

工业智能化何以提升绿色全要素生产率？

王 钰 周歆雨 刘山峰

摘要:工业智能化是人工智能对工业的深度再造,赋能工业实现质量效率与绿色低碳协同发展。本文采用超效率基于松弛变量测度的全局马姆奎斯特-卢恩伯格(SBM-GML)模型,测算 2008—2023 年全国 235 个地级及以上城市工业绿色全要素生产率,并利用工业机器人渗透率衡量工业智能化水平,探究工业智能化对绿色全要素生产率的影响及其作用机制。研究结果显示,工业智能化提升了绿色全要素生产率。机制分析表明,工业智能化通过推动绿色技术创新、降低能源消耗强度促进绿色全要素生产率。交互效应分析表明,环境规制增强了工业智能化对绿色全要素生产率的提升作用。异质性分析表明,工业智能化的提升作用在东部地区、沿海城市和教育投入高的地区更明显。基于上述研究结论,本文提出应积极推动城市工业智能化发展、加大绿色技术创新扶持、深化智能节能全域改造、注重因城施策等政策建议。

关键词:工业智能化 新型工业化 绿色全要素生产率 环境规制 工业机器人

中图分类号:F062.4;F279.233.1

文献标识码:A

文章编号:1000-7636(2026)09-0049-14

一、问题提出

工业化是一个国家实现现代化的必经之路。中国的工业化走出了一条从无到有、从计划向市场、从传统向新型、从追赶到跨越的中国式现代化道路^[1]。这条道路的选择离不开国内发展阶段与世界格局变化的双重影响,特别是经济进入新常态后,国内转变经济增长方式恰逢全球新一轮科技革命。一方面,以人工智能、新能源等为代表的新技术加速迭代,逐渐渗入社会经济各个领域^[2],与传统产业深度融合,推动全球产业向高端化和智能化方向转变;另一方面,中国经济经过高速增长阶段后,资源和环境约束不断收紧,加之全球气候变暖加剧,在资本积累速度下降、人口红利消失、“干中学”技术进步效应消减、资源环境约束(“四层叠加”效应)的影响下^[3],粗放发展方式不可持续,经济向优质高效、绿色低碳方向转型刻不容缓。

面对全球产业变革浪潮与国内发展转型的迫切需求,中国已将智能化视为重塑工业竞争力、转变经济发展方式的关键引擎,并对工业化提出了一系列的战略部署。关于新型工业化的纲领性文件及相关内容如

收稿日期:2026-04-03;修回日期:2026-08-23

基金项目:国家社会科学基金重点项目“降碳、减污、扩绿、增长协同推进的理论与实践研究”(24AZD074);国家社会科学基金一般项目“对中国不同发展阶段减排目标的碳排放权分配机制研究”(14BJL101);首都经济贸易大学研究生科技创新项目“工业智能化对工业绿色发展效率的影响研究”(2025KJCX074)

作者简介:王 钰 首都经济贸易大学经济学院教授、博士生导师,北京,100070;

周歆雨 首都经济贸易大学经济学院博士研究生,通信作者;

刘山峰 首都经济贸易大学经济学院博士研究生。

作者感谢审稿快线专家的评审意见。

表 1 所示。

表 1 关于新型工业化的纲领性文件梳理

发布时间	文件名称	相关内容概括
2002 年 11 月	《全面建设小康社会,开创中国特色社会主义事业新局面——在中国共产党第十六次全国代表大会上的报告》	首次提出新型工业化道路及其主要特征
2007 年 10 月	《高举中国特色社会主义伟大旗帜 为夺取全面建设小康社会新胜利而奋斗——在中国共产党第十七次全国代表大会上的报告》	中国特色新型工业化道路,推进信息化和工业化融合(简称为“两化融合”)
2012 年 11 月	《坚定不移沿着中国特色社会主义道路前进 为全面建成小康社会而奋斗——在中国共产党第十八次全国代表大会上的报告》	坚持走中国特色新型工业化、信息化、城镇化、农业现代化道路(简称“新四化”),促进“新四化”同步发展
2015 年 8 月	《中国制造 2025》	坚持走中国特色新型工业化道路,以促进制造业创新发展为主题,以提质增效为中心,以加快新一代信息技术与制造业深度融合为主线,以推进智能制造为主攻方向,实现制造业由大变强的历史跨越
2022 年 10 月	《高举中国特色社会主义伟大旗帜 为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗——在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告》	2035 年基本实现新型工业化,推动制造业高端化、智能化、绿色化
2026 年 3 月	《中华人民共和国国民经济和社会发展第十五个五年规划纲要》	新型工业化、信息化、城镇化、农业现代化取得重大进展

资料来源:中国政府网。

政策层面已为工业发展指明前进方向,但现实挑战不容忽视。中国虽已成为门类齐全、规模最大、体系最完善的工业大国,但与世界发达经济体相比,工业化还存在进程不协调,自主创新能力、信息化、数字化水平有待提高,工业化速度与资源环境承载力不平衡等问题。2024 年,中国工业增加值和工业能源消费强度均超过美国、日本和德国^①。此外,国际机器人联合会(IFR)2023 年数据显示,中国工业机器人渗透率已处于世界领先地位,但工业 4.0 成熟度指标明显低于美国、日本和德国,这表明中国工业智能化过程中“机器换人”的速度虽然较快,但与真正的智能化仍有一定差距。

由此可见,“两化融合”是中国至 2035 年基本实现新型工业化的核心内容,而智能化是实现的具体路径和最终目标,这标志着新型工业化进入运用人工智能实现全要素和全流程相互联动协同的新阶段。工业智能化作为新生产模式,不仅对全要素从研发、生产、管理到服务的生命周期全流程重塑,更是工业化实现高端化、融合化、绿色化发展目标的核心实现形式。

那么,工业智能化究竟是什么?现有研究认为工业智能化是指开发人的智力资本,创新智能工具、智能软件、智能材料和各种智能基础设施,通过人机一体化的智能系统和基于互联网的分散式增强型控制,对所有传统产业和整个国民经济体系进行工业智能化改造的过程^[4]。从这一内涵出发,其对经济整体改造将涉及多个维度。工业智能化进入生产领域时最先影响的是劳动,它既具有总量上“锦上添花”的就业创造效应^[5],也具有结构上的替代效应^[6],由此引发了对收入分配情况的讨论。现有研究对综合影响是扩大^[7]还是缩小^[8]收入差距仍存争议。在资源和环境方面,工业智能化不仅能控制碳排放总量^[9],提升工业碳排放效率^[10],还可以降低企业污染物排放^[11]。在经济增长方式和经济效率方面,工业智能化通过优化生产要素配置^[12]和提升全要素生产率^[13]等途径将粗放型经济增长方式转向集约型,推动经济高质量发展。

