

引用格式: 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. [Zhong C Y, Zhang Y M, Ma X X. The enabling effect of intelligent manufacturing on China's urban low-carbon development: From the perspective of industrial robots[J]. Resources Science, 2024, 46(4): 728–743.] DOI: 10.18402/resci.2024.04.06

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

仲崇阳¹, 张雨朦², 马新啸^{3,4}

(1. 南京财经大学经济学院, 南京 210023; 2. 南京工业职业技术大学经济管理学院, 南京 210023;
3. 中国海洋大学管理学院, 青岛 266100; 4. 中国海洋大学中国企业营运资金管理研究中心,
青岛 266100)

摘要:【目的】以城市为主体推进碳减排是实现“双碳”目标的必由之路, 以智能化和自动化为核心特征的智能制造对绿色发展的重要性愈发显现, 评估智能制造的碳减排效应为经济社会低碳发展提供科学依据。【方法】本文以工业机器人应用作为智能制造赋能低碳发展的切入, 基于中国 2006—2019 年 274 个城市的面板数据, 综合采用固定效应模型、中介效应检验等方法考察了工业机器人应用对中国城市碳排放的影响及其作用机制。【结果】①工业机器人应用能够降低城市碳排放, 该结论经过稳健性检验后仍然成立。②工业机器人能够通过推动技术创新、赋能产业升级、促进数字化转型等途径助力城市碳减排。③工业机器人的碳减排效应在资源型城市、未参与国家智慧城市试点的城市以及政商关系较好的城市更加突出。【结论】本文识别了工业机器人应用助力城市碳减排的积极作用。应进一步提升智能制造技术应用的深度与广度, 加强核心技术研发、产业智能化升级、城市治理与企业管理数字化转型的制度设计, 促成新时期绿色生产力发展的新生动力源泉。

关键词: 工业机器人; 碳排放; 技术创新; 产业升级; 数字化转型; 中国

DOI: 10.18402/resci.2024.04.06

1 引言

近年来, 严峻的碳排放形势逐渐成为制约中国经济高质量发展的堵点。持续增加的碳排放不仅对生态环境质量构成严重威胁, 也给经济社会发展和人民生活带来巨大挑战^①。十八大以来, 党中央将生态文明建设作为一项重大战略决策, 推动低碳减排取得积极成效, 截至 2020 年底, 中国碳排放强度较 2005 年降低了 48.4%^①。然而, 中国碳排放增速近年来虽有所放缓, 但能源消费总量仍然规模庞大, 碳减排工作仍面临着巨大压力。2020 年 9 月, 习

近平总书记在第七十五届联合国大会上宣布, 中国将力争在 2030 年前使二氧化碳排放达到峰值、2060 年前实现碳中和。党的二十大报告对前述目标作出了“坚持先立后破, 有计划分步骤实施碳达峰行动”的战略部署, “逐步转向碳排放总量和强度‘双控’制度”以及“深入推进能源革命, 加强煤炭清洁高效利用”等工作成为重中之重。这意味着, 实现“双碳”目标将是一个复杂而艰巨的过程, 既要以促进能源体系转型为长远目标, 也要在促进能源清洁利用、提高能源利用效率等方面协同发力。由此可

收稿日期: 2023-11-07; 修订日期: 2024-04-11

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(72302224); 中国博士后科学基金面上项目(2023M733331); 山东省社会科学规划青年研究项目(23DJJJ26)。

作者简介: 仲崇阳, 男, 山东微山人, 博士, 讲师, 研究方向为区域经济与城市经济。E-mail: chongy_zhong@126.com

通讯作者: 张雨朦, 女, 宁夏银川人, 博士, 讲师, 研究方向为城市能源经济与管理。E-mail: zym_mia@163.com

① https://www.gov.cn/xinwen/2021-10/27/content_5646822.htm。

2024年4月

见,如何在经济社会实践中有效促成碳减排,已然成为在国家高质量发展层面极具重要性的研究主题。

理论上,减少碳排放既离不开制度激励、市场监管等政策措施对微观主体的引导,更需要在工业制造和管理领域强化科技支撑,从而推动实现降低生产能耗、提高管理精细化水平以及加强碳排放监测预测等目标。随着信息化、工业化不断融合,以机器人科技为代表的智能产业成为现时代科技创新的重要标志^②。不仅如此,作为制造业转型升级的重要象征,机器人在工业制造中的大规模应用能够充分释放其智能化效应^③,从而助力实现从“制造”到“智造”的转变。据统计,中国工业机器人消费量连续多年位居全球第一;截至2022年,中国制造领域中机器人密度已达到每万名工人392台,工业机器人装机量超过全球总量的50%^④。这表明,随着机器人应用规模不断扩大,中国工业制造的智能化水平正在不断提升。事实上,自2015年国务院颁布的《中国制造2025》将智能制造列为实现制造业强国目标的五大工程之一,至十九大报告明确“加快建设制造业强国,加快发展先进制造业”的发展目标,再到2021年发布的《“十四五”机器人产业发展规划》进一步明确“到2025年,中国成为全球机器人技术创新策源地、高端制造集聚地和集成应用新高地”的目标,工业机器人应用已然成为推动中国从“制造大国”迈向“制造强国”的巨大动力。与此同时,作为第四代工业革命的关键引擎和技术进步的重要载体,工业机器人将在应对气候变化和赋能“双碳”目标实现等方面扮演重要角色^⑤。而城市作为温室气体排放的主角和中国实施“双碳”战略的主体^⑥,自然成为智能制造助力碳减排的主战场。

关于碳排放的影响因素,国内外学者主要围绕经济社会因素、人口因素以及制度环境因素进行了考察,其经验结论为本文研究思路提供了参考。其中,经济社会因素主要包括经济发展^⑦、技术进步^⑧、产业结构^⑨、城镇化^⑩等,其对碳排放和碳排放效率存在显著影响。从人口因素来看,既有研究主要考察了人口数量、人口结构、家庭消费对碳排放的影响^{⑪-⑬}。此外,随着制度与政策的经济效应研究不断

拓展,环境规制^⑭、生态文明建设^⑮、可持续发展政策^⑯、碳交易政策^⑰等制度环境特征也构成了碳排放的重要影响因素。进一步,在经济发展目标转向提质增效的新阶段,一些研究转而关注数字经济^⑱、高质量发展^⑲等因素对碳排放的影响。当然,也有少量研究开始探讨人工智能或智能制造的碳减排效应。例如,黄贇琳等^⑳发现,人工智能可以通过促进绿色技术创新和强化人机匹配度抑制碳排放;王海等^㉑认为,机器人应用的碳减排效应可以通过增加财政科技支出和提升市场竞争程度来实现;蒋为等^㉒指出,机器人资本的动态深化已成为智能化转型的内在要求,能够显著降低中国制造业碳排放。通过对现有文献的梳理可知,当前有关碳排放的影响因素研究已经取得了较为丰富的成果,基于智能化视角的碳减排效应研究也形成了一些认识。然而,既有研究仍存在如下不足:①基于工业机器人应用视角理论分析并实证检验智能制造助力碳减排的文献并不多见,相关经验证据仍有待补充;②国内以往有关智能制造赋能碳减排的实证研究主要基于省级层面展开,从城市层面考察智能制造赋能低碳发展的文献较少;③有关智能制造助力碳减排的作用机制及异质性分析有待进一步丰富。

为了弥补上述不足,本文利用2006—2019年中国城市面板数据,基于工业机器人应用视角考察智能制造对碳排放的影响及作用机理。本文的边际贡献体现在以下3个方面:①基于加快实施制造强国战略和工业机器人应用水平不断提高的现实情境,本文对工业机器人应用如何影响中国城市碳排放进行研究,可以对城市碳减排研究进行有益拓展。②在测算各城市工业机器人应用水平的基础上,本文聚焦于碳减排的主战场,探讨工业机器人应用对中国城市碳排放的影响及作用机理,能够对工业机器人应用的经济后果研究作出创新拓展。③中国制造业正处于结构调整、提质增效的关键时期,本文研究主题聚焦智能制造赋能低碳发展,与“推动制造业高端化、智能化和绿色化发展”的政策导向相契合,可以对新时代制造业高质量发展的理论与实践作出有益贡献。

② https://www.cac.gov.cn/2015-11/27/c_1117278843.htm?from=timeline。

③ https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202308/content_6899128.htm。

2 理论分析与研究假说

根据国际机器人联合会(IFR)的定义,工业机器人一般是指自动控制、可重新编程以及具有多场景用途的机械设备。伴随着人工智能技术在世界范围内蓬勃发展,越来越多的工业机器人被应用于经济生产和社会运转系统中,有力推动了各国建设现代化产业体系。在此背景下,机器人技术的环境效应开始被关注,具体体现在机器人应用能够提高企业治污能力^[20]、降低制造业碳排放^[19]等方面。同时,作为电力、热力、工业制造等能源消耗“大户”的主要汇聚场所,城市是温室气体排放的主要来源。因此,需重点围绕工业生产领域讨论机器人应用如何助力城市碳减排。当然,人工智能技术的应用范围十分广泛且技术扩散普遍存在,故机器人技术势必会与其他非工业生产范畴不断融合,进而在多个经济社会领域产生影响。本文将从技术创新、产业升级、数字化转型3个维度,对工业机器人应用影响城市碳排放的作用机制进行分析。

