

机器人应用对城市碳排放影响的机理与效应研究

王海，郭冠宇，闫卓毓

(浙江工商大学 经济学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 全面实施“机器人+”应用行动是新时代建设制造强国、数字中国的必然要求，也是推动经济社会高质量发展的重要举措。工业机器人是实现信息化与工业化深度融合的关键，加快机器人在城市产业生产体系的应用能否实现碳减排效应有待检验。本文基于国际机器人联合会（IFR）数据，采用固定效应模型检验机器人应用对城市碳排放的影响及其作用机制。研究结果显示：机器人应用能够减少城市碳排放；机器人应用通过绿色创新能力、财政科技支出和市场竞争程度影响城市碳排放；机器人应用对中西部地区、非老工业基地和低行政等级城市碳排放的抑制作用更明显。以上结论可以为理解机器人在城市低碳发展中起到的积极作用提供新的视角，也可以为中国制定提升机器人应用深度及广度计划、培育机器人产业发展生态等提供参考。

关键词: 机器人应用；城市碳排放；碳减排效应；绿色创新能力；市场竞争程度

中图分类号: F062.9; F49 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-176X(2023)05-0052-12

一、问题的提出

当前，中国将应对气候变化纳入生态文明建设整体布局。习近平主席在第七十五届联合国大会一般性辩论上宣布：“中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和。”为实现这一目标，《“十四五”工业绿色发展规划》指出：“推动数字化智能化绿色化融合发展”“深化生产制造过程的数字化应用，赋能绿色制造”。习近平总书记在中共中央政治局第三十六次集体学习时指出：“要紧紧抓住新一轮科技革命和产业变革的机遇，推动互联网、大数据、人工智能、第五代移动通信（5G）等新兴技术与绿色低碳产业深度融合，建设绿色制造体系和服务体系，提高绿色低碳产业在经济总量中的比重。”党的二十大报告进一步强调：“加快发展方式绿色转型”“深入推进环境污染防

收稿日期: 2023-02-03

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“地区环境目标约束的就业效应研究：内在机制、边界条件与政策建议”（72173118）；国家自然科学基金青年项目“中国环境规制政策的‘波特效应’触发机制与实现路径研究”（71803176）；浙江省哲学社会科学规划之江青年课题“中国环境规制政策演进规律及其经济影响——基于波特假说的再思考”（22ZJQN26YB）；浙江工商大学“数字+”学科建设管理项目“经济运行态势分析及模拟推演平台”（SZJ2022A007）；浙商研究院课题“浙商企业的数字化转型模式及其绿色‘赋能’效果研究”（22ZSKT04YB）

作者简介: 王海（1989-），男，安徽巢湖人，特聘研究员，博士，主要从事数字经济与政府规制研究。E-mail: hariz_wang@163.com
郭冠宇（2000-），男，河南焦作人，硕士研究生，主要从事数字经济与政府规制研究。E-mail: ggy_3334@163.com
闫卓毓（1998-），女，内蒙古巴彦淖尔人，硕士研究生，主要从事数字经济研究。E-mail: zhuoyu_yan0118@163.com

治”“积极稳妥推进碳达峰碳中和”。那么,作为新兴数字技术在产业发展中的重要应用载体,机器人能否在引领产业数字化智能化发展的同时助力城市低碳发展?

伴随着经济转向高质量发展阶段,加快机器人等智能装备的应用已成为中国推动发展方式变革和产业转型升级的重要抓手,探讨机器人应用带来的影响便具有重要的学术价值和迫切的现实意义。通过梳理相关文献可以发现,现有关于机器人应用的研究更多围绕机器人应用对就业的影响展开。一方面,部分学者认为,机器人应用将降低就业水平。机器人应用能够缩减企业生产成本,促使企业增加资本投入,由此替代相应岗位的劳动力^[1]。董雪兵等^[2]还进一步发现,机器人应用减少了制造业就业规模,增加了服务业就业规模,并且能够推动劳动力从制造业流向服务业,由此导致制造业就业份额下降。另一方面,也有学者指出,机器人应用将提升就业水平。李磊等^[3]基于企业层面的经验研究发现,机器人应用能够推动企业生产方式转向自动化,并提高非自动化生产环节的劳动力需求。魏下海等^[4]基于城市层面的数据发现,机器人释放的生产力能够增加相应的技能需求和工作机会,创造更多就业岗位,从而吸纳更多外来移民。也有学者从经济增长、产业升级和创新发展等方面讨论了机器人应用的潜在影响。陈彦斌等^[5]认为,机器人应用能促进资本积累,提升全要素生产率,削弱因人口老龄化对经济增长带来的不利影响,由此提升经济发展质量。郭凯明^[6]认为,机器人等人工智能技术的发展及应用会促使生产要素在产业部门之间流动,并推动产业部门内部的生产要素实现优化配置,从而带动产业结构转型升级。师博^[7]的研究表明,机器人应用能在与实体产业融合的同时激发企业自主创新活力,并通过技术外溢效应引领地区创新发展。