① 依据国家统计局、世界银行世界发展指标(WDI)、国际能源署、美国商务部经济分析局、日本总务省《日本统计年鉴》和德国联邦统计局数据推算。各国工业增加值数据用现价美元计算,其中折算过程的汇率依据国际货币基金组织(IMF)提供的汇率计算。

衡量工业智能化发展过程是否兼顾效率与环境约束,绿色全要素生产率是核心观察指标,其本质为在传统全要素生产率框架中纳入能源消耗与污染排放,体现环境约束下的效率水平^[14-15]。学界对绿色全要素生产率的有效度量已形成较为成熟的方法论体系,现有研究主要通过马姆奎斯特-卢恩伯格 (ML) 指数^[16-17]、全局马姆奎斯特-卢恩伯格 (GML) 指数^[18] 等方法测算。基于上述测算框架,大量实证研究进一步揭示其影响因素。技术创新被认为是绿色全要素生产率提升的重要推动力。技术进步^[17],尤其是绿色技术进步^[16]对工业绿色全要素生产率提升有较强的促进作用。在数字化转型和生态文明建设的双重背景下,数字经济对工业绿色全要素生产率亦有提升作用^[19]。

然而,现有文献关于工业智能化对工业绿色全要素生产率影响的研究较为有限。比如,唐晓华和迟子茗从省级层面发现工业智能化能够促进工业绿色发展效率提升,但存在区域异质性与非线性特征,绿色技术创新与能源使用效率提升是核心机制^[20];杜传忠等从地级市层面发现工业智能化对于工业绿色转型的促进作用主要通过绿色技术创新、产业结构高级化与人力资本结构高级化来实现,且具有城市类型异质性与正向溢出效应^[21]。

由此,工业智能化能否促进绿色全要素生产率的提升?其机制是什么?本文立足经济和绿色协同发展视角,基于 2008—2023 年 235 个地级及以上城市数据考察工业智能化对绿色全要素生产率的影响。本文的边际贡献在于三个方面。第一,深入地级市层面,在更细分的空间范围内考察工业智能化对绿色全要素生产率的影响及其作用机制。这既弥补了省级层面研究无法详细分析城市间差异的不足,也在地级市层面研究的基础上兼顾绿色与效率。第二,不仅考察工业智能化对绿色全要素生产率的直接影响,还分析环境规制的交互作用。这不仅弥补了现有文献缺少外部因素分析的不足,也有助于揭示工业智能化的绿色效应在一定程度上依赖于环境规制的约束强度,从而深化了对工业智能化与绿色发展之间复杂关系的理解。第三,结合地理区位、区域禀赋、教育投入的异质性,厘清工业智能化影响绿色全要素生产率的边界情景,为制定差异化政策提供实证支撑。

二、理论分析与研究假设

(一) 工业智能化对工业绿色全要素生产率的影响

在现有的技术水平下,工业生产的投入仍依赖自然资源,且生产过程多为化学转化,产生的污染物破坏环境,影响经济可持续发展,而传统的污染治理方式多为末端治理。作为通用目的技术,工业智能化通过技术赋能重构生产函数内核,实现生产前沿面的系统性扩张。这一过程在提升生产效率和增强环境效益两个关键维度上推动绿色全要素生产率提升。在提升生产效率方面,工业智能化通过物联网和数字孪生技术重构生产要素组合方式,基于实时数据流实现资本、劳动力^[22]的动态优化匹配,使要素有效流向生产效率更高的环节,缓解生产过程中因要素错配导致的生产率降低问题^[23]。在增强环境效益方面,工业智能化通过多目标动态优化算法,将环境污染纳入生产决策的内生约束,在技术层面实现环境因素与经济效益的协同优化。具体而言,智能系统通过嵌入实时传感网络与算法控制器,将排放强度、碳足迹等环境指标转化为可量化的生产输入变量,并运用约束优化算法实现经济效益与环境成本的双重目标。在生产过程中,智能系统不仅能实时优化燃烧效率、降低污染物排放,还可通过物料循环的智能匹配与废料再利用率提升,直接减少固体废物产生。智能化将环境治理从末端治理转变为嵌入生产流程内部治理,从源头降低污染强度,从而增强环境效益。

基于上述分析,本文提出假设 1:工业智能化能够提升绿色全要素生产率。

(二) 工业智能化影响绿色全要素生产率的作用机制

具体而言,工业智能化促进绿色全要素生产率提升主要通过以下两个机制实现:一是促进绿色技术创新,二是降低能源消耗强度。

1. 促进绿色技术创新

工业智能化促进绿色技术创新,主要表现在以下方面。第一,降低绿色技术创新的成本和资金压力。工业智能化一方面依托数字孪生、虚拟仿真等技术,对绿色技术研发与应用全流程进行模拟验证^[20],降低研发损耗、缩短研发周期,从而缓解绿色技术创新的成本约束^[24];另一方面,优化生产管理流程,提高创新战略执行效率^[25],将成本节约并转化为绿色创新投入,进一步减轻企业资金压力。二者共同作用能有效破解绿色技术创新初期成本高、落地难的问题,为企业绿色技术创新释放更大的资金空间。第二,加速绿色技术创新应用和迭代。工业智能化一方面通过嵌入监测与清洁生产模块,实现能耗、排放实时监测与动态优化调控,增强绿色技术应用效果;另一方面,借助人工智能算法分析技术短板、推动绿色技术迭代升级,提升绿色技术创新效率^[24]。第三,促进绿色技术创新的广度和深度。工业智能化依托工业互联网平台,通过智能回收和数字孪生等技术,推动供应链协同^[25]、废弃物资源化利用与产品全生命周期绿色一体化创新,拓宽绿色技术创新的广度与深度。第四,工业智能化通过约束与激励双重机制,推动企业从被动合规转向主动绿色创新。工业智能化一方面通过智能监测与数据追溯可实时精准管控能耗与排放,强化环境约束,从而倒逼企业开展绿色技术创新^[26];另一方面,助力企业提升绿色绩效,企业获得政策支持与市场收益之后再次将资金投入绿色技术创新中,形成良性循环。第五,工业智能化通过工业互联网平台打破创新资源分散的壁垒。一方面,企业可通过平台对接高校、科研机构的绿色技术研发资源,引进先进的绿色技术和科研人才,解决企业自身研发能力不足的问题;另一方面,工业智能化通过平台推动各行业企业绿色创新协同,实现绿色技术创新经验的共享,提升行业整体绿色创新水平。

