

工业智能化影响中国工业绿色转型：机制与效应

杜传忠，曹雅慧，孟天赐

摘要：工业绿色化是新型工业化的鲜明时代特征，也是工业高质量发展的内在要求。面对以“智能化”为主要特征的第四次工业革命的快速发展，加快推进工业智能化成为促进工业绿色转型的重要路径。本文在对工业智能化促进工业绿色转型机制进行理论分析的基础上，以中国 271 个城市面板数据为样本，使用多种模型实证考察了工业智能化对工业绿色转型的促进效应及内在机制。研究表明：(1) 工业智能化能够促进工业绿色转型，此结果在经过一系列稳健性及内生性检验后依然成立；(2) 异质性分析发现，工业智能化对中国工业绿色转型的影响在城市等级层面、资源禀赋层面、环境制度层面均表现出一定的异质性，具体来说，工业智能化对重点城市、非资源型城市、环境规制强度较高城市的绿色转型效应更为突出；(3) 中介机制分析表明，工业智能化的绿色转型效应主要通过促进绿色技术创新、推进产业结构高级化及人力资本结构高级化三条渠道实现；(4) 拓展性分析发现，工业绿色转型在城市间呈现正向空间相关性，且工业智能化对邻近地区工业绿色转型存在正向空间溢出效应。本文研究结论对加快推进中国工业智能化、实现工业绿色发展具有明显政策启示。

关键词：工业智能化；工业绿色转型；绿色技术创新；产业结构高级化；人力资本结构高级化

中图分类号：F424.1 **文献标识码：**A **文章编号：**1671-0169(2025)03-0062-15

DOI:10.16493/j.cnki.42-1627/c.20250407.001

一、引言

随着中国高质量发展和“双碳”战略的深入推进，绿色发展理念逐步贯穿于生产各领域各环节。工业作为国民经济的主导产业，其绿色转型是新型工业化的鲜明时代特征，对推动经济社会整体绿色化、低碳化至关重要^[1]。然而，在带来经济增长红利的同时，中国工业仍依赖于“高投资、高能耗、高排放”的粗放型发展模式，能源消耗与生态环境问题比较突出。2024 年 7 月，党的二十届三中全会审议通过的《中共中央关于进一步全面深化改革 推进中国式现代化的决定》明确强调“全方位、全领域、全地域推进绿色转型”“加快推进新型工业化，推动制造业绿色化发展”，这为推进工业绿色转型指明了前进方向。

在第四次工业革命背景下，互联网、云计算和大数据等先进智能技术不断取得突破，新一代信息技术与制造业加速融合，推动了工业智能化快速发展。工业智能化作为工业经济技术领域的新范式，在提升投入要素配置效率、推动技术进步、优化产业结构等方面已展现出巨大潜力。中

基金项目：国家社会科学基金重大项目“新一代人工智能对中国经济高质量发展的影响、趋向及应对战略研究” (20&ZD067)

作者简介：杜传忠，南开大学经济与社会发展研究院，duzhong@nankai.edu.cn (天津 300071)；曹雅慧，南开大学经济学院；孟天赐，四川大学经济学院 (四川 成都 610065)

国政府对工业智能化发展高度重视, 先后出台了《中国制造2025》《“十四五”智能制造发展规划》等多项专项规划及相应政策, 为工业部门智能化转型作出全面部署, 强调要以智能制造作为制造强国建设的主攻方向, 推动工业数字化、智能化发展, 加快工业绿色低碳转型和可持续发展。可以说, 中国的工业智能化变革承载着工业转型升级和实现绿色低碳发展的双重历史任务。深入研究工业智能化对工业绿色转型的促进作用及传导路径, 是加快推进新型工业化、实现由“工业大国”向“工业强国”跨越需要思考的重要课题。

二、文献综述

与本文有关的研究文献主要包括工业智能化内涵与影响效应的研究、工业绿色转型的测度方法与驱动因素研究、智能技术在推动工业绿色发展中的作用研究。

关于工业智能化内涵与影响效应的相关研究。在数字经济及人工智能发展浪潮的推动下, 关于工业智能化的研究日益丰富。第一, 关于工业智能化的内涵。工业智能化是工业化的高级形态, 指在工业领域中以大数据、人工智能技术、物联网为基础, 以提高生产效率、优化资源利用、降低成本并提升产品质量及竞争力为核心目标的产业形态^[2]。它不仅仅是简单的自动化, 更强调通过智能技术使生产过程更加灵活、高效、智能。第二, 关于工业智能化经济效应的研究。现有文献从劳动力市场、收入分配、技术进步与产业分工等方面进行了系统探讨。大多学者认为, 智能技术在工业领域的应用可增强持续竞争力, 有助于实现产业内的包容性增长, 增加就业机会^[3], 提升高技术产业在全球价值链中的地位^[4], 并通过调整劳动力、资本等投入要素配置结构^[5], 提高生产管理及经济发展效率^[6], 从而获得新的发展优势。随着工业化生产流程对绿色低碳的愈发重视, 已有部分文献从工业智能化角度探讨了绿色发展的路径与机制。大部分学者指出数字技术、人工智能等技术应用可在绿色技术进步、产业结构转型及人力资本结构优化等方面为可持续发展提供有力支撑^[7]。与此同时, 在新一轮科技革命的催化下, 新兴技术的广泛应用提升了资源的配置效率, 加速了劳动力与资本的优化积累, 共同驱动着工业的绿色转型^[8]。

关于工业绿色转型测度方法与驱动因素的相关研究。第一, 工业绿色转型的衡量方法主要有两类: 一类依据其理论内涵构建反映动态演变特征的指标体系, 常采用熵值法、主成分分析法等进行测度^[9]; 另一类从经济转型动力出发, 认为工业绿色全要素生产率是其核心驱动力, 通常运用随机前沿分析或数据包络分析进行量化评估^[10]。相较而言, 前者更具理论解释力, 但易受指标选择影响, 存在高估或低估风险。后者基于前沿面测度, 可在一定程度上避免共线性与内生性问题, 已逐渐成为主流方法。第二, 关于工业绿色转型的驱动因素, 学界普遍认为绿色技术创新是其核心动力^[11], 而强化环境监管^[12]、扩大外资规模^[13]、优化产业结构^[14]对推动工业绿色转型同样至关重要。研究还强调, 创造有利的创新环境、优化人力资本结构是实现工业可持续发展关键所在^[15]。

关于智能技术应用对工业绿色发展作用的相关研究。现有研究从理论与实证两个维度展开探讨, 主要通过环境绩效间接推测其绿色效应。多数文献认为, 智能技术有助于推动绿色技术进步与低碳发展, 提升能源与资源利用效率, 并通过智能检测、远程监控等手段强化环境监测与污染防治, 从而推动工业绿色转型^[16]。李国祥等^[17]从环境分权体制角度切入, 发现智能应用可实现环境精细化管理, 有效提高跨区域监管效率, 对环境污染改善效果明显。然而, 也有研究指出, 发展中国家在智能化转型中因缺乏相应的人力资本、物质资本和产业基础, 可能面临技术性失业及新的环境污染问题^[18]。有学者认为生成式人工智能本身能耗较高, 可能加剧能源压力并对可持续发展构成挑战^[19]。同时, 对于中国这种以煤炭等传统能源消耗为主的发展中国家, 工业智能化

