

# 智能化改造与企业绿色转型\*

——基于进口工业机器人微观数据的研究

袁丽静 王婉军 王国新

**摘要:**企业绿色转型对于中国“双碳”战略的实施具有重大意义,减少工业污染物排放是企业实现绿色转型的重要环节。随着第四次工业革命向纵深发展,企业智能化改造成为推动生产方式转变和经济高质量发展的主要途径,工业机器人的使用则是企业智能化改造的常用手段。本文利用2000—2013年进口工业机器人企业层面数据,构建固定效应模型和产业链传导效应模型,对智能化改造的减排影响及机制进行分析。实证研究发现,进口工业机器人显著抑制了制造业企业污染物排放,但这种效应主要通过生产线中的工业机器人实现,特别是多功能工业机器人。其有助于提高企业劳动生产率,扩大产出规模,减少能源消耗,改进全要素生产率;进口工业机器人还通过产业链传导效应促进上下游企业污染物减排;同时,人力资本水平越高、产业结构越优化、基础设施越完善的地区及技术水平越领先的行业,越能发挥工业机器人污染物减排的作用。本文以工业机器人进口额存量指标为核心解释变量,区分了不同工业机器人的使用,同时将影响效应延伸到产业链传导上,丰富和拓展了现有工业机器人减排效应研究,为机器人等智能技术更好地服务中国绿色发展提供了决策思路和政策参考。

**关键词:**智能化改造 进口工业机器人 污染物减排 产业链传导效应

## 一、引言

中国一直致力于经济增长与环境保护的协同发展。现有文献已从环境规制、政府补贴、绿色创新、金融信贷、人力资本等方面进行了较为深入的研究(Miranda & Hale, 2002; Acemoglu et al., 2012; Gillingham & Stock, 2018; Fisher-Vanden et al., 2006; 杨岚、周亚虹, 2022; 房宏琳、杨思莹, 2021; 李兰冰、李焕杰, 2021)。2020年“双碳”目标对我国经济发展方式提出了更高要求,制造业作为工业污染物的主要来源,减污降碳的任务十分艰巨、紧迫。2021年“十四五”规划纲要提出,中国要坚定不移地建设制造强国,推进重点行业和重要领域绿色化改造。党的二十大报告更是明确指出要加快发展方式的绿色转型,贯彻执行生态优先、节约集约、绿色低碳的发展方针,协同推进降碳、减污、扩绿和增长<sup>①</sup>。因此,如何在不限企业生产的同时,实现制造业的绿色低碳转型对于国家的可持续发展具有重要意义。

21世纪以来,企业的智能化改造已成为制造业绿色转型的重要途径。其中,最具代表性的就是

\*袁丽静、王婉军、王国新,东北财经大学经济与社会发展研究院,邮政编码:116025,电子邮箱:christina7971@163.com, wwj13526675031@163.com, 13731400616@163.com。基金项目:国家社会科学基金重大招标项目“我国制造业低碳化发展的理论体系、政策框架与实践路径研究”(22&ZD102);辽宁省教育厅基本科研项目“关于加快我省产业互联网发展带动区域经济转型问题研究”(LJKMR20221597)。感谢匿名审稿专家的宝贵意见,文责自负。

<sup>①</sup>习近平:《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》,人民出版社2022年版。

工业机器人的使用。作为新兴技术的重要载体和现代产业的关键装备,工业机器人引领产业数字化发展、智能化升级,带来生产技术和生产方式的巨大变革。高档数控机床和机器人已经成为我国大力推动的重点领域之一。近些年,我国人口红利逐渐消失,加速了工业机器人在生产制造环节的普及。最初关于工业机器人使用的影响研究主要集中在经济增长(Gasteiger & Prettnner, 2017; 杨光、侯钰, 2020; 蔡跃洲、陈楠新, 2019)、产业升级(Acemoglu & Restrepo, 2020; 王文等, 2020; 郭凯明, 2019; 韦东明等, 2021)、劳动就业(Graetz & Michaels, 2018; Graetz et al., 2018; 王永钦、董雯, 2020; 孔高文等, 2020; 李磊等, 2021; 闫雪凌等, 2020)及工资收入等领域(Acemoglu & Restrepo, 2020)。但随着国家日益紧迫的减污降碳要求,各地区纷纷将智能化改造作为加快企业绿色转型的突破口加以推进。

近期关于工业机器人对企业绿色转型影响的研究逐渐增多。国内学者从国家(史丹、李鹏, 2021)、区域(唐晓华、迟子茗, 2022)、行业(陈昊等, 2021)等层面展开了卓有成效的讨论,为本文的开展提供了一定的参考和借鉴。但已有研究较少涉及企业层面的微观数据,具有代表性的文献所采用的机器人指标,是通过国际机器人联合会(以下简称IFR)中各个行业的机器人渗透度和各企业占所在行业的劳动就业份额,推算出的企业层面工业机器人使用水平(盛丹、卜文超, 2022),或者从进口工业机器人对企业冲击角度研究污染物减排效果(韩超、李鑫平, 2023; 林熙等, 2023),涉及的进口数据多为流量数据,能够反映企业机器人实际使用的存量数据分析仍很匮乏。此外,根据IFR发布的数据,2013年以前我国的工业机器人70%依靠进口,所以利用进口工业机器人企业层面存量数据进行污染物减排分析是一个有益的尝试,也可以从另外的角度丰富现有研究。

本文在以下四个方面进行了拓展性研究:第一,采用更能反映机器人智能化水平的进口额存量指标作为核心解释变量,探讨其对企业绿色转型的影响。已有文献使用的企业工业机器人数据主要是根据行业机器人年安装量推算而来,或者是工业机器人进口的流量数据,无法反映企业生产中工业机器人的实际使用情况。而机器人进口额存量指标是企业层面的微观数据,能够代表实际投入生产中的进口工业机器人价值,可以更为准确地刻画机器人等设备投资对企业污染物减排的影响,也有助于机器人分类别的影响机制研究。第二,从产业链传导角度讨论上下游企业进口工业机器人对污染物减排的影响。本文发现上游企业进口工业机器人能够产生需求引致的污染物减排效果,而且上游企业进口的工业机器人越多,越能促进下游企业的污染物减排。同时,下游企业进口工业机器人则能对上游企业污染物减排产生倒逼效应,下游企业进口的工业机器人越多,越能促进上游企业的污染物减排。因此,进口工业机器人的使用在产业链上具有显著的传导效应。第三,进一步探讨不同类型工业机器人的减排效应。本文按照工业机器人的分类,研究发现主要是生产线中的机器人对企业污染物减排起到显著作用,尤其是多功能工业机器人。本文在一定程度上说明了生产线智能化改造对于企业绿色转型的重要性,补充了进口工业机器人对企业污染物减排影响的作用渠道研究;第四,替代传统分组式的异质性分析,从可能影响工业机器人减排效应的地区特征和行业因素入手,匹配中国工业企业专利数据库,通过调节效应,研究发现人力资本水平越高、产业结构越优化、基础设施越完善的地区及技术水平越领先的行业,越能发挥工业机器人污染物减排作用。这一规律在高等教育人数占比越高、科技型基础设施越完善的地区,表现越明显。

## 二、特征事实

工业机器人的大小与用途的不同会直接影响其使用效果,这一特征通常会体现在产品定价上,故本文选取进口金额类数据作为主要研究对象,同时考虑到存量指标更能反映工业机器人的智能化水平及其在企业中的实际使用,在进口工业机器人流量数据基础上推算出进口额存量指标,以此来分析进口工业机器人对企业污染物减排的影响。从IFR和中国海关贸易数据的对比看,2000—2013年工业机器人数量和工业机器人进口额呈现出相似的上漲趋势,详见图1。在2011年之后,中国工

业机器人进口额流量数据超过存量数据,说明企业进口工业机器人的金额不断增大。同时,参考李磊等(2021)的研究和《2007年海关统计商品分类与投入产出部门分类对照表》,对84795010(多功能工业机器人)、84795090(多功能工业机器人除外的其他工业机器人)和84864031(IC工厂专用的自动搬运机器人)进行分类比较。依据《中华人民共和国进出口税则本国子目注释》(以下简称“税则”),多功能工业机器人是指具有一种以上功能或具有两种及两种以上互补或交替功能的工业机器人。这类机器人仅通过更换不同工具即可执行弧焊、切削、点焊、喷涂等多种功能,具有很强的灵活性,应用场景较多。21世纪以来,多功能工业机器人在适用性、可达性、回转半径及离线编程等软件上都取得突破性进展,受到越来越多的市场青睐。但由于这类机器人轴数通常较多,造价较高。根据海关数据,2000—2013年间多功能工业机器人的进口额增长最为明显,并在2003年后呈现加速趋势。其他工业机器人(多功能工业机器人除外)是指具有特定的功能,且其功能在税则中也没有列明的工业机器人。这类机器人由于功能单一,通常是机器人产业发展早期的代表性产品,应用场景较为固定。其进口额在2007年之前保持连续增长,之后则逐渐被多功能工业机器人超越,呈现出平稳趋势。IC工厂专用的自动搬运机器人是一种可以进行自动化搬运作业的工业机器人,例如,机械式停车设备及其他装卸、储运设备及其零件等,应用场景有限。这类机器人由于其功能所需以四轴为主,同等大小下其造价较低,所以进口额的变动较小,且增长较慢。详见图2。从工业机器人进口额的变化可以看出中国企业越来越注重生产线的智能化改造,加大了以多功能工业机器人为主的智能设备引进与投入。