沿袭上述研究脉络,部分文献开始关注机器人应用与碳排放的关系。但受限于数据,相应研究更多从国别或省级层面展开。Li等^[8]基于35个国家的数据检验了机器人应用对碳排放的影响。蒋为等^[9]利用中国省级层面数据讨论了机器人冲击对制造业碳排放的影响。在此背景下,利用更为精确的地级市层面碳排放测算数据展开研究便具有重要的学术价值和迫切的现实意义。更为重要的是,机器人应用对城市碳排放的影响是通过何种机制发挥作用的?这种影响是否会呈现出明显的异质性?对这些问题的回答直接关系到中国数字经济发展规划乃至经济社会高质量发展。为此,本文在利用国际机器人联合会(IFR)数据量化城市机器人应用情况的基础上,采用固定效应模型考察机器人应用对城市碳排放的影响及其作用机制。

较之已有研究,本文的边际贡献主要体现在以下两个方面:一方面,在理论层面,早期文献更多关注环境政策在驱动经济低碳发展中所发挥的积极作用^[10-11]。伴随着人工智能等新兴数字技术不断发展,机器人应用能否减少碳排放这一问题开始受到关注^[12-13]。但就机器人应用对城市碳排放具体影响方向及作用机制,现有文献还没有予以充分解读。本文采用地级市数据检验机器人应用对城市碳排放的影响,从而丰富了机器人应用和碳减排方面的研究文献。另一方面,在实证层面,本文验证了机器人应用对城市碳减排的积极影响,从而明确了加快机器人应用乃至推动数字经济发展在实现碳达峰、碳中和目标中所起到的关键作用,也为中国促进数字经济与实体经济深度融合、精准实现数字化绿色化协同发展提供了经验证据。

二、理论分析与研究假设

改革开放以来,中国利用粗放型发展模式实现了经济的快速增长,但这一高耗能、高排放的发展模式也使得碳排放水平持续上升,由此引发的生态环境问题已成为推进经济社会高质量发展进程的重大阻碍。在此背景下,采取何种方式来根治这一问题受到社会各界的广泛关注。伴随着数字经济不断发展,加快机器人等智能装备的应用能够推动发展方式变革和助推产业转型升级。这也将带动企业优化革新生产模式,从而减少城市碳排放^[12-13]。Yu等^[13]的研究结果显示,工业机器人应用显著减少了城市碳排放,其通过提高能源效率和绿色技术效率减少城市碳排放,且对

超大城市、先进制造业基地和低碳试点城市碳减排的影响更明显。

机器人应用能助力企业精确地掌握生产流程各环节的实际情况,实现对企业排污状况的实时监管,并有助于提升企业污染处理效率和污染治理能力^[14-15],从而有助于减少城市碳排放。盛丹和卜文超^[15]研究发现,机器人使用能够显著抑制企业污染排放,机器人使用主要通过人工替代、增加清洁能源使用、增设末端处理设备和增强排污处理能力等渠道抑制企业污染排放。机器人应用能促使企业生产流程向自动化、智能化转变,并利用数字技术对高耗能和高排放的生产环节进行定量分析和持续优化,减少企业生产资源消耗。这也能激励企业实施个性化、定制化生产模式,从而实现企业生产流程与产品的绿色化升级,最终减少城市整体碳排放^[8]。作为一种新兴数字技术,机器人应用能优化城市财政支出结构,推动城市市场环境向竞争格局转变,由此重塑城市资源配置状况,推动城市向低碳发展模式转型。基于以上分析,笔者提出如下假设:

假设1: 机器人应用能够减少城市碳排放。

绿色创新为中国生态文明建设和经济绿色可持续发展提供了新的动力。企业能够借助绿色技术实现资源要素结构的优化配置,从而在生产过程中减少对传统化石能源的依赖度,最终减少自身碳排放且提升环境绩效^[16]。然而,绿色创新具有高技术投入、高市场风险和长投资周期等特征,因而缺乏创新资源的企业可能并不会转向以绿色技术为主导的绿色创新路径。在此背景下,推动机器人应用有助于革新企业生产模式,促使企业实现市场需求信息的自动化收集与分析,进而强化企业快速响应能力和动态优化能力,提升产品与市场需求的匹配效率^[17]。这也有助于企业利用机器人整合业务模块,对研发全流程进行实时监控,从而在缓解企业创新资源错配问题的同时,大幅度提高绿色技术研发效率^[18-19]。Gan等^[19]基于2011—2019年中国制造业上市公司数据的研究结果显示,工业机器人应用对绿色创新产生了显著正向影响,工业机器人应用通过节省劳动力成本和调整人力资本结构对绿色创新产生影响。与此同时,机器人应用可能会影响劳动力结构配置状况,补充地区绿色创新人才资源。孙早和侯玉琳^[20]研究发现,机器人应用能够形成资本对劳动力的替代,并增加对高端劳动力的需求,实现高端人才与研发岗位的高效率匹配。基于此,笔者提出如下假设:

假设2: 机器人应用可以通过增强绿色创新能力减少城市碳排放。

作为重要的政府扶持手段,财政收支结构对地区碳排放有显著影响^[21]。刘俸奇和张同斌^[21]研究发现,财政支出结构由生产性支出偏向消费性支出和服务性支出,财政收入来源由污染型企业向清洁型企业倾斜,会促进产业结构升级,最终改善环境质量。具体来说,扩大经济建设等生产性支出能促进工业产出增长,但工业产出增长引致的高耗能和高排放问题会增加城市碳排放^[22]。与之不同的是,增加科技等非生产性支出可能会激励企业开展污染治理活动并对生产技术及设备进行绿色化改造,从而减少企业的能源消耗和污染排放^[23],最终减少了城市碳排放。因此,如何推进财政支出结构转型对城市经济低碳发展至关重要。在此背景下,机器人应用可能促使地方政府提高创新重视程度,优化财政支出结构。《“机器人+”应用行动实施方案》指出:“各相关部门、各地方将机器人应用推广作为科技创新、行业规划、产业政策重点方向,统筹政策、资金、资源予以支持,加大对机器人创新应用的投入力度。”一方面,机器人与传统制造业的深度融合将催生出对高新制造业和现代服务业等新兴产业的发展需求,由此优化地区产业结构;另一方面,机器人应用将推动相应产业实现生产规模的扩大和生产效率的提升。产业结构的转型升级以及产业的快速发展将为城市培育优质税源,进而拓宽城市财政科技支出的资金来源。总体而言,地方政府将在推广机器人应用的过程中增加财政科技支出,这也有助于减少城市碳排放。基于此,笔者提出如下假设:

假设3: 机器人应用可以通过增加财政科技支出减少城市碳排放。

经济低碳发展的实质在于生产资源在低环境效率企业与高环境效率企业之间的优化配置^[24]。

鉴于此,国务院印发的《关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见》指出,坚持市场导向原则,在绿色转型中充分发挥市场的导向性作用。市场机制能够迫使低效率企业退出市场,促使新兴企业和高效率企业进入市场来加速企业更替,由此引发产业重构和跨企业资源再配置^[25],最终促进城市碳减排。伴随着机器人的广泛应用,城市市场环境将逐渐形成竞争格局。一方面,机器人与现有产业的深度融合将加快技术变革速度和缩短产品生命周期,改变传统企业的生产方式和组织模式,从而加剧在位企业之间的竞争程度。戚聿东和肖旭^[26]还发现,机器人也能重塑企业组织边界,迫使企业转向跨界发展,由此引致替代性竞争效应。另一方面,机器人应用在推动机器人产业发展的同时会带动产业链上下游企业快速发展,由此吸引大量新企业进入市场。这将进一步压缩在位企业的市场资源和盈利空间。在此背景下,市场资源的有限性约束将倒逼企业转向产品及服务的绿色高质量供给,由此抢占低碳市场并建立领先优势。基于此,笔者提出如下假设:

假设4: 机器人应用可以通过提升市场竞争程度减少城市碳排放。

三、研究设计

(一) 变量选择

1. 被解释变量

被解释变量为城市碳排放(CO₂)。借鉴邵帅等^[27]的研究,本文以城市碳排放量与城市年末户籍人口数量的比值衡量。

2. 解释变量

解释变量为机器人应用(robot)。借鉴许健等^[28]的研究,本文利用第二次全国经济普查数据中地级市分行业就业人员数据对IFR提供的机器人安装数据进行分解,由此得到城市机器人应用指标。^①第一,将IFR数据与第二次全国经济普查数据进行匹配。^②第二,利用地级市不同行业就业人数占有所有就业人数的份额来构建权重,将行业层面机器人数据分解至地级市—行业层面。第三,对地级市各行业机器人应用情况进行汇总处理。具体指标构建如下:

$$\text{robot}_{it} = \sum_{j=1}^N \frac{\text{employ}_{ij,t=2008}}{\text{employ}_{i,t=2008}} \times \frac{\text{IFRrobot}_{jt}}{\text{employ}_{j,t=2008}} \quad (1)$$

其中,i、j和t分别为城市、行业和年份;robot_{it}为i城市t年机器人应用情况;employ_{ij,t=2008}为i城市j行业2008年就业人员数量;employ_{i,t=2008}为i城市2008年就业人员数量;employ_{j,t=2008}为j行业2008年就业人员数量;IFRrobot_{jt}为j行业t年机器人应用情况。

3. 中介变量

中介变量如下:绿色创新能力(inno),以城市绿色发明专利申请数量衡量,该变量数值越大,意味着绿色创新能力越强。^③财政科技支出(tech),以城市科学技术支出占财政支出的比值衡量,该变量数值越大,意味着财政科技支出越多。市场竞争程度(firm_entry),以城市新成立企业的自然对数值衡量,该变量数值越大,意味着市场竞争越激烈。

4. 控制变量

控制变量如下:经济发展水平(gdp),以城市生产总值的自然对数值衡量;财政支出

① 本文主要利用第二次全国经济普查数据中地级市各行业就业数据来对机器人数据进行分解。用早期数据进行测算能够避免因城市行业结构随时间变化等因素而带来的指标衡量偏误问题,也能确保变量设计的外生性。因此,本文主要利用地级市层面机器人应用情况进行分析。此外,考虑到地级市数据可能存在信息漏损问题,省级层面的数据公开度相对较高,能够以年度数据来计算机器人使用权重,从而将行业—年度层面机器人数据分解至省份—行业—年度层面。为此,本文还利用省级层面机器人应用及存量进行稳健性检验。