应用还可能进一步加剧高消耗、高污染等生态问题。

综上所述，已有文献围绕工业智能化与绿色转型的相关问题进行了较为系统的探讨，为本文的研究提供了有益参考，不过仍存在有待推进和深入之处，主要包括以下几个方面。第一，在研究视角方面，现有文献多聚焦工业绿色化或工业智能化单一视角，而探讨工业智能化对工业绿色转型的影响、传导路径、空间溢出等深层次问题的文献相对匮乏。第二，在研究对象方面，现有研究多侧重省域或城市整体绿色发展，对工业部门绿色转型的关注不足，且受限于数据可得性，对城市层面工业绿色转型的实证分析仍较薄弱。第三，在指标测度方面，大多文献使用工业机器人安装或存量数据测度中国工业智能化水平，指标过于单一。同时，部分研究仅从节能、减排等层面评估地区工业绿色转型，对工业发展效率的关注不足。第四次工业革命背景下，工业智能化成为核心驱动力，相关的理论分析和实证研究需进一步深化。

基于以上分析，本文的边际贡献主要体现在以下三个方面。一是在研究视角方面，本文从工业智能化这一新视角出发，将工业智能化与工业绿色转型纳入同一分析框架，强调了智能技术在工业绿色转型中由“可选”向“必选”的角色变化。二是在研究内容方面，本文从平面与空间关联两个维度分析了工业智能化对工业绿色转型的作用效果，并从多重视角详细阐述了其内在传导路径，揭示了工业智能化推动工业绿色转型的“黑箱”。三是在研究设计方面，与聚焦省域层面的既有研究相比，本文以中国地级市为研究样本，更符合各地级市工业智能化和绿色发展差异较大的现实特征，使得异质性和空间溢出效应分析更加细致，增强了政策建议的针对性和参考价值。

三、理论分析与研究假说

（一）工业智能化对工业绿色转型的影响效应

工业绿色转型是一种兼顾生产效率提升与污染减排的可持续发展路径^[20]。工业智能化推动了生产环节优化、产业链协同、经济系统优化的逐级变革，有助于实现生产效率与环境效益双重提升，从而加快工业绿色转型进程。具体而言，从生产效率角度看，工业智能化通过自动化设备、智能制造系统和实时质量监测与数据分析等技术，实现了生产流程的智能化管理与控制。这不仅提高了工业产品质量的一致性和稳定性，还降低了生产成本，从而提升工业部门的生产效率。此外，工业智能化借助数字化和智能化的信息系统，能够促进产业链与跨部门之间的信息交流与共享，缓解传统组织中的信息不对称问题，提升组织内部运作的自主性与灵活性，为生产效率与经济效益的提升创造有利条件。从环境效益角度看，一方面，智能技术在工业领域的应用可优化生产流程，实现工业设备的自动化控制与调度优化，最大限度提高资源利用效率，减少资源与能源消耗，降低废水、废气等污染物排放。另一方面，通过技术识别、环境风险监控等感知系统，智能技术可实时监测并识别环境污染源及安全隐患，有助于增强工业企业对环境污染及突发安全事故的处理能力，促进废弃物的分类回收和再利用，降低环境污染，增大环境效益。基于上述分析，本文提出假说1。

H1：工业智能化可促进工业绿色转型。

（二）工业智能化促进工业绿色转型的作用机制

在工业4.0时代，智能技术广泛应用深刻改变了工业生产流程和组织结构，主要通过技术进步、产业结构优化和劳动力替代与升级三种路径推动工业现代化变革。工业智能化作为关键驱动力，通过绿色技术创新效应、产业结构优化效应和人力资本提升效应三条路径，促进工业绿色转型发展。

1. 绿色技术创新效应。工业智能化是绿色技术变革的重要推动力量。一方面，机器学习与大数据分析等智能技术为绿色技术开发提供技术基础和数据支持，帮助企业精准识别市场需求与技术趋势，提高绿色技术研发效率。工业智能化还促进跨部门、跨行业协同创新，加快绿色技术的

跨界融合与知识共享。另一方面, 工业智能化推动生产自动化与智能化, 释放劳动力参与创新活动, 并通过人才激励与培养机制强化绿色技术的人力资本保障。此外, 工业智能化还可催生出低耗、高效的工业新模式和新业态, 推动清洁能源与节能环保技术应用, 进一步助力绿色技术发展。技术进步是工业绿色转型的根本动力, 绿色生产技术是破解高投入、高消耗、高排放问题, 实现绿色发展的关键路径^[21]。绿色技术进步不仅能提供更多绿色解决方案, 降低资源消耗与企业运营成本, 还可提升资源利用效率, 推动工业绿色转型。基于此, 本文提出假说2。

H2: 工业智能化可通过促进绿色技术创新驱动工业绿色转型。

2. 产业结构优化效应。产业结构高级化转型依赖工业智能化的发展。第一, 自动化、物联网、大数据等智能技术的应用可推动传统产业向高附加值、高技术方向转型。受竞争示范效应影响, 未实现智能化的企业出于避免淘汰的动因, 也会通过模仿性同构效应效仿智能化企业的行为^[22], 从而促使传统制造业在生产、管理等方面发生深层变革。此外, 通过物联网、大数据和云计算等技术, 工业企业可提供增值服务, 推动传统制造业与服务业融合, 促进产业结构高级化发展。第二, 工业智能化的通用目的属性催生了新的产业链和商业模式, 驱动智能制造、智慧城市等智能化新兴产业的发展, 也优化了供应链管理, 提升产业体系的灵活性与协同性, 推动产业结构向高级化发展。产业结构的高级化是推动工业绿色转型的新引擎。产业结构高级化可引导劳动、资本密集型制造业向知识和技术密集型制造业转型, 推动资源从低效率企业向高效率企业流动, 提升资源配置效率和生产能力。同时, 高技术制造业更注重循环经济与环境保护, 有助于降低能源强度和减少污染排放, 推动工业绿色转型。基于此, 本文提出假说3。