绿色技术创新作为推动绿色全要素生产率提升的内生动力,有助于工业企业采用高效节能的先进技术装备和无害化或低害化的新工艺,提高工业企业绿色生产水平,从而推动工业绿色转型^[27]。另外,绿色技术创新通过推动生产可能性曲线向外扩张促进企业绿色生产,从而提高绿色全要素生产率^[28]。

基于上述分析,本文提出假设2:工业智能化通过促进绿色技术创新,提升绿色全要素生产率。

2. 降低能源消耗强度

工业智能化降低能源消耗强度,主要体现在以下方面。第一,优化能源投入。工业智能化通过智能制造系统的生产流程数字化映射和自适应优化算法实时监测各生产单元的要素使用效率,并通过强化学习算法探索最优的能源使用策略^[29]。这不仅有助于缓解能源供应压力,增加清洁能源使用比重,还能降低能源使用成本。同时,工业智能化通过结合数字孪生技术构建生产过程虚拟镜像,最大限度减少非必要、非增值的能源消耗。第二,减少浪费。一方面,工业智能化通过工业物联网传感器、智能控制系统等技术,实时采集生产全流程的关键参数,并对其进行动态监测和闭环调控,从而替代传统高耗能、低效率的人工生产模式^[29],减少人工生产过程中的能源浪费^[30],提高能源利用效率。另一方面,工业智能化通过设备状态在线监测技术对生产设备的运行参数进行实时采集,根据故障诊断与预测性维护算法分析设备运行状态并预测设备劣化趋势,及时发现设备低效运行问题,避免能源浪费^[30]。第三,优化流程节约能源。工业智能化依托工业互联网平台,通过能源管理系统、大数据分析与全局优化算法等技术,打通生产、运输、能源管理等各环节的数据壁垒,优化能源与资本、劳动力等要素的组合比例,缓解要素错配问题,提升整体生产组织效率与能源利用效率。

能源消耗强度作为单位产出的能源消耗量,反映工业生产过程中能源利用效率和环境成本问题。一方面,能源消耗强度下降意味着单位产出所投入的能源要素减少,能源要素的边际产出提高,能源利用效率得到提升,同时也标志着工业生产模式从粗放式扩张转向集约高效、绿色低碳,减少工业发展对能源资源的过度依赖,降低因能源过度消耗带来的环境压力,进而提升绿色全要素生产率。另一方面,能源消耗强度下降能降低企业能源采购、加工成本,同时减少因能源过度消耗带来的环境治理成本。企业可将节约的资金与资源重新配置到技术研发、高端设备更新等环节,实现良性循环,在兼顾环境约束的同时,推动绿色全要素生产率提升。

基于上述分析,本文提出假设3:工业智能化通过降低能源消耗强度,提升绿色全要素生产率。

(三) 环境规制的交互作用

在纯粹的市场机制下,工业智能化带来的效率红利天然倾向于流向经济产出端而非环境优化端,即工业智能化所依托的人工智能算法、工业互联网平台等既可用于精准调控能源使用以实现节能降耗,也可用于高耗能生产线的效率倍增来实现产能扩张。前者主要表现为环境收益,见效相对缓慢,在企业投资决策中天然处于劣势,后者直接体现为经济效益。节能减排本身具有明显的外部性,但仅凭单纯的市场机制难以实现^[31]。此外,即便智能化技术被用于提升能源效率、降低资源消耗,但根据杰文斯悖论的经典逻辑,技术进步带来的单位产出能耗下降,会降低资源消耗的相对成本,反而刺激生产规模扩张与消费需求增长,最终可能导致资源消耗总量不减反增。按照这个逻辑,工业智能化效率提升越明显,引发的产量扩张冲动越强烈,单位能耗的下降越可能被总产量的激增所抵消。

工业智能化在缺乏外部制度约束的条件下,不仅面临绿色应用方向动力不足的困境,更面临效率提升可能反向加剧资源环境压力的悖论,因此需要环境规制予以纠偏,使有为政府与有效市场更好结合,从而加强工业智能化对工业绿色发展的促进作用。首先,当污染排放不再是无须付费的外部行为,而是将面临排污税费、超标罚金乃至限产停产等实质性成本时,降低能耗与排放便成为必须主动优化的核心成本,环境成本从外部性转化为内部性,从而工业智能化的绿色化应用方向获得市场逻辑的内在支撑。其次,环境规制以制度形式设定排放标准、能耗红线等资源环境边界,为生产规模的扩张划定了生态限制。在这一制度约束下,企业即使因智能化而获得了效率跃升的空间,也无法无限制地将效率转化为产量,而必须在给定的排放与能耗额度内进行生产,从而实现工业智能化促进工业绿色发展。

基于上述分析,本文提出假设4:环境规制能够强化工业智能化对绿色全要素生产率的提升作用。

三、实证设计

(一) 样本选取与数据来源

本文解释变量工业智能化的数据源自 IFR 官网数据库,被解释变量工业绿色全要素生产率和控制变量的数据源自《中国城市统计年鉴》《中国区域经济统计年鉴》、各省市统计年鉴和统计公报,机制变量中绿色技术创新的数据源自国家知识产权局,能源消耗强度的数据源自《中国能源统计年鉴》和各省(自治区、直辖市)统计年鉴。与此同时,考虑到样本数据的可得性,本文未涉及香港、澳门、台湾、西藏和新疆,并剔除其他省份中数据缺失较多的城市,最终样本包含 235 个地级及以上城市,样本时间为 2008—2023 年,少数缺失数据通过线性插值法补齐。

(二) 模型设定

本文设定双向固定效应模型,探究工业智能化对绿色全要素生产率的影响,具体如式(1)所示:

$$\ln GTFP_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 \ln Robot_{it} + X'_{it} \beta + \mu_i + \nu_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

其中, i 表示城市, t 表示年份。被解释变量 $GTFP_{it}$ 表示城市 i 在年份 t 的工业绿色全要素生产率,核心解释变量 $\ln Robot_{it}$ 表示城市 i 在年份 t 的工业智能化水平; α_1 表示工业智能化对绿色全要素生产率的影响,为本文主要关注的回归系数; X'_{it} 表示控制变量向量; μ_i 、 ν_t 分别表示城市固定效应、时间固定效应; ε_{it} 为随机扰动项。此外,稳健标准误聚类到城市层面。

(三) 变量说明

1. 被解释变量

本文借鉴杜传忠等^[21]的思路,同时考虑工业智能化发展已成为电力消耗的主要来源,选取第二产业从业人员数、规模以上工业企业资产总计、工业用电量和科学技术支出作为投入指标,分别代表劳动、资本、资源和