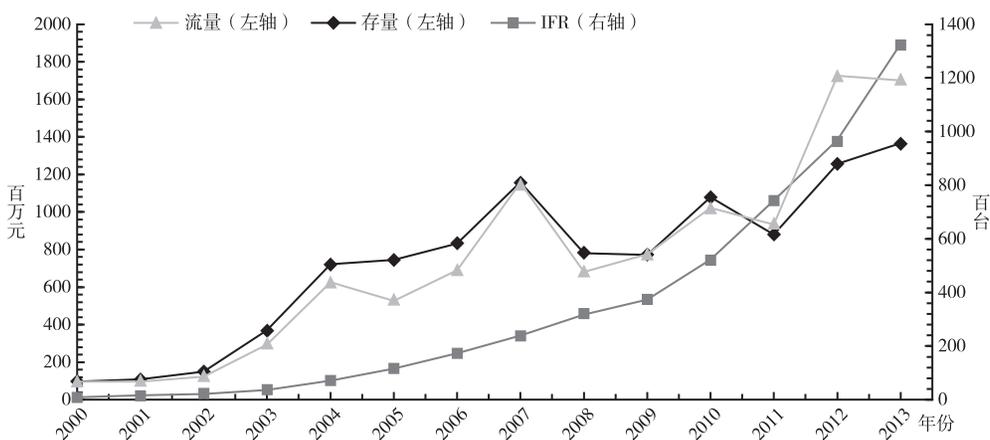


图1 中国工业机器人进口额和IFR中国工业机器人存量

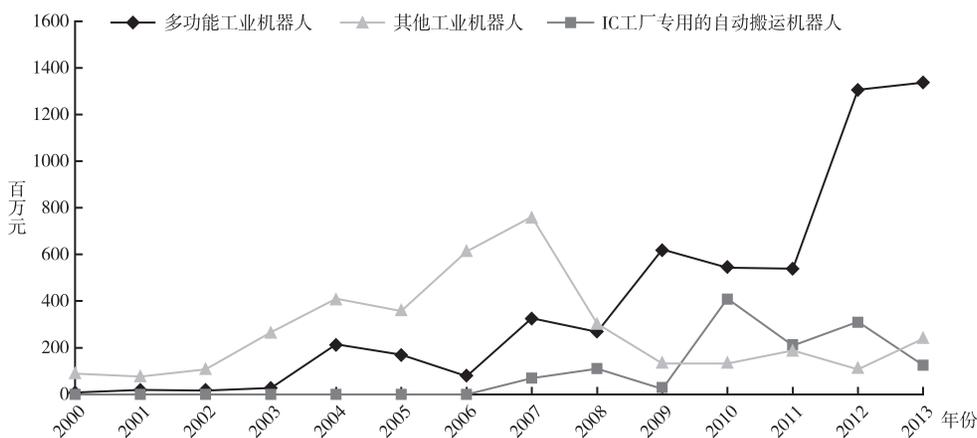


图2 三类进口工业机器人进口额

### 三、文献综述与理论假说

#### (一)文献综述

现有研究对工业机器人的绿色转型影响仍然存疑,与此相关的文献主要有两支。第一支是机器人等智能技术会给环境带来一定的不利影响。Strubell et al.(2019)指出机器学习本身就不环保,训练单个深度学习模型的能量消耗的二氧化碳排放量可能高达284吨,约相当于五辆汽车在整个生命周期内的碳足迹。李治国等(2024)的研究构建了包括非期望产出在内的高质量指标体系,发现数字经济对黄河中下游城市高质量发展的影响呈现出“先抑制后促增”的U型关系。

第二支文献则肯定了机器人等智能技术对经济绿色转型的推动作用,分别从国家环境治理、区域和行业异质性、企业视角展开分析,是目前比较主流的观点。第一,在环境治理方面,Cortés et al.(1999)认为人工智能已经成功地广泛应用于环境问题。早在1985年Guariso et al.(1985)就开发了用于发电、防洪、灌溉等人工智能系统,随后国内外学者对人工智能技术在环保上的应用展开了一系列研究。Haupt et al.(2009)描述了基于人工智能技术的各种潜在方法,包括神经网络、决策树、遗传算法和模糊逻辑等在实际环境问题上的应用。Ye et al.(2020)则介绍了用于三废处理回收的最新人工智能技术。而国内研究更偏于环境规制,关婷等(2019)、张文博和周冯琦(2019)对环境信息获取与监督领域的应用进行了深入的分析。李国祥和张伟(2019)则从环境分权体制切入,研究人工智能对环境污染治理的影响。发现人工智能应用实现了环境精细化管理,提升了跨区域监管效率,实现了对环境污染的有效管理。

第二,在区域和行业异质性方面。孙早和侯玉琳(2019)基于2000—2016年省级层面数据,发现工业智能化和人力资本的有效匹配可以促进产业结构优化升级,进而实现地区绿色发展。唐晓华和迟子茗(2022)基于2006—2019年省级面板数据,研究发现智能化对工业绿色发展效率具有显著的促进作用,且可以通过绿色技术创新和提高能源使用效率两条路径,实现绿色发展。陈昊等(2021)经过对2006—2015年间中国制造业细分行业污染物排放数据分析,得出行业机器人存量和增量提高,可以降低工业废气排放量和一般工业固体废物产生量的结论,但是对工业废水排放量则没有显著影响,且主要依靠研发增长效应和人工替代效应来实现。

第三,企业层面的微观分析,是最新的研究趋势,但也是研究较为薄弱的领域。较具代表性的是盛丹和卜文超(2022)利用2006—2013年中国企业污染数据和中国工业企业数据的研究,通过行业机器人渗透度推算各企业工业机器人应用水平,选择二氧化硫排放强度代表企业污染物排放水平,得出机器人使用显著抑制企业污染物排放的结论,并从污染产生的源头和末端治理进行机制分析。还有韩超和李鑫平(2023)、林熙等(2023)从进口工业机器人对企业冲击角度选用DID方法展开的研究。后者虽涉及工业机器人进口额,但使用的却是流量数据。在实际生产管理中,机器人等重要设备进口后不能马上投入使用,需要进行安装调试,而且使用年限也不只是1年,所以存量指标更能代表机器设备的使用情况。

可以说,现有文献已为该领域研究打下了坚实的基础,但关于机器人在绿色转型领域的应用仍值得深入探讨。已有分析主要集中在环境治理、区域和行业层面,企业层面的微观分析还比较匮乏,机制机理研究多从要素替代和污染治理过程展开。本文以工业主要污染物排放作为企业绿色转型的代表,通过匹配中国海关贸易数据库、中国工业企业数据库、中国企业污染排放数据库和中国工业企业专利数据库,以工业机器人进口额存量指标为核心解释变量,采用固定效应模型分析工业机器人的减排效应,并根据进口工业机器人类型拓展了作用机制研究,还进一步讨论了污染物减排的产业链传导效应以及不同环境下污染物减排的异质性。

#### (二)理论假说

制造业企业的污染控制是我国经济绿色转型的重点,强调以一种对自然环境更为友好的生产方式发展。第三次工业革命虽然给世界生产力带来了极大的解放,但在各国的发展中也消耗了巨

大的资源能源,带来了严重的环境污染。不同于传统经济的高投入、高产出、高耗能、高污染模式,工业机器人在诞生的过程中就一直面对环境的约束和绿色化转型的要求。工业机器人通过算法自动调整机器设备,优化生产流程,尽可能地减少原材料和能源的消耗,让产品制造更加智能、高效、环保。陈昊等(2021)指出人工操作根本无法避免严重污染,也可能由于达不到需要的精度而造成污染,而机器人替代人工则可以达到足够的精度,避免或减轻污染;在改善自身能源效率和污染排放的同时,机器人等智能技术也成为促进其他产业部门绿色转型的重要手段。蒋为等(2022)的研究发现机器人冲击推动企业进行大量的工业机器人应用,显著降低了中国制造业碳排放,加强以机器人为代表的人工智能和制造业融合发展能够助力企业污染物减排。所以,本文提出假说H1:

H1:进口工业机器人的使用减少了制造业企业污染物排放。

进口工业机器人对企业的污染物减排有促进作用,主要是通过直接影响和间接影响两个渠道实现。直接影响是指机器换人所产生的替代效应。首先,工业机器人可以通过算法自动调整,更加高效快捷地完成复杂任务,降低废品率,提高劳动生产率。机器人等智能技术不仅可以通过使用更高效的资本投入来替代劳动力执行常规的、可编纂的工作,使日常工作自动化,还增强了劳动力解决问题的能力,加快其适应新技能,促进技术创新,提升劳动生产率(Acemoglu & Restrepo, 2020; Aghion et al., 2017),在生产规模不变的情况下减少企业污染物排放。其次,机器人的使用一般呈现出单位生产成本逐渐降低的过程,在市场未出清的情况下,机器换人拓展了企业生产能力和生产可能性边界。最后,由于机器人对生产数据的跟踪检测优势,有利于企业获得全面的生产环境信息。在促进企业生产规模扩大的同时,降低了单位产出的污染物排放,在一定程度上促进了企业绿色转型。戴翔和杨双至(2022)的实证研究发现,数字经济的发展和應用可以扩大企业的产出规模,产出规模的扩大又促进企业降低能源消耗强度和污染物排放强度。

间接影响是指机器人对除劳动力以外的生产要素使用的影响。一方面,工业机器人减少了企业能源消耗。煤炭等能源消耗是我国污染排放的主要来源之一,在生产同样数量的产品时,工业机器人通过智能控制、精准操作降低能源消耗、物耗,实现污染物减排。中国社会科学院工业经济研究所课题组(2011)则指出工业绿色发展的实质就是降低能源资源消耗量,减少排放。而且随着工业机器人使用的不断拓展,工业清洁智能机器人扩大了清洁能源在工业领域中的应用。另一方面,工业机器人提高企业的全要素生产率,即技术进步,进而减少污染物排放,促进企业绿色转型。工业机器人具有技术进步效应,企业通过对先进设备的学习和吸收提高了创新能力,带动企业进行技术革新和组织创新,改变企业的生产可能性边界,增加期望产出和减少污染物排放。Hanson(2001)提出,计算机技术和智能化技术比一般技术改进更为迅速,人工智能的应用可以大幅提升研发和创新效率,改进生产工艺,促进技术创新在各行业中的扩散和外溢,从而提升企业全要素生产率(韩峰、庄宗武,2022)。因此,本文提出假说H2:

H2:进口工业机器人对企业污染物减排的影响主要有直接和间接两种途径。直接影响是通过提高劳动生产率和扩大产出规模来降低企业的污染物排放,间接影响则是通过减少能源消耗和提升企业全要素生产率来减少污染物排放。

随着信息通信技术的不断变革,国际国内“双循环”迅速地向纵深发展,各经济部门之间的技术联系越来越紧密,互补性也越来越强。因此,工业机器人还可能通过产业链的传导效应,对上下游企业的生产安排产生一定的间接影响,带动关联企业的绿色转型。上游企业通过工业机器人生产出更加环保的中间产品,下游企业出于技术匹配的视角,必定会加强创新和生产方式的变革,在再加工过程中采用能够保证最终产品品质的生产工艺,进而影响下游企业的污染物排放水平。同样,下游企业由于使用工业机器人,会对中间投入品和引进的生产设备提出更高的技术要求,通过产业链的传导效应倒逼上游企业供给更加智能和环保的产品与服务,反向促进上游企业在生产过程中尽可能地减少污染物排放。所以,工业机器人从上游的供给端和下游的需求端分别对关联企业的绿色转型起

到积极促进作用。据此,本文提出假说H3:

H3:工业机器人通过产业链传导效应促进上下游企业污染物减排。

综上所述,进口工业机器人主要通过直接影响、间接影响和产业链传导效应三条路径作用于企业污染物减排,本文对此进行了进一步探讨。

## 四、研究设计与数据来源

### (一)数据来源

本文数据主要来源于中国海关贸易数据库、中国工业企业数据库、中国企业污染排放数据库和中国工业企业专利数据库。

第一,工业机器人进出口信息来源于中国海关贸易数据库。该数据库提供了每个企业每年每月的进出口产品数据,包含产品价格、产品数量、产品金额、来源地等等。每个产品都有属于自己的HS八位数商品编码,本文筛选出每家企业在2000—2013年每月机器人的进口额和进口数量的数据,然后按照年份和企业名称进行手工加总,整理成企业一年份面板数据。借鉴田巍和余森杰(2014)的“两步法”,先后利用年份、企业名称、邮编和电话对中国海关贸易数据库和中国工业企业数据库进行匹配。同时,参考李磊等(2021)的研究和《2007年海关统计商品分类与投入产出部门分类对照表》对进口工业机器人分类,筛选出符合严格意义上的工业机器人,即多功能工业机器人、其他工业机器人(多功能工业机器人除外)和IC工厂专用的自动搬运机器人的进口数据。

第二,企业污染排放数据主要来自中国企业污染排放数据库。中国海关贸易数据库和中国工业企业数据库匹配后,再与中国企业污染排放数据库进行匹配,经过三库匹配得到一个2000—2013年包含企业基本信息、财务信息、进出口信息和环境信息的面板数据。行业专利数据来源于中国工业企业专利数据库。其他层面数据来源于国家统计局、《中国城市统计年鉴》和Wind数据库。同时,文中所涉及的价值变量均以2000年为基期进行了价格指数平减,行业标准调整为2002年的标准,并删除了员工人数少于8人、总资产小于固定资产和流动资产、实收资本小于或等于0、成立时间不合理、具有极值以及观测值缺失较多的企业,并借鉴李磊等(2021)、柏培文和喻理(2019)的做法,剔除了非制造业企业。

### (二)模型构建

为了检验进口工业机器人的减排效应,基准回归采用固定效应模型,方程设定如式(1)所示:

$$\ln pollution_{ijct} = \beta_0 + \beta_1 \ln robot_{ijct} + \beta_2 controls_{ijct} + u_i + \delta_t + \theta_j + \varphi_c + \epsilon_{ijct} \quad (1)$$

其中, $\ln pollution_{ijct}$ 为企业*j*在*t*年的污染排放量, $\ln robot_{ijct}$ 为*j*企业的工业机器人进口额存量,是本文的核心解释变量, $\beta_1$ 是核心系数,表示企业进口工业机器人存量变化一个百分比,企业污染排放变化的百分比。 $controls_{ijct}$ 为相关控制变量, $u_i$ 为行业固定效应, $\delta_t$ 为时间固定效应, $\theta_j$ 为企业固定效应, $\varphi_c$ 为城市固定效应, $\epsilon_{ijct}$ 为随机误差项。

### (三)变量选取

1. 被解释变量。被解释变量 $\ln pollution_{ijct}$ 为*i*行业、*c*城市、*j*企业在*t*年的工业化学需氧量(COD)排放强度,以此代表企业的污染排放水平。工业污染物一般包括工业废水、废气、固体废弃物等。为了丰富现有研究,并考虑到数据的完整性和可得性,借鉴王贤彬和钟夏洋(2022)的做法,用工业化学需氧量排放量/工业总产值取对数表示。工业总产值以2000年为基期进行了价格指数平减。

2. 解释变量。解释变量为 $\ln robot_{ijct}$ 为*i*行业、*c*城市、*j*企业在*t*年的进口工业机器人指标,使用工业机器人进口额存量代表企业机器人使用情况,对未进口工业机器人的企业赋值为1。由于存量数据更能反映企业机器人使用的实际情况,同时机器人进口的污染物减排影响往往存在滞后性,所以,在李磊等(2021)、陈东和姚笛(2022)、林熙等(2023)采用工业机器人进口额流量指标的基础上,选取工业机器人进口额存量指标作为核心解释变量,取对数进行模型估计,并以滞后一期的进口工业机

器人流量指标作为稳健性检验。其中,工业机器人进口存量数据是通过对企业每年的工业机器人进口额原值(采用平均年限法进行折旧,折旧年限为5年)<sup>①</sup>,加上企业每年新增工业机器人进口额,最后减去累计折旧得出企业的工业机器人进口额存量数值,由于1999年的工业机器人进口额较少,所以统一赋值为0作为基期<sup>②</sup>。