H3: 工业智能化可通过促进产业结构高级化驱动工业绿色转型。

3. 人力资本提升效应。工业智能化发展推动了智能设备投资大幅增长, “机器换人”成为智能改造的主要手段, 促进了人力资本结构高级化转型^[23]。具体来说, 工业智能化推动了工业管理方式变革, 传统劳动密集型岗位逐渐被自动化设备替代, 提升了高技能劳动力的需求, 促进了劳动者技能升级和人力资本结构优化。尽管此过程中低技能岗位受到冲击, 但新兴产业提供了更多就业机会, 促使劳动者不断学习、适应新岗位要求, 提升人力资本水平^[24]。此外, 工业智能化强化了终身学习理念, 引导劳动者持续更新知识与技能。工业智能化发展强化了教育与技术的融合, 推动运用数字化工具提供教育资源与教学手段, 提高学习效率, 提升高技能劳动力培养质量。人力资本结构的提升意味着更多高技能劳动者参与生产活动, 其创新能力、领导能力和绿色意识明显增强。高技能劳动力更加注重质量管理, 通过精细化流程控制减少生产过程浪费, 有效提升资源利用效率并降低环境污染。同时, 高技能劳动力与智能设备协同匹配, 可提升生产中的数据分析、故障诊断与设备维修能力, 有助于提升生产效率与产品质量, 减少资源浪费, 推动绿色转型。基于此, 提出假说4。

H4: 工业智能化可通过促进人力资本结构高级化驱动工业绿色转型。

(三) 工业智能化对工业绿色转型的空间溢出效应

新经济地理学观点认为, 空间个体并非孤立发展, 生产要素的跨区域流动及信息交流有助于突破地理区位带来的市场分割, 使各地区的经济要素呈现出空间关联性^[25]。工业智能技术作为一种公共品, 具有极强的正外部性和高渗透性, 能够显著缩短信息传递的时空距离。通过地区间的技术扩散和创新互动、工业供应链和产业集群协同配合、制造业技术人才和高素质劳动力转移集聚, 工业智能化可有效促进制造业先进知识与技术在区域间充分传递与共享, 从而实现经济发展和环境改善。这对周边地区工业发展形成示范效应和技术溢出, 有助于邻近地区的工业智能化和绿色化转型。基于此, 本文提出假说5。

H5: 工业智能化对邻近地区的工业绿色转型存在空间溢出效应。

四、模型设定与数据说明

(一) 计量模型设定

基于前述研究假说,为检验工业智能化对工业绿色转型的直接影响,本文构建如下基准回归模型:

$$GTFP_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 Int_{it} + \alpha X_{it} + \mu_i + \sigma_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

其中, $GTFP_{it}$ 表示城市 i 在 t 年份的工业绿色转型水平; Int_{it} 代表城市 i 在 t 年份的工业智能化水平,根据其系数 α_1 的正负及大小判断工业智能化发展对工业绿色转型的影响效果。 X_{it} 为可能影响工业绿色转型的一系列控制变量; μ_i 、 σ_t 分别为城市、时间固定效应; ε_{it} 为随机扰动项。

为检验理论部分提出的工业智能化影响工业绿色转型的内在传导机制,本文构建中介效应模型,以判断工业智能化是否通过绿色技术创新、产业结构高级化和人力资本结构高级化等路径间接影响城市工业绿色转型。模型设定如下:

$$M_{it} = \beta_0 + \beta_1 Int_{it} + \beta X_{it} + \mu_i + \sigma_t + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

$$GTFP_{it} = \gamma_0 + \gamma_1 Int_{it} + \gamma_2 M_{it} + \gamma X_{it} + \mu_i + \sigma_t + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

其中, M_{it} 为中介变量,包括绿色技术创新 ($Green$)、产业结构高级化 ($Instru$)、人力资本结构高级化 ($Hstr$),其余符号含义与公式 (1) 一致。

(二) 变量选取

1. 核心解释变量:工业智能化 (Int)。现有研究对工业智能化的测度方法主要包括单指标和多指标两种方式。考虑到工业机器人安装及存量密度等单指标测度方法对工业智能化的评价相对片面,可能存在测试结果偏误,为此,本文参考王林辉等^[26]的研究,从智能化基础条件、应用深度、成果效益三个维度构建城市工业智能化发展指数。为保证测度的科学性,本文采用基于客观赋权的熵值法对其进行测度。工业智能化衡量指标及权重如表1所示。

表1 工业智能化衡量指标及权重

一级指标	二级指标	三级指标	计算方法
工业智能化 发展指数	智能化基础条件	通信技术和信息基础设施建设(29.45%)	光缆密度、移动交换机容量 ^①
		技术人才资源(4.87%)	科研从业人员数 ^② /当地年末常住人口数
		互联网普及率(13.01%)	互联网宽带接入用户数/当地年末常住人口数、移动互联网用户数/当地年末常住人口数
	智能化应用深度	工业机器人渗透度(12.51%)	工业机器人安装密度 ^③
		大数据采集、处理能力(20.00%)	信息传输、计算机服务和软件业从业人员数/总从业人员数
	智能化成果效益	智能化技术(12.57%)	人工智能专利数 ^④ /科研从业人员数
智能化企业(7.59%)		人工智能企业数/科研从业人员数	

① 光缆及移动交换机容量数据仅可查询到省级面板,参考王林辉等^[26]的方法将数据折算至地级市。

② 科研从业人员数采用科学研究、技术服务和地质勘察从业人员数来表征。

③ 将IFR的行业分类方法《国际标准行业分类》(ISIC Rev.4)与《国民经济行业分类》(GB/T 4754—2017)进行匹配归并,结合各行业机器人安装量与各地区行业就业份额,采用Bartik工具变量法计算城市层面的工业机器人安装密度。

④ 人工智能专利数:利用Python软件在中国专利数据库中爬取各地级市人工智能专利数据,得到地级市的人工智能发明专利、外观设计专利以及实用新型专利3个细分类目,加总得人工智能专利数。

2. 被解释变量: 工业绿色全要素生产率 ($GTFP$)。 $GTFP$ 涵盖了资源投入、环境污染、福利效益多方面, 能够从生产率视角反映绿色发展水平, 是衡量工业绿色转型的重要指标。本文参考黄磊等^[27]的研究, 在假定规模报酬可变条件下, 采用基于非径向、非角度的 Super-SBM Malmquist-Luenberger (ML) 生产率指数测度地级市 $GTFP$ 水平。ML 指数反映了 $GTFP$ 的增长速度, 借鉴李斌等^[28]的研究, 假设 2008 年的 $GTFP=1$, 则 $GTFP_{t+1}=GTFP_t*ML_{t+1}$ 。投入变量、产出变量设置如下。

投入变量。(1) 资本投入。由于工业资本存量无法全部获取, 这里使用规模以上工业企业资产总量测算, 为消除价格影响, 使用固定资产投资价格指数进行平减。(2) 劳动力投入。采用年末工业行业就业人数测度。(3) 能源消耗。使用工业能源消费总量进行衡量。工业能源消费总量使用标准煤折算系数将原煤、洗精煤等 20 种能源消费量折算为标准煤加总获得。鉴于一个城市的夜间灯光强度可大致反映该城市的经济活跃度, 这里以城市夜间灯光强度占省级夜间灯光强度的比重为权重, 将省级层面的工业能源消费量折算至地级市。

产出变量。(1) 期望产出, 使用地级市工业增加值进行测度, 并用工业生产者出厂价格指数进行平减。(2) 非期望产出, 使用工业二氧化硫排放量、工业废水排放量、工业烟(粉)尘排放量进行衡量。