② IFR数据行业分类标准为《国际标准行业分类》第4版(ISIC Rev 4.0),第二次全国经济普查数据则使用《国民经济行业分类》(GB/T 4754—2002)。借鉴许健等^[28]的研究,本文将行业划分为农林牧渔业,采矿业,制造业,电力、热力、燃气及水生产和供应业,建筑业,教育业六大行业。

③ 在计算绿色创新能力时,考虑到绿色专利数据中存在大量零值样本,本文引入反双曲正弦函数(IHS)对数据进行调整。

(finc)，以城市财政支出占城市生产总值的比值衡量；产业结构（stru），以城市第二产业从业人员占城市所有从业人员的比值衡量；人力资本（stud），以城市普通高等学校在校学生的自然对数值衡量；引资情况（fdi），以城市当年实际使用外资金额的自然对数值衡量。

（二）模型构建

为检验机器人应用对城市碳排放的影响，本文构建如下计量模型：

$$CO_{2it} = \alpha_0 + \alpha_1 robot_{it} + \sum_{k=2}^6 \alpha_k control_{kit} + \varphi_i + \omega_t + \varepsilon_{it} \tag{2}$$

其中，i和t分别为城市和年份；CO₂为城市碳排放；robot为机器人应用；control为上述一系列控制变量；φ和ω分别为城市固定效应和年份固定效应；ε为随机扰动项。

（三）数据来源

本文选取的样本为2006—2019年中国地级市的面板数据。数据主要来源于IFR、中国碳核算数据库（CEADs）、《中国城市统计年鉴》、《中国劳动统计年鉴》、《中国工业统计年鉴》、第二次全国经济普查数据、中国研究数据服务平台（CNRDS）。其中，IFR提供了全球国家—行业一年度层面的机器人安装量及存量状况，是当前有关机器人相关研究中使用最广泛的数据库。CEADs提供的二氧化碳排放总量基于中国不同行业各类化石燃料消耗量乘以排放因子得到，据此能够较为准确地测算出城市碳排放情况。^①

表1是本文主要变量的描述性统计结果，城市碳排放的均值为0.104，其最大值和最小值分别为1.911和0.004。机器人应用的均值为0.268，其最大值和最小值分别为1.655和0.002。城市碳排放和机器人应用的最大值与最小值之差较大，说明不同城市的碳排放和机器人应用情况存在明显差异。其他变量的分布情况均在合理范围之内。

表1 主要变量的描述性统计结果

名 称	符 号	观测值	均 值	标准差	最小值	最大值
城市碳排放	CO ₂	2 837	0.104	0.132	0.004	1.911
机器人应用	robot	2 837	0.268	0.297	0.002	1.655
绿色创新能力	inno	2 837	4.589	1.933	0.000	10.781
财政科技支出	tech	2 837	0.017	0.015	0.000	0.207
市场竞争程度	firm_entry	2 837	10.356	0.859	7.596	13.715
经济发展水平	gdp	2 837	16.502	0.936	14.588	19.014
财政支出	finc	2 837	15.780	6.532	6.093	38.389
产业结构	stru	2 837	45.774	13.551	16.550	77.970
人力资本	stud	2 837	10.719	1.290	7.715	13.646
引资情况	fdi	2 837	10.258	1.645	5.697	13.922

四、实证结果与分析

（一）基准回归结果分析

表2是机器人应用对城市碳排放影响的基准回归结果，列（1）和列（2）分别为在未引入控制变量和引入控制变量的情况下，机器人应用对城市碳排放的回归结果。表2列（2）的回归结果显示，机器人应用的系数为-0.065，且在1%的水平上显著，表明机器人应用能够减少城市碳排放，假设1得以验证。在控制变量方面，经济发展水平的系数显著为负，这可能是因为地方政府在发展经济的过程中愈发重视环境保护，进而对环境提出更高要求^[29]。财政支出的系数显著

① 现有在地级市层面讨论机器人应用对碳排放影响的文献主要利用电力、天然气、液化天然气和煤炭的消耗数据以及联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）提供的碳排放转换因子来测算城市碳排放情况^[13]。但这可能会忽视其他能源消耗所产生的碳排放，导致测算结果小于真实值。因此，本文主要采用CEADs提供的碳排放数据进行研究。

为负，这可能是由于中国开始强调财政体系的绿色化转型，通过财政手段来激励企业实现低碳发展。产业结构对城市碳排放有显著正向影响，这可能是由于相比于其他产业，第二产业的发展需要消耗大量化石能源，很容易在生产过程中释放二氧化碳，由此增加城市碳排放。人力资本的影响不显著，这可能是由于：一方面，人力资本提升有助于促使企业开展创新活动，生产技术的变革将最终促使城市碳排放减少；另一方面，人力资本对碳排放的抑制影响需要一定基础条件作为支撑。引资情况的系数为负，但并未通过统计上的显著性检验，可能的原因为，尽管中国表示要提升外资引进的质量，但现实中地方政府可能在与其他地区进行引资竞争的过程中放松了环境方面的要求。

表2 基准回归结果

变 量	(1)	(2)	变 量	(1)	(2)
robot	-0.058*** (0.017)	-0.065*** (0.017)	fdi		-4E-5 (0.002)
gdp		-0.042*** (0.016)	城市 FE/年份 FE	控制	控制
finc		-0.001*** (0.000)	常数项	0.120*** (0.005)	0.793*** (0.233)
stru		4E-4*** (0.000)	观测值	2 837	2 837
stud		0.002 (0.010)	R ²	0.866	0.868

