系数；α_0 为常数项。

3.2　变量设定

3.2.1　被解释变量：制造业绿色创新效率（MGIE）

当下，对于效率的测度，学术界普遍采用的方法有两种：参数法即随机前沿分析（stochastic frontier approach，SFA）和非参数法即数据包络分析（data envelopment analysis，DEA），两者的差异在于使用随机前沿分析测算效率时需要提前预设生产函数的形式，这往往与现实情况存在一定的偏差，并且，随机前沿分析只适用于单产出的效率测算，具有一定的局限性；而数据包络分析在一定程度上克服了随机前言分析的弊端，可应用于多投入多产出的现实情况测算效率值，并且规避了模型误设带来的误差。但是传统的数据包络分析要求投入与产出通过径向的方式进行改进，利用改进的距离来评价决策单元的效率，这与实际情况存在诸多不符。由此，Tone[39] 提出考虑松弛变量的 SBM 模型，并且该模型还考虑了生产过程中的非期望产出对效率带来的影响，更加综合地评价了效率的大小。基于此，利用基于非期望产出的 Super-SBM 模型，测算 2012—2023 年各省份的制造业绿色创新效率。

遵循生产函数的投入产出视角，并基于数据的可得性，将制造业绿色创新效率的投入指标、期望产出指标和非期望产出指标体系见表 1。

表 1　制造业绿色创新效率评价指标体系

指标		指标测度说明	单位
绿色创新研发投入	劳动投入	规模以上工业企业 R&D 人员全时当量	人年
	资本投入	规模以上工业企业 R&D 内部经费支出	万元
	能源投入	地区能源消费总量	万吨/标准煤
绿色创新成果转化阶段产出	期望产出	规模以上工业企业新产品销售收入	万元
		规模以上工业企业有效发明专利数	件
	非期望产出	基于熵权法将工业废水排放量、工业 SO_2 排放量和一般工业固体废弃物排放量折算成环境污染综合指数	

3.2.2　核心解释变量：工业互联网平台发展水平（IIL）

目前在学术界对于工业互联网平台发展水平的测度还未达成统一，借鉴吕明元和程秋阳[40] 的做法，从工业互联网平台基础建设水平、信息化发展水平和企业智能化水平 3 个维度构建指标体系，利用熵权-TOPSIS 法测算 2012—2023 年 30 个省份（因数据缺失，未包含西藏地区和港澳台地区）的工业互联网平台发展水平，部分数据缺失利用插值法补齐。具体评价指标体系见表 2。

表 2　工业互联网平台发展水平评价指标体系

一级指标	二级指标	三级指标	单位
工业互联网平台基础设施建设水平	光缆网络密度	光缆线路长度/各省市占地面积	万 km/万 km^2
	互联网接入密度	互联网宽带接入端口/各省市占地面积	万个/万 km^2
	互联网接入用户密度	互联网宽带接入用户数量/年末常住人口数	万人/万人
	物流网络密度	邮路总长度/各省市占地面积	万 km/万 km^2
	互联网普及率		%
	铁路网络密度	铁路营业里程/各省市占地面积	万 km/万 km^2
信息化发展水平	信息化产品水平	信息技术服务收入	亿元
		软件产品收入	亿元
		软件业务收入	亿元
		嵌入式系统软件收入	亿元
		电信业务总量	亿元
	信息化人才水平	信息传输、软件和信息技术服务业城镇单位就业人员	万人
企业智能化水平	智能化建设水平	期末使用计算机数	台
		企业拥有网站个数	个
		有电子商务交易活动的企业数	个
		有电子商务交易活动的企业数比重	%
	智能化产品水平	电子商务销售额	亿元

3.2.3　中介变量

中介变量包括区域经济发展水平(LED)和创新资源配置系数(IFA),区域经济发展水平(LED)以各省人均 GDP 衡量;创新资源配置系数(IFA),假定各省份进行创新活动主要投入为财力和人力两大要素,其中资本错配指数为 t_{ki},人力错配指数为 t_{li}。

$$t_{ki}=\frac{1}{\gamma_{ki}}-1,\ t_{li}=\frac{1}{\gamma_{li}}-1 \tag{2}$$

式中:γ_{ki}、γ_{li} 为要素价格绝对扭曲系数,因其无法观测,用价格相对扭曲系数 $\hat{\gamma}_{ki}$、$\hat{\gamma}_{li}$ 取代。

$$\hat{\gamma}_{ki}=\frac{K_i/K}{s_i\beta_{ki}/\beta_k},\ \hat{\gamma}_{li}=\frac{L_i/L}{s_i\beta_{li}/\beta_l} \tag{3}$$