科技;将工业增加值作为期望产出指标,将工业废水排放量、工业二氧化硫排放量和工业烟(粉)尘排放量作为非期望产出指标,以此构建工业绿色全要素生产率的指标体系,具体如表2所示。其中,规模以上工业企业资产总计、科学技术支出和工业增加值分别通过以2008年为基期的固定资产投资价格指数^①、国内生产总值(GDP)平减指数和工业生产者出厂价格指数剔除价格因素。与此同时,本文构建超效率-基于松弛变量测度(Super-SBM)模型的GML指数对工业绿色全要素生产率进行测算^②,并对其进行对数化处理($\ln GTFP$)。

表2 工业绿色全要素生产率指标体系

类别	名称	定义	单位
投入	劳动	第二产业从业人员数	万人
	资本	规模以上工业企业资产总计	亿元
	资源	工业用电量	万千瓦时
	科技	科学技术支出	万元
产出	期望产出	工业增加值	万元
	非期望产出	工业废水排放量	万吨
		工业二氧化硫排放量	吨
		工业烟(粉)尘排放量	吨

2. 解释变量

本文参考现有文献^[32],利用工业机器人渗透率衡量工业智能化水平,同时考虑到不同城市在不同年份的工业机器人渗透率差异较大,为避免极端值对回归结果的影响,对其进行对数化处理($\ln Robot$),具体计算方式如式(2)所示。

$$Robot_{it} = \sum_{s=1}^S \frac{employ_{s,i,t=2008}}{employ_{i,t=2008}} \cdot \frac{Robot_{st}}{employ_{s,t=2008}}$$

(2)

其中, S 表示各行业合集; $Robot_{it}$ 表示城市*i*在年份*t*的工业机器人渗透率, $Robot_{st}$ 表示行业*s*在年份*t*的机器人安装数量, $employ_{s,t=2008}$ 表示行业*s*在2008年的就业人数, $employ_{i,t=2008}$ 表示城市*i*在2008年的就业人数, $employ_{s,i,t=2008}$ 表示城市*i*的行业*s*在2008年的就业人数。

3. 控制变量

本文参考已有文献^[20-21,33],控制如下变量(需要说明的是,控制变量中涉及价格的指标均已通过以2008年为基期GDP平减指数剔除价格因素):(1)经济发展水平($PGDP$),以人均GDP衡量;(2)政府干预水平(GOV),采用地方财政支出占GDP比重衡量;(3)城镇化水平($\ln UL$),采用城镇人口数占常住人口数比重的自然对数衡量;(4)金融发展水平($\ln FIN$),采用金融机构存贷款余额占地区生产总值比重的自然对数衡量;(5)对外贸易依存度($\ln TDR$),采用进出口总值占GDP比重的自然对数衡量;(6)产业结构合理化水平($\ln ISR$),本文参考干春晖等^[34]的研究方法测算产业结构合理化水平,并对其进行对数化处理。

(四) 变量描述性统计

主要变量的描述性统计结果见表3。其中,工业绿色全要素生产率均值为1.0473,表明中国工业绿色发展整体上呈现改善态势,但最值之间差距过大,反映出不同城市工业绿色发展水平存在显著的非均衡特征,部分地区绿色转型进程明显滞后;工业智能化均值为0.5025,标准差为1.5131,这表明多数样本城市的工业智能化程度不高,且呈现出典型的右偏特征。

① 由于2020年及以后的固定资产投资价格指数无法公开获取,故本文利用相应年份的工业生产者出厂价格指数(PPI)代替。
② 为保证后续实证分析样本量一致,被解释变量的样本时间范围为2007—2023年。

表 3 主要变量的描述性统计结果

类别	变量	样本量	均值	标准差	最小值	最大值
被解释变量	GTFP	3 760	1. 047 3	0. 377 2	0. 033 1	9. 280 6
解释变量	Robot	3 760	0. 502 5	1. 513 1	0. 001 2	39. 956 7
控制变量	PGDP	3 760	2. 730 1	1. 641 0	0. 360 2	14. 198 0
	GOV	3 760	18. 453 6	8. 686 7	4. 371 1	70. 437 3
	UL	3 760	56. 083 3	15. 479 1	13. 140 0	100. 000 0
	FIN	3 760	256. 802 1	121. 911 8	19. 973 1	1 223. 864 8
	TDR	3 760	19. 638 2	29. 753 2	0. 076 0	323. 113 3
	ISR	3 760	0. 224 9	0. 187 8	0. 000 1	1. 721 9

四、实证结果与分析

(一) 基准回归

基准回归结果如表 4 所示。其中,工业智能化的回归系数均在 1%水平下显著为正,假设 1 得到验证。具体来看,列(2)中工业智能化的回归系数为 4. 448 7,这表明工业智能化发展水平每提高 1%,工业绿色全要素生产率平均提升 4. 448 7%。原因可能在于,伴随着工业智能化发展,数字技术渗透工业生产过程中的每个环节:一方面,降低企业绿色技术研发成本和创新过程中的不确定性,提升企业绿色创新水平,从而提高绿色全要素生产率,促进工业绿色转型;另一方面,通过降低能源消耗,提高能源利用效率,进一步推动工业绿色发展。

表 4 基准回归结果

变量	(1)	(2)
lnRobot	1. 917 2 *** (0. 386 2)	4. 448 7 *** (1. 719 5)
GDP	0. 004 8 (0. 003 1)	0. 007 8 (0. 010 2)
GOV	0. 000 3 (0. 000 6)	0. 000 1 (0. 001 3)
lnUL	0. 073 7 ** (0. 029 0)	0. 037 3 (0. 049 6)
lnFIN	0. 028 9 ** (0. 012 3)	0. 007 6 (0. 035 8)
lnTDR	-0. 006 4 * (0. 003 7)	-0. 001 0 (0. 009 8)
lnISR	0. 001 4 (0. 004 8)	0. 008 4 (0. 008 4)
常数项	-0. 404 8 *** (0. 100 6)	8. 211 8 ** (3. 305 2)
城市固定效应	未控制	控制
时间固定效应	未控制	控制
样本量	3 760	3 760
R ²	0. 042 1	0. 142 0

注:***、**、* 分别表示 1%、5% 和 10% 的显著性水平,括号内为聚类稳健标准误。后表同。

(二) 内生性分析

考虑到双向因果、遗漏变量、选择偏差等可能导致模型内生性问题,本文采用两阶段最小二乘(2SLS)法、系统广义矩估计(SYS-GMM)和倾向得分匹配(PSM)进行内生性检验。