注：***、**和*分别表示在1%、5%和10%的显著性水平上显著，小括号内为稳健标准误，下同。

(二) 内生性检验

基准回归模型中可能存在如下内生性问题：其一，遗漏其他同时影响机器人应用和城市碳排放的相关因素，从而带来估计偏误。其二，地方政府可能依据辖区往年碳排放情况来制定机器人产业发展规划，这种双向因果关系将导致联立偏差。为此，本文采用工具变量法缓解上述内生性问题，具体选用美国、日本、德国、瑞典和韩国五个主要机器人进口来源国对中国各城市机器人覆盖度作为工具变量。这些国家在机器人方面的出口情况将影响中国各城市的机器人应用情况，且这些国家在机器人发展趋势上与中国较为接近^[28]，由此满足了工具变量选取的相关性原则；而他国本土机器人应用情况并不会直接对中国碳排放产生影响，满足工具变量选取的排他性原则。具体指标构建如下：

$$\text{forerobot}_{it} = \sum_{j=1}^N \frac{\text{employ}_{ij,t=2008}}{\text{employ}_{i,t=2008}} \times \frac{\text{fore_IFRrobot}_{jt}}{\text{employ}_{j,t=2008}} \tag{3}$$

$$\text{robot_m}_{it} = \left(\sum_{f=1}^5 \text{forerobot}_{fi} \right) \times \frac{1}{5} \tag{4}$$

其中，f为进口来源国；fore_IFRrobot_{fi}为进口来源国f在t年j行业的机器人应用情况；employ_{ij,t=2008}为中国i城市j行业在2008年的就业人员数量；employ_{i,t=2008}为中国i城市在2008年的就业人员数量；employ_{j,t=2008}为中国j行业在2008年的就业人员数量。由此得到进口来源国f对中国各城市的机器人覆盖度（forerobot）。在此基础上，本文利用五个进口来源国机器人覆盖度的均值（robot_m）构造工具变量。

基于工具变量robot_m的回归结果如表3列（1）和列（2）所示，机器人应用能减少城市碳排放的结论与基准回归结果保持一致。在工具变量适用性检验中，第一阶段回归结果显示，工具变量的系数显著为正，表明工具变量与机器人应用之间存在较强相关性。Kleibergen-Paap rk Wald F值以及Kleibergen-Paap rk LM值拒绝了弱工具变量以及识别不足假设。此外，本文还借鉴王永钦和董雯^[30]的研究，根据模型（3）得到美国对中国各城市的机器人覆盖度（robot_ame）来作为工具变量进行回归。工具变量robot_ame的回归结果如表3列（3）和列（4）所示，机器人应用有助于减少城市碳排放。第一阶段回归结果、Kleibergen-Paap rk Wald F值以及Kleibergen-Paap rk LM值均证实该工具变量选取的可信性。

表3 内生性检验的回归结果

变 量	(1)	(2)	(3)	(4)
	第一阶段 robot	第二阶段 CO ₂	第一阶段 robot	第二阶段 CO ₂
robot_m	5.365 ^{***} (0.198)			
robot_ame			3.334 ^{***} (0.056)	
robot		-0.067 ^{***} (0.017)		-0.073 ^{***} (0.017)
gdp	-0.014 [*] (0.008)	-0.042 ^{***} (0.015)	0.007 (0.008)	-0.042 ^{***} (0.015)
finc	-0.001 ^{***} (0.000)	-0.001 ^{***} (0.000)	-0.001 [*] (0.000)	-0.001 ^{***} (0.000)
stru	-4E-4 ^{***} (0.000)	4E-4 ^{***} (0.000)	-4E-4 ^{***} (0.000)	4E-4 ^{***} (0.000)
stud	-0.001 (0.005)	0.002 (0.009)	-3E-4 (0.004)	0.002 (0.009)
fdi	-0.002 ^{**} (0.001)	-8E-5 (0.002)	-3E-4 (0.001)	-2E-4 (0.002)
城市 FE	控制	控制	控制	控制
年份 FE	控制	控制	控制	控制
常数项	-0.186 (0.170)	0.793 ^{***} (0.239)	-0.421 ^{***} (0.145)	0.806 ^{***} (0.239)
观测值	2 837	2 837	2 837	2 837
F 值	736.227		3 520.758	
LM 值	435.870 ^{***} [0.000]		483.876 ^{***} [0.000]	

注：中括号内为P值。

（三）稳健性检验^①

1. 替换变量

一方面，本文将被解释变量的衡量指标分别替换为城市碳排放量、城市碳排放量与年末从业人员数量的比值重新纳入模型进行回归。替换被解释变量的回归结果显示，机器人应用的系数仍然显著为负。另一方面，本文将解释变量的衡量指标分别替换为地级市层面机器人存量^[28]、省级层面机器人应用及存量^[9, 31]重新纳入模型进行回归。替换解释变量后的回归结果与基准回归结果一致，证实了基准回归结果的稳健性。^②