式中:K、L 分别为创新活动投入资本总量和人力总量;K_i、L_i 分别为地区 i 创新活动投入资本量和人力量;s_i 为 i 地区创新产出占总产出的比重;β_k 和 β_l 分别为加权情况下资本和人力对创新产出的贡献率;β_{ki} 和 β_{li} 分别为各地区资本和人力产出弹性;$\frac{K_i}{K}$ 为地区 i 创新活动使用资本占资本总量的实际比例;$\frac{s_i\beta_{ki}}{\beta_k}$ 为资本有效配置时理论上 i 地区的创新活动资本使用比例,两者的比值反映了 i 地区创新资本错配程度;$\frac{L_i}{L}$ 为地区 i 创新活动使用人力占人力总量的实际比例;$\frac{s_i\beta_{li}}{\beta_l}$ 为人力有效配置时理论上 i 地区的创新活动人力使用比例,两者的比值反映了 i 地区创新人力错配程度,该比值为 1 时资源配置最优,反之若该比值大于 1 则配置过度,小于 1 则配置不足。

假设各省份 i 的生产函数为

$$Y_{it}=AK_{it}^{\beta_{ki}}L_{it}^{1-\beta_{ki}} \tag{4}$$

式中:创新资本投入 K_{it} 为各地区 R&D 资本存量,将各地区 R&D 经费内部支出以 2012 为基期转化为实际资本投入,在此基础上使用以 15%为资本折旧率的永续盘存法,处理后得到实际资本投入量;创新劳动力投入 L_{it} 用各地区 R&D 人员全时当量表示;各地区专利申请数为创新产出 Y_{it}。在此基础上计算出 t_{ki} 和 t_{li},取平均数获得创新资源配置系数。

3.2.4　控制变量

借鉴相关文献的研究,从以下几个方面设置控制变量。人口密度(POP):以各省总人口与各省行政区域面积之比来衡量;城市化水平(URB):以各省年末城镇人口与该地区总人口之比来衡量,其数值越大,代表该省城市化水平越高;产业结构(CYG):采用第三产业增加值占第二产业增加值的比重表示;政府干预(GOV):用各省地方财政支出占地区生产总值的比重来衡量;环境规制水平(ER):用地区工业污染治理完成投资额占地区生产总值的比重表征,其数值越大,代表该地区环境规制水平越高;外商直接投资(FDI):以各省外商直接投资实际使用额与地区生产总值的比值来衡量,其数值越大,表示外商投资水平越高。

3.3　数据来源

由于工业互联网平台的概念最早于 2012 年提出,基于数据的可得性,选取 2012—2023 年中国 30 个省份(因数据缺失,未包含西藏地区和港澳台地区)的面板数据作为研究样本,探讨工业互联网平台对制造业绿色创新效率的影响,选取的相关数

据来源于《中国统计年鉴》《中国科技统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国工业统计年鉴》以及各省市年鉴，对于部分缺失值采取插值法补齐，同时为了避免极端值和异常值的影响，对所有变量进行 1% 水平上的缩尾处理。

3.4　描述性统计

变量描述性统计见表 3，其中，核心解释变量工业互联网平台发展水平（IIL）的最大值为 0.515，最小值为 0.011，标准差为 0.110，表明不同省域的工业互联网平台发展水平存在一定的差异，被解释变量制造业绿色创新效率（MGIE）最大值为 1.778，最小值为 0.133，标准差为 0.378，这说明各地制造业绿色创新效率水平存在明显差异。

表 3　变量描述性统计

变量类型	变量	样本数	均值	标准差	最小值	最大值
核心解释变量	IIL	360	0.107	0.110	0.011	0.515
被解释变量	MGIE	360	0.557	0.378	0.133	1.778
控制变量	POP	360	472.574	707.775	8.003	3 913.249
	URB	360	61.265	11.624	38.780	89.300
	CYG	360	1.324	0.738	0.578	5.169
	GOV	360	24.823	10.077	11.806	61.211
	ER	360	0.09	0.086	0.002	0.439
	FDI	360	1.669	1.442	0.039	7.352
中介变量	IFA	360	0.645	0.572	0.010	3.986
	LED	360	6.487	3.212	1.971	20.028