3. 控制变量。控制变量  $controls_{ijt}$  为影响企业污染物减排的一系列变量,参考已有文献(李磊等,2021;孙晓华等,2020)做法,选取以下变量:(1)企业年龄( $lnage$ )及其平方项( $lnage^2$ ),用调查年份与企业登记注册年份之差测算;(2)企业资本劳动密集度( $lnkl$ ),用固定资产总额与年末从业人员的比值计算;(3)市场势力( $Market$ ),研究常用勒纳指数,本文用企业的主营业务收入减去主营业务成本之差除以主营业务收入的比值衡量;(4)企业进口贸易( $Import$ ),用除机器人进口以外的进口贸易金额与主营业务销售收入的比值衡量,控制该变量在一定程度上有助于识别机器人进口对企业污染物减排的影响;(5)资产负债率( $lnlev$ ),用企业期末负债总额除以资产总额的百分比进行衡量;(6)企业人均资产规模( $lnasset$ ),用人均资产的对数衡量;(7)国企改革( $rate$ )、出口贸易( $export$ )和环境规制( $er$ )是下文稳健性分析所用变量;(8)机器人进口密度( $iv$ )是后文内生性检验分析时用到的工具变量;(9)劳动生产率( $lnlp$ )、能源消耗( $coal$ )、产出规模( $lnsize$ )、全要素生产率( $lnTFP$ )是在机制分析时所涉及的变量。模型控制了企业固定效应、年份固定效应、城市固定效应、行业固定效应。

4. 描述性统计。表1是主要变量的描述性统计。各个企业工业机器人进口额存量取对数后,最大值为7.4425,最小值为0,平均值为0.0115,进口额存量不同;企业每单位实际产值下的工业COD排放量取对数后,最大值为12.4679,最小值为-18.0738,平均值为-3.3141,排放量不同。同时,企业年龄、资本劳动密集度、市场势力、进口贸易、资产负债率、企业人均资产规模等也存在显著差异。由于能源消耗数据截止到2010年,所以在机制分析中主要是针对2000—2010年数据进行的检验。

表1 主要变量描述性统计

变量	定义	观测值	平均值	标准差	最小值	最大值
$lnrobot$	工业机器人进口额存量取对数	152664	0.0115	0.1853	0.0000	7.4425
$lnpollution$	工业COD排放/工业总产值取对数	127214	-3.3141	2.2727	-18.0738	12.4679
$lnage$	企业年龄取对数	152018	2.2623	0.7662	0.0000	4.7274
$lnage^2$	企业年龄的平方项取对数	152018	5.7053	3.5349	0.0000	22.3482
$lnkl$	劳动资本密集度取对数	146794	4.3043	1.3993	-6.7695	14.1808
$Market$	市场势力	148030	0.1642	0.1550	-8.0397	1.0000
$Import$	进口贸易	144769	0.1476	0.6573	0.0000	53.2949
$lnlev$	资产负债率取对数	147886	-0.7022	0.7445	-10.0629	3.2104
$lnasset$	人均资产规模取对数	147366	5.5532	1.2152	-14.3867	15.5481
$rate$	国企改革	152664	0.0571	0.0651	0.0000	1.0000
$export$	出口贸易	148049	0.3418	0.7573	0.0000	76.0879
$er$	环境规制	139356	0.0042	0.0021	0.0000	0.0229
$iv$	机器人进口密度	152664	0.0068	0.0123	0.0000	0.0632
$lnlp$	劳动生产率取对数	146476	5.7335	1.1540	-6.4249	14.8262
$coal$	能源消耗	72521	0.0586	0.3529	0.0000	60.9757

①2008年修订之前的外资税法实施细则规定,电子设备的最低折旧年限为5年,2008年修订后缩短为3年。其中税法对电子设备进行了解释,是指由集成电路、晶体管、电子管等电子元器件组成,应用电子技术(包括软件)发挥作用的设备,包括电子计算机以及由电子计算机控制的机器人、数控或者程控系统。但不是所有使用电脑控制的设备均可划入电子设备,一般情况下对于有机运动结构的大型生产线使用的设备还是需要归入机械设备中按10年计提折旧。本文为了统一研究标准,将进口工业机器人的折旧年限设为5年。

②1999年我国工业机器人产销规模仅为500余台,IFR统计的中国1999年工业机器人存量为550台,且未划分到行业层面。相比2008年的7000台,1999年我国工业机器人数量较少。为了简化统计,本文将1999年中国工业机器人进口指标设为0。

续表 1

变量	定义	观测值	平均值	标准差	最小值	最大值
lnsize	产出规模取对数	146476	11.7502	1.5122	-0.2469	19.0170
lnfjp	全要素生产率取对数	121688	7.2418	1.3481	-3.2410	13.7821

## 五、基准回归及机制分析

### (一) 基准回归

表 2 报告了基准回归中进口工业机器人的使用对企业工业化学需氧量排放强度的估计结果。列(1)没有控制任何变量,lnrobot 的估计系数在 1% 的水平上显著为负;列(2)和列(3)分别加入了年份固定效应和城市固定效应,lnrobot 的估计系数在 1% 的水平上显著为负;列(5)加入了年份、城市、行业固定效应,lnrobot 的估计系数在 1% 的水平上显著为负;为保证结果准确性,列(6)在控制了所有控制变量的基础上,同时控制了年份、城市、行业、企业固定效应,lnrobot 的估计系数依然在 1% 的水平上显著为负,工业机器人进口额存量对企业污染物减排具有显著的促进作用,初步验证了假说 1。

表 2 基准回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
工业机器人进口额存量	-0.6273*** (-19.2788)	-0.6346*** (-20.0741)	-0.4409*** (-17.7717)	-0.4479*** (-17.6424)	-0.2922*** (-11.8223)	-0.0917*** (-3.3688)
企业年龄			-0.8928*** (-29.4808)	-0.4394*** (-14.6908)	-0.5755*** (-20.6400)	-0.1479*** (-4.4549)
企业年龄平方			0.2002*** (30.9801)	0.1133*** (17.8555)	0.1542*** (26.0604)	0.0399*** (4.8676)
资本劳动密集度			0.3783*** (42.1456)	0.3077*** (35.3078)	0.2533*** (30.9332)	0.1602*** (16.8109)
市场势力			-0.4567*** (-10.5193)	-0.4769*** (-10.2153)	-0.3910*** (-8.4235)	0.3454*** (6.5828)
进口贸易			0.0433*** (3.2822)	0.0192 (1.5693)	0.0183 (1.4770)	0.0737*** (3.7845)
资产负债率			0.0029 (0.3395)	-0.0173** (-2.0020)	-0.0099 (-1.2187)	-0.0572*** (-5.5237)
人均资产规模			-0.6317*** (-60.9275)	-0.5263*** (-51.7335)	-0.4194*** (-43.2172)	-0.1188*** (-10.1406)
常数项	-3.3061*** (-518.4856)	-3.3060*** (-533.7420)	-0.4972*** (-10.5292)	-1.3182*** (-27.7880)	-1.6173*** (-35.5199)	-3.3713*** (-53.5051)
年份固定效应	否	是	否	是	是	是
城市固定效应	否	否	是	是	是	是
行业固定效应	否	否	否	否	是	是
企业固定效应	否	否	否	否	否	是
观测值	127214	127214	122893	122893	122893	112756
R <sup>2</sup>	0.0033	0.0596	0.1467	0.1894	0.3077	0.8058

注:括号中为 t 值,\*\*\*、\*\*、\* 分别表示在 1%、5%、10% 的水平上显著,下同。

### (二) 稳健性检验

本文从更换解释变量、更换被解释变量、排除其他政策和干扰因素、缩尾处理和内生性问题上进行了一系列稳健性检验。第一,更换解释变量,将工业机器人进口数量、工业机器人进口额流量滞后一期作为核心解释变量,替换工业机器人进口额存量。第二,更换被解释变量,由于企业绿色转型不