2.1 工业机器人应用、技术创新与碳排放

科技创新是推动产业高质量发展的重要着眼点,被视为发展新质生产力的核心要素。作为工业4.0的关键引擎和新一代人工智能技术嵌入工业制造的物化表现,工业机器人应用将对企业技术创新产生巨大的推动作用,从而助力发展绿色低碳产业和供应链。理论上,工业机器人应用能够通过3个渠道推动技术创新:①凭借自动化优势,工业机器人可以将部分人力从繁重的机械劳动中解放出来,使其有更多时间参加知识学习、经验交流、能力培训等活动,有助于新知识的创造和溢出;②工业机器人应用能够通过提高生产效率增加企业经济效益,从而促进企业研发资本的积累。在此基础上,依托智能化管理、智能算法等先进技术,企业可以便利地实现对研发资源的统筹管理及合理分配,进而提高技术研发效率;③创新驱动,人才为先。无论是自主研发智能技术还是引进海外智能设备,最终都需要充足的高技能劳动力作为科技创新和智能制造的实践支撑。在此诉求下,企业会主动加强科技人才队伍建设、知识产权保护、激励机制完善等工作,从而增强研发部门的创新动力。

进一步地,通过推动技术创新,工业机器人可

以在提高制造业能源利用效率和经济效益的同时,有效抑制碳排放。一方面,技术创新有助于改善能源利用效率,构成了实现降污减排的必经之路^[21]。具体而言,这一碳减排效应至少可以通过2种途径实现:①凭借具有高度智能和自主性的自动化系统改造和传统生产技艺优化,缓解能源浪费、冗余投入或投入结构不合理等问题,从而有效抑制生产流程中产生的碳排放;②能够为企业优化能源利用结构提供支持,助力其探索形成以化石能源为基础、非化石能源和清洁能源综合利用的融合能源体系,促成能源利用的环保及智能化转型。另一方面,技术创新能够显著提高产品附加值,从而增强企业的市场竞争力和产品溢价能力。因此,为了巩固产品竞争优势,并符合当地环保标准和规避环境规制可能带来的惩罚成本^[21],企业将自发地增加生产过程中清洁技术的投入。在市场竞争机制下,随着先进技术的推广,将会有越来越多的企业采用清洁生产技术,从而进一步放大减污降碳的积极成效。据此,本文提出以下理论假说:

H1:工业机器人应用能够通过推动技术创新抑制城市碳排放。

2.2 工业机器人应用、产业升级与碳排放

产业结构优化升级有利于建设高端化、智能化、绿色化的现代产业体系,是发展新质生产力的重要抓手。无论是以智能化赋能项目管理,还是以自动化赋能工业生产,工业机器人应用均有助于企业获得更强的生产能力并有效整合生产流程,从而助力产业升级和降低能耗。同时,由于“干中学”效应的存在,当企业在某一生产领域应用工业机器人实现产业升级之后,可以将相关经验复制、推广至其他产品的生产流程之中,进一步提高产业升级的经济效能。除此之外,工业机器人的产业升级效应还体现在优化劳动力结构方面。随着工业机器人的自动化技术不断成熟,其在劳动力市场引发的替代效应成为学界讨论的热点话题。一些观点指出,工业机器人的推广使用会显著降低就业^[22],甚至导致工作岗位的两极分化^[23]。但与此同时,工业机器人也具有强大的创造效应,体现在能够创造非自动化环节的工作任务和优化工作分配,从而增加对特定劳动的需求并助力提高员工与工作岗位的匹配

2024年4月

度^[24]。并且,这种创造效应从中长期来看更加明显^[25]。由于本文主要关注工业机器人的环境效应,故不对前述替代效应和创造效应进行深入讨论。与本文密切相关的一个经验结论是,尽管存在替代效应和创造效应这一不确定性关系,工业机器人仍可以促进产业升级^[26],从而为智能制造赋能低碳发展提供理论支撑。

事实上,替代效应和创造效应均对赋能产业升级具有积极意义,并产生良好的环境绩效。从替代效应来看,中国工业生产长期存在低端劳动力过剩问题,不仅制约着企业人力资本积累,也将成为工业高质量发展和建设制造强国的一大堵点。除此之外,还会带来劳动者队伍专业知识储备相对不足和生产精细化水平较低等负面影响,继而导致生产流程操作不合理、资源浪费等问题频频出现,甚至引发严重的工业生产事故。对此,通过智能制造带动产业升级,有利于发挥智能化生产和精密操作对工业生产流程的改善作用。特别是,对于一些需要高度精确性、熟练操作能力或重复性明显的岗位,推广智能制造技术能够有效缓解前述短板导致的生产安全和环境污染问题^[27]。从创造效应来看,积极引进工业机器人的企业势必会增加对技术型人才的需求。为了满足这一需求,企业一般可通过两种方式增加人力资本积累,并积极作用于产业优化升级和环境绩效提升:①大力引进外部技术人才,为企业内部注入先进技术和生产、管理经验;②为既有员工提供合理的人才培养模式、完善的留才用才机制、多元的表彰奖励体系等制度安排,扩大产业转型升级的人才基础。此外,工业机器人作为一种技术冲击,当部分企业凭借其创造效应形成人力资本和生产率优势之后,这种冲击将逐渐由少数企业内部扩展至整个市场,从而淘汰落后产业并倒逼现有产业优化升级,放大减污降碳的积极后果。据此,本文提出以下理论假说:

H2:工业机器人应用能够通过赋能产业升级抑制城市碳排放。

2.3 工业机器人应用、数字化转型与碳排放

数字技术是工业机器人应用的重要组成部分,可以在企业经营管理和城市环境治理等关键领域发挥积极作用,进而抑制城市碳排放。一方面,工

业机器人应用能够促进企业经营的数字化转型,从能源利用、生产流程、组织管理3个方面助力碳减排。首先,对企业能源利用而言,工业机器人可以在优化能源传输路径、提升传统能源配置效率的同时,助力新能源的消化、吸纳和循环利用体系的建立,从而加速制造业能源利用系统的转型升级。并且,借助数据采集和深度学习技术,智能平台还能够及时汇总和反馈工业生产系统的整体运行状况,帮助企业实现数字化排产、设备实时管理、预测性维护等工作,从而全面支持企业能源利用的数字化运营,减少能源发、变、输、配等环节产生的碳排放。其次,在工业制造流程中,工业机器人能够利用自优化技术对生产线上的实时数据进行分析,在此基础上生成合理的生产方案并按照既定的运行参数精准控制各个生产环节,从而在保证生产效率和质量的同时降低生产能耗、保障安全生产。最后,在组织管理方面,数字化管理平台具备集成核心业务数据、实现信息实时共享和流通等优势,能够为管理决策提供全面、准确和即时的信息支持。由此,管理层能够充分而及时地获取生产进度,并对生产组织形式、预算成本、要素投入组合等适时作出调整,从而提高全流程生产质量和管理效率。

另一方面,在环境治理领域,工业机器人也能够通过3个维度的数字化效应助力碳减排。首先,利用工业互联网和大数据平台,地方政府能够准确获取和有效监管城市碳排放动态,据此在碳排放规模评估、碳减排目标跟进、统筹碳配额等方面作出反应,有助于制定更加合理的碳减排政策和低碳发展规划。其次,将人工智能技术接入城市管理系统,推动城市管理向数字化和智能化转变。人工智能可以在城市管理决策支持和常规任务自动化运维领域发挥积极作用,大大提高城市管理效能。特别地,凭借人工智能赋能,可以方便城市管理者全面掌握当地工业布局和生产动态,及时发现和解决不合理的生产活动、资源闲置和浪费、突发生产事故以及生态补偿等问题^[20]。此外,将工业机器人的应用范围进一步拓展至交通、建筑等行业领域,可以更加充分地发挥人工智能技术在微观主体碳排放监测、追踪、精准测算等方面的积极作用,从而全面助力城

市碳减排。据此,本文提出以下理论假说:

H3:工业机器人应用能够通过促进数字化转型抑制城市碳排放。

3 研究设计

3.1 模型设定

借鉴既有研究^[28,29]的做法,本文构建如下模型检验工业机器人应用对中国城市碳排放的影响作用:

$$CARBON_{it} = b_0 + b_1 ROBOT_{it} + \gamma_1 CONTROLS_{it} + \sum CITY_i + \sum YEAR_t + e_{it} \quad (1)$$

式中: i 和 t 分别为城市与年份; $CARBON$ 为城市碳排放规模; $ROBOT$ 为城市工业机器人应用水平; $CONTROLS$ 为影响城市碳排放的控制变量; $CITY_i$ 和 $YEAR_t$ 分别为地区固定效应和年份固定效应; e_{it} 为随机误差项; b_0 为常数项; b_1 和 γ_1 为影响系数。