3. 控制变量。除工业智能化这一核心解释变量外, 本文还引入若干控制变量, 以控制其他可能影响工业绿色转型的因素, 包括产业结构水平 (Ins), 以第二产业增加值占地区名义 GDP 的比重进行衡量; 经济发展水平 ($Pgdp$), 以人均实际 GDP 衡量; 外商直接投资 (Fdi), 以实际使用外商直接投资额在 GDP 中所占比例测度; 交通基础设施水平 ($Trans$), 选择人均城市道路面积进行衡量; 工业人口密度 (Inp), 使用工业劳动就业人数与城市工业建设用地面积比值度量。

4. 机制变量。(1) 绿色技术创新 ($Green$)。使用地级市每万人绿色专利授权量测度。(2) 产业结构高级化 ($Instru$)。参考袁航等^[29]的研究, 采用三次产业相对规模与各产业劳动生产率乘积的加权平均值进行衡量。(3) 人力资本结构高级化 ($Hstr$)。借鉴刘智勇等^[30]的研究, 采用向量夹角法衡量人力资本结构高级化水平。由于部分地级市数据缺失, 该方法仅适用于省级面板数据的人力资本结构测度。鉴于地区高等人力资本水平与人力资本高级化高度相关, 本文参考范子英等^[31]的数据折算方法, 以地级市高等教育在校学生数占全国比重作为权重, 将省级人力资本结构高级化数据折算至地级市层面。

(三) 数据说明

鉴于在城市层面上工业机器人及工业烟粉尘排放量等数据的可获取性, 本文选取了 2008—2019 年间中国 271 个城市的面板数据作为研究样本。人工智能专利数据来自中国创新专利研究数据库 (CIRD), 工业机器人安装流量数据收集于国际机器人联合会 (IFR), 人工智能企业数据来自天眼查企业信息数据库, 夜间灯光亮度原始数据来源于美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 提供的 SNPP-VIIRS 夜光遥感影像数据, 处理方式参考秦蒙等^[32]的研究, 绿色技术专利数据来自上海知识产权(专利信息)公共服务平台。其他变量数据均来自《中国城市统计年鉴》、各省份统计年鉴及 EPS 数据库。对于少量缺失值, 使用线性插值法进行补充。为避免变量极端值对估计结果产生偏误, 本文对连续变量进行上下 1% 的缩尾处理。

变量的描述统计如表 2 所示。被解释变量 $GTFP$ 的标准差为 1.775, 最小值为 0.142, 最大值为 10.977, 表明研究期内不同城市间工业绿色发展水平差异显著。解释变量 Int 的均值为 0.039, 最小值为 0.004, 最大值为 0.233, 反映出当前中国工业部门的智能化水平整体较低, 且城市间存在较大发展差异。中介变量和其他控制变量的统计特征与现有研究基本一致, 大多数变量均值大于标准差, 样本分布较为稳定。

表2 变量的描述性统计

变量类型	变量名称	观测值	均值	标准差	最小值	最大值
被解释变量	工业绿色全要素生产率(<i>GTFP</i>)	3 252	1.695	1.775	0.142	10.977
解释变量	工业智能化水平(<i>Int</i>)	3 252	0.039	0.033	0.004	0.233
中介变量	绿色技术创新(<i>Green</i>)	3 252	1.416	3.722	0.000	23.441
	产业结构高级化(<i>Instru</i>)	3 252	0.547	0.277	0.052	1.980
	人力资本结构高级化(<i>Hstr</i>)	3 252	6.355	3.064	0.344	14.503
控制变量	产业结构水平(<i>Ins</i>)	3 252	0.476	0.109	0.000	0.851
	经济发展水平(<i>Pgdp</i>)	3 252	2.912	2.100	0.589	11.197
	外商直接投资(<i>Fdi</i>)	3 252	0.018	0.017	0.000	0.081
	交通基础设施水平(<i>Trans</i>)	3 252	0.526	0.157	0.210	0.941
	工业人口密度(<i>Inp</i>)	3 252	1.096	1.351	0.106	9.434

五、实证结果分析

（一）基准回归结果分析

本研究采用固定效应普通最小二乘法对式（1）进行估计，结果如表3所示。表3列（1）至列（6）报告了工业智能化对工业绿色转型影响的估计结果，其中，列（1）未引入控制变量，工业智能化的回归系数显著为正，表明工业智能化应用显著促进了工业绿色转型。在此基础上，列（2）至列（6）逐步引入控制变量，结果显示工业智能化的系数仍显著为正，与列（1）结果趋势一致，进一步验证了工业智能化对工业绿色转型具有显著的正向影响。工业智能化通过推动生产过程的精细化管理，不仅提升了产品质量与稳定性，还有效减少了资源与能源浪费，从而助力工业部门实现生产效率与环境效益的双重提升，推动绿色转型进程。综上，假说1得以验证。

表3 基准回归结果

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
<i>Int</i>	0.542*** (0.035)	0.558*** (0.034)	0.486*** (0.041)	0.398*** (0.041)	0.498*** (0.042)	0.496*** (0.042)
<i>Ins</i>		0.209*** (0.026)	0.225*** (0.027)	0.223*** (0.027)	0.223*** (0.027)	0.224*** (0.027)
<i>Pgdp</i>			0.694*** (0.216)	0.747*** (0.217)	0.747*** (0.218)	0.758*** (0.219)
<i>Fdi</i>				0.093** (0.042)	0.093** (0.042)	0.093** (0.042)
<i>Trans</i>					0.001 (0.082)	-0.001 (0.082)
<i>Inp</i>						-0.078 (0.051)
常数项	0.053*** (0.007)	-0.066*** (0.017)	-0.189*** (0.042)	-0.207*** (0.042)	-0.207*** (0.042)	-0.206*** (0.042)
地区固定效应	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
R^2	0.363	0.376	0.378	0.379	0.379	0.380
样本数	3 252	3 252	3 252	3 252	3 252	3 252

注：括号内为异方差稳健标准误；*、**和***分别表示10%、5%和1%的显著性水平。下同。

(二) 稳健性检验

为确保研究结果的可靠性, 本文采用更换解释变量、更换被解释变量以及引入解释变量滞后一期等方法开展稳健性检验。

1. 更换解释变量。参考丁焕峰等^[33]的研究, 使用Bartik工具变量法构造的工业机器人渗透度作为工业智能化的替代指标, 回归结果见表4列(1)。参考陈俊龙等^[34]的研究, 利用“WinGo相似词数据库”筛选上市公司年报中“智能制造”主题下的57个关键词, 以关键词词频占比衡量上市公司智能化水平, 并将其匹配至城市层面进行分析。回归结果见表4列(2)。进一步替换解释变量的测度方法, 采用主成分分析和CRITIC等客观赋权方法测度工业智能化水平, 相关结果见表4列(3)和列(4)。结果显示, 工业智能化估计系数仍显著为正, 结果稳健。