4　实证分析

4.1　回归结果分析

利用固定效应模型检验工业互联网平台对制造业创新效率的影响，回归结果见表 4。在表 4 中，列（1）为时间固定效应模型，列（2）为时间个体双固定模型。列（1）、列（2）结果表明，在控制了一系列变量后，不论是时间固定效应模型还是时间个体双固定模型，工业互联网平台发展水平依旧与制造业绿色创新效率显著正相关，只是参数的估计值大小发生变化。这表明在选取样本期间，工业互联网平台发展水平能够显著提高制造业的绿色创新效率，从而假设 H1 得以验证。

从选取的控制变量来看，产业结构的回归系数为负，且显著，这可能是由于第三产业增加值占第二产业增加值的比例更大，会导致资源配置在二三产业之间不平衡，造成制造业的绿色创新效率下降。政府干预程度能促进制造业绿色创新效率的提升，这可能是因为政府的干预有助于完善基础设施建设，为工业互联网平台的运行提供良好的环境，促进制造业绿色创新。环境规制水平对制造业的绿色创新效率影响并不显著，这可能是由于环境规制水平越高，会导致投资更多地集中于对末端的污染治理技术，而非生产过程中的绿色创新，因此显示不显著；而外商直接投资对制造业绿色创新效率也不显著，这可能是因为外商直接投资更加注重于市场中的短期回报而非长期的环境可持续性，因此显示影响不够显著。

表 4　基准回归结果

变量	（1）	（2）
	MGIE	MGIE
IIL	1.043***	0.989**
	（2.65）	（2.27）
POP	−0.001	−0.001
	（−1.14）	（−1.05）
URB	0.005	0.008
	（1.59）	（1.06）
CYG	−0.141***	−0.074
	（−2.68）	（−1.30）
GOV	0.013***	0.012***
	（3.64）	（3.31）
ER	−0.024	−0.213
	（−0.16）	（−1.21）
FDI	0.005	0.003
	（0.41）	（0.23）
常数项	0.479	0.216
	（1.09）	（0.29）
样本数	360	360
R^2	0.832	0.854
个体固定效应	Yes	Yes
时间固定效应	No	Yes
adj. R^2	0.813	0.832
F	3.512	2.629

注：**、***分别表示通过 5%、1% 水平下的显著性检验；括号内为 t 统计量。

4.2　稳健性检验

为了确保以上回归结果的准确性和可靠性，从以下几方面对上述模型进行稳健性检验。

4.2.1　内生性检验

引入核心解释变量工业互联网平台发展水平的滞后项作为该变量的工具变量，以缓解内生性问题。结果见表 5 列（1）、列（2），结果表明滞后 1 期后，工业互联网平台水平对制造业绿色创新效率的正向作用依旧存在，且都在 5% 的水平上显著。

4.2.2　替换核心解释变量

为了避免因赋权方式的不同导致回归结果存在偶然性，采用熵权法重新对工业互联网平台发展水平进行测算，计算得出新的工业互联网平台发展水平综合指数。回归结果见表 5 列（3）、列（4），结果表明工业互联网平台的回归系数为正，且通过了显著