在影响机制检验部分,借鉴温忠麟等^[30]和吴海军等^[31]的研究,在式(1)的基础上,构建如下计量模型进行中介效应检验:

$$JZ_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 ROBOT_{it} + \gamma_2 CONTROLS_{it} + \sum CITY_i + \sum YEAR_t + e_{it} \quad (2)$$

$$CARBON_{it} = \lambda_0 + \lambda_1 ROBOT_{it} + \lambda_2 JZ_{it} + \gamma_3 CONTROLS_{it} + \sum CITY_i + \sum YEAR_t + e_{it} \quad (3)$$

式中: JZ 为代表不同影响机制的中介变量; α_0 和 λ_0 为常数项; α_1 、 γ_2 、 λ_1 、 λ_2 、 γ_3 均为影响系数。若回归系数 α_1 显著,表明工业机器人应用对中介变量具有显著影响。在 b_1 和 α_1 均显著的情况下,如果式(3)中 λ_1 不显著, λ_2 显著,存在完全中介效应;若 λ_1 、 λ_2 均显著,则存在部分中介效应。以上结果均能说明,中介变量是工业机器人应用影响城市碳排放的重要传导机制。

此外,在异质性分析部分,本文分别从城市产业模式、政策规划导向以及营商制度环境3个维度出发,按照分组回归的方式对工业机器人应用的碳减排效应进行异质性检验。其中,在城市产业模式维度,参照李虹等^[32]的研究,按照《全国资源型城市可持续发展规划(2013—2020年)》将样本城市划分为资源型城市和非资源型城市。在政策规划导向

维度,参照石大千等^[33]的研究,将样本城市按照是否参与第一批国家智慧城市试点划分为试点城市和非试点城市。在营商制度环境维度,参照周俊等^[34]的研究,根据中国人民大学国家发展与战略研究院政企关系与产业发展研究中心发布的《中国城市政商关系排行榜》中公布的“中国城市政商亲近指数”对样本城市进行分组。

3.2 变量定义、样本选择与数据来源

3.2.1 变量定义

首先,本文的被解释变量为城市碳排放规模,以样本城市的碳排放总量衡量。中国碳核算数据库(Carbon Emission Accounts and Datasets, CEADs)公布了基于城市排放清单计算的中国城市碳排放数据,计算方法来自联合国政府间气候变化专门委员会发布的《国家温室气体清单指南》。另外,为了增强结论的可信度,本文还采用碳排放强度(碳排放总量与地区生产总值的比值)作为被解释变量进行稳健性检验。

其次,本文的核心解释变量为城市工业机器人应用水平,以城市当年工业机器人保有量来衡量。具体地,首先参照王晓娟等^[25]和闫雪凌等^[35]的做法,根据以下两个步骤计算得到各省份的工业机器人数量:第一步,基于国际机器人联合会(IFR)公布的中国各行业工业机器人保有量,将国民经济行业分类与代码(GB/T 4754-2002和GB/T 4754-2011)中的细分行业代码与其进行匹配,由于上述两个版本的制造业分类与代码并不完全相同^④,所以对2006—2011年和2012—2019年的制造业各行业机器人保有量分别进行了匹配,匹配后的中国制造业各行业工业机器人保有量如表1所示^⑤,该结果与已有文献基本一致^[35];第二步,计算各个省份的制造业各行业就业人数占全国总就业人数的百分比,用这一比重乘以全国制造业各行业机器人保有数量并加总,从而得到各省工业机器人保有量。随后,由于各地级市没有公布制造业行业细分从业人员数据,因此本文难以沿用第二步的方法精确地计算城市制造业各行业就业份额。在此情形下,考虑到制造业是工

④ 根据国民经济行业分类代码GB/T 4754-2002,汽车制造业在2006—2011年应属于运输设备制造业,共计13个行业;而根据国民经济行业分类代码GB/T 4754-2011,2012年之后汽车制造业从原有的运输设备制造业独立出来,行业数量变为14个。

⑤ 篇幅所限,此处仅列举部分年份的匹配结果,其余结果留存备案。

2024年4月

表1 中国制造业各行业工业机器人保有量(台)

Table 1 Ownership of industrial robots in China's manufacturing sector (sets)

行业类别	2006年	2011年	行业类别	2012年	2019年
食品饮料加工制造业	24	753	食品饮料加工制造业	1236	15115
纺织及服装制品业	0	11	纺织及服装制品业	12	1017
木制品及家具制造业	0	1	木制品及家具制造业	2	1666
造纸及印刷制品业	0	58	造纸及印刷制品业	66	880
化学制品业	3	288	化学制品业	349	7503
橡胶和塑料制品业	2575	10157	橡胶和塑料制品业	11487	36157
非金属矿物制品业	0	300	非金属矿物制品业	315	5597
金属加工冶炼业	0	336	金属加工冶炼业	518	4346
金属制品业	236	2089	金属制品业	2641	29363
通用及专用设备制造业	0	580	通用及专用设备制造业	710	32967
运输设备制造业	410	21076	汽车制造业	32247	230520
电子和电气设备制造业	442	7165	其他运输设备制造业	371	3716
其他制造业分支	0	588	电子和电气设备制造业	10454	215608
			其他制造业分支	1266	21241

业机器人应用的最主要领域^[36],故本文参照魏嘉辉等^[37]的研究,假设城市制造业结构与省份基本一致,随后计算各城市制造业就业人数占其所在省份制造业就业总人数的比重作为权重,再乘以第二步得到的各省工业机器人保有量,最终得到各城市工业机器人保有量。另外,为了缓解变量度量误差,本文在稳健性检验中采用以城市规模以上工业企业数量占比作为权重,得到的城市工业机器人保有量作为解释变量,重新进行估计。

再次,本文的机制变量分别为技术创新、产业升级以及数字化水平。对于技术创新,本文采用学界普遍使用的非期望产出-超效率SBM模型,在规模报酬可变的条件下测算出城市全要素生产率,并基于效率值分解得到技术效率指数(TE)和技术进步指数(TC)^[38]。随后,以 TC 与 TE 的比值衡量技术创新,比值越大,表明技术进步对城市全要素生产率的贡献越大,即技术创新动力越强。在测算城市全要素生产率时,将单位从业人员作为劳动力投入,将基于永续盘存法计算得到的资本存量作为资本投入,将用电量作为能源投入;将以2005年为基期的实际地区生产总值作为期望产出;将工业二氧化硫、工业烟粉尘和工业废水排放量作为非期望产出。另外,以产业结构高级化指数衡量产业升级^[39];以信息传输、计算机服务和软件业从业人员之和与

三产从业人员之和的比值衡量数字化水平^[40]。

最后,为了缓解遗漏变量问题对估计结果的影响,本文加入若干城市层面的因素作为控制变量。参照现有文献^[28,41,42],选取经济发展、人口密度、外商投资、财政压力、城镇化、能源消费、人力资本等城市特征作为控制变量,这些因素可能对城市生产和二氧化碳产生与排放均产生影响。同时,还加入城市通风系数作为自然因素加以考察。此外,所有连续型变量均在1%水平上进行缩尾处理,以避免异常值对结果的干扰;回归模型控制了城市固定效应和年份固定效应并采用城市层面聚类的稳健标准误。各变量具体定义如表2所示。

3.2.2 样本选择与数据来源

在研究样本选择上,本文以中国274个地级及以上城市(因数据缺失未包含西藏和港澳台地区)为研究对象。国家工业信息安全发展研究中心和百度智能云联合撰写的《人工智能助力城市“双碳”目标达成白皮书》指出,城市是控制碳排放的主战场和政策落地实施的基本单元,是“双碳”战略全面开展的强有力抓手。在数据来源方面,本文使用的碳排放数据来自中国碳核算数据库(CEADs),工业机器人数据来自国际机器人联合会(IFR)并经手工匹配整理得到,空气流通系数数据来自欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的ERA-Interim数据库并按照经

表2 各变量定义

Table 2 Definition of variables

变量类型	符号	名称	定义
被解释变量	<i>CARBON</i>	城市碳排放	以CEADs数据库公布的中国各城市碳排放量(百万t)取自然对数衡量
解释变量	<i>ROBOT</i>	工业机器人	参照既有文献 ^[25,35,37] ,以按照行业→省份→城市的步骤计算得到的城市工业机器人保有量(千台)衡量。计算过程进行了量纲调整,故此处单位与表1不同。后文城市工业机器人保有量均以千台计。
机制变量	<i>TP</i>	技术创新	以技术进步指数与技术效率指数的比值衡量
	<i>IU</i>	产业升级	以三大产业劳动生产率的加权值 ^[39] 表示的产业结构高级化指数衡量
	<i>DI</i>	数字化水平	以信息传输、计算机服务和软件业从业人数之和与三产从业人数之和的比值衡量
控制变量	<i>GDP</i>	经济发展	以实际人均生产总值(以2005年为基期,元/人)的自然对数衡量
	<i>PS</i>	人口密度	以单位行政区域土地面积上常住人口数量(人/km ²)的自然对数衡量
	<i>FDI</i>	外商投资	以外商直接投资(万元)与地区生产总值(万元)的比值衡量
	<i>FP</i>	财政压力	以地方财政预算内支出和收入之差(万元)与地区生产总值(万元)的比值衡量
	<i>URB</i>	城镇化	以城市当年第二三产业从业人口之和占总就业人口的比重(%)衡量
	<i>EC</i>	能源消费	参照吴健生等 ^[43] ,以基于拟合得到的夜间灯光数据 ^[44] 将省级能源消费量(t标准煤)分解到各个城市并取自然对数衡量
	<i>HC</i>	人力资本	以每万人在校大学生数量衡量
	<i>VC</i>	通风系数	参照沈坤荣等 ^[45] ,以ERA-Interim数据库公布的空气流通系数取自然对数衡量