2. 排除其他政策事件

机器人应用对城市碳排放的抑制作用可能包含城市节能减排工作的影响。中国政府强调各地区要增强绿色发展意识，并在不同城市实行节能减排财政政策、低碳城市和碳排放权交易等试点工作。因此，本文还排除了一系列可能产生影响的政策事件。具体包括：第一，地级市层面政府工作报告环保词频。地级市层面政府工作报告是地方政府对上一年度工作的总结及对下一年度工作的规划，其内容能够直接体现地方政府对某方面工作的重视程度。因此，本文统计“低碳”“环境保护”等关键词在地级市层面政府工作报告中的出现频次，并将其引入模型进行回归。第二，节能减排财政政策。自2011年起，财政部等部门要求部分城市开展节能减排财政政策综合示范工作，通过财政支出结构调整充分发挥财政对节能减排工作的引领作用。为此，本文生成相应城市成为节能减排财政政策试点城市的虚拟变量，并将其引入模型进行回归。第三，低碳城市。为推动城市低碳发展，国家发展和改革委员会于2010年正式启动低碳城市试点工作，并逐步扩大试点范围。本文在收集不同批次试点城市名单的基础上，将其作为虚拟变量引入模型进行

① 稳健性检验结果未在正文中列出，留存备案。
② 考虑到机器人的安装和使用可能存在一定周期，从而使得机器人应用对城市碳排放的影响存在滞后性。为排除这一问题带来的干扰，本文还对解释变量分别进行滞后一期、滞后两期和滞后三期处理，由此分别作为替代指标进行检验。此外，考虑到中国企业使用的机器人有相当一部分比例来源于进口渠道。这就使得机器人进口数据同样能够反映地区应用情况。本文在收集中国海关统计数据的基础上，整理出省级层面的机器人进口金额及数量情况，并以此作为解释变量进行回归。相应回归结果与基准回归结果基本一致。

回归。第四，碳排放权交易。2011年开始的碳排放权交易试点工作主要以市场机制为主来加快经济发展方式转变和促进产业结构升级，从而实现控制温室气体排放行动目标。本文生成了这一试点工作的虚拟变量，并将其引入模型进行回归。此外，本文同时加入上述政策事件进行回归。上述回归结果显示，机器人应用的系数均显著为负，表明本文的基准回归结果是稳健的。

3. 溢出效应再检验

在推广机器人应用的过程中，不同城市的经济主体之间可能存在一定的空间关联，如不同城市在机器人推广应用经验方面的交流合作。这就可能使得机器人应用对城市碳排放的影响存在空间溢出效应。忽视这一现象的存在将致使本文结论存在偏差。为此，本文参考王海和尹俊雅^[32]的研究，分别从地理位置及经济发展水平视角生成邻近城市机器人应用变量。在地理位置方面，计算与本城市相邻的其他城市的机器人应用水平均值；在经济水平方面，计算与本城市经济发展水平相近的前3名城市的机器人应用水平均值、与本城市经济发展水平相近的前5名城市的机器人应用水平均值。基于此，本文将其作为控制变量引入模型进行回归。回归结果显示，上述新引入变量的系数均不显著，且机器人应用的系数并未发生较大变化。因此，这在一定程度上说明机器人应用对城市碳排放的影响可能并不存在明显的空间溢出效应。

4. 分位数回归再检验

为进一步明确机器人应用对城市碳排放的影响特征，本文对基准模型进行分位数回归检验，分别得到基于第20百分位数、第40百分位数、第60百分位数和第80百分位数的分位数回归结果。上述回归结果显示，随着分位数值的逐步提升，机器人应用的系数逐渐变小。这意味着对于不同城市而言，处于条件分布高端的城市，机器人应用对城市碳排放的抑制影响更为明显。

（四）机制检验

根据前文理论分析，机器人应用可能通过绿色创新能力、财政科技支出和市场竞争程度来影响城市碳排放。本文参考胡山和余泳泽^[33]的做法，检验机器人应用对上述中介变量的影响，机制检验的回归结果如表4所示。

表4 机制检验的回归结果

变 量	(1)	(2)	(3)
	inno	tech	firm_entry
robot	0.333*** (0.109)	0.017*** (0.002)	0.291*** (0.049)
控制变量	控制	控制	控制
城市FE	控制	控制	控制
年份FE	控制	控制	控制
常数项	-14.979*** (2.292)	-0.197*** (0.035)	5.624*** (0.763)
观测值	2 837	2 837	2 837
R ²	0.936	0.759	0.940

表4列（1）是机器人应用对绿色创新能力影响的回归结果，机器人应用的系数为0.333，且在1%的水平上显著，即机器人应用有助于提升绿色创新能力，假设2得以验证。推动机器人应用既能提升城市工业信息化水平，助力企业实现业务流程的数字化改造，也将优化城市劳动力结构配置，从而在强化绿色创新能力的同时，助力城市实现低碳发展。表4列（2）是机器人应用对财政科技支出影响的回归结果，机器人应用的系数为0.017，且在1%的水平上显著，即机器人应用能增加财政科技支出，假设3得以验证。地方政府可能在推进机器人应用的过程中进一步优化财政支出结构，通过增加科技等非生产性支出来压实城市创新基础，从而带动城市低碳转型。表4列（3）是机器人应用对市场竞争程度影响的回归结果，机器人应用的系数为0.291，且在