表4 稳健性检验的估计结果

	工业机器人渗透度	关键词词频	主成分分析	CRITIC	SBM-DDF GML	解释变量滞后一期
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
<i>Int</i>	0.220*** (0.025)	0.142*** (0.018)	0.479*** (0.045)	0.384*** (0.031)	0.215*** (0.040)	0.635*** (0.048)
常数项	-0.294*** (0.041)	-0.359*** (0.040)	-0.257 (0.041)	-0.232 (0.041)	0.219*** (0.040)	0.219*** (0.040)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制	控制
地区固定效应	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
R^2	0.368	0.364	0.375	0.384	0.459	0.383
样本数	3 252	3 252	3 252	3 252	3 252	2 981

2. 更换被解释变量。使用基于SBM-DDF模型的GML指数测度工业绿色全要素生产率水平, 结果见表4列(5)。结果表明, 工业智能化回归系数显著为正, 与主回归结果一致, 结果稳健。

3. 引入解释变量滞后一期。考虑到工业智能化应用是一个较为复杂的过程, 技术从研发到实际应用再到效益显现通常需要一定时间, 其对工业绿色转型可能存在时滞效应。同时, 部分研究指出, 良好的生态环境能吸引投资和人才资源, 可为技术进步创造优越的条件。在本研究中, 若地方政府将工业智能化作为推动绿色转型的重要手段, 可能导致模型存在逆向因果问题。为此, 本文将工业智能化变量滞后一期处理并重新估计, 结果见表4列(6)。结果显示, 估计系数依然显著为正, 进一步验证了研究结果的稳健性。

(三) 内生性处理

工业智能化与城市工业绿色转型之间可能存在双向因果和遗漏变量等问题, 导致回归结果中工业智能化的估计系数出现偏误。本文采用工具变量法、系统广义矩估计, 以及引入年份×省份高阶固定效应等方法, 缓解可能的内生性问题。

1. 工具变量法。为缓解模型中双向因果导致的内生性问题, 提升实证结果的可靠性与有效性, 本文构建合理的工具变量, 并采用两阶段最小二乘法(IV-2SLS)进行回归分析。第一, 借鉴Acemoglu等^[35]的做法, 使用同期美国工业机器人数据, 通过Bartik工具变量法构造美国工业机器人渗透度, 作为城市层面工业智能化的工具变量(*Iv1*), 第一阶段与第二阶段回归结果见表5列(1)、列(2)。一方面, 美国工业智能化发展在全球领先, 对中国等发展中国家的工业智能化转型起到了引领作用, 且中美工业智能化发展变化趋势相似, 满足相关性; 另一方面, 美国工业发展已较为成熟, 工业机器人渗透率不易受发展中国家影响, 且其对中国经济发展的影响主要通过推动中国工业智能化转型这一途径实现, 满足排他性。第二, 参考张璇等^[36]的研究, 使用同一省份

其他城市工业化发展水平均值作为工具变量 ($Iv2$)，第一阶段与第二阶段回归结果见表5列(3)、列(4)。考虑到地理溢出效应与宏观政策取向一致性，省内其他城市工业化平均水平与本城市发展具有相关性，但难以直接影响本城市的绿色转型路径，因此是较为理想的工具变量。表5列(1)、列(3)结果表明，美国工业机器人渗透度、同省其他城市工业化均值对城市工业化发展均起到了显著的提升效果，满足工具变量相关性要求。表5列(2)、列(4)结果显示工业化对工业绿色转型具有显著促进作用，与基准回归结果一致。此外，Kleibergen-Paap rk LM统计量 P 值均为 0.000，拒绝工具变量识别不足假设；Cragg-Donald Wald F 统计量均大于 Stock-Yogo 临界值，排除弱工具变量问题，进一步验证了工具变量的有效性。

表5 内生性处理估计结果

	IV-2SLS				SYS-GMM	加入高阶固定效应
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Int		0.623*** (0.096)		0.981*** (0.239)	0.694*** (0.056)	0.496*** (0.042)
$Iv1$	0.025*** (0.001)					
$Iv2$			1.544*** (0.079)			
$L.GTFP$					0.209*** (0.081)	
常数项	0.031 (0.078)	-0.284* (0.146)	-0.693*** (0.096)	-0.140 (0.170)	-0.007 (0.021)	-0.206*** (0.042)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制	控制
地区固定效应	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
年份×省份固定效应						控制
R^2	0.869	0.593	0.935	0.576		0.380
样本数	3 252	3 252	3 252	3 252	3 252	3 252
Cragg-Donald Wald F Statistic		1 194.720		377.470		
Kleibergen-Paap rk LM Statistic		856.380		336.749		
AR(1)					-4.210*** (0.000)	
AR(2)					0.090 (0.927)	
Hansen 检验					191.78 (0.111)	

注：AR(1)、AR(2)、Hansen 检验所对应的系数括号里面为 P 值。

2. 系统-广义矩估计 (SYS-GMM)。本文选取工业化的一阶滞后项作为工具变量，采用 SYS-GMM 模型进行估计，结果见表5列(5)。结果显示， Int 系数仍在 1% 的水平上显著为正，验证了其对工业绿色转型的促进作用。其中，AR 检验结果显示模型存在一阶自相关但不存在二阶自相关，说明滞后项设定合理；Hansen 检验 P 值大于 0.1，表明工具变量有效，模型设定合理，满足 SYS-GMM 的条件。

3. 排除不可观测的遗漏变量问题。为排除地区经济发展和政策导向等地区动态因素的干扰，本文引入年份×省份高阶固定效应，结果见表5列(6)。结果显示，控制上述效应后，工业智能化的回归系数及其显著性与主回归结果保持一致，结论具有稳健性。

(四) 异质性分析

1. 城市等级异质性分析。不同等级城市在工业基础禀赋、政策支持力度、资源配置能力等方面存在差异, 可能导致工业智能化对绿色转型的作用效果呈现层级分化。通常, 重点城市作为国家或区域发展战略的核心, 更易实现高技术人才集聚与新兴产业发展, 具备更好的技术研发能力和产业升级基础, 有助于提升生产效率与污染治理能力, 从而更有利于推动工业绿色转型。本文参考李政等^[37]的研究, 将直辖市、省会城市以及副省级城市列为重点城市, 其他城市为一般城市。相关回归结果见表6列(1)、列(2)。结果表明, 工业智能化变革对重点城市、一般城市均存在显著促进作用, 且对重点城市的影响作用更强。这一差异主要源于重点城市在政策环境、产业结构和人才储备方面的综合优势。首先, 政策环境方面, 重点城市往往是国家或地方政府推行新政和技术试点的首选区域, 能够为工业智能化提供更优的发展条件, 有助于加快绿色转型进程。其次, 重点城市聚集了更多创新型和高端产业, 便于整合智能化技术, 推动绿色生产方式的转型升级。最后, 人才储备方面, 重点城市依托丰富的高校与科研机构资源, 聚集大量专业人才, 为工业智能化提供坚实的技术支持与人才保障。上述因素共同作用, 使工业智能化在重点城市的绿色转型中发挥出更强的效能。