纬度匹配至相应城市,其余城市特征数据均来自《中国城市统计年鉴》,缺失值采用插值法补充。在研究期间选择上,由于中国的工业机器人应用从2006年开始才有明显的数据记录^[35],并且CEADs数据库公布的城市碳排放数据目前更新至2019年,故本文将样本期间划定为2006—2019年。主要变量的描述性统计如表3所示。

4 结果与分析

4.1 基本回归结果

表4列示了工业机器人应用与中国城市碳排放的基本回归结果。可以发现,在仅考虑个体固定效

应的情况下,列(1)中*ROBOT*的回归系数在1%水平上显著为正,而加入控制变量后列(2)中*ROBOT*的回归系数在1%水平上显著为负;进一步加入时间固定效应后,列(3)–(4)中*ROBOT*的回归系数分别在5%和1%水平上显著为负。鉴于同时加入时间固定效应和个体固定效应能够更好地控制部分不可观测变量,从而缓解遗漏变量问题,故可以认为后者所示结果更加稳健,即工业机器人对城市碳排放具有显著的抑制作用。同时,根据列(4)的回归结果及主要变量的统计结果,工业机器人应用增加1个单位能够使城市碳排放平均减少2.5%,工业

表3 描述性统计

Table 3 Descriptive statistics

变量	样本量	平均数	标准差	最小值	中位数	最大值
<i>CARBON</i>	3836	12.370	0.917	10.070	12.420	14.480
<i>ROBOT</i>	3836	0.564	1.336	0.001	0.107	9.302
<i>GDP</i>	3836	6.944	0.960	4.950	6.881	9.528
<i>PS</i>	3836	5.902	0.648	4.077	5.943	7.182
<i>FDI</i>	3836	1.868	1.837	0.017	1.269	8.689
<i>FP</i>	3836	0.101	0.079	−0.003	0.082	0.376
<i>URB</i>	3836	0.981	0.062	0.623	0.989	1.000
<i>EC</i>	3836	16.177	1.059	13.773	16.125	18.454
<i>HC</i>	3836	1.656	2.022	0.002	0.912	12.597
<i>VC</i>	3836	7.078	0.380	6.178	7.099	7.934

2024年4月

表4 工业机器人碳减排效应的基准回归结果

Table 4 Benchmark regression results for carbon reduction effects of industrial robots

变量	CARBON			
	(1)	(2)	(3)	(4)
ROBOT	0.045*** (5.021)	-0.033*** (-4.243)	-0.023** (-2.527)	-0.025*** (-2.672)
GDP		0.284*** (6.610)		0.166 (1.120)
PS		0.450** (2.335)		0.407** (2.228)
FDI		-0.021*** (-2.966)		-0.019*** (-2.769)
FP		0.094 (0.280)		0.158 (0.452)
URB		0.311 (0.623)		0.419* (1.741)
EC		0.145*** (3.410)		0.130*** (3.054)
HC		-0.028*** (-2.765)		-0.027*** (-2.706)
VC		0.157* (1.842)		0.079 (0.826)
常数项	12.350*** (2420.551)	4.114*** (3.267)	12.040*** (586.870)	5.739*** (3.714)
YEAR	否	否	是	是
CITY	是	是	是	是
样本量	3836	3836	3836	3836
伪R ²	0.029	0.338	0.317	0.347

注:***、**、*分别代表在1%、5%、10%显著性水平上显著。除特别说明外,括号中均为t值,下同。

机器人应用每提高1个标准差能够使城市碳排放相对于其均值减少约0.3%。由此可见,工业机器人应用对城市碳排放的抑制作用在统计意义和经济意义上均较为明显。

4.2 稳健性检验

4.2.1 更换变量度量方式

为了缓解变量测量误差对研究结论的影响,本文分别更换解释变量和被解释变量的度量方式并重新进行回归。一方面,在缓解解释变量的度量误差上,以样本城市规模以上工业企业数量占所在省份规模以上工业企业总数的比重作为权重,重新计算城市工业机器人安装量 $ROBOT_R$ 并将其作为解释变量回归,结果如表5中列(1)和列(2)所示。可以发现, $ROBOT_R$ 的回归系数至少在5%水平上显

表5 基于更换核心变量的稳健性检验

Table 5 Robustness test based on replacement of core variables

变量	CARBON		CARBON_I	
	(1)	(2)	(3)	(4)
ROBOT_R/ ROBOT	-0.025** (-2.227)	-0.032*** (-2.730)	-0.039*** (-4.041)	-0.040*** (-4.028)
常数项	12.040*** (586.471)	5.665*** (3.673)	1.163*** (58.502)	2.963* (1.945)
控制变量	否	是	否	是
Year/City	是	是	是	是
样本量	3836	3836	3836	3836
伪R ²	0.316	0.348	0.576	0.631

著为负,这表明缓解解释变量的度量误差后结论保持稳健。另一方面,在缓解被解释变量的度量误差上,本文参照张卓群等^[46]的做法,以城市碳排放强度($CARBON_I$)作为被解释变量再次进行回归,结果如表5中列(3)和列(4)所示。可以发现, $ROBOT$ 的回归系数均在1%水平上显著为负,这表明缓解被解释变量的度量误差后结论保持稳健。由此可见,缓解变量测量误差后本文结论不变。

4.2.2 调整样本容量

考虑到直辖市和计划单列市与一般地级市相比在行政级别、研发水平、环境规制等方面有所不同,故本文参照吕冰洋等^[47]的研究,剔除直辖市和计划单列市之后重新回归,结果如表6中列(1)和列(2)所示。可以发现 $ROBOT$ 的系数与基准回归基本一致且仍在5%水平上显著为负,这表明在调整样本容量后本文的研究结论保持稳健。

4.2.3 采用FGLS和PCSE模型

鉴于面板数据可能存在的组间异方差和同期相关问题,本文参照周广肃等^[48]的做法,分别采用可行的广义最小二乘法(FGLS)和面板校正标准误(PCSE)对面板误差结构进行处理,继而检验回归结果的稳健性,回归结果如表6中列(3)和列(4)所示。可以发现 $ROBOT$ 的回归系数仍分别在10%和1%水平上显著为负,这表明在对面板数据进行误差修正后本文的研究结论保持稳健。

4.2.4 工具变量法

为了缓解内生性问题,本文使用工具变量进行两阶段回归。既有研究对工业机器人的工具变量选择主要有两种思路:其一,采用美国同行业工业

表6 基于调整样本容量和误差修正的稳健性检验

Table 6 Robustness test based on adjusted sample size and error correction

变量	CARBON		变量	CARBON	
	(1)	(2)		(3)	(4)
ROBOT	-0.021*	-0.027**	ROBOT	-0.008*	-0.021***
	(-1.792)	(-2.345)		(-1.790)	(-3.092)
常数项	11.990***	5.298***	常数项	4.233***	3.532***
	(568.366)	(3.169)		(19.284)	(10.323)
控制变量	否	是	控制变量	是	是
Year/City	是	是	Year/City	是	是
样本量	3710	3710	样本量	3836	3836
伪R ²	0.318	0.350	Wald χ^2	6187.630	2690.800

注:列(3)与列(4)所示结果中,括号内为z值。

机器人作为中国行业机器人的工具变量^[26,35],但其主要适用于行业层面的研究视角,就本文而言,利用美国工业机器人数据构造中国城市工业机器人应用的工具变量略显牵强,难以满足工具变量的相关性假设。其二,采用滞后一期的工业机器人应用作为工具变量^[25,48],在本文中,前期工业机器人应用情况对当期城市碳排放仍有可能产生影响,故使用该指标作为工具变量难以满足外生性条件。在反复权衡之后,本文尝试采用各城市注册时间为2006—2019年的从事机器人研发和技术服务的企业数量(*YFE*)作为工具变量,数据来源于国家企业信用信息公示系统并经过手工整理得到。具体地,这些企业的主要经营范围包括:专业技术服务、研究和试验发展、科技推广和应用服务、科学研究和技术服务、互联网服务、信息传输服务、软件和信息技术服务、资本市场服务、租赁和商务服务等其他服务业。理论上,从事机器人研发和技术服务的企业与当地人工智能发展水平密切相关,能够助力工业机器人的推广使用和生产效率提高,因此满足工具变量的相关性假设。并且,由于这些企业主要提供工业机器人研发、使用和维护等技术支持和配套服务,并不直接参与工业生产过程,故不会对当地工业碳排放产生直接影响,所以在理论上满足工具变量的外生性假设。工具变量的回归结果如表7所示,可以发现,第一阶段中*YFE*的回归系数在1%水平上显著为正,第二阶段中*ROBOT*的回归系数仍在5%水平上显著为负。此外,回归亦通过了弱工具变量检验,这表明缓解反向因果问题后本文的研究结论保持稳健。