1%的水平上显著，即机器人应用能影响企业进入决策，通过吸引企业注册成立而加剧市场竞争程度，假设4得以验证。伴随着机器人得到广泛应用，市场格局将趋于竞争化。为争取市场份额，企业将展开产品和业务模式等方面的创新^[34]，从而实现生产的低碳化。

（五）异质性分析

1. 地区异质性

考虑到不同地区在资源禀赋和政策倾斜力度等方面有所不同，其在机器人应用及碳排放控制方面投入的资源和重视程度可能存在差异，由此使得机器人应用对城市碳排放的影响存在地区异质性。为此，本文将各城市划分为东部地区和中西部地区进行分样本回归。^①表5列（1）和列（2）的回归结果表明，与东部地区相比，机器人应用对中西部地区碳排放的抑制作用更明显。东部地区具有较高的经济发展水平和人力资本水平，这就使得其在推进碳减排工作过程中具有较好的现实基础。而中西部地区在这方面稍显不足，机器人应用能更好地推进其城市碳减排。

2. 工业发展异质性

在中华人民共和国成立初期，为加快工业体系建设，国家在部分地区依托重工业企业建设了一批工业基地。但伴随着经济发展形势发生变化，这些工业基地粗放的发展方式也带来了较大的能源消耗问题。因此，机器人应用带来的影响可能在老工业基地城市和非老工业基地城市中存在差异。为此，本文在收集整理老工业基地城市名单的基础上展开分样本回归。^②表5列（3）和列（4）的回归结果表明，与老工业基地城市相比，机器人应用对非老工业基地城市碳排放的抑制作用更明显。这是因为，老工业基地具有较为明显的路径依赖问题，其能耗强度在短期内下降空间有限^[35]。而非老工业基地对环境质量诉求更高，在推广机器人应用过程中能够减少碳排放。

3. 行政等级异质性

在中国城市管理体系中，行政等级划分通常与资源获取挂钩。与低行政等级的城市相比，高行政等级的城市在吸引人口流入和招商引资竞争等方面更具优势，且这些城市通常具有较好的经济发展条件。那么，机器人应用的影响是否会因行政等级差异而表现出一定的异质性？为此，本文将省会城市、副省级城市和直辖市划分为高行政等级城市，其他城市划分为低行政等级城市，由此展开分样本回归。表5列（5）和列（6）的回归结果表明，与高行政等级城市相比，机器人应用对低行政等级城市碳排放的抑制作用更明显。凭借机器人应用红利，低行政等级城市或在一定程度上能够缩小其与高行政等级城市间的资源禀赋差异，由此带动城市实现低碳发展。

表5 异质性分析的回归结果

变 量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	东部	中西部	老工业基地	非老工业基地	高行政等级	低行政等级
robot	-0.003 (0.013)	-0.132*** (0.041)	0.024 (0.020)	-0.099*** (0.024)	-0.021 (0.023)	-0.070*** (0.020)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制	控制
城市FE	控制	控制	控制	控制	控制	控制
年份FE	控制	控制	控制	控制	控制	控制
常数项	0.832*** (0.283)	0.969** (0.458)	0.978*** (0.251)	1.033*** (0.399)	-1.061*** (0.301)	1.145*** (0.266)
观测值	1 365	1 472	939	1 898	457	2 380
R ²	0.861	0.872	0.936	0.848	0.864	0.871

① 东部地区包括北京、天津、河北、上海、江苏、浙江、福建、山东、广东、海南、辽宁、吉林和黑龙江。中西部地区包括山西、安徽、江西、河南、湖北、湖南、内蒙古、广西、重庆、四川、贵州、云南、陕西、甘肃、青海、宁夏和新疆。本文研究样本中未包括西藏和港澳台地区。

② 相应名单源自《全国老工业基地调整改造规划（2013—2022年）》。

五、研究结论与政策建议

伴随着人工智能等新一代数字技术不断发展,中国政府表明要加快推进机器人应用,以助推经济社会高质量发展。在此背景下,机器人应用能否减少城市碳排放值得关注。为回答这一问题,本文基于IFR数据,采用固定效应模型检验机器人应用对城市碳排放的影响及其作用机制。研究结果显示:机器人应用能够减少城市碳排放;机器人应用通过绿色创新能力、财政科技支出和市场竞争程度影响城市碳排放;机器人应用对中西部地区、非老工业基地和低行政等级城市碳排放的抑制作用更明显。本文关于机器人应用将引致碳减排效应的研究结论不仅关系到数字经济发展背景下产业发展的转型方向,也对中国实现碳达峰、碳中和目标具有重要的决策参考价值和现实指导意义。根据上述研究结论,笔者提出如下政策建议:

首先,中国政府应在促进数字经济发展过程中更好地发挥政府作用,积极拓展机器人应用深度和广度,激励企业实现智能化转型。一方面,应加快构建机器人产业协同创新体系,以企业智能化改造需求牵引拉动机器人重大核心技术供给创新,从而在助力中国机器人产业高质量发展的同时,为推进“上云用数赋智”行动培育良好生态环境;另一方面,依托数字经济发展红利来推进机器人与相关产业深度融合,以机器人为抓手扭转城市高耗能、高污染、高排放产业的发展模式。这也将实现政府与企业对碳排放的有效协同监管,进而在减少企业碳排放的同时,助力城市实现低碳发展。