表6 异质性分析结果

	重点城市	一般城市	资源型城市	非资源型城市	环境规制高强度城市	环境规制低强度城市
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
<i>Int</i>	0.350*** (0.118)	0.301*** (0.051)	0.037 (0.069)	0.426*** (0.059)	0.627*** (0.058)	0.395*** (0.062)
常数项	-0.406 (0.284)	-0.124** (0.038)	-0.086** (0.038)	-0.349*** (0.070)	-0.138** (0.059)	-0.263*** (0.060)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制	控制
地区固定效应	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
R^2	0.546	0.381	0.276	0.430	0.389	0.389
样本数	408	2844	1260	1992	1584	1668

2. 资源禀赋异质性分析。资源型城市与非资源型城市在要素投入结构和主导产业类型等方面存在差异, 工业智能化对绿色转型的影响也可能因资源禀赋不同而有所差异。资源型城市通常依赖高投入、高排放的粗放型增长模式, 污染程度高、经济效益低, 绿色转型面临更大挑战, 易陷入“资源诅咒”。本文参考刘亦文等^[38]的研究, 从资源禀赋视角进一步分析工业智能化对绿色转型的异质性影响。依据《全国资源型城市可持续发展规划(2013—2020)》将研究样本分为资源型城市与非资源型城市, 并进行分组估计, 结果见表6列(3)、列(4)。结果显示, 工业智能化在非资源型城市中的绿色转型促进作用更为显著。这可能是由于资源型城市主要以矿产、煤炭等资源开采与加工为主导产业, 经济发展易形成路径依赖, 产业结构单一、资源依赖性强, 工业智能化在提高资源利用效率和减污降耗方面难度更大。同时, 智能化变革在短期内对资源型城市带来较大冲击, 实现绿色转型发展仍需更长周期。相比之下, 非资源型城市在信息化基础设施方面具备优势, 产业结构更为多元, 通常涵盖信息技术、高端制造等多个产业, 有利于其更好地整合智能技术, 提升生产效率与环境效益, 从而加快工业绿色转型进程。

3. 环境制度异质性分析。鉴于政府政策偏好差异会对经济社会发展产生不同影响, 本文从环境基础制度视角分析环境规制强度对工业智能化促进绿色转型作用的异质性影响。借鉴邵帅等^[39]的研究, 本文采用各城市政府工作报告中环保相关词汇所在句子的字数占报告总字数的比例, 作

为环境规制强度的代理变量。根据这一比例的均值，将城市分为高强度组（高于均值）和低强度组（低于均值），进行分组回归，结果见表6列（5）、列（6）。结果表明，工业智能化在两类城市中均具有显著促进作用，且在环境规制强度较高城市中的促进作用更强。这一差异可能源于高强度规制城市更重视环境监管与生态文明建设。在政策推动下，地方政府环保积极性更高，企业绿色技术创新意愿更强，工业企业在生产过程中更注重绿色化与技术升级，有助于更充分发挥工业智能化的绿色转型效应。

（五）机制分析

基于前文理论分析，本文认为工业智能化可通过绿色技术创新、产业结构优化和人力资本提升三条路径推动工业绿色转型。据此，本文依据模型（1）、（2）、（3）开展中介效应检验。

1. 绿色技术创新效应的机制检验。本文以绿色技术专利授权量衡量绿色技术创新水平，开展机制路径回归，结果见表7列（2）与列（3）。列（2）结果显示，工业智能化变革对绿色技术创新的回归系数在1%水平上显著为正，表明其有助于提升城市绿色技术创新能力。列（3）显示，绿色技术创新对工业绿色转型亦具有显著正向影响，表明绿色技术进步有助于加快工业绿色转型。由此可见，工业智能化可通过绿色技术创新路径推动工业绿色转型，研究假说2得到验证。

表7 作用机制检验结果

	<i>GTFP</i>	<i>Green</i>	<i>GTFP</i>	<i>Instru</i>	<i>GTFP</i>	<i>Hstr</i>	<i>GTFP</i>
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
<i>Int</i>	0.496*** (0.042)	0.029*** (0.009)	0.490*** (0.042)	0.326*** (0.020)	0.459*** (0.044)	0.010*** (0.001)	0.445*** (0.042)
<i>Green</i>			0.215** (0.086)				
<i>Instru</i>					0.114*** (0.039)		
<i>Hstr</i>							5.201*** (0.595)
常数项	-0.206*** (0.042)	-0.005 (0.009)	-0.205*** (0.042)	0.510*** (0.020)	-0.265*** (0.047)	0.331*** (0.001)	-1.928*** (0.201)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制	控制	控制
地区固定效应	控制	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	控制
R^2	0.380	0.433	0.381	0.426	0.382	0.655	0.395
样本数	3 252	3 252	3 252	3 252	3 252	3 252	3 252

2. 产业结构优化效应的机制检验。本文以产业结构高级化水平衡量产业结构优化程度，开展机制回归检验，结果见表7列（4）与列（5）。列（4）结果显示，工业智能化对产业结构高级化的影响系数在1%水平上显著为正，说明其有助于地区产业结构高级化发展。列（5）进一步表明，产业结构高级化对工业绿色转型具有显著正向影响。由此可见，工业智能化可通过产业结构优化路径推动工业绿色转型，研究假说3得到验证。

3. 人力资本提升效应的机制检验。本文以人力资本结构高级化水平衡量人力资本优化程度，开展机制回归分析，结果见表7列（6）与列（7）。列（6）结果显示，工业智能化对人力资本结构高级化的影响系数在1%水平上显著为正，说明工业智能化变革有利于地区人力资本结构高级化发展。列（7）进一步表明，人力资本结构高级化对工业绿色转型具有显著正向影响。由此可见，工业智能化可通过人力资本提升路径推动工业绿色转型，研究假说4得到验证。

六、进一步分析

(一) 空间计量模型设定

本文进一步引入空间计量模型, 分析工业智能化对工业绿色转型的空间溢出效应。构建如下空间杜宾模型 (SDM):

$$GTFP_{it} = \theta_0 + \rho W_{ij} GTFP_{jt} + \theta_1 Int_{it} + \varphi_1 W_{ij} Int_{jt} + \theta_2 X_{it} + \varphi_2 W_{ij} X_{jt} + \mu_i + \sigma_t + \epsilon_{it} \quad (4)$$

其中, ρ 为因变量空间自回归系数, W_{ij} 为空间权重矩阵, $W_{ij} GTFP_{jt}$ 为工业绿色全要素生产率的空间滞后项。 $W_{ij} Int_{jt}$ 、 $W_{ij} X_{jt}$ 分别为工业智能化、控制变量的空间滞后项。本文构建了两类空间权重矩阵: 一是空间邻接权重矩阵 (W_1); 二是地理经济距离权重矩阵 (W_2), 以更全面刻画城市间的空间关联特征。