表7 稳健性检验:工具变量估计

Table 7 Robustness test: Instrumental variable estimation

变量	ROBOT 第一阶段	CARBON 第二阶段
<i>YFE</i>	1.891*** (63.982)	
<i>ROBOT</i>		-0.030** (-2.316)
常数项	0.258 (0.705)	1.221*** (4.031)
控制变量	是	是
Year/City	是	是
样本量	3836	3836
R ²	0.728	0.602
最小特征值统计量	4095.080	

注:列(2)所示结果中,括号内为z值。

5 进一步研究

5.1 作用机制检验

前文指出,工业机器人应用可以推动技术创新、赋能产业升级、促进数字化转型,从而对城市碳排放产生抑制作用,据此展开进一步作用机制检验。首先,对“工业机器人应用→推动技术创新→抑制城市碳排放”这一影响机制进行检验,结果如表8中列(2)、(3)所示。列(1)再次展现了基准回归结果,列(2)则展示了以技术创新动力(*TP*)作为被解释变量,以工业机器人应用(*ROBOT*)作为核心解释变量的检验结果,可以发现*ROBOT*的回归系数在1%水平上显著为正,说明工业机器人应用可以显著推动城市技术创新。进一步,列(3)在列(1)的基础上加入变量*TP*进行了回归,结果显示,*TP*的回归系数在5%水平上显著为负,且*ROBOT*的回归系数依然在1%水平上显著为负。以上结果说明,工

2024年4月

表8 工业机器人应用的作用机制检验

Table 8 Examination of the mechanism of industrial robot use

变量	CARBON	TP	CARBON	IU	CARBON	DI	CARBON
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
ROBOT	-0.025*** (-2.673)	0.024*** (3.447)	-0.025*** (-2.647)	0.048*** (2.968)	-0.028*** (-2.955)	0.023*** (3.640)	-0.025** (-2.507)
TP			-0.013** (-1.993)				
IU					-0.070*** (-2.602)		
DI							-0.011** (-2.134)
常数项	5.739*** (3.716)	-1.034 (-0.990)	5.726*** (3.702)	18.220*** (9.241)	7.020*** (4.341)	-0.368 (-1.053)	5.735*** (3.712)
控制变量	是	是	是	是	是	是	是
Year/City	是	是	是	是	是	是	是
样本量	3836	3836	3836	3836	3836	3836	3836
伪R ²	0.347	0.146	0.348	0.790	0.353	0.173	0.347

业机器人应用可以通过推动技术创新这一作用机制来抑制城市碳排放。H1 得到验证。

其次,对“工业机器人应用→赋能产业升级→抑制城市碳排放”这一影响机制进行检验,结果如表8中列(4)、(5)所示。列(4)展示了以产业升级(IU)作为被解释变量,以工业机器人应用(ROBOT)作为核心解释变量的检验结果,可以发现ROBOT的回归系数在1%水平上显著为正,说明工业机器人应用可以显著赋能产业升级。列(5)在列(1)的基础上加入变量IU进行了回归,结果显示,IU的系数在1%水平上显著为负,且ROBOT的回归系数依然在1%水平上显著为负。由此可见,工业机器人应用可以通过赋能产业升级这一作用机制来抑制城市碳排放。H2 得到验证。

最后,本文对“工业机器人应用→促进数字化转型→抑制城市碳排放”的作用机制进行检验,结果如表8中列(6)、(7)所示。列(6)展示了以数字化水平(DI)作为被解释变量,以工业机器人应用(ROBOT)作为核心解释变量的检验结果,可以发现ROBOT的回归系数在1%水平上显著为正,说明工业机器人应用可以显著促进数字化转型。进一步,列(7)在列(1)的基础上加入变量DI进行了回归,结果显示,DI的回归系数在5%水平上显著为负,且ROBOT的回归系数在5%水平上显著为负。由此可

见,工业机器人应用可以通过促进数字化转型这一作用机制抑制城市碳排放。H3 得到验证。

5.2 异质性分析

上文指出,工业机器人应用可以抑制城市碳排放,但这一影响可能会受到城市产业模式、政策规划导向以及营商制度环境的异质性影响,本文对此进行深入研究。

首先,表9中列(1)和列(2)展示了基于城市产业模式的分组回归结果。可以发现,ROBOT的回归系数分别在5%水平和10%水平上显著为负,并且组间系数差异显著。这表明,工业机器人应用对资源型城市碳排放的抑制作用更明显。

过度依赖资源开采和加工而形成产业结构失调问题的城市更容易导致资源浪费和环境污染加剧^[49],而过度依赖资源开发以及由此导致的发展模式存在“路径依赖”正是资源型城市的典型特征。与之相比,非资源型城市的资源“路径依赖”程度较弱,资源型产业占比和环境污染强度亦较低,且能够更好地通过经济发展、高效投资等多个途径实现技术进步和产业结构优化^[32],进而减少污染排放。事实上,由于化石能源的严重依赖性和生产技术落后,资源型城市的发展长期伴随着资源过度消耗和二氧化碳等污染物大量排放,更易形成高碳发展模式并进一步加剧碳锁定效应^[1]。与此同时,由于传

表9 异质性检验:产业模式、政策规划导向与营商制度环境

Table 9 Heterogeneity test: Industrial patterns, policy and planning orientations, and institutional environment for business

变量	CARBON					
	资源型城市	非资源型城市	试点城市	非试点城市	得分较高城市	得分较低城市
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
<i>ROBOT</i>	-0.130** (-2.524)	-0.020* (-1.902)	0.015 (0.655)	-0.029*** (-2.816)	-0.023** (-2.145)	0.012 (0.385)
常数项	10.960*** (5.947)	1.269 (0.633)	8.557** (2.103)	4.967*** (2.740)	3.774* (1.897)	7.310*** (2.923)
控制变量	是	是	是	是	是	是
<i>Year/City</i>	是	是	是	是	是	是
样本量	1526	2310	448	3388	1918	1918
伪 R^2	0.333	0.391	0.329	0.363	0.425	0.320
组间系数差异	0.000***		0.090*		0.035**	

统资源型产业的资金密集、技术密集,使资源型城市的碳减排难度高于非资源型城市^[50]。在此情形下,引进智能化生产技术、减少资源浪费并提高资源利用效率就成为资源型城市实现降污减排和可持续发展的重要途径。正如已有研究所指出的,在绿色低碳成为城市发展方向的背景下,资源型城市的低碳转型最为迫切,而绿色技术创新对资源型城市实现低碳转型具有重要现实意义^[4]。在此情形下,智能制造的碳减排效应将在资源型城市具有更大的释放空间。因此,工业机器人应用对碳排放的抑制作用在资源型城市更加显著。

其次,表9中列(3)和列(4)展示了基于城市政策规划导向的分组回归结果。可以发现,*ROBOT*的回归系数在非试点城市中在1%水平上显著为负,在试点城市中则不显著,并且组间系数差异显著。这表明,工业机器人应用对未参与首批国家智慧城市试点的城市具有更明显的碳减排效应。

适时调整发展战略促进治理模式变革有助于破除城市病和降低环境污染,国家智慧城市试点政策正是新时代城市发展战略调整的具体表现^[33]。智慧城市建设是推动智能、绿色、低碳发展的重要途径,强调工业化、城镇化与信息化的高度融合^⑥。从直觉上看,工业机器人作为先进生产技术的重要载体,可以通过融入智慧城市建设和工业生产来抑制碳排放。但事实上,智慧城市建设可能恰好“掩盖”

工业机器人抑制碳排放的作用,其原因有二:首先,智慧城市建设实质上已经包含了技术创新、资源配置创新等重要理念,能够产生技术效应、配置效应和结构效应并直接助力生产技术革新和能源利用结构^[33]。其次,通过优化城市运行模式和营造生态文明理念,智慧城市建设可以引导居民生活方式绿色化、促进绿色交通发展、增加城市环境治理和研发投入^[51,52]。可见,智慧城市建设已经隐含着采用工业机器人等先进生产技术来优化生产模式、资源利用和城市绿色转型的实践。换言之,工业机器人属于智慧城市建设体现在企业生产转型方面的实现路径之一,而智慧城市试点实现低碳发展并不一定主要受益于工业机器人这一具体投入。正如既有研究指出,智慧城市建设能够通过多个途径降低城市二氧化碳等污染物排放^[33]。与之相比,未参与试点的城市(包括较晚试点城市)受到的来自政策规划的引导作用较弱,表现为由高新技术冲击引发的自主研发创新、管理优化等行为相对迟缓^[53]。此外,智慧城市试点政策作为一种可持续发展型环境硬约束,意味着非试点城市的污染控制与标准相对宽松^[54],而相对较低的环境规制水平会固化对传统高能耗、高排放生产模式的依赖。在此情形下,智能制造的碳减排效应将在非试点城市具有更大的释放空间。因此,工业机器人应用对碳排放的抑制作用在非试点城市更为明显。