表 5　稳健性检验结果

变量	滞后 1 期		熵权法		删除直辖市	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	MGIE	MGIE	MGIE	MGIE	MGIE	MGIE
L. IIL	1.015**	1.092**				
	(2.13)	(2.04)				
IIL			0.928**	0.964**	1.516**	1.238*
			(2.34)	(2.18)	(2.49)	(1.91)
POP	−0.002	−0.002	−0.001	−0.001	−0.003*	−0.003
	(−1.44)	(−1.35)	(−1.21)	(−1.24)	(−1.67)	(−1.55)
URB	0.002	0.007	0.006*	0.010	0.002	−0.012
	(0.47)	(0.77)	(1.80)	(1.21)	(0.51)	(−1.00)
CYG	−0.153**	−0.091	−0.140**	−0.071	−0.102	−0.074
	(−2.55)	(−1.45)	(−2.57)	(−1.24)	(−1.39)	(−1.06)
GOV	0.014***	0.013***	0.013***	0.012***	0.010**	0.006*
	(3.34)	(3.35)	(3.58)	(3.33)	(2.39)	(1.77)
ER	−0.237	−0.333*	−0.049	−0.248	−0.039	−0.137
	(−1.27)	(−1.73)	(−0.32)	(−1.37)	(−0.25)	(−0.77)
FDI	0.006	0.006	0.007	0.005	−0.014	−0.005
	(0.37)	(0.34)	(0.54)	(0.33)	(−0.92)	(−0.27)
常数项	1.057*	0.638	0.536	0.235	1.012	1.868*
	(1.88)	(0.78)	(1.15)	(0.32)	(1.65)	(1.94)
样本数	330	330	360	360	312	312
R^2	0.831	0.854	0.831	0.854	0.774	0.802
个体固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
时间固定效应	No	Yes	No	Yes	No	Yes
adj. R^2	0.810	0.831	0.812	0.832	0.748	0.770
F	3.283	2.974	3.288	2.512	3.878	1.890

注：*、**、***分别表示通过 10%、5%、1%水平下的显著性检验；括号内为 t 统计量。

性水平检验，这表明前文的主要回归结果具有良好的稳健性。

4.2.3　剔除直辖市样本

为增强研究结论的说服性，现缩小样本空间验证结论。考虑到 4 个直辖市相对于其他省份来说，在经济规模、发展水平、政策支持、资源配置等方面存在较大差异，可能会对回归结果产生较大影响，所以，在删除 4 个直辖市数据后，对剩余省份重新回归，结果见表 5 列(5)、列(6)，工业互联网平台对制造业绿色创新效率的影响仍然正向显著，再次验证了前文的主回归结果的稳健性。

4.3　异质性分析

由前文明显可知，中国各省域工业互联网平台发展水平存在明显的差异，加上各个地区的经济基础设施、人才、环境等条件各不相同，参考现有文献，将中国分为东、中、西三部分，探讨工业互联网平台与制造业绿色创新效率两者之间的关系是否仍然成立。回归结果见表 6，工业互联网平台对制造业绿色创新效率的推动作用在东部地区显著，而在中部和西部地区暂未显现，假设 H2 得以验证。

具体来看，列(1)显示，在东部地区，工业互联网平台水平每提高一个百分点，制造业绿色创新效率水平将提升 1.182 个百分点，且通过了 5%水平的显著性检验，与总样本回归结果得出的结论相一致，即工业互联网平台有利于推动制造业绿色创新效率的提升。列(3)～列(6)显示，在中部和西部地区，工业互联网平台对制造业绿色创新效率的影响并未通过统计性检验，即中部和西部地区的工业互联网平台发展并未明显赋能该地区制造业绿色创新效率。出现这种差异的主要原因是由于东部地区拥有相对于中部和西部地区更加发达的经济发展水平和配套设施、政策，配有完善的人才保障且市场驱动力旺盛，制造业企业更有动力利用工业互联网平台进行绿色创新；而中部地区的经济发展水平较东部地区来说还处于发展阶段，尚未成熟，相关的人才、设备等资源的丰富程度不如东部地区，这限制了工业互联网平台对制造业绿色创新效率的提升作用，影响未显著体现；西部地区的基础设施等条件相对薄弱，无法有效支持工业互联网平台的高效运行，其面临的环境挑战也更加严峻，人才、资金外流加上市场驱动力不足，导致工业互联网平台的应用甚至可能对制造业的绿色创新效率产生负面影响。