(二) 空间相关检验及模型选择

为选择适宜的空间计量模型, 本文依次开展 LM 检验、LR 检验和 Hausman 检验, 相关结果如表 8 所示。结果显示, Moran's I 在 1% 水平上显著大于 0, 表明工业绿色转型在城市之间存在正向空间相关性。LM 检验结果支持采用结合空间误差项和空间滞后项的空间杜宾模型 (SDM), LR 检验进一步证实 SDM 不可退化为空间误差模型或空间滞后模型。Hausman 检验结果表明应选择固定效应模型。综合上述检验结果, 本文最终选取包含个体与时间双固定效应的 SDM 模型进行回归分析。

(三) 空间计量模型回归结果分析

为解释因变量与自变量间的空间溢出关系, 本文在空间杜宾模型回归基础上, 使用“求偏微分法”将影响效应分解为直接效应和间接效应, 结果如表 9 所示, 其中, 直接效应反映工业智能化对本地区工业绿色转型的影响效应, 间接效应则体现其对邻近城市工业绿色转型的空间溢出效应。由表 9 可知, 在两种空间矩阵下 ρ 均显著大于 0, 表明城市间工业绿色转型具有显著空间正相关性。直接效应结果显示, 工业智能化显著推动本地工业绿色转型, 与基准回归结果一致; 间接效应进一步表明, 工业智能化对周边城市工业绿色转型亦具有显著正向影响, 存在正向空间溢出效应。由此验证假设 5 成立。工业智能化通过物联网、机器学习等技术应用, 推动工业生产与现代信息技术深度融合, 在提升本地生产效率与绿色发展水平的同时, 对邻近城市形成了积极的“示范效应”。邻近城市工业企业通过“模仿效应”和“学习效应”, 加快技术知识的扩散与集

表 8 空间计量模型检验结果

检验指标	空间邻接权重矩阵 (W_1)		地理经济距离权重矩阵 (W_2)	
	统计量	P 值	统计量	P 值
Moran's I	15.513	0.000	10.612	0.000
LM-lag	349.256	0.000	110.771	0.000
LM-err	230.728	0.000	89.525	0.000
LR(lag)	50.010	0.000	120.350	0.000
LR(err)	52.020	0.000	144.160	0.000
Hausman	129.840	0.000	107.120	0.000

表 9 空间计量模型回归结果

	空间邻接权重矩阵 (W_1)	地理经济距离权重矩阵 (W_2)
	(1)	(2)
直接效应	0.365*** (0.043)	0.246*** (0.046)
间接效应	0.503*** (0.080)	0.681*** (0.115)
总效应	0.868*** (0.089)	0.927*** (0.117)
控制变量	控制	控制
空间自回归系数 ρ	0.262*** (0.022)	0.148*** (0.033)
空间滞后系数 δ	0.010*** (0.000)	0.010*** (0.000)
地区固定效应	控制	控制
时间固定效应	控制	控制
样本数	3 252	3 252

聚,提升智能化水平、生产效率与绿色发展能力,从而进一步带动工业绿色转型。

七、结论与对策建议

本文基于2008—2019年中国271个城市平衡面板数据,系统分析了工业智能化对工业绿色转型的促进效应、作用机制及其空间溢出效应,主要结论有如下几点。(1)从总体上看,工业智能化有利于促进工业绿色转型,该结论在多种稳健性与内生性检验下依然成立。(2)工业智能化对工业绿色转型的影响具有显著异质性特征:在城市等级方面,其对重点城市的促进作用更强;在资源禀赋方面,其对非资源型城市的影响更为显著;在环境制度方面,其在环境规制强度较高城市中的促进效应更为突出。(3)中介机制分析发现,工业智能化主要通过绿色技术创新、产业结构高级化和人力资本结构高级化三条路径推动工业绿色转型。(4)拓展性分析发现,工业绿色转型在城市间呈现正向空间相关性,工业智能化对周边城市工业绿色转型存在正向空间溢出效应。

基于上述研究结论,为加快推进工业智能化,促进中国工业绿色转型,应重点从以下五个方面着手。

第一,加快推进工业智能化改造,以新技术、新模式赋能工业领域绿色转型。政府相关部门应强化“智改数转”政策,推出财政补贴、税收减免等优惠措施,并设立专项基金,尤其是促进工业企业在污染监测及处理环节增加智能设备的应用。鼓励银行、保险公司等金融机构创新工业智能改造专属金融产品和服务,开设“智改数转”企业金融服务绿色通道。加强“AI+工业”核心技术攻关,大力发展共享经济与平台化模式,打破工业智能设备在数据与技术层面的壁垒,实现绿色与高效协同发展。

第二,深化绿色技术创新,增强工业绿色转型科技动能。政府应设立绿色技术创新基金或专项补助,加大对能源、环境、资源循环利用等领域基础研究的投入,推动绿色技术的关键突破。培育绿色技术创新领军企业,推进“产学研金介”创新主体协作融合。鼓励工业企业打破传统技术路径依赖,构建以智能监测、大数据分析等智能技术为基础的绿色技术创新体系,推动工业领域绿色技术的加速创新。

第三,加速产业结构跃迁升级,推进产业体系绿色转型。鼓励传统产业引入智能化生产设备,加快智能化生产线改造,实现降本增效与新旧动能接续转换,推动传统产业提质增效。培育发展新能源、新材料、高端装备等战略性新兴产业和未来产业,锻造新的产业竞争优势,提升产业链整体效能,擦亮工业生态底色。

第四,强化人才支撑,以人才红利助推工业绿色转型。加强“产学研用”深度融合,持续推进跨学科高素质复合型人才培养,形成工业智能全产业链人才梯队。优化人才发展环境,探索建立适应工业智能技术创新的多元化评价体系,以激发人才创新潜力,推动工业高质量发展。

第五,支持区域差异特色化发展,因地因时制宜推进工业智能化。中国各城市资源分布不均、智能转型程度各异,落实工业智能化发展政策应防范“一刀切”问题。地方政府应牢牢把握在国家发展大局中的战略定位,结合区域自身资源禀赋及实际发展阶段,形成具有地方特色的区域规划及政策体系,找到切实可行的智能制造突破口。

参考文献

- [1] 史丹.中国工业绿色发展的理论与实践——兼论十九大深化绿色发展的政策选择[J].当代财经,2018(1).
- [2] 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).
- [3] 汪前元,魏守道,金山,等.工业智能化的就业效应研究——基于劳动者技能和性别的空间计量分析[J].管