⑥ https://www.gov.cn/gongbao/content/2015/content_2806019.htm。

2024年4月

最后,表9中列(5)和列(6)展示了基于城市营商制度环境的分组回归结果^⑦。可以发现,ROBOT的回归系数在政商关系得分较高的城市在5%水平上显著为负,在得分较低的城市不显著,并且组间系数差异显著。这表明,工业机器人应用对碳排放的抑制作用在政商关系较好的城市更加明显。

政商关系反映了制度环境的关键内涵,是企业投资和经营决策的重要影响因素^[55]。理论上,地方政商关系越友好,企业获取生产资源和持续经营的稳定性就越好,优化生产结构和增强研发创新的动机和能力就越强^[56]。具体而言,友好的政商关系至少能够在两方面为企业研发创新和技术进步提供支持:其一,政府部门通过与企业加强沟通,能够充分了解企业经营管理和技术创新的实际状况和面临的困难,进而可以通过建立健全配套政策、完善基础设施、优化资源配置等方式为企业获得创新资源和生产结构转型提供帮助。其二,在由投资驱动、要素驱动转向创新驱动的时代背景下,企业与政府部门积极交流有助于增强企业家对宏观政策和发展理念的理解,并将其转化为责任意识和自主创新意识^[34],从而更加积极主动地寻求技术升级和生产模式改善。因此,在政商关系较为友好的城市,企业将更有意愿通过引进工业机器人来实现技术进步和低碳生产。相关研究也提供了充分的经验证据,例如,在“亲清”政商关系驱动下,企业的环境绩效能够显著提高^[57];新型政商关系能够帮助企业获取政府创新补贴和降低创新过程中的不确定性风险,继而促进绿色创新“量质齐升”^[56]。与之相反,在制度环境较差的城市,企业对创新项目的投资动机和能力会受到限制,加之先进技术所需的投资成本较高,故企业引进工业机器人的意愿相对较低。特别地,在一些自然资源丰裕地区,“非清”政商关系极可能对地区能源环境效率产生不利影响^[58]。所以,工业机器人应用对碳排放的抑制作用在政商关系较好的城市更明显。

6 结论与政策启示

6.1 结论

本文以工业机器人应用作为智能制造赋能低碳发展的切入,在计算中国274个地级及以上城市

工业机器人应用水平的基础上,采用固定效应模型、中介效应检验等方法,实证考察了工业机器人应用对城市碳排放的影响及作用机制。研究发现:

(1)在其他条件一定的情况下,工业机器人应用水平的提高能够抑制城市碳排放,且该结论经稳健性检验后保持不变。统计显著性表明,工业机器人应用增加1个单位能够使城市碳排放平均减少2.5%;经济显著性表明,工业机器人应用提高1个标准差能够使城市碳排放相对于其均值减少约0.3%。

(2)机制检验表明,工业机器人的碳减排效应能够通过技术创新、产业升级、数字化转型来实现。

(3)异质性分析表明,工业机器人对碳排放的抑制作用在资源型城市、未参与智慧城市试点的城市以及政商关系较好的城市更加突出。

6.2 政策启示

本文为评估工业机器人应用对中国地区碳排放的影响提供了来自城市层面的经验证据,对推动建设现代化制造业体系和提高城市环境绩效具有重要的参考价值。具体的政策启示主要有:

(1)加强智能制造领域的技术研发,提高工业机器人应用的环境效益。面对大力发展新质生产力的现实诉求,人工智能能够极大地助力绿色生产力发展。因此,可以加大研发投入和科技攻关力度,从而提高人工智能技术的创新性、稳定性、适应性,使工业机器人在助力能源高效利用、兼顾生产质量与效率的同时,更好地适应多样化的生产环境和任务需求。为了促进科技成果转化,地方政府可加快布局发展高新技术产业,推动智能制造赋能产业优化升级,促进绿色生产、低碳发展;在资源依赖严重、机械任务繁琐和污染密集型生产部门,可以通过技术补贴、创新支持等措施鼓励企业引进智能化技术,改进生产流程。当然,科学评估现有产业基础是引进智能技术的前提,利用机器人开展工业生产应该有针对性地进行,而不是盲目投入。

(2)推动经济发展与环境治理的数字化转型,畅通智能制造助力碳减排的实现路径。首先,着力构建实时数据管理平台,以数字技术的及时性和精确性实现智能化生产调度,从而减少过度生产和资源浪费问题。其次,以数字化系统为支撑,强化对

⑦ 基于数据可得性,本文按照2017—2019年各城市“政商亲近指数”均值的中位数划分样本城市以进行分组回归。

工业生产设备运行的动态监测与调控,在预测性维护、减少故障、提高运转效率等方面多管齐下,减少生产流程中产生的碳排放。再次,可以探索建立大数据分析碳排放热点环节长效机制,为制定针对性的减排措施、提高碳减排效率提供参考。最后,加大数字人才培养力度,提高劳动者对新技术的认知和应用能力以及环保意识,从而增强生产、生活领域推动实现碳减排的主观能动性。

(3)坚持宏观政策引导与精准分类指导相结合,促进不同城市共享智能化发展成果。对于资源型城市、未参与智慧城市试点的城市以及政商关系较好的城市,可进一步提高工业机器人应用水平,放大其降低能耗、助力绿色生产等积极作用。对于非资源型城市和参与智慧试点的城市,可积极探索人工智能技术在公共服务和社会治理领域的作用空间,通过推动落实智能生活、智能交通、智能建筑等理念来提高节能减排的实践成效。此外,对于政商关系有待进一步改善的城市,需要进一步落实有效市场与有为政府相结合的政策方针,优化营商环境,增强市场主体的创新动力和投资信心,从而构建产业智能化的市场基础和制度保障体系。

参考文献(References):

- [1] 张艳,郑贺允,葛力铭.资源型城市可持续发展政策对碳排放的影响[J].财经研究,2022,48(1):49-63.[Zhang Y, Zheng H Y, Ge L M. The impact of sustainable development policy of resource-based cities on carbon emissions[J]. Journal of Finance and Economics, 2022, 48(1): 49-63.]
- [2] Kromann L, Malchow-Møller N, Skaksen J R, et al. Automation and productivity: A cross-country, cross-industry comparison[J]. Industrial and Corporate Change, 2020, DOI: 10.1093/icc/dtz039.
- [3] Yu L Z, Wang Y, Wei X H, et al. Towards low-carbon development: The role of industrial robots in decarbonization in Chinese cities[J]. Journal of Environmental Management, 2023, DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.117216.
- [4] 徐英启,程钰,王晶晶.中国资源型城市碳排放效率时空演变与绿色技术创新影响[J].地理研究,2023,42(3):878-894.[Xu Y Q, Cheng Y, Wang J J. The impact of green technological innovation on the spatiotemporal evolution of carbon emission efficiency of resource-based cities in China[J]. Geographical Research, 2023, 42(3): 878-894.]
- [5] 徐英启,程钰,王晶晶,等.中国低碳试点城市碳排放效率时空演变与影响因素[J].自然资源学报,2022,37(5):1261-1276.[Xu Y Q, Cheng Y, Wang J J, et al. Spatio-temporal evolution and influencing factors of carbon emission efficiency in low carbon city of China[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(5): 1261-1276.]
- [6] Churchill S A, Inekwe J, Smyth R, et al. R&D intensity and carbon emissions in the G7: 1870-2014[J]. Energy Economics, 2019, DOI: 10.1016/j.eneco.2018.12.020.
- [7] 熊娜,宋洪玲,崔海涛.产业协同融合与碳排放结构变化:东盟一体化经验证据[J].中国软科学,2021,(6):175-182.[Xiong N, Song H L, Cui H T. Industrial synergy and carbon emission changes: Empirical evidence of ASEAN integration[J]. China Soft Science, 2021, (6): 175-182.]
- [8] Yuan B L, Ren S G, Chen X H. The effects of urbanization, consumption ratio and consumption structure on residential indirect CO₂ emissions in China: A regional comparative analysis[J]. Applied Energy, 2015, DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.11.047.
- [9] 李国志,周明.人口与消费对二氧化碳排放的动态影响:基于变参数模型的实证分析[J].人口研究,2012,36(1):63-72.[Li G Z, Zhou M. Dynamic effects on carbon dioxide emissions of population and consumption: An empirical analysis based on variable parameter model[J]. Population Research, 2012, 36(1): 63-72.]
- [10] Menz T, Welsch H. Population aging and carbon emissions in OECD countries: Accounting for life-cycle and cohort effects[J]. Energy Economics, 2012, DOI: 10.1016/j.eneco.2011.07.016.
- [11] Zhang H W, Shi X P, Wang K Y, et al. Intertemporal lifestyle changes and carbon emissions: Evidence from a China household survey[J]. Energy Economics, 2020, DOI: 10.1016/j.eneco.2019.104655.
- [12] 孙博文,郑世林.环境规制的减污降碳协同效应:来自清洁生产标准实施的准自然实验[J].经济学(季刊),2024,24(2):624-642.[Sun B W, Zheng S L. The synergistic effect of pollution reduction and carbon reduction of environmental regulation: Evidence from the quasi-natural experiment of cleaner production standards implementation[J]. China Economic Quarterly, 2024, 24(2): 624-642.]
- [13] 刘凯,吴怡,陶雅萌,等.中国省域生态文明建设对碳排放强度的影响[J].中国人口·资源与环境,2019,29(7):50-56.[Liu K, Wu Y, Tao Y M, et al. The influence of ecological civilization construction to carbon emission intensity in China's provinces[J]. China Population, Resources and Environment, 2019, 29(7): 50-56.]
- [14] 罗良文,雷朱家华.中国碳市场政策的减污降碳协同效应[J].资源科学,2024,46(1):53-68.[Luo L W, Leizhu J H. Synergetic effect of China's carbon market policies on pollution reduction and carbon reduction[J]. Resources Science, 2024, 46(1): 53-68.]
- [15] 郭沛,王光远.数字经济的减污降碳协同作用及机制:基于地级市数据的实证检验[J].资源科学,2023,45(11):2117-2129.[Guo P, Wang G Y. The synergistic effect of digital economy on pollution and carbon reduction and the influence mechanism: An empirical test based on prefecture-level city data[J]. Resources Science, 2023, 45(11): 2117-2129.]
- [16] 丁学谦,吴群,刘向南,等.土地利用、经济高质量发展与碳排