首先,关于工具变量法,本文参考唐晓华和迟子茗^[20]的方法,鉴于本城市以外地区工业智能化的平均水平与本城市的工业智能化水平存在一定的相关性,而与本城市的工业绿色全要素生产率不存在直接联系,使用同一时期本城市以外地区的工业机器人渗透率对数均值作为工具变量(IV),该工具变量满足外生性假设。表 5 前两列回归结果显示,解释变量与工具变量呈负相关,且通过识别不足检验和弱工具变量检验,说明工具变量选取具有合理性,解释变量的回归系数在 1%水平下显著,说明基准回归结论可靠。

其次,关于 SYS-GMM,本文参考孙早和侯玉琳^[35]的方法,考虑到光缆是数据传输的物理载体,是实现工业智能化的必要前提,光缆密度与工业智能化水平具有较强的相关性,同时鉴于光缆密度在很大程度上是由国家层面的长远战略规划、地理地形等决定,而非由当前各地区的短期环境效率水平决定,本文选取光缆密度作为工具变量,并采用 SYS-GMM 模型进行估计。需要说明的是,本文还参考王林辉等^[33]的计算方法,利用地级市市政公用设施建设固定资产投资比重将省级光缆数据折算至地级市。表 5 第三列回归结果显示,解释变量的回归系数在 10%水平下显著,证明工具变量有效,说明基准回归结论可靠。

最后,关于 PSM,本文将工业智能化水平排序后按照省份均值分为两组,高于均值的样本设为处理组,低于均值的样本设为控制组,以本文控制变量作为匹配使用的协变量,进行以 0.01 为卡尺范围的 1:1 不放回近邻匹配。匹配结果显示大部分协变量标准差偏差均小于 10%,且大部分 *t* 检验结果均无法拒绝原假设。表 5 第四列回归结果显示,解释变量的回归系数在 5%水平下显著,说明基准回归结论可靠。

表 5 内生性分析回归结果

变量	2SLS		SYS-GMM	PSM
	第一阶段	第二阶段		
<i>IV</i>	-23 401.270 0*** (2.675 9)			
<i>lnRobot</i>		4.462 7*** (1.724 2)	0.040 2* (0.021 4)	8.245 6** (3.844 6)
控制变量	控制	控制	控制	控制
城市固定效应	控制	控制	控制	控制
时间固定效应	控制	控制	控制	控制
样本量	3 760	3 760	3 525	132 0
Kleibergen-Paap rk LM	5.335 0 [0.020 9]			
Kleibergen-Paap rk Wald F	7.600 0×10 ⁷ {16.380 0}			
<i>AR</i> (1)			-4.400 0 (0.000 0)	
<i>AR</i> (2)			0.080 0 (0.933 0)	
Hansen <i>J</i>			170.130 0 (0.376 0)	

注:中括号内为不可识别检验 *P* 值,大括号内为弱工具变量检验在 10%水平下的临界值。

(三) 稳健性检验

1. 替换被解释变量

本文利用基于能量的模型(EBM)的 GML 指数重新测算工业绿色全要素生产率,并对其进行对数化处理。表 6 第一列回归结果表明,基准回归结论具有稳健性。

2. 替换解释变量

在稳健性检验中,本文参考王林辉等^[33]的构建思路和方法,同时考虑到工业智能化发展离不开新型数字基础设施建设,将已有研究指标体系中的“企业注册网站数”和“电子邮箱数”替换为新型数字基础设施建设,并参考钞小静等^[36]的方法,利用政府工作报告中新型数字基础设施建设相关词频占比衡量,从智能化条件、应用和成果三个方面构建指标体系重新衡量工业智能化发展水平,并对其进行对数化处理(lnRobot_1)。表6第二列回归结果表明,基准回归结论具有稳健性。

3. 其他稳健性检验

为进一步验证基准回归结论的稳健性,本文还采用控制高阶固定效应、更换聚类方式^[37]和缩小城市范围^[13]等方法进行稳健性检验。表6后三列回归结果表明,基准回归结论稳健。

表 6 稳健性检验回归结果

变量	替换被解释变量	替换解释变量	控制高阶固定效应	更换聚类方式	缩小城市范围
lnRobot	2.182 9 [*] (1.177 7)		4.828 1 ^{**} (1.946 8)	4.448 7 ^{**} (1.962 9)	4.501 0 ^{**} (1.731 7)
lnRobot_1		0.069 5 ^{**} (0.030 2)			
常数项	4.134 8 [*] (2.290 6)	0.076 5 (0.243 2)	8.879 9 ^{**} (3.709 3)	8.211 8 ^{**} (3.693 3)	8.172 5 ^{**} (3.279 1)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制
城市固定效应	控制	控制	控制	控制	控制
时间固定效应	控制	控制	控制	控制	控制
地区与时间固定效应	未控制	未控制	控制	未控制	未控制
样本量	3 760	3 760	3 760	3 760	3 696
R ²	0.126 1	0.141 6	0.160 8	0.142 0	0.139 6

(四) 机制检验

为进一步探究工业智能化通过哪些途径影响绿色全要素生产率,本文在式(1)的基础上设定如下机制检验模型:

$$M_{it} = \delta_0 + \delta_1 \ln Robot_{it} + X'_{it} \beta + \mu_i + v_t + \varepsilon_{it} \tag{3}$$

其中, M 表示机制变量,分别代表绿色技术创新(lnGPG)和能源消耗强度(EU)。具体而言,本文以城市绿色专利授权数的自然对数衡量绿色技术创新,采用城市能源消耗量与工业增加值之比衡量能源消耗强度。考虑到目前仅有各省、自治区、直辖市和极少部分地级市提供能源消耗数据,且规模以上工业能源消耗的数据存在大量缺失,本文参考李卫兵和涂蕾^[38]的方法,利用各省份能源消耗总量乘以各城市生产总值占所在省份生产总值的比重来估算各城市的能源消耗数据。

表7第一列回归结果表明,工业智能化提升了绿色技术创新水平。具体来说,绿色技术创新通过促使企业更新和应用能源管理系统、环保技术装备和无害化或低害化新工艺,提升绿色生产水平,促进工业绿色全要素生产率,实现工业企业向集约化清洁化低碳化生产转型^[39]。此外,绿色技术创新通过推动生产可能性曲线向外扩张、提高企业产品溢价能力、规避环境规制的惩罚成本,促进企业绿色生产,提高工业绿色全要素生产率^[28]。因此,工业智能化通过绿色技术创新提升绿色全要素生产率,故假设2成立。第二列回归结果表明,工业智能化降低了能源消耗强度,而能源消耗强度的下降本身意味着能源利用效率的提升,从而推