表 6　异质性分析结果

变量	东部		中部		西部	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	MGIE	MGIE	MGIE	MGIE	MGIE	MGIE
IIL	1.182**	1.391***	1.573	−0.280	−0.446	0.217
	(2.29)	(2.78)	(0.75)	(−0.06)	(−0.62)	(0.30)
POP	−0.001	−0.000	−0.003	0.002	−0.013**	−0.015***
	(−0.64)	(−0.26)	(−0.53)	(0.18)	(−2.15)	(−2.64)
URB	0.009	0.028**	−0.009	−0.058	0.015**	−0.030*
	(1.36)	(2.47)	(−0.68)	(−1.23)	(2.57)	(−1.92)
CYG	−0.167**	−0.045	0.064	−0.006	−0.188**	−0.132
	(−2.03)	(−0.44)	(0.83)	(−0.07)	(−2.23)	(−1.23)
GOV	0.008	0.001	0.010	−0.001	0.008	−0.005
	(0.88)	(0.14)	(1.40)	(−0.13)	(1.51)	(−0.85)
ER	0.437	0.047	−0.093	−0.138	−0.146	−0.259
	(1.32)	(0.13)	(−0.28)	(−0.28)	(−0.81)	(−1.09)
FDI	0.017	−0.001	−0.062*	−0.079	0.003	0.059
	(1.26)	(−0.05)	(−1.69)	(−1.60)	(0.12)	(1.58)
常数项	0.481	−1.199	1.525	3.604*	1.298	4.310***
	(0.55)	(−0.95)	(1.20)	(1.73)	(1.52)	(3.50)
样本数	132	132	96	96	132	132
R^2	0.883	0.907	0.685	0.733	0.526	0.616
个体固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
时间固定效应	No	Yes	No	Yes	No	Yes
adj. R^2	0.866	0.882	0.631	0.638	0.456	0.512
F	1.979	3.196	2.331	1.170	2.307	4.422

注：*、**、***分别表示通过 10%、5%、1%水平下的显著性检验；括号内为 t 统计量。

4.4　作用机制检验

在前文的作用机制分析中，假设工业互联网平台会通过影响创新资源要素配置和区域经济发展水平，进而作用于制造业的绿色创新效率，为检验两者的中介作用，采用中介效应模型进一步检验该作用渠道是否存在。借鉴江艇[41]对中介效应的分析建议，在基准回归模型(1)的基础上设定如下模型进行中介效应检验。

$$\begin{aligned}IFA_{it} = {} & \alpha_0 + \alpha_1 IIL_{it} + \beta_1 \ln POP_{it} + \beta_2 \ln URB_{it} + \\ & \beta_3 CYG_{it} + \beta_4 GOV_{it} + \beta_5 ER_{it} + \\ & \beta_6 FDI_{it} + \mu_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \qquad (5)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}LED_{it} = {} & \alpha_0 + \alpha_1 IIL_{it} + \beta_1 \ln POP_{it} + \beta_2 \ln URB_{it} + \\ & \beta_3 CYG_{it} + \beta_4 GOV_{it} + \beta_5 ER_{it} + \\ & \beta_6 FDI_{it} + \mu_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \qquad (6)\end{aligned}$$

中介效应检验结果见表 7。列(3)、列(4)结果表明，解释变量 IIL 对中介变量 IFA 的回归系数显著为负，表明工业互联网平台会提高创新资源配置效率，结合前文相关论述可知，工业互联网平台能够通过影响创新资源配置系数，进而提升制造业绿色创新效率，假设 H3 得以验证。列(5)、列(6)结果表明，解释变量 IIL 对中介变量 LED 的回归系数显著为正，表明工业互联网平台会提高区域经济发展水平，综合前文论述可知，工业互联网平台能够通过影响区域经济发展水平，进而提升制造业绿色创新效率，假设 H4 得以验证。

5　结论与建议

5.1　结论

(1)由于在样本期 2012—2023 年各省的经济发展、技术水平等存在明显差异性，导致工业互联网平台发展水平与制造业绿色创新效率在各省域之间也存在明显的差异性。

(2)从全国层面来看，工业互联网平台对区域制造业绿色创新效率的影响确实存在，但该效应具有明显的区域异质性，具体来看，两者之间的推动作用在东部地区最显著，而在中部和西部地区不显著，这可能是由于各地区的要素禀赋、发展水平差异导致的。

(3)工业互联网平台能够推动制造业绿色创新效率的提升，其具体的作用机制在于工业互联网平台能够通过影响区域创新资源配置效率和区域经济发展水平，进而作用于制造业绿色创新效率。