2024年4月

- 放耦合协调度及影响因素: 来自中国282个地级市的经验研究[J]. 资源科学, 2022, 44(11): 2233-2246. [Ding X Q, Wu Q, Liu X N, et al. Coupling and coordination degree of land use, high-quality economic development, and carbon emissions and influencing factors in China: An empirical study of 282 prefecture-level cities [J]. Resources Science, 2022, 44(11): 2233-2246.]
- [17] 黄毓琳, 蒋鹏程. 数字低碳之路: 工业机器人与城市工业碳排放[J]. 财经研究, 2023, 49(10): 34-48. [Huang Z L, Jiang P C. Digital low-carbon road: Industrial robots and urban industrial carbon emissions[J]. Journal of Finance and Economics, 2023, 49(10): 34-48.]
- [18] 王海, 郭冠宇, 闫卓毓. 机器人应用对城市碳排放影响的机理与效应研究[J]. 财经问题研究, 2023, (5): 52-63. [Wang H, Guo G Y, Yan Z Y. Research on the mechanism and effect of robot application on urban carbon emissions[J]. Research on Financial and Economic Issues, 2023, (5): 52-63.]
- [19] 蒋为, 龚思豪, 李锡涛. 机器人冲击、资本体现式技术进步与制造业减排: 理论分析及中国的经验证据[J]. 中国工业经济, 2022, (10): 24-42. [Jiang W, Gong S H, Li X T. Robot shock, capital-embodied technological progress and carbon reduction of manufacturing sector: Theoretical analysis and empirical evidence from China[J]. China Industrial Economics, 2022, (10): 24-42.]
- [20] 盛丹, 卜文超. 机器人使用与中国企业的污染排放[J]. 数量经济技术经济研究, 2022, 39(9): 157-176. [Sheng D, Bu W C. The usage of robots and enterprises' pollution emissions in China[J]. Journal of Quantitative & Technological Economics, 2022, 39(9): 157-176.]
- [21] 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. [Nie F, Hu H L, Li L. How can industrial robots promote green production? Evidence from Chinese micro-firms[J]. Industrial Economics Research, 2022, (4): 1-14.]
- [22] Acemoglu D, Restrepo P. Robots and jobs: Evidence from us labor markets[J]. Journal of Political Economy, 2020, DOI: 10.1086/705716.
- [23] Goos M, Manning A, Salomons A. Explaining job polarization: Routine-biased technological change and offshoring[J]. American Economic Review, 2014, DOI: 10.1257/aer.104.8.2509.
- [24] Acemoglu D, Restrepo P. Automation and new tasks: How technology displaces and reinstates labor? [J]. Journal of Economic Perspectives, 2019, DOI: 10.1257/jep.33.2.3.
- [25] 王晓娟, 朱喜安, 王颖. 工业机器人应用对制造业就业的影响效应研究[J]. 数量经济技术经济研究, 2022, 39(4): 88-106. [Wang X J, Zhu X A, Wang Y. The impact of robot application on manufacturing employment[J]. Journal of Quantitative & Technological Economics, 2022, 39(4): 88-106.]
- [26] 宋旭光, 左马华青. 工业机器人如何影响制造业就业变动: 基于上市公司微观数据的分析[J]. 经济学动态, 2022, (7): 70-89. [Song X G, Zuoma H Q. How does industrial robots affect employment of the manufacturing industry? An analysis on listed manufacturing companies[J]. Economic Perspectives, 2022, (7): 70-89.]
- [27] 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): 126-138. [Chen H, Yan X L, Zhu B K. The impact of robot use on pollution discharge: A theoretical mechanism and empirical research[J]. China Economic Studies, 2021, (5): 126-138.]
- [28] 孙鹏博, 葛力铭. 通向低碳之路: 高铁开通对工业碳排放的影响[J]. 世界经济, 2021, 44(10): 201-224. [Sun P B, Ge L M. The way to low carbon emission: Impact of high-speed railway on industrial carbon emissions[J]. The Journal of World Economy, 2021, 44(10): 201-224.]
- [29] 杨光, 侯钰. 工业机器人的使用、技术升级与经济增长[J]. 中国工业经济, 2020, (10): 138-156. [Yang G, Hou Y. The usage of industry robots, technology upgrade and economic growth[J]. China Industrial Economics, 2020, (10): 138-156.]
- [30] 温忠麟, 叶宝娟. 中介效应分析: 方法和模型发展[J]. 心理科学进展, 2014, 22(5): 731-745. [Wen Z L, Ye B J. Analyses of mediating effects: The development of methods and models[J]. Advances in Psychological Science, 2014, 22(5): 731-745.]
- [31] 吴海军, 杨其静, 阳镇. 生产性政府债务与城市创新力: 基于中国城市面板数据的经验研究[J]. 中国工业经济, 2023, (10): 42-60. [Wu H J, Yang Q J, Yang Z. Productive government debt and urban innovation: Based on urban panel data in China[J]. China Industrial Economics, 2023, (10): 42-60.]
- [32] 李虹, 邹庆. 环境规制、资源禀赋与城市产业转型研究: 基于资源型城市与非资源型城市的对比分析[J]. 经济研究, 2018, 53(11): 182-198. [Li H, Zou Q. Environmental regulations, resource endowments and urban industry transformation: Comparative analysis of resource-based and non-resource-based cities[J]. Economic Research Journal, 2018, 53(11): 182-198.]
- [33] 石大千, 丁海, 卫平, 等. 智慧城市建设能否降低环境污染? [J]. 中国工业经济, 2018, (6): 117-135. [Shi D Q, Ding H, Wei P, et al. Can smart city construction reduce environmental pollution? [J]. China Industrial Economics, 2018, (6): 117-135.]
- [34] 周俊, 张艳婷, 贾良定. 新型政商关系能促进企业创新吗? 基于中国上市公司的经验数据[J]. 外国经济与管理, 2020, 42(5): 74-89. [Zhou J, Zhang Y T, Jia L D. Can the new government-business relationship promote firm innovation? Evidence from listed firms in China[J]. Foreign Economics & Management, 2020, 42(5): 74-89.]
- [35] 闫雪凌, 朱博楷, 马超. 工业机器人使用与制造业就业: 来自中国的证据[J]. 统计研究, 2020, 37(1): 74-87. [Yan X L, Zhu B K, Ma C. Employment under robot impact: Evidence from China manufacturing[J]. Statistical Research, 2020, 37(1): 74-87.]
- [36] Wang E, Lee C, Li Y Y. Assessing the impact of industrial robots on manufacturing energy intensity in 38 countries[J]. Energy Economics, 2022, DOI: 10.1016/j.eneco.2021.105748.
- [37] 魏嘉辉, 顾乃华, 郑鹏. 工业机器人应用与服务业结构升级[J].