动工业绿色发展^[20],故假设3成立。

表7 机制检验回归结果

变量	lnGPC	EU
lnRobot	15.882 5 *** (4.276 8)	-9.750 6 ** (4.861 4)
常数项	34.479 3 *** (8.383 8)	-18.724 6 ** (9.063 5)
控制变量	控制	控制
城市固定效应	控制	控制
时间固定效应	控制	控制
样本量	3 760	3 760
R ²	0.955 4	0.901 9

表8 交互效应分析回归结果

变量	lnGTFP
lnRobot	4.608 4 *** (1.759 2)
lnER	0.040 7 ** (0.018 9)
lnRobot×lnER	0.014 9 ** (0.006 2)
常数项	8.400 6 ** (3.374 6)
控制变量	控制
城市固定效应	控制
时间固定效应	控制
样本量	3 760
R ²	0.143 8

2. 区域禀赋

考虑到不同的区域要素禀赋会对工业智能化推动工业绿色发展的过程产生一定影响,本文将研究样本划分为沿海城市和内陆城市^①并进行分组回归。表9中间两列回归结果显示,工业智能化对绿色全要素生产率的促进作用在两组中均存在。一方面,沿海城市以电子信息、纺织轻工等为主导产业,生产流程模块化程度高,人工智能技术应用场景丰富,智能化对能耗优化、物料循环利用的渗透路径更为直接。相比之下,内陆城市以资源开采、金属冶炼等重工业为主,智能技术基本应用于安全监测、热效率监控等单点环节,难以深入动态全局优化,因此绿色转化效率相对有限。另一方面,沿海城市相较于内陆城市集聚了大量数字

(五) 交互效应分析

为探究环境规制对工业智能化与绿色全要素生产率之间关系的影响,本文设定如下交互模型:

$$\ln GTFP_{it} = \eta_0 + \eta_1 \ln Robot_{it} + \eta_2 \ln ER_{it} + \eta_3 \ln Robot_{it} \times \ln ER_{it} + X'_{it} \beta + \mu_i + \nu_t + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

关于环境规制,本文参考陈诗一和陈登科^[40]的方法,利用政府工作报告中与环境规制相关的词汇出现的频次占全文词频总数比重的对数来衡量环境规制(lnER)。由表8可知,环境规制在5%水平下对工业智能化与绿色全要素生产率之间的关系产生正向交互作用,故假设4成立。

(六) 异质性分析

1. 地理区位

由于中国东部和中西部地区在经济、科技和绿色等方面发展存在差异,本文将研究样本划分为东部、中西部地区两个组别。表9前两列回归结果显示,两组工业智能化均能促进绿色全要素生产率提升。相较而言,东部地区经济发展情况更好,具有更强的技术创新能力,促使工业智能化发展速度加快,并且东部地区在发展中更重视环境问题,更有利于工业智能化推动绿色全要素生产率提升;而中西部地区则需加快发展工业智能化,推动绿色全要素生产率提升。

① 沿海城市包括辽宁、河北、天津、山东、江苏、浙江、上海、福建、广东、广西、海南这些省份的城市,其余城市划分为内陆城市。

经济人才,工业互联网平台搭建更完善,智能技术的绿色效益通过产业链协同以及上下游配套设施实现指数级放大,而内陆城市则面临数字人才缺乏困境,智能技术绿色效能的释放更依赖外部成套软件的引入,缺乏二次开发与系统集成能力,造成一定的效率损失。

3. 教育投入

考虑到不同城市教育投入水平不同,工业智能化对工业绿色发展过程产生的影响亦有所不同,本文根据教育投入水平的中位数将样本划分为高、低投入水平组,并进行分组回归。表9后两列回归结果显示,只有高投入水平组的工业智能化促进了绿色全要素生产率提高。这可能是因为高教育投入水平意味着该城市拥有更具数字素养的劳动力储备和更活跃的校企研发合作网络,有效降低企业引入智能化设备后的协调摩擦成本,使智能技术促进绿色全要素生产率提升更为顺利有效;而低教育投入水平的地方对教育公共品的供给不足,企业面临高技能劳动力短缺和外部技术配套缺失的困局,二者之间的促进作用受到试错成本和制度摩擦影响,从而低教育投入水平组的回归系数并不显著。

表 9 异质性分析回归结果

变量	地理区位		区域禀赋		教育投入	
	东部地区	中西部地区	沿海城市	内陆城市	高投入水平组	低投入水平组
lnRobot	25.703 6 ** (11.665 1)	3.532 5 *** (0.929 1)	18.038 1 * (9.360 5)	3.230 5 *** (0.903 6)	4.096 0 ** (1.994 0)	6.271 7 (3.946 9)
常数项	46.766 1 ** (21.521 9)	6.867 8 *** (1.823 5)	32.507 2 * (17.158 4)	6.259 8 *** (1.784 7)	9.422 6 ** (4.505 6)	9.170 6 (6.147 9)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制	控制
城市固定效应	控制	控制	控制	控制	控制	控制
时间固定效应	控制	控制	控制	控制	控制	控制
样本量	1 472	2 288	1 616	2 144	1 880	1 880
R ²	0.170 5	0.143 6	0.160 9	0.149 3	0.206 0	0.152 3
邹检验	6.130 0 **		4.250 0 **		3.160 0 **	

五、结论与建议

本文采用超效率 SBM-GML 模型测算 2008—2023 年全国 235 个地级及以上城市工业绿色全要素生产率,并利用工业机器人渗透率衡量各城市工业智能化水平,实证研究工业智能化对绿色全要素生产率的影响及其作用机制。研究结果显示,工业智能化促进了绿色全要素生产率提升。机制分析表明,工业智能化通过促进绿色技术创新、降低能源消耗强度提升绿色全要素生产率。交互效应分析表明,环境规制增强了工业智能化对绿色全要素生产率的提升作用。异质性分析表明,工业智能化的提升作用在地理区位、区域禀赋、教育投入方面具有异质性。

基于以上结果,本文提出如下政策建议:

第一,积极推动城市工业智能化发展,助力绿色全要素生产率提升。政府需以智能化与绿色化深度融合为核心,破除工业智能化转型“重产能、轻绿色”的市场偏差。一是要加快构建高速、安全、覆盖范围广的工业网络基础设施,完善数据要素市场化配置机制,建立可信的数据共享与流通体系,为工业智能化发展提

供坚实的基础保障。二是建立健全一体化的工业智能化量化评价体系与绿色标准,从能耗管控、绿色产出等多维度设定考核标准,实现精准研判与动态监测,同时明确工业智能化改造的节能降耗技术要求与清洁生产实操准则,确立智能化改造的绿色能效底线,推动工业智能化绿色转型标准化规范和精细化考核。三是要搭建工业互联网绿色赋能平台,引导平台企业开发绿色化专属模块,整合能耗数据采集与分析、污染排放预警、绿色工艺推荐等功能,同时建立跨行业、跨区域的智能绿色数据共享机制,推动产业链上下游企业智能设备、绿色技术互联互通,破除数据孤岛。四是应完善数据安全与合规监管体系,确保数据流通的安全性,为工业智能化提供稳定可靠的制度环境。