仅体现在排污的减少上,还体现在企业实际的生产安排中,所以选用企业购进的废水治理设施套数、废气治理设施套数、脱硫设施套数和工业废水排放强度分别代表企业生产过程中的绿色转型及污染物减排。第三,在排除其他政策干扰上,主要是消除中国加入WTO、1998年国有企业改革和地方政府环境规制的影响。通过分别加入企业出口贸易额与主营业务收入比值、行业年度水平上国有企业数量占全部企业的份额,以及环保词汇词频数与地级市政府工作报告词频总数之比的控制变量,重新进行回归。第四,考虑到数据质量,剔除中国工业企业数据库2010年失真数据,以及在进口企业中可能存在的贸易商或科研机构,重新进行回归。第五,为了排除极端异常值的影响,对被解释变量进行上下1%的缩尾处理,重新进行回归。第六,针对基准模型存在的内生性问题,分别使用工具变量和双重差分(DID)方法进行检验。参考李磊等(2021)做法,使用行业年度水平上的机器人平均进口强度作为工具变量,即用进口工业机器人的企业个数占行业内所有企业的比例衡量。表3列(1)(2)显示,第一阶段系数在1%的水平上显著为正,表明工具变量对企业进口工业机器人具有显著正向作用,工具变量具有相关性。第二阶段回归结果在1%的水平上显著为负,说明进口工业机器人的使用能显著减少企业污染物排放。且第一阶段F统计量为168.38,不存在弱工具变量问题。表3列(3)汇报了双重差分的估计结果,将进口过工业机器人的企业赋值为1,相反为0;企业首次进口工业机器人的年份及以后年份赋值为1,相反为0。实证结果在1%的水平上通过了显著性检验,表明发生过工业机器人进口的企业相较于没发生过的企业,更能促进污染物减排。以上检验均与基准回归结果一致,证明了基准回归结果稳健可靠。<sup>①</sup>

表3 稳健性检验

变量	(1)	(2)	(3)
	内生性检验		双重差分
	第一阶段	第二阶段	
工业机器人进口额存量		-1.8118*** (-3.1601)	
<i>iv</i>	1.5809*** (12.9201)		
<i>DID</i>			-0.1877*** (-3.2707)
控制变量	是	是	是
年份固定效应	是	是	是
城市固定效应	是	是	是
行业固定效应	是	是	是
企业固定效应	是	是	是
行业×年份固定效应	否	否	是
观测值	112756	112756	112756
R <sup>2</sup>	0.8913	0.8235	0.7491

注:括号中为t值;\*\*\*和\*\*和\*分别代表在1%,5%,10%的水平上显著。

参考Beck et al.(2010)的做法,对处理组和对照组样本进行平行趋势检验。使用处理组中各企业的当前年份减去进口工业机器人的初始年份,将进口工业机器人之前年份记为*pre*,进口工业机器人之后年份的交互项记为*after*,选择*pre1*作为基期。若*pre*的系数均不显著,则可说明在进口工业机器人之前的处理组和对照组企业满足平行趋势条件,平行趋势检验的结果如图3所示。回归结果显示,*pre8*、*pre7*、*pre6*、*pre5*、*pre4*、*pre3*、*pre2*的系数均不显著,说明在进口工业机器人之前的年份区间内,处理组和控制组样本企业的污染物排放情况基本一致,而在企业进口工业机器人之后,后续系数均显著为负,说明工业机器人的减排效应是存在的。

<sup>①</sup>限于篇幅,部分稳健性检验结果及表格未在正文中列出。

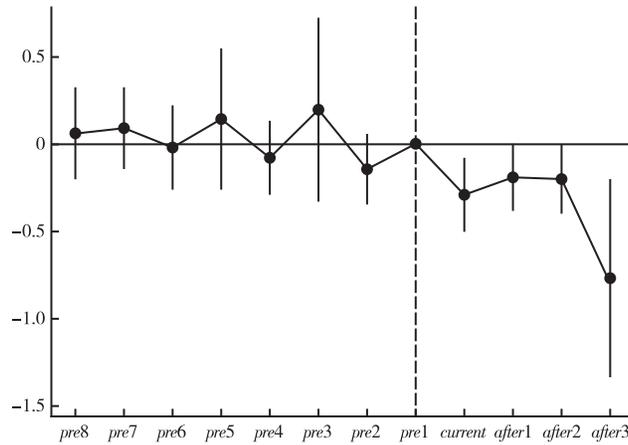


图3 平行趋势检验

### (三)影响机制分析

根据前文的基准回归结果,进口工业机器人显著地抑制了污染物排放,促进企业绿色转型。为了检验其中的作用机制,本文从直接和间接影响两个途径展开分析。

1. 直接影响:劳动生产率和产出规模效应。表4列(1)展示了进口工业机器人对劳动生产率的估计结果,列(5)展示了进口工业机器人对产出规模的估计结果,表明进口工业机器人的使用可以提高企业劳动生产率和扩大产出规模。劳动生产率的提高和产出规模的扩大都会减少企业的单位生产成本,进而降低污染排放强度。李磊和刘常青(2023)认为劳动生产率是促进信息技术污染物减排效应的重要机制。戴翔和杨双至(2022)的研究发现产出规模扩大可以降低企业的能源消耗强度和污染物排放强度。根据工业机器人的类型,进一步发现列(2)(6)进口多功能工业机器人对企业劳动生产率和产出规模有积极的影响,列(7)其他工业机器人(多功能工业机器人除外)对产出规模影响显著。而列(3)(4),其他工业机器人(多功能工业机器人除外)和IC工厂专用的自动搬运机器人对企业劳动生产率影响不显著,列(8)IC工厂专用的自动搬运机器人对产出规模影响不显著。因此,主要是生产线中工业机器人的使用才会产生劳动生产率和产出规模效应,促进企业污染物减排。

表4 劳动生产率和产出规模效应

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
	劳动生产率				产出规模			
	全部类型机器人	多功能工业机器人	其他工业机器人(多功能工业机器人除外)	IC工厂专用的自动搬运机器人	全部类型机器人	多功能工业机器人	其他工业机器人(多功能工业机器人除外)	IC工厂专用的自动搬运机器人
工业机器人进口额存量	0.0225** (2.4498)	0.0381*** (3.1680)	0.0142 (1.0894)	-0.0279 (-0.5091)	0.0583*** (4.4631)	0.0864*** (5.0894)	0.0420** (2.2104)	-0.0096 (-0.1355)
控制变量	是	是	是	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是
城市固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是
行业固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是
企业固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是
观测值	130504	129843	130092	129527	130504	129843	130097	129527
R <sup>2</sup>	0.9041	0.9045	0.9044	0.9046	0.9201	0.9192	0.9192	0.9181

2. 间接影响:能源消耗和TFP效应。表5列(1)展示了进口工业机器人对能源消耗的估计结果,列(5)展示了进口工业机器人对全要素生产率的估计结果,表明进口工业机器人的使用可以减少企业的能源消耗和促进全要素生产率提升。工业机器人能够精准掌握能源和原材料的投入,降低废品

率。并依据能源供应和成本收益情况调整运行时段,展开智能预警和实时分析,选择能耗更少的投入组合进行生产。同时还与其他环节的生产设备融合,加快企业技术进步,促进全要素生产率的提升,这些都有利于企业的污染物减排。李磊和刘常青(2023)认为提高能源使用效率是产品生产组织过程绿色化的形式之一,促进了企业污染物减排。钱娟和李金叶(2018)的研究显示技术进步能够有效促进企业的污染物减排。进一步地将工业机器人按类型划分,发现列(2)(6)进口多功能工业机器人,对企业能源消耗的减少和全要素生产率的提高有积极影响,列(3)的多功能工业机器人除外的其他工业机器人也显著地减少了企业能源消耗。而列(4)(8)IC工厂专用的自动搬运机器人对能源消耗和全要素生产率的影响不显著,列(7)多功能工业机器人除外的其他工业机器人对全要素生产率的影响也不显著。所以,在间接影响方面也主要是生产线上的工业机器人在发挥主要作用。

表5 能源消耗和TFP效应

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
	能源消耗				全要素生产率			
	全部类型机器人	多功能工业机器人	多功能工业机器人除外的其他工业机器人	IC工厂专用的自动搬运机器人	全部类型机器人	多功能工业机器人	多功能工业机器人除外的其他工业机器人	IC工厂专用的自动搬运机器人
工业机器人进口额存量	-0.0016* (-1.6564)	-0.0044** (-2.2228)	-0.0158* (-1.7611)	-0.0007 (-0.6035)	0.0453*** (2.9061)	0.0764*** (3.6084)	0.0257 (1.1823)	-0.0485 (-0.5693)
控制变量	是	是	是	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是
城市固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是
行业固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是
企业固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是
观测值	60806	60470	60691	60359	105913	105334	105557	105056
R <sup>2</sup>	0.6921	0.6928	0.6921	0.6928	0.8574	0.8574	0.8578	0.8561