- 软科学, 2022, 36(9): 1-7. [Wei J H, Gu N H, Zheng P. Industrial robots and upgrading of service industry structure[J]. Soft Science, 2022, 36(9): 1-7.]
- [38] 杜运周, 刘秋辰, 陈凯薇, 等. 营商环境生态、全要素生产率与城市高质量发展的多元模式: 基于复杂系统观的组态分析[J]. 管理世界, 2022, 38(9): 127-145. [Du Y Z, Liu Q C, Chen K W, et al. Ecosystem of doing business, total factor productivity and multiple patterns of high-quality development of Chinese cities: A configuration analysis based on complex systems view[J]. Journal of Management World, 2022, 38(9): 127-145.]
- [39] 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): 60-77. [Yuan H, Zhu C L. Do national high-tech zones promote the transformation and upgrading of China's industrial structure? [J]. China Industrial Economics, 2018, (8): 60-77.]
- [40] 赵涛, 张智, 梁上坤. 数字经济、创业活跃度与高质量发展: 来自中国城市的经验证据[J]. 管理世界, 2020, 36(10): 65-76. [Zhao T, Zhang Z, Liang S K. Digital economy, entrepreneurship, and high-quality economic development: Empirical evidence from urban China[J]. Journal of Management World, 2020, 36(10): 65-76.]
- [41] 胡彬, 余子然. 地方财政压力对城市生产率的异质性影响研究: 基于新型城镇化背景的分析[J]. 财经研究, 2021, 47(6): 139-153. [Hu B, Yu Z R. Research on the heterogeneous impact of local fiscal pressure on urban productivity: Based on the background of new-type urbanization[J]. Journal of Finance and Economics, 2021, 47(6): 139-153.]
- [42] 仲崇阳, 马新啸, 郑国坚. 法治强化能促进地方招商引资吗: 基于投资权益司法保护的视角[J]. 山西财经大学学报, 2022, 44(7): 99-111. [Zhong C Y, Ma X X, Zheng G J. Will strengthening the rule of law promote local investment attraction: Based on the perspective of the judicial protection of investment equities[J]. Journal of Shanxi University of Finance and Economics, 2022, 44(7): 99-111.]
- [43] 吴健生, 牛妍, 彭建, 等. 基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据的 1995-2009 年中国地级市能源消费动态[J]. 地理研究, 2014, 33(4): 625-634. [Wu J S, Niu Y, Peng J, et al. Research on energy consumption dynamic among prefecture-level cities in China based on DMSP/OLS nighttime light[J]. Geographical Research, 2014, 33(4): 625-634.]
- [44] Chen Z Q, Yu B L, Yang C S, et al. An extended time series (2000-2018) of global NPP-VIIRS-like nighttime light data from a cross-sensor calibration[J]. Earth System Science Data, 2021, DOI: 10.5194/essd-2020-201.
- [45] 沈坤荣, 金刚, 方娴. 环境规制引起了污染就近转移吗? [J]. 经济研究, 2017, 52(5): 44-59. [Shen K R, Jin G, Fang X. Does environmental regulation cause pollution to transfer nearby? [J]. Economic Research Journal, 2017, 52(5): 44-59.]
- [46] 张卓群, 张涛, 冯冬发. 中国碳排放强度的区域差异、动态演进及收敛性研究[J]. 数量经济技术经济研究, 2022, 39(4): 67-87. [Zhang Z Q, Zhang T, Feng D F. Study on regional differences, dynamic evolution and convergence of carbon emission intensity in China[J]. Journal of Quantitative & Technological Economics, 2022, 39(4): 67-87.]
- [47] 吕冰洋, 陈怡心. 财政激励制与晋升锦标赛: 增长动力的制度之辩[J]. 财贸经济, 2022, 43(6): 25-47. [Lv B Y, Chen Y X. Fiscal incentives or promotion tournaments: A debate on the institutional engine driving China's economic growth[J]. Finance & Trade Economics, 2022, 43(6): 25-47.]
- [48] 周广肃, 丁相元. 工业机器人应用对城镇居民收入差距的影响[J]. 数量经济技术经济研究, 2022, 39(1): 115-131. [Zhou G S, Ding X Y. The effects of robotics application on income distribution of urban resident[J]. Journal of Quantitative & Technological Economics, 2022, 39(1): 115-131.]
- [49] Li X, Wang D P. Does transfer payments promote low-carbon development of resource-exhausted cities in China? [J]. Earth's Future, 2022, DOI: 10.1029/2021EF002339.
- [50] 王家明. 我国资源型城市碳排放配额分配研究: 基于 H-CSW-DEA 模型[J]. 统计研究, 2023, 40(9): 31-44. [Wang J M. Research on carbon emission quota distribution of resource-based cities in China: Based on H-CSW-DEA model[J]. Statistical Research, 2023, 40(9): 31-44.]
- [51] Chu Z, Cheng M W, Yu N N. A smart city is a less polluted city[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2021, DOI: 10.1016/j.techfore.2021.121037.
- [52] Gao K, Yuan Y J. Is the sky of smart city bluer? Evidence from satellite monitoring data[J]. Journal of Environmental Management, 2022, DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.115483.
- [53] 石大千, 李格, 刘建江. 信息化冲击、交易成本与企业 TFP: 基于国家智慧城市建设的自然实验[J]. 财贸经济, 2020, 41(3): 117-130. [Shi D Q, Li G, Liu J J. Informatization impact, transaction cost and TFP of enterprise: Natural experiments based on Chinese smart city construction[J]. Finance & Trade Economics, 2020, 41(3): 117-130.]
- [54] 张荣博, 钟昌标. 智慧城市试点、污染就近转移与绿色低碳发展: 来自中国县域的新证据[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(4): 91-104. [Zhang R B, Zhong C B. Smart city pilot projects, nearby pollution transfer, and green and low-carbon development: New evidence from Chinese counties[J]. China Population, Resources and Environment, 2022, 32(4): 91-104.]
- [55] 聂辉华, 韩冬临, 马亮, 等. 中国城市政商关系排行榜(2017)[R]. 北京: 中国人民大学国家发展与战略研究院, 2018. [Nie H H, Han D L, Ma L, et al. Ranking of Chinese Cities' Political and Business Relationships (2017)[R]. Beijing: National Academy of Development and Strategy, RUC, 2018.]
- [56] 石怀旺, 杨鹏, 肖仁桥, 等. 新型政商关系是否促进了企业绿色创新“量质齐升”? 来自中国上市公司的经验证据[J]. 科技进步与对策, 2023, 40(8): 108-117. [Shi H W, Yang P, Xiao R Q, et al. Does the new government-business relationship promote the quan-

- tity and quality of green innovation? Evidence from Chinese listed firms[J]. *Science & Technology Progress and Policy*, 2023, 40(8): 108–117.]
- [57] 罗进辉, 巫奕龙, 刘海潮, 等. 亲清政商关系的绿色治理效应: 来自绿色并购的证据[J]. *财经研究*, 2023, 49(11): 34–49. [Luo J H, Wu Y L, Liu H C, et al. The green governance effect of cordial and clean government–business relationship: Evidence from green M&A[J]. *Journal of Finance and Economics*, 2023, 49(11): 34–49.]
- [58] 李江龙, 杨秀汪, 孟观飞, 等. 政商关系是能源环境效率的“基石”还是“绊脚石”? 理解“资源诅咒”的新视角[J]. *当代经济科学*, 2023, 45(3): 13–28. [Li J L, Yang X W, Meng G F, et al. Is state–business interaction a cornerstone or an obstacle for improving energy environmental efficiency? New insights on the resource curs[J]. *Modern Economic Science*, 2023, 45(3): 13–28.]

The enabling effect of intelligent manufacturing on China's urban low-carbon development: From the perspective of industrial robots

ZHONG Chongyang¹, ZHANG Yumeng², MA Xinxiao^{3,4}

(1. School of Economics, Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing 210023, China; 2. School of Economics and Management, Nanjing Vocational University of Industry Technology, Nanjing 210023, China; 3. Management College, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 4. China Business Working Capital Management Research Center, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: [Objective] Taking cities as the main agent to promote carbon emission reduction is essential for achieving the “dual carbon” goals. The significance of intelligent manufacturing for green development is increasingly apparent, and evaluating its impact on carbon emissions provides a scientific foundation for low-carbon economic and social development. **[Methods]** Based on the panel data of 274 cities in China from 2006 to 2019, this study comprehensively employed the fixed-effects model and mediation effects test to examine the impact of industrial robots on carbon emissions in Chinese cities and its mechanism. **[Results]** (1) Industrial robots can reduce urban carbon emissions, and this conclusion remains valid after robustness tests. (2) Industrial robots can help cities reduce carbon emissions by promoting technological innovation, empowering industrial upgrading, and facilitating digital transformation. (3) The carbon emission reduction effect of industrial robots is more prominent in resource-based cities, non-national smart city pilots, and cities with better political and business relations. **[Conclusion]** This study identified the positive role of industrial robots in urban carbon emission reduction, providing empirical evidence for achieving a mutually beneficial goal of low-carbon development and establishing a manufacturing powerhouse. To this end, the government should further enhance the depth and breadth of intelligent manufacturing technologies, strengthen the institutional design of core technology research and development, industrial intelligent upgrading, and digital transformation of urban governance and enterprise management, in order to enhance the new driving power of green productivity development in the new era.

Key words: industrial robots; carbon emissions; technological innovation; industrial upgrading; digital transformation; China