第二,加大绿色技术创新扶持力度,畅通绿色技术成果转化增效路径。考虑到绿色技术创新研发自身存在风险高、外溢性强、转化慢的痛点,一是要设立智能化绿色技术创新专项基金和绿色技术中试专项与工程化配套资金,重点支持低碳工艺、清洁生产等前沿绿色技术攻关,开展中试验证与示范产线建设,对企业联合高校、科研院所建立的绿色智能创新联合平台给予长期资金扶持,降低企业绿色技术研发成本与风险,破解绿色科技成果应用转化瓶颈。二是要搭建智能化绿色技术转化平台,建设绿色智能技术中试基地和验证场景,建立从研发到中试再到产业化的全流程服务机制,对成熟度高、节能降碳效果显著的技术,通过首台(套)装备补贴、政府优先采购、市场准入倾斜等方式加速推广,降低企业应用绿色技术创新成果的市场风险。三是要完善科技财税与金融协同激励机制,将企业绿色专利产出、绿色工艺智能化应用率纳入科技补贴核心指标,对绿色技术产业化项目提供低息信贷与财政贴息,对利用人工智能开展绿色技术研发的企业给予研发费用加计扣除比例提升、专利申请费用减免等支持。四是要完善绿色专利产权保护制度,保障企业绿色创新收益。

第三,深化智能节能全域改造,依托能耗优化筑牢长效增收机制。考虑到工业能源消耗目前存在管控粗放、结构不合理、效率偏低等问题,一是要督促高耗能企业部署能源管控系统,使企业对生产和运输过程中的能源消耗进行实时监测、精准核算以及动态优化,对实现能耗智能调控的企业按投入比例给予财政补贴,同时建立工业能耗大数据监管平台,对接企业智能管控系统,实现政府对企业、行业、区域能耗的实时监控、预警与调度。二是要推动智能节能装备规模化应用,实施通用设备智能化节能改造工程,推广高效节能技术装备,对企业购置、更新二级及以上能效智能节能设备给予购置补贴、加速折旧等支持。三是要实施行业能效智能化标杆引领行动,分行业制定能效准入与领跑标准,将智能能耗管控能力纳入评定核心,对能效领跑企业给予政策倾斜,同时对于能效低于准入水平的企业要求限期开展智能化节能改造,逾期未达标实施限产,甚至停产整治。

第四,针对不同城市探索差异化的工业智能化发展模式。工业智能化的发展需要因城施策,充分考虑不同城市资源禀赋、综合实力等方面的差异性。对于综合实力强、创新资源密集的城市,政府部门应侧重于构建高端算力基础设施、推动大模型技术研发与行业应用深度融合,以技术溢出效应带动区域工业智能化水平整体提升。对于传统工业占比较高、数字化基础较弱、环境监管政策较为严格的城市,政府部门的重点应放在工业智能化改造的普惠性支持上,如提供设备购置补贴、降低算力使用成本,并配套技术培训以提升劳动力技能素质,同时应建设区域性工业互联网平台,避免因技术鸿沟产生区域工业智能化发展不平衡问题。总之,各地政府应根据城市发展阶段建立动态评估机制,适时适度调整政策工具组合,确保政策与工业智能化转型需求的适配性,推进工业绿色发展。

参考文献:

- [1] 黄群慧. 中国共产党领导社会主义工业化建设及其历史经验[J]. 中国社会科学, 2021(7): 4-20.