#### (四)产业链传导效应分析

同处于一条产业链的上下游行业普遍存在着生产与投入的技术联系。因此,进口工业机器人的使用可能存在沿着产业链向前或者向后的传导效应,对上下游企业的绿色转型产生间接影响。为了更好地识别进口工业机器人是如何通过产业链影响企业污染物减排,本文参考王永钦和董雯(2020)做法,并在此基础上增加了交乘项,构造如式(2)(3)的回归模型:

$$\ln pollution_{ijct} = \beta_0 + \beta_1 \ln robot_{ijct} + \beta_2 upstream_{ijt} + \beta_{up} upstream_{ijt} \times \ln robot_{ijct} + \beta_3 controls_{ijct} + \epsilon_{ijct} \quad (2)$$

$$\ln pollution_{ijct} = \beta_0 + \beta_1 \ln robot_{ijct} + \beta_2 downstream_{ijt} + \beta_{down} downstream_{ijt} \times \ln robot_{ijct} + \beta_3 controls_{ijct} + \epsilon_{ijct} \quad (3)$$

其中,  $\ln pollution_{ijct}$  是核心被解释变量,  $i, j, c, t$  分别代表行业、企业、城市、年份,  $\ln robot_{ijct}$  是核心解释变量为工业机器人进口额存量,  $controls_{ijct}$  表示一系列关于行业、企业、城市、年份的控制变量。  $upstream_{ijt}$  的系数  $\beta_2$  衡量的是  $i$  行业的上游企业机器人使用对  $i$  行业企业污染物排放的影响。  $upstream_{ijt} \times \ln robot_{ijct}$  的系数  $\beta_{up}$  衡量的是  $i$  行业上游企业机器人使用的调节作用,对  $i$  行业企业污染物排放的影响;  $downstream_{ijt}$  的系数  $\beta_2$  衡量的是  $i$  行业的下游企业机器人使用对  $i$  行业企业的污染物排放的影响。  $downstream_{ijt} \times \ln robot_{ijct}$  的系数  $\beta_{down}$  衡量的是  $i$  行业下游企业机器人使用的调节作

用,对*i*行业企业污染物排放的影响。其中, $upstream_{ijt}$ 和 $downstream_{ijt}$ 具体构造如式(4)(5)所示:

$$upstream_{ijt} = \frac{asset_{ijt=2002}}{allasset_{t=2002}} \times \sum_k (output\%_{i \rightarrow k}^{2002} - 1_{k=i}) \times \frac{x^l_{kt}}{asset_{kt=2002}} \quad (4)$$

$$downstream_{ijt} = \frac{asset_{ijt=2002}}{allasset_{t=2002}} \times \sum_k (input\%_{i \rightarrow k}^{2002} - 1_{k=i}) \times \frac{x^l_{kt}}{asset_{kt=2002}} \quad (5)$$

其中, $\sum_k (output\%_{i \rightarrow k}^{2002} - 1_{k=i})$ 表示*i*行业与其下游行业*k*的关联系数,反映了*i*行业每单位产出投入到*k*行业的使用份额, $\sum_k (input\%_{i \rightarrow k}^{2002} - 1_{k=i})$ 表示*i*行业与其上游行业*k*的关联系数,反映了*i*行业每单位产出使用*k*行业中间投入品的份额, $1_{k=i}$ 是一个指示函数(当*k=i*时为1,否则为0);借鉴张晴和于津平(2021)的研究,企业的资产水平也可以代表企业间的数字技术差异。 $\frac{asset_{ijt=2002}}{allasset_{t=2002}}$ 表示*i*行业*j*企业2002年的资产与所有制造业企业2002年资产的平均数的比值; $\frac{x^l_{kt}}{asset_{kt=2002}}$ 表示*k*行业*t*年的机器人进口额与*k*行业所有企业2002年的资产总计的比值。

如表6所示,对于我国制造业来说,产业链之间的传导效应显著存在,即企业自身引进工业机器人进行生产设备升级,对于同处一条产业链的其他行业企业产生影响。列(1)(2)显示,企业进口工业机器人的减排效应向上游传导和向下游传导均通过了10%的显著性检验。企业引进工业机器人促进自身污染物减排的同时,对产业链上游企业生产安排产生需求引致和对下游企业产生技术溢出,这都显著抑制了企业污染物排放。同一条产业链的企业由于生产的关联性,会带动合作企业采取更加清洁的生产方式。同时,产业链的上游调节效应通过了5%的显著性水平检验,产业链的下游调节效应通过了1%的显著性水平检验。进一步说明,上游企业越增加工业机器人的进口越能促进下游企业污染物减排,越能产生需求引致的绿色转型影响。下游企业越增加工业机器人的进口,越能倒逼上游企业提供更清洁的产品,越能产生技术溢出的绿色转型影响。

基于地区间产业链的关联度差距,依据国家统计局的区域划分方法,将全国分为东部、中部、西部三部分。如表6所示,列(3)(4)东部地区 $upstream$ 、 $downstream$ 和交互项均通过了显著性水平检验,中部地区和西部地区未通过显著性水平检验。原因可能是东部地区经济发达,工业机器人的使用起步较早,已形成相对完善的生产和投入的协作关系,企业之间的信息共享和技术更新更为密切,通过产业链传导效应显著地降低上下游企业工业COD排放量,促进企业绿色转型。中部地区和西部地区经济发展相对落后,工业机器人等智能化技术起步较晚,企业之间联系不紧密,信息共享和技术更新相对落后,工业机器人的使用并未起到减排作用。至此,假说3得到验证。

表6 产业链传导效应

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
	工业COD排放强度		东部地区		中部地区		西部地区	
工业机器人进口额存量	-0.0680*** (-2.5954)		-0.0736*** (-2.6002)		0.0645 (0.8236)		-0.1036 (-0.9284)	
上游传导效应	-0.0349* (-1.8289)		-0.0403* (-1.7886)		0.0579 (0.4841)		0.3081 (0.6336)	
上游与进口额存量交乘项	-0.0469** (-2.4666)		-0.0278* (-1.6670)		0.5143 (0.5495)		0.3081 (0.6336)	
工业机器人进口额存量		-0.0680*** (-2.5950)		-0.0736*** (-2.5997)		0.0658 (0.8409)		-0.1040 (-0.9315)
下游传导效应		-0.0381* (-1.8338)		-0.0440* (-1.8037)		0.0410 (0.3354)		0.5087 (1.0060)
下游与进口额存量交乘项		-0.0500*** (-2.7352)		-0.0345** (-2.4563)		0.3731 (0.3644)		0.0222 (0.5510)

续表6

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
	工业COD排放强度		东部地区		中部地区		西部地区	
控制变量	是	是	是	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是
城市固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是
行业固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是
企业固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是
观测值	108892	108892	89963	89958	12203	12203	6726	6726
R <sup>2</sup>	0.8061	0.8066	0.8085	0.8082	0.8124	0.8124	0.7856	0.7851

## 六、异质性分析

智能化改造对企业绿色转型作用的发挥不仅取决于企业自身的表现,还与各地区的人力资本、产业结构、基础设施以及所属行业的技术属性有关。基于此,本文构建核心解释变量与各地区的人力资本、产业结构、基础设施的交互项(工业机器人进口额存量×人力资本、工业机器人进口额存量×产业结构、工业机器人进口额存量×基础设施),考察不同地区条件下工业机器人使用对企业绿色转型的影响,构建核心解释变量与行业技术水平的交互项(工业机器人进口额存量×行业技术水平),考察不同行业技术水平下机器人应用对企业绿色转型的影响。其中,人力资本用人均受教育年限衡量,产业结构用第二产业增加值与GDP的比值衡量,基础设施用全社会固定资产投资总额与GDP的比值衡量,行业技术水平用专利授权量衡量<sup>①</sup>。

表7列(1)(2)(3)的结果显示,工业机器人进口额存量×人力资本、工业机器人进口额存量×产业结构、工业机器人进口额存量×基础设施均在1%的水平上显著为负,表明人力资本水平越高、产业结构越优化和基础设施越完善的地区,工业机器人的使用越能促进企业污染减排,进而加快企业的绿色转型。Brynjolfsson et al.(2017)发现重大技术作用的发挥需要人员素质、基础设施、产业结构等不同条件与之相匹配。禀赋条件的缺失可能导致工业机器人不能很好发挥其污染物减排作用。陈东和姚笛(2022)的研究发现机器人应用的发展需要更多与之相适应的高级人力资本和科技型基础设施。因此,进一步引入核心解释变量和高级人力资本、科技型基础设施的交互项(工业机器人进口额存量×高级人力资本、工业机器人进口额存量×科技型基础设施)。其中,高级人力资本用大专及以上学历人数与六岁以上受教育人数的比值衡量,科技型基础设施用信息传输、计算机和软件的固定资产投资额与GDP的比值衡量。列(4)和列(5)结果显示,工业机器人进口额存量×高级人力资本、工业机器人进口额存量×科技型基础设施均在1%的水平上显著为负。高等教育人数占比越高、科技型基础设施越完善的地区,应用工业机器人的污染物减排效果越好,越能促进企业通过智能化改造实现绿色转型。