- 理世界, 2022(10).
- [4] 魏龙, 刘嘉利, 蔡培民. 工业智能化与高技术产业全球价值链地位——基于社会网络分析视角[J]. 软科学, 2024(8).
- [5] 孙早, 侯玉琳. 工业智能化如何重塑劳动力就业结构[J]. 中国工业经济, 2019(5).
- [6] 何琨玟, 张文彬, 张楠. 数智赋能与中国节能降碳效率: 机制与效应[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2025(1).
- [7] 许宪春, 任雪, 常子豪. 大数据与绿色发展[J]. 中国工业经济, 2019(4).
- [8] 王珊珊, 张勇, 纪韶. 创新型人力资本对中国经济绿色转型的影响[J]. 经济与管理研究, 2022(7).
- [9] 邓慧慧, 杨露鑫. 雾霾治理、地方竞争与工业绿色转型[J]. 中国工业经济, 2019(10).
- [10] Chen, S. Y., J. Golley. "Green" productivity growth in China's industrial economy[J]. *Energy Economics*, 2014(3).
- [11] 岳鸿飞, 徐颖, 吴璘. 技术创新方式选择与中国工业绿色转型的实证分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2017(12).
- [12] 赵晓梦, 魏婷, 朱俊鹏. 从排污费到环保税: 绿色税制改革视阈下的减污降碳协同治理研究[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2024(3).
- [13] 孙传旺, 张文悦. 对外直接投资与工业绿色转型——基于中国省际面板数据的实证研究[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2022(4).
- [14] 曾刚, 陆琳忆, 何金廖. 生态创新对资源型城市产业结构与工业绿色效率的影响[J]. 资源科学, 2021(1).
- [15] 常青山, 侯建, 宋洪峰, 等. 科技人力资源对工业绿色转型的门槛效应——基于环境规制的视角[J]. 科技管理研究, 2020(12).
- [16] 陈昊, 闫雪凌, 朱博楷. 机器人使用影响污染排放的机制和实证研究[J]. 中国经济问题, 2021(5).
- [17] 李国祥, 张伟. 环境分权、环境规制与工业污染治理效率[J]. 当代经济科学, 2019(3).
- [18] Brevini, B. Black boxes, not green: Mythologizing artificial intelligence and omitting the environment[J]. *Big Data & Society*, 2020(2).
- [19] Grant, D., A.K. Jorgenson, W. Longhofer. How organizational and global factors condition the effects of energy efficiency on CO₂ emission rebounds among the world's power plants[J]. *Energy Policy*, 2016, 94.
- [20] 陈福中, 蒋国海, 董康银. 数字经济对制造业绿色转型的空间溢出效应[J]. 中国人口·资源与环境, 2024(5).
- [21] Zhai, X.Q., Y.F. An. The relationship between technological innovation and green transformation efficiency in China: An empirical analysis using spatial panel data[J]. *Technology in Society*, 2021, 64.
- [22] Svahn, F., L. Mathiassen, R. Lindgren. Embracing digital innovation in incumbent firms: How Volvo cars managed competing concerns[J]. *MIS Quarterly*, 2017, 41.
- [23] 蔡跃洲, 陈楠. 新技术革命下人工智能与高质量增长、高质量就业[J]. 数量经济技术经济研究, 2019(5).
- [24] 吕越, 马明会, 陈泳昌, 等. 人工智能赋能绿色发展[J]. 中国人口·资源与环境, 2023(10).
- [25] 王伟龙, 王健龙, 谢成兴, 等. "中国制造 2025" 试点示范城市建设对城市绿色发展效率的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2023(9).
- [26] 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).
- [27] 黄磊, 吴传清. 长江经济带城市工业绿色发展效率及其空间驱动机制研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2019(8).
- [28] 李斌, 彭星, 欧阳铭珂. 环境规制、绿色全要素生产率与中国工业发展方式转变——基于 36 个工业行业数据的实证研究[J]. 中国工业经济, 2013(4).
- [29] 袁航, 朱承亮. 国家高新区推动了中国产业结构转型升级吗[J]. 中国工业经济, 2018(8).
- [30] 刘智勇, 李海峥, 胡永远, 等. 人力资本结构高级化与经济增长——兼论东中西部地区差距的形成和缩小

- [J]. 经济研究, 2018(3).
- [31] 范子英, 赵仁杰. 法治强化能够促进污染治理吗? ——来自环保法庭设立的证据[J]. 经济研究, 2019(3).
- [32] 秦蒙, 刘修岩, 李松林. 城市蔓延如何影响地区经济增长? ——基于夜间灯光数据的研究[J]. 经济学(季刊), 2019(2).
- [33] 丁焕峰, 张蕊, 周锐波. 工业智能化、要素流动与创新经济地理格局[J]. 统计研究, 2023(8).
- [34] 陈俊龙, 何瑞宇, 刘佳丽. 智能制造对制造企业绿色全要素生产率影响的研究[J]. 软科学, 2024(8).
- [35] Acemoglu, D., P. Restrepo. Robots and jobs: Evidence from US labor markets [J]. *Journal of Political Economy*, 2020, 128.
- [36] 张璇, 刘贝贝, 汪婷, 等. 信贷寻租、融资约束与企业创新[J]. 经济研究, 2017(5).
- [37] 李政, 杨思莹. 创新型城市试点提升城市创新水平了吗?[J]. 经济学动态, 2019(8).
- [38] 刘亦文, 邓楠. 环境保护税是否有效释放了四重红利效应?[J]. 中国人口·资源与环境, 2023(10).
- [39] 邵帅, 葛力铭, 朱佳玲. 人与自然何以和谐共生: 地理要素视角下的环境规制与环境福利绩效[J]. 管理世界, 2024(8).

Industrial Intelligence Affects the Green Transformation of China's Industry: Mechanisms and Effects

DU Chuan-zhong, CAO Ya-hui, MENG Tian-ci

Abstract: The greening of industry is a distinctive epochal feature of new industrialization and an inherent requirement for high-quality industrial development. In the face of the rapid development of the fourth industrial revolution, which is mainly characterized by “intelligence”, accelerating industrial intelligence has become an important path to promote the green transformation of industry. Based on the theoretical analysis of the mechanism of industrial intelligence to promote industrial green transformation, this paper empirically examines the promotional effect and internal mechanism of industrial intelligence on industrial green transformation using a variety of models based on the panel data of 271 cities in China. The results of the study show that: (1) Industrial intelligence can promote the green transformation of industry, this result still holds after a series of robustness and endogeneity tests. (2) Heterogeneity analysis finds that the impact of industrial intelligence on China's industrial green transformation shows some heterogeneity at the level of city hierarchy, the level of resource endowment, and the level of environmental regime. Specifically, the green transformation effect of industrial intelligence is more prominent in Key cities, non-resource-based cities, and cities with higher environmental regulation intensity. (3) The analysis of the mediating mechanism shows that the green transformation effect of industrial intelligence is mainly realized through three channels: promoting green technological innovation, advancing the advanced industrial structure and the advanced human capital structure. (4) The comprehensive analysis reveals that industrial green transformation exhibits a significant positive spatial correlation across cities, while industrial intelligence generates a positive spatial spillover effect on the green transformation of neighboring regions. The research findings provide significant policy implications for accelerating and achieving the intelligent transformation and green development in China's industrial sector.

Key words: industrial intelligence; industrial green transformation; green technological innovation; advanced industrial structure; advanced human capital structure

(责任编辑 孙洁)