5.2　建议

(1)因地制宜，实施差异化发展战略。由于各地区之间的资源禀赋以及经济发展水平等存在差

表 7　中介效应检验结果

变量	基准回归		中介效应			
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	MGIE	MGIE	IFA	IFA	LED	LED
IIL	1.043***	0.989**	−0.663*	−1.254***	13.595***	6.208***
	(2.65)	(2.27)	(−1.74)	(−2.96)	(5.15)	(2.86)
POP	−0.001	−0.001	−0.002*	−0.001	0.025***	0.021***
	(−1.14)	(−1.05)	(−1.65)	(−1.27)	(5.42)	(4.85)
URB	0.005	0.008	−0.007	−0.023**	0.092***	−0.221***
	(1.59)	(1.06)	(−1.37)	(−2.54)	(4.91)	(−6.00)
CYG	−0.141***	−0.074	0.223**	0.207	1.058***	−0.324
	(−2.68)	(−1.30)	(2.10)	(1.51)	(3.34)	(−1.33)
GOV	0.013***	0.012***	−0.001	0.004	−0.164***	−0.169***
	(3.64)	(3.31)	(−0.11)	(0.79)	(−10.68)	(−11.45)
ER	−0.024	−0.213	−0.140	−0.143	−1.322*	0.086
	(−0.16)	(−1.21)	(−0.52)	(−0.51)	(−1.95)	(0.15)
FDI	0.005	0.003	0.058***	0.074***	−0.190***	0.086
	(0.41)	(0.23)	(3.49)	(3.97)	(−3.61)	(1.39)
常数项	0.479	0.216	1.522***	2.324**	−9.407***	14.081***
	(1.09)	(0.29)	(3.37)	(2.41)	(−3.94)	(4.05)
样本数	360	360	360	360	360	360
R^2	0.832	0.854	0.808	0.815	0.953	0.970
个体固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
时间固定效应	No	Yes	No	Yes	No	Yes
adj. R^2	0.813	0.832	0.787	0.788	0.947	0.966
F	3.512	2.629	4.979	4.050	198.5	47.66

注:*、**、***分别表示通过 10%、5%、1%水平下的显著性检验;括号中为 t 统计量。

异,所以各地政府应该根据本地特征制定符合本地发展需求的发展战略,进一步缩小各省域工业互联网平台发展水平和制造业绿色创新效率的差异,加强区域协同发展。首先,要重视相关基础设施建设,加快大数据、云计算、人工智能等新一代数字技术的应用和普及,特别是落后地区的相关基建工作,为缩小地区间工业互联网平台发展水平差异提供物质基础,助力落后地区发挥好其后发优势。其次,要加强多元化人才队伍建设,运用工业互联网平台推动制造业绿色创新效率的提升,亟须一批高素质的复合型专业人才,必须从教育层面入手培育人才。相关学府、院校应加强对技术、技能型人才的培养,丰富人才储备;制造业企业也要加强对现有员工的培训,提高员工整体素养,为制造业的绿色创新注入新动力。具体来看,东部地区,应积极加强工业互联网平台的应用深度,打破其制造业绿色创新瓶颈;而中西部地区应完善基础设施建设,并出台相关政策优化人才发展环境,加强与东部之间的技术交流和合作,推广协同创新,推动协调发展。

(2)加强顶层设计,完善相关政策体系。明确工业互联网平台在提升制造业绿色创新效率中的重要作用。首先,要加强政策支持和激励措施,要提供税收优惠、财政补贴等激励措施,鼓励企业利用工业互联网平台进行创新和研发,引导企业上云、上平台,实现产品的全过程管理,进而减少能耗和污染排放;需设立专项资金支持工业互联网平台的研发、推广以及相关人才的培养。其次,要加强宣传推广,在重点行业及地区开展工业互联网平台试点,建立示例项目,总结经验并向全国推广;需提升绿色产品市场认可度,引导消费理念绿色化转型。最后,要健全相关法律法规及监管机制,制定统一的工业互联网平台标准及安全规范体系,确保工业数据的安全和隐私保护以及各平台间的数据互操作性,促进数据的开放共享;加强国际合作,推动工业互联网平台国际化,借鉴国际先进经验,共同推动全球制造业的绿色转型。

(3)优化创新资源配置效率,提升制造业绿色创新效率。研究结果表明工业互联网平台通过影响创新资源配置系数来推动制造业绿色创新效率的提升。首先,可以构建省域间的创新资源共享机制,打破地区壁垒,实现地区间的创新资源信息共享,同时利用大数据分析精准匹配企业所需资源,及时、高效地确保资源流向最需要的领域,减少资

源错配。其次，推动跨行业、企业合作，利用工业互联网平台推进不同行业、企业之间进行资源整合，协同创新开发绿色项目。最后，企业也应加强与研发机构和高校的合作，深度融合创新链与产业链，从而资源共享，促进科研成果与产业需求对接，提高创新成果的转化率，推动产学研用一体化。

参考文献

[1] 陈武，陈建安，李燕萍. 工业互联网平台：内涵、演化与赋能[J]. 经济管理，2022，44(5)：189-208.