表7列(6)的结果显示,工业机器人进口额存量×行业技术水平的系数在1%的水平上显著为负,表明行业技术水平越高,工业机器人的使用对企业污染物减排的作用越强。行业技术水平越高,意味着该行业中企业的智能化水平越高,生产效率优于其他行业,能源消耗低于其他行业,越有利于企业绿色转型。所以,国家在传统行业的绿色转型中应大力提升企业的智能化改造。

中国的污染跨界转移是区域碳排放日益增长的一个重要原因,跨界污染不仅仅发生在流域下游,更广泛存在于省际交界地区(彭可茂等,2013)。鉴于此,本文通过GIS软件识别企业是否位于省份交界处,将非两省交界的企业设为0,相反为1,与核心解释变量进行交乘。如表7列(7)所示,工业

<sup>①</sup>中国海关贸易数据库、中国工业企业数据库、中国企业污染排放数据库三库匹配之后,再根据企业名称和年份与专利数据库匹配,然后按照年份和行业手工加总整理成行业专利数据。

机器人进口额存量与省界的系数在1%的水平上显著为负,表明工业机器人对省界企业污染物减排影响更大,工业机器人的使用有助于降低“排污避难所”的难题。

表7 异质性分析

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
	工业机器人进口额存量×人力资本	工业机器人进口额存量×产业结构	工业机器人进口额存量×基础设施	工业机器人进口额存量×高级人力资本	工业机器人进口额存量×科技型基础设施	工业机器人进口额存量×行业技术水平	工业机器人进口额存量×省界
单独考虑	-0.0101*** (-3.4389)	-0.1789*** (-3.1171)	-0.1350*** (-3.1287)	-0.5549*** (-3.3781)	-14.6639*** (-3.7106)	-0.0109*** (-3.1602)	-0.0437*** (-4.0639)
控制变量	是	是	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是	是	是
城市固定效应	是	是	是	是	是	是	是
行业固定效应	是	是	是	是	是	是	是
企业固定效应	是	是	是	是	是	是	是
观测值	112756	112756	112756	112756	98913	111656	112756
R <sup>2</sup>	0.8056	0.8056	0.8056	0.8054	0.8165	0.8056	0.8056

## 七、结论与对策建议

机器人等智能技术在大幅提高企业生产效率的同时,也为工业生产绿色转型提供了机遇与挑战。本文在理论分析的基础上,对2000—2013年中国海关贸易数据库、中国工业企业数据库、中国企业污染排放数据库和中国工业企业专利数据库进行匹配,以进口工业机器人为例,深入分析智能化改造对企业绿色转型的影响。研究发现,进口工业机器人的使用有利于企业污染物减排,智能化改造具有增长和扩绿的叠加作用。进口工业机器人对企业污染物减排的影响有直接和间接两种方式。直接影响是通过提高劳动生产率和扩大产出规模来降低企业的污染物排放,间接影响是通过减少能源消耗和提升企业全要素生产率来减少企业污染物排放。工业机器人还通过产业链传导效应促进上下游企业污染物减排。同时,人力资本水平越高、产业结构越优化、基础设施越完善的地区及技术水平越高的行业,机器人的使用越能促进企业的绿色转型,工业机器人的使用还有助于降低“排污避难所”的难题。本文为智能化改造的绿色转型影响研究提供了最直接的微观证据,提出如下对策建议:

第一,鼓励企业加快生产线的智能化改造,大幅提升企业劳动生产率和能源使用效率。政府相关部门通过固定资产加速折旧或政府补贴、贴息等方式鼓励有需求的企业加快引进工业机器人等智能设备。鼓励银行、保险公司等金融机构开展工业机器人等智能设备的融资租赁业务。大力发展平台经济和第三方技术服务,挖掘企业技术升级潜在需求,消除企业使用智能设备的技术壁垒,在提升企业生产能力的同时加快绿色转型。

第二,持续优化制造业企业用能结构,提升地区清洁能源消纳和储存能力。进一步完善制造业企业使用清洁能源的优惠政策,减少企业对传统能源的依赖,并通过税收补贴等方式引导企业配备太阳能等清洁能源设备。鼓励各地区根据实际情况建设光伏、风电、氢能等新能源基地,大力发展新型储能产业,降低企业用能成本。在优势地区布局清洁能源、储能等国家级科研平台,注重全国能源网络建设和能源传输体系设计,加快推动清洁能源参与市场交易,对重点项目给予财政和金融支持。

第三,鼓励制造业企业加大科技研发投入力度,提升全要素生产率。通过科技专项资金、税收优惠和奖励等政策,激励机器人研发制造企业加大科技攻关,降低工业机器人的出厂成本。鼓励制造业企业通过智能化改造开展联合科技创新,丰富工业机器人在生产管理中的应用场景。通过区域政策,支持处在两省交界或排污监管较弱地带的企业,加大工业机器人应用等生产智能化

改造。

第四,进一步畅通国内大循环,促进产业链上下游的技术联系与信息沟通。以产业链核心企业为中心,推动与上下游企业的生产协作与信息交流,特别是广大的中西部地区。政府相关部门应定期组织企业对接洽谈会和智能化发展促进会,充分发挥东部先进企业的龙头作用,加强东中西产业链上的企业合作。

第五,针对不同地区、不同行业的企业实施差异化扶持政策。人力资本水平、产业结构、基础设施相对优越的地区继续以税收优惠、奖励补贴等方式激励企业加强智能化改造,其他地区以专项资金为主、财税政策为辅的方式改进企业生产线智能化水平,或以试点示范为主要方式来促进区域或者行业的智能化、绿色化协同发展。通过产业政策加快传统行业的智能化升级,对传统行业的新技术、新设备引进与使用给予一定的财政金融支持。

#### 参考文献:

- 柏培文 喻理,2019:《数字经济发展与企业价格加成:理论机制与经验事实》,《中国工业经济》第11期。
- 蔡跃洲 陈楠,2019:《新技术革命下人工智能与高质量增长、高质量就业》,《数量经济技术经济研究》第5期。
- 陈昊 闫雪凌 朱博楷,2019:《机器人使用影响污染排放的机制和实证研究》,《中国经济问题》第5期。
- 陈东 姚笛,2022:《人工智能扩大了企业间的工资差距吗?——来自中国工业企业的证据》,《经济科学》第3期。
- 戴翔 杨双至,2022:《数字赋能、数字投入来源与制造业绿色化转型》,《中国工业经济》第9期。
- 房宏琳 杨思莹,2021:《金融科技创新与城市环境污染》,《经济学动态》第8期。
- 关婷 薛澜 赵静,2019:《技术赋能的治理创新:基于中国环境领域的实践案例》,《中国行政管理》第4期。
- 郭凯明,2019:《人工智能发展、产业结构转型升级与劳动收入份额变动》,《管理世界》第7期。
- 韩峰 庄宗武,2022:《国内大市场,人工智能应用与制造业出口国内附加值》,《世界经济研究》第5期。
- 韩超 李鑫平,2023:《在自动化中推动企业绿色转型:技术进步与产品重构效应》,《数量经济技术经济研究》第4期。
- 蒋为 龚思豪 李锡涛,2022:《机器人冲击、资本体现式技术进步与制造业碳减排——理论分析及中国的经验证据》,《中国工业经济》第10期。
- 孔高文 刘莎莎 孔东民,2020:《机器人与就业——基于行业与地区异质性的探索性分析》,《中国工业经济》第8期。
- 林熙 刘啟仁 冯桂娟,2023:《智能制造与绿色发展:基于工业机器人进口视角》,《世界经济》第8期。
- 李兰冰 李焕杰,2021:《技术创新、节能减排与城市绿色发展》,《软科学》第11期。
- 李国祥 张伟,2019:《环境分权、环境规制与工业污染治理效率》,《当代经济科学》第3期。
- 李磊 王小霞 包群,2021:《机器人的就业效应:机制与中国经验》,《管理世界》第9期。
- 李磊 刘常青,2023:《信息技术应用的减排效果与成本分摊机制》,《经济学动态》第11期。
- 李治国 李兆哲 孔维嘉,2024:《数字经济赋能高质量发展过程中的“虹吸集聚”——来自黄河中下游城市层面的经验证据》,《经济地理》第1期。
- 彭可茂 席利卿 雷玉桃,2013:《中国工业的污染避难所区域效应——基于2002—2012年工业总体与特定产业的测度与验证》,《中国工业经济》第10期。
- 钱娟 李金叶,2018:《技术进步是否有效促进了节能降耗与CO<sub>2</sub>减排?》,《科学学研究》第1期。
- 史丹 李鹏,2021:《“双碳”目标下工业碳排放结构模拟与政策冲击》,《改革》第12期。
- 盛丹 卜文超,2022:《机器人使用与中国企业的污染排放》,《数量经济技术经济研究》第9期。
- 孙早 侯玉琳,2019:《工业智能化如何重塑劳动力就业结构》,《中国工业经济》第5期。
- 孙晓华 张竣喃 郑辉,2020:《“营改增”促进了制造业与服务业融合发展吗》,《中国工业经济》第8期。
- 唐晓华 迟子茗,2022:《工业智能化提升工业绿色发展效率的实证研究》,《经济学家》第2期。
- 田巍 余森杰,2014:《中间品贸易自由化和企业研发:基于中国数据的经验分析》,《世界经济》第6期。
- 王文 牛泽东 孙早,2020:《工业机器人冲击下的服务业:结构升级还是低端锁定》,《统计研究》第7期。
- 王贤彬 钟夏洋,2022:《中央垂直监管如何影响企业环境绩效?——基于〈环境空气质量标准〉的准自然实验》,《产业经济研究》第6期。
- 韦东明 顾乃华 韩永辉,2021:《人工智能推动了产业结构转型升级吗——基于中国工业机器人数据的实证检验》,《财经科学》第10期。
- 王永钦 董雯,2020:《机器人的兴起如何影响中国劳动力市场?——来自制造业上市公司的证据》,《经济研究》第10期。