- [2] 朱小刚, 刘博, 刘春年. 数字化提升企业绿色创新质量的机制研究[J]. 首都经济贸易大学学报, 2024, 26(1): 18-33.
- [3] 黄群慧, 李芳芳. 中国式现代化语境下推进新型工业化的逻辑与路径[J]. 财贸经济, 2024, 45(1): 28-38.
- [4] 贾根良. 第三次工业革命与工业智能化[J]. 中国社会科学, 2016(6): 87-106.
- [5] Shen Y, Zhou P F. Technological anxiety: analysis of the impact of industrial intelligence on employment in China[J]. Chinese Journal of Population, Resources and Environment, 2024, 22(3): 343-355.
- [6] 田高良, 施诺, 刘晓丰. 智能制造与劳动力成本粘性: 基于工业机器人应用的视角[J]. 经济管理, 2023, 45(9): 28-49.
- [7] 孙早, 宗睿. 工业智能化、劳动力技能结构与行业收入差距[J]. 中国工业经济, 2025(1): 62-80.
- [8] 程时雄, 陈雨飞. 工业机器人应用、技能差异与收入不平等: 基于城乡二元结构的视角[J]. 经济学动态, 2025(2): 37-54.
- [9] 仲崇阳, 张雨朦, 马新啸. 智能制造对中国城市低碳发展的赋能效应: 基于工业机器人应用视角[J]. 资源科学, 2024, 46(4): 728-743.
- [10] 王艳秋, 陶思佳. 工业智能化对中国工业碳排放效率的影响及空间效应研究[J]. 技术经济, 2023, 42(1): 130-140.
- [11] 任晓聪, 李政道. 工业机器人能否促进制造企业污染减排: 基于我国制造业上市企业的实证分析[J]. 经济体制改革, 2024(4): 108-115.
- [12] 韩永辉, 刘洋. 少子老龄化、工业智能化与宏观经济波动: 基于内生经济增长理论的 DSGE 模型分析[J]. 管理世界, 2024, 40(1): 20-37.
- [13] 金光敏, 祝滨滨. 工业智能化对区域高质量发展的影响机制及空间溢出效应[J]. 经济地理, 2025, 45(10): 121-130.
- [14] 牛晓童, 刘鑫, 杨友才. 数据资产化能否提升企业绿色生产效率? [J]. 经济与管理研究, 2026, 47(8): 36-55.
- [15] 涂正革. 环境、资源与工业增长的协调性[J]. 经济研究, 2008(2): 93-105.
- [16] 魏奇峰, 谭娟, 石琳娜. 成渝地区双城经济圈工业绿色全要素生产率测度及空间分异研究[J]. 软科学, 2023, 37(2): 103-111.
- [17] 王建事, 于尚坤, 胡瑞, 等. 中国工业高质量发展的时空演变及其科技创新驱动机制[J]. 资源科学, 2023, 45(6): 1168-1180.
- [18] 杨文举, 王其. 化解产能过剩有助于绿色全要素生产率提升吗?: 基于中国工业去产能的准自然实验[J]. 经济问题, 2022(7): 1-12.
- [19] 程文先, 钱学锋. 数字经济与中国工业绿色全要素生产率增长[J]. 经济问题探索, 2021(8): 124-140.
- [20] 唐晓华, 迟子茗. 工业智能化提升工业绿色发展效率的实证研究[J]. 经济学家, 2022(2): 43-52.
- [21] 杜传忠, 曹雅慧, 孟天赐. 工业智能化影响中国工业绿色转型: 机制与效应[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2025, 25(3): 62-76.
- [22] Acemoglu D, Restrepo P. Artificial intelligence, automation, and work [M]//Agrawal A, Gans J, Goldfarb A. The economics of artificial intelligence: an agenda. Chicago: University of Chicago Press, 2019: 197-236.
- [23] Bartelsman E, Haltiwanger J, Scarpetta S. Cross-country differences in productivity: the role of allocation and selection[J]. American Economic Review, 2013, 103(1): 305-334.
- [24] 余正颖, 李宗洋, 李胜会. 数智赋能视角下人工智能发展对城市绿色技术创新的影响研究[J]. 经济问题探索, 2026(1): 54-70.
- [25] 梅冬州, 张弘正, 程琳. 人工智能应用的绿色创新效应研究[J]. 经济学动态, 2025(6): 33-50.
- [26] 马丽娜, 周佳男. 人工智能可供性情境下员工—AI 协作对企业绿色创新的影响机制[J]. 研究与发展管理, 2025, 37(6): 80-93.
- [27] 王阳, 郭俊华. 数字基础设施建设能否推动工业绿色转型发展?: 基于“宽带中国”战略的准自然实验[J]. 经济问题探索, 2023(8): 1-18.
- [28] 聂飞, 胡华璐, 李磊. 工业机器人何以促进绿色生产?: 来自中国微观企业的证据[J]. 产业经济研究, 2022(4): 1-14.
- [29] 张秀武, 沈洋. 人工智能对减污降碳协同治理的影响效应及作用机制研究[J]. 现代财经(天津财经大学学报), 2025, 45(5): 77-94.
- [30] 韩超, 李鑫平. 在自动化中推动企业绿色转型: 技术进步与产品重构效应[J]. 数量经济技术经济研究, 2023, 40(4): 72-93.
- [31] 张万里, 宣畅. 智能化如何提高地区能源效率?: 基于中国省级面板数据的实证检验[J]. 经济管理, 2022, 44(1): 27-46.
- [32] 魏下海, 张沛康, 杜宇洪. 机器人如何重塑城市劳动力市场: 移民工作任务的视角[J]. 经济学动态, 2020(10): 92-109.
- [33] 王林辉, 姜昊, 董直庆. 工业智能化会重塑企业地理格局吗[J]. 中国工业经济, 2022(2): 137-155.
- [34] 干春晖, 郑若谷, 余典范. 中国产业结构变迁对经济增长和波动的影响[J]. 经济研究, 2011, 46(5): 4-16.
- [35] 孙早, 侯玉琳. 工业智能化与产业梯度转移: 对“雁阵理论”的再检验[J]. 世界经济, 2021, 44(7): 29-54.
- [36] 钞小静, 廉园梅, 罗鑒楷. 新型数字基础设施对制造业高质量发展的影响[J]. 财贸研究, 2021, 32(10): 1-13.
- [37] 赵云辉, 孙源, 冯泰文, 等. 供应商 ESG 评级分歧何以影响企业运营韧性[J]. 中国工业经济, 2024(11): 174-192.
- [38] 李卫兵, 涂蕾. 中国城市绿色全要素生产率的空间差异与收敛性分析[J]. 城市问题, 2017(9): 55-63.
- [39] 步晓宁, 赵丽华. 自愿性环境规制与企业污染排放: 基于政府节能采购政策的实证检验[J]. 财经研究, 2022, 48(4): 49-63.
- [40] 陈诗一, 陈登科. 雾霾污染、政府治理与经济高质量发展[J]. 经济研究, 2018, 53(2): 20-34.

How Can Industrial Intelligence Enhance Green Total Factor Productivity?

WANG Yu, ZHOU Xinyu, LIU Shanfeng

(Capital University of Economics and Business, Beijing 100070)

Abstract: Industrial intelligence represents the deep transformation of industry driven by artificial intelligence and serves as a core driver for industrial transformation and upgrading, empowering industry to achieve coordinated advancement of quality and efficiency as well as green and low-carbon development. However, the path of China's industrialization is shaped by the domestic development stage and changes in the global landscape. On the one hand, new technologies are undergoing rapid iterations and becoming deeply integrated with traditional industries, promoting global industries towards greater sophistication and intelligence. On the other hand, following a period of rapid economic growth, China's economy has been increasingly constrained by resources and the environment. Coupled with intensifying global climate change, the extensive development mode is no longer sustainable, making the transition towards high-quality, more efficient, green, and low-carbon development imperative. Facing the demands of industrial transformation and upgrading, China still faces problems such as uncoordinated progress, insufficient independent innovation, and lagging informatization and digitalization. Therefore, this paper aims to assess the impact of industrial intelligence on green total factor productivity (GTFP), to provide implications for the development of industrial intelligence and the green transformation of industry at the city level.

This paper adopts the super-efficiency slack-based measure-global Malmquist-Luenberger (SBM-GML) model to calculate industrial GTFP of 235 prefecture-level and above cities in China from 2008 to 2023, and uses the penetration rate of industrial robots to measure the level of industrial intelligence. It explores the impact of industrial intelligence on GTFP and its underlying mechanisms. Empirical results show that industrial intelligence enhances GTFP. The findings remain valid after endogeneity analysis and a series of robustness tests. Mechanism analyses reveal two major channels, including driving green technology innovation and reducing energy consumption intensity. Interaction effect analysis demonstrates that environmental regulation strengthens the positive effect of industrial intelligence on GTFP. Heterogeneity analysis indicates that this positive effect is more pronounced in the eastern region, coastal cities, and areas with high levels of investment in education.

The possible marginal contributions are as follows. First, by conducting the analysis at the city level, this paper examines the impact of industrial intelligence on GTFP within a more detailed spatial scope. Second, it expands the research boundaries regarding the underlying mechanisms and the interaction effect of environmental regulations. Third, by incorporating the heterogeneity in geographical locations, regional endowments, and educational investment, it clarifies the boundary scenarios where industrial intelligence affects GTFP, thereby providing empirical support for formulating differentiated policies.

Keywords: industrial intelligence; new industrialization; green total factor productivity; environmental regulation; industrial robot

编校:周 斌;魏小奋