[2] 王玉荣，段玉婷，卓苏凡. 工业互联网对企业数字创新的影响：基于倾向得分匹配的双重差分验证[J]. 科技进步与对策，2022，39(8)：89-98.

[3] HUI L L，XIE H B. Industrial internet technology，resource reallocation and corporate risk-taking capacity：evidence from the strategic management perspective[J]. China Journal of Accounting Research，2024，17(4)：10038.

[4] 李君，邱君降，柳杨，等. 工业互联网平台评价指标体系构建与应用研究[J]. 中国科技论坛，2018(12)：70-86.

[5] 肖琳琳，王睿哲，夏宜君，等. 中国工业互联网平台发展指数构建及应用[J]. 科技管理研究，2023，43(13)：171-178.

[6] 任耀，牛冲槐，牛彤，等. 绿色创新效率的理论模型与实证研究[J]. 管理世界，2014，30(7)：176-177.

[7] 陈瑶. 中国区域工业绿色发展效率评估：基于R&D投入视角[J]. 经济问题，2018(12)：77-83.

[8] 聂名华，齐昊. 对外直接投资能否提升中国工业绿色创新效率？基于创新价值链与空间关联的视角[J]. 世界经济研究，2019(2)：111-122，137.

[9] BAI Y X，WANG C，ZENG M，et al. Does carbon trading mechanism improve the efficiency of green innovation? evidence from China[J]. Energy Strategy Reviews，2023，49：10117.

[10] LIN B Q，XIE Y J. Impact assessment of digital transformation on the green innovation efficiency of China's manufacturing enterprises[J]. Environmental Impact Assessment Review，2024，105：107373.

[11] 王惠，苗壮，王树乔. 空间溢出、产业集聚效应与工业绿色创新效率[J]. 中国科技论坛，2015(12)：33-38.

[12] ONU P，PRADHAN A，MBOHWA C. Industrial internet of things (IIoT)：opportunities，challenges，and requirements in manufacturing businesses in emerging economies[J]. Procedia Computer Science，2023，217：856-865.

[13] 王一晨. 运用工业互联网推动中国制造业转型升级[J]. 中州学刊，2019(4)：26-30.

[14] 蔡呈伟，戚聿东. 工业互联网对中国制造业的赋能路径研究[J]. 当代经济管理，2021，43(12)：40-48.

[15] YU F F，CHEN J Q. The impact of industrial internet platform on green innovation：evidence from a quasi-natural experiment[J]. Journal of Cleaner Production，2023，414：13764.

[16] GUO X X，LIU N. The industrial internet and green technology innovation[J]. Finance Research Letters，2024，66：105720.

[17] 李爱国，陈银忠，杨柏. 工业互联网、生产性服务业虚拟集聚与区域创新[J]. 科学学研究，2024，42(7)：1536-1546.

[18] 伍先福，李欣宇. 工业互联网对制造企业创新绩效的影响机制[J]. 科技进步与对策，2023，40(23)：92-102.

[19] 吕文晶，陈劲，刘进. 工业互联网的智能制造模式与企业平台建设：基于海尔集团的案例研究[J]. 中国软科学，2019(7)：1-13.

[20] 肖静华，吴小龙，谢康，等. 信息技术驱动中国制造转型升级：美的智能制造跨越式战略变革纵向案例研究[J]. 管理世界，2021，37(3)：161-179.

[21] 庄存波，刘检华，隋秀峰，等. 工业互联网推动离散制造业转型升级的发展现状、技术体系及应用挑战[J]. 计算机集成制造系统，2019，25(12)：3061-3069.

[22] 杜传忠，杨志坤，宁朝山. 互联网推动我国制造业转型升级的路径分析[J]. 地方财政研究，2016(6)：19-24，31.