- 杨岚 周亚虹,2022:《环境规制与城市制造业转型升级——基于产业结构绿色转型和企业技术升级双视角分析》,《系统工程理论与实践》第6期。
- 杨光 侯钰,2020:《工业机器人的使用、技术升级与经济增长》,《中国工业经济》第10期。
- 闫雪凌 朱博楷 马超,2020:《工业机器人使用与制造业就业:来自中国的证据》,《统计研究》第1期。
- 张文博 周冯琦,2019:《人工智能背景下的环境治理变革及应对策略分析》,《社会科学》第7期。
- 张晴 于津平,2021:《制造业投入数字化与全球价值链中高端跃升——基于投入来源差异的再检验》,《财经研究》第9期。
- 中国社会科学院工业经济研究所课题组,2011:《中国工业绿色转型研究》,《中国工业经济》第4期。
- Acemoglu, D. & P. Restrepo(2020), “Robots and jobs: Evidence from US labor markets”, *Journal of Political Economy*, 128(6):2188—2244.
- Acemoglu, D. et al.(2012), “The environment and directed technical change”, *American Economic Review*, 102(1):131—166.
- Aghion, P. et al.(2017), “Artificial intelligence and economic growth”, *Social Science Electronic Publishing*, 16(10):15—16.
- Brynjolfsson, E. et al.(2017), “Artificial intelligence and the modern productivity paradox: A clash of expectations and statistics”, NBER Working Paper, No. 24001.
- Beck, T. et al.(2010), “Big bad banks? The winners and losers from bank deregulation in the United States”, *Journal of Finance*, 65(5):1637—1667.
- Cortés, U. et al.(1999), “Binding environmental sciences and artificial intelligence on ECAI’98”, *AI Communications*, 12(4):261—265.
- Dauth, W. et al.(2018), “Adjusting to robots: Worker-level evidence”, Opportunity and Inclusive Growth Institute Working Papers, No.2018.
- Fisher-Vanden, K. et al.(2006), “Technology development and energy productivity in China”, *Energy Economics*, 28(5):690—705.
- Gasteiger, E. & K.Prettner(2017), “A note on automation, stagnation, and the implications of a robot tax”, School of Business & Economics Discussion Papers, No.17.
- Guariso, G. et al.(1985), “Decision support systems for water management: The Lake Como case study”, *European Journal of Operational Research*, 21(3):295—306.
- Gillingham, K. & J. H. Stock(2018), “The cost of reducing greenhouse gas emissions”, *Journal of Economic Perspectives*, 32(4):53—72.
- Graetz, G. & G.Michaels(2018), “Robots at work”, *Review of Economics and Statistics*, 100(5):753—768.
- Hanson, R.(2001), “Economic growth given machine intelligence”, University of California: Berkeley, CA, USA, 2001.
- Haupt, S. E. et al.(2009), *Artificial Intelligence Methods in the Environmental Sciences*, Springer Netherlands.
- Miranda, M.L. & B.Hale(2002), “A taxing environment: Evaluating the multiple objectives of environmental taxes”, *Environmental Science & Technology*, 36(24):5289—5295.
- Strubell, E. et al.(2019), “Energy and policy considerations for deep learning in NLP”, Proceedings of the 57th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics.
- Ye, Z. et al.(2020), “Tackling environmental challenges in pollution controls using artificial intelligence: A review”, *Science of the Total Environment*, 699(10):1—28.

## Intelligentized Reconstruction and Green Transformation of Enterprises: A Study Based on Micro Data of Imported Industrial Robots

YUAN Lijing, WANG Wanjun and WANG Guoxin  
(Dongbei University of Finance and Economics, Dalian, China)

**Summary:** The green transformation of enterprises is of great significance for China's "dual carbon" strategy. China explicitly designated sustainable development strategy as a national strategy in the 9th Five-Year Plan in 1995. As a key area of energy conservation and emission reduction, the manufacturing industry has started the green transformation of production since the promulgation of the *Law of the People's Republic of China on the Promotion of Clean Production* in 2002. *Administrative Regulations on Levy and Use of Pollutant Discharge Fees* in 2003 increased the emission reduction costs of enterprises, forcing manufacturing enterprises to accelerate green technology innovation. China further clarified the overall requirements and key tasks for greenhouse gas emissions in 2011, and reducing industrial pollutant emissions became an important link for enterprises to achieve green transformation. The Fourth Industrial Revolution has been deepening in the 21st century, and the intelligent transformation of manufacturing enterprises has become an important way to promote the transformation of development mode and high-quality economic development. Industrial robot is a common means of enterprise intelligent transformation. The first ten-year action plan of Made in China 2025 clearly identifies "computer numerical control machine tools and robots" as one of the key areas to be vigorously promoted. The 14th Five-Year Plan clearly encourages innovation in industries such as robotics and promotes the high-end, intelligent, and green development of manufacturing industry. This article matches the four databases of China Customs Trade Database, China Industrial Enterprise Database, China Enterprise Pollution Emission Database, and China Industrial Enterprise Patent Database to form enterprises data on imported industrial robot from 2000 to 2013, constructs a fixed effect model and an industrial chain transmission effect model, and analyzes the emission reduction effects and mechanisms of intelligentized reconstruction. The empirical study shows that imported industrial robots significantly inhibit the pollution emissions of manufacturing enterprises, but this effect is mainly brought about by industrial robots in the production line, especially multifunctional industrial robots, which improves the labor productivity, expands the output scale, reduces energy intensity, and increases total factor productivity (TFP). Imported industrial robots also promote the pollution reduction of upstream and downstream enterprises through the transmission effect of the industrial chain. The more industrial robots imported by upstream enterprises, the more it can promote the emission reduction of downstream enterprises. Meanwhile, the more industrial robots imported by downstream enterprises, the more they can promote the emission reduction of upstream enterprises. At the same time, industrial robots have a more promoting effect on green transformation of enterprises in regions with higher human capital, and better industrial structure and infrastructure, as well as in industries with higher technological level. This is more obvious in regions where the proportion of higher education population is higher and the technological infrastructure is more complete. Moreover, industrial robots have a greater impact on the emission reduction in enterprises at provincial boundaries, and the use of industrial robots reduces the problem of "pollution shelters". The data of industrial robots in existing literature is mainly calculated based on the annual installation volume of industrial robots, or the flow data of imported industrial robots, which cannot reflect the actual use of industrial robots in enterprises. The amount of imports of industrial robots in stock is a micro-level data that can represent the actual value of imported industrial robots used in production. It can more accurately measure the impact of investment in robots and other equipment on enterprises' pollutant reduction, and help to study the impact mechanism based on robot classification. This article takes the amount of imports of industrial robots in stock as the core explanatory variable, distinguishing the use of different industrial robots. It also extends the impact to the transmission effect of the industrial chain, exploring the regional and industrial heterogeneity of the pollution reduction effect of industrial robots, which enriches and expands existing research on the pollution reduction effect of industrial robots, providing decision-making ideas and policy reference for intelligent technologies such as robots to better serve China's green development.

**Keywords:** Intelligentized Reconstruction; Imported Industrial Robots; Pollution Reduction; Industrial Chain Conduction Effect

**JEL Classification:** O13, O33, Q55

(责任编辑:金禾)  
(校对:木丰)