[23] 王文娜，刘戒骄，张祝恺. 研发互联网化、融资约束与制造业企业技术创新[J]. 经济管理，2020，42(9)：127-143.

[24] GOLDFARB A，TUCKER C. Digital economics[J]. Journal of Economic Literature，2019，57(1)：3-43.

[25] 李燕. 工业互联网平台发展的制约因素与推进策略[J]. 改革，2019(10)：35-44.

[26] 周中林，何怡. 工业互联网平台助力传统制造企业转型升级研究[J]. 西南科技大学学报(哲学社会科学版)，2022，39(1)：51-59.

[27] 权锡鉴，史晓洁，宋晓缤，等. 资本配置结构优化的企业混合所有制：工业互联网平台的赋能机理与本质[J]. 会计研究，2020(12)：99-112.

[28] 孙新波，张明超，王永霞. 工业互联网平台赋能促进数据化商业生态系统构建机理案例研究[J]. 管理评论，2022，34(1)：322-337.

[29] 武汉大学工业互联网研究课题组. “十四五”时期工业互联网高质量发展的战略思考[J]. 中国软科学，2020(5)：1-9.

[30] 李慧泉，简兆权，林青宁. 数字经济发展能否改善中国资源错配[J]. 科技进步与对策，2023，40(16)：22-31.

[31] YANG Z B，SHAO S，LI C Y，et al. Alleviating the misallocation of R&D inputs in China's manufacturing sector：from the perspectives of factor-biased technological innovation and substitution elasticity[J]. Technological Forecasting and Social Change，2020，151：119878.

[32] 贺子欣，惠宁. 要素市场扭曲抑制了绿色创新效率提升吗：高技术产业集聚的调节效应[J]. 科技进步与对策，2022，39(21)：75-84.

[33] 赵玉林，刘超，潘毛毛. R&D资源错配与绿色创新效率损失：基于中国高技术产业的实证分析[J]. 科技进步与

对策,2022,39(4):49-59.
[34] 罗军. 数字化如何赋能制造业绿色发展[J]. 当代财经,2023(7):108-120.
[35] 刘美玲,王佳. 区域创新要素、配置效率与创新绩效[J]. 统计与决策,2022,38(9):169-174.
[36] 李婉红. 排污费制度驱动绿色技术创新的空间计量检验:以29个省域制造业为例[J]. 科研管理,2015,36(6):1-9.
[37] 吴传清,申雨琦. 中国装备制造业集聚对绿色创新效率的影响效应研究[J]. 科技进步与对策,2019,36(5):54-63.
[38] 李婉红. 中国省域工业绿色技术创新产出的时空演化及影响因素:基于30个省域数据的实证研究[J]. 管理工程学报,2017,31(2):9-19.
[39] TONE K. A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research,2002,143(1):32-41.
[40] 吕明元,程秋阳. 工业互联网平台发展对制造业转型升级的影响:效应与机制[J]. 人文杂志,2022(10):63-74.
[41] 江艇. 因果推断经验研究中的中介效应与调节效应[J]. 中国工业经济,2022(5):100-120.

Impact of Industrial Internet Platform on Efficiency of Green Innovation in Manufacturing Industry

LÜ Mingyuan, ZENG Yi
(School of Economics, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300133, China)

Abstract: As a brand-new industrial ecosystem resulting from the deep integration of new-generation information and communication technologies with the industrial economy, industrial internet platforms are of vital importance to the high-quality development of manufacturing. Based on the panel data of provinces and municipalities from 2012 to 2023, a fixed-effect model was used to empirically examine the impact of industrial internet platforms on the green innovation efficiency of manufacturing, as well as the mediating role of the innovation resource allocation coefficient and the regional economic development level in their relationship. The research findings indicate that industrial internet platforms have a significant positive effect on the green innovation efficiency of manufacturing. Industrial internet platforms significantly reduce the mismatch rate of innovation resources, promoting the rise of regional economic development levels and thereby enhancing the green innovation efficiency of the manufacturing industry. The impact of industrial internet platforms on the green innovation efficiency of manufacturing shows significant regional heterogeneity, with the most significant effect in the eastern region and no significant effect in the central and western regions. The research conclusions can provide theoretical guidance for the formulation of policies related to the development of industrial internet platforms and the high-quality development of manufacturing.

Keywords: industrial internet; green innovation efficiency; manufacturing industry