其次,借助“机器人+”应用行动,地方政府应重点关注辖区在实现绿色低碳发展过程中存在的问题,通过机器人应用来集聚创新资源和强化绿色创新能力,从而实现要素驱动发展模式向创新驱动发展模式的转变。伴随着数字经济的不断发展,中国政府还应利用新兴数字技术实现生产方式的低碳化转型。就如何实现碳达峰、碳中和目标而言,中国政府需要调整财政支出结构,通过加大科学技术支出来引导资金流向节能减排等相关基础研究领域,并由此带动辖区企业形成创新偏好,以便为绿色低碳转型提供良好的基础。此外,中国政府还需要进一步盘活城市经济发展活力,通过强化优胜劣汰的市场机制来加速城市生产资源的优化配置和有效再利用,最终实现生产资源自发流向绿色高效率产业。

最后,机器人应用对城市碳排放的影响在不同地区、工业发展情况和行政等级等方面存在异质性,那么在深入推进机器人应用的过程中,应遵循有所侧重的实施策略。优先推进中西部地区、非老工业基地和低行政等级等城市的机器人应用工作,在推进这些城市碳减排工作的同时,进一步解决因资源禀赋差异及等级化行政管理界限引发的城市间发展不均衡问题。总体来看,中国碳达峰、碳中和目标能否如期实现既要充分发挥宏观政策顶层设计的重要作用,也要通过“机器人+”应用行动等计划来促使新旧动能转换,由此为城市实现低碳发展提供支撑。

参考文献:

- [1] 孔高文,刘莎莎,孔东民.机器人与就业——基于行业与地区异质性的探索性分析[J].中国工业经济,2020(8):80-98.
- [2] 董雪兵,潘登,池若楠.工业机器人如何重塑中国就业结构[J].经济学动态,2022(12):51-66.
- [3] 李磊,王小霞,包群.机器人的就业效应:机制与中国经验[J].管理世界,2021,37(9):104-119.
- [4] 魏下海,张沛康,杜宇洪.机器人如何重塑城市劳动力市场:移民工作任务的视角[J].经济学动态,2020(10):92-109.
- [5] 陈彦斌,林晨,陈小亮.人工智能、老龄化与经济增长[J].经济研究,2019,54(7):47-63.
- [6] 郭凯明.人工智能发展、产业结构转型升级与劳动收入份额变动[J].管理世界,2019,35(7):60-77+202-203.
- [7] 师博.人工智能助推经济高质量发展的机理诠释[J].改革,2020(1):30-38.

- [8] LI Y Y, ZHANG Y R, PAN A, et al. Carbon emission reduction effects of industrial robot applications: heterogeneity characteristics and influencing mechanisms[J]. *Technology in society*, 2022, 70(3): 102034.
- [9] 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碳减排——理论分析及中国的经验证据[J]. *中国工业经济*, 2022(10): 24-42.
- [10] 王海, 尹俊雅, 李卓. 开征环保税会影响企业TFP吗——基于排污费征收力度的实证检验[J]. *财贸研究*, 2019, 30(6): 87-98.
- [11] 韩超, 王震, 田蕾. 环境规制驱动减排的机制: 污染处理行为与资源再配置效应[J]. *世界经济*, 2021, 44(8): 82-105.
- [12] WANG J L, WANG W L, LIU Y, et al. Can industrial robots reduce carbon emissions? Based on the perspective of energy rebound effect and labor factor flow in China[J]. *Technology in society*, 2023, 72(1): 102208.
- [13] 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, 330(6): 117216.
- [14] 綦建红, 张志彤. 机器人应用与出口产品范围调整: 效率与质量能否兼得[J]. *世界经济*, 2022, 45(9): 3-31.
- [15] 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.
- [16] HUANG J W, LI Y H. Green innovation and performance: the view of organizational capability and social reciprocity [J]. *Journal of business ethics*, 2017, 145(2): 309-324.
- [17] 唐晓华, 迟子茗. 工业智能化提升工业绿色发展效率的实证研究[J]. *经济学家*, 2022(2): 43-52.
- [18] 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.
- [19] GAN J W, LIU L H, QIAO G, et al. The role of robot adoption in green innovation: evidence from China [J]. *Economic modelling*, 2023, 119(2): 1-11.
- [20] 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): 61-79.
- [21] 刘倬奇, 张同斌. 财政收支结构变动、产业结构转型与环境质量改善[J]. *财政研究*, 2020(10): 57-73.
- [22] 余长林, 杨惠珍. 分权体制下中国地方政府支出对环境污染的影响——基于中国287个城市数据的实证分析[J]. *财政研究*, 2016(7): 46-58.
- [23] 雷明, 虞晓雯. 地方财政支出、环境规制与我国低碳经济转型[J]. *经济科学*, 2013(5): 47-61.
- [24] 邵帅, 尹俊雅, 范美婷, 等. 僵尸企业与低碳转型发展: 基于碳排放绩效的视角[J]. *数量经济技术经济研究*, 2022, 39(10): 89-108.
- [25] 简泽. 企业间的生产率差异、资源再配置与制造业部门的生产率[J]. *管理世界*, 2011(5): 11-23.
- [26] 戚聿东, 肖旭. 数字经济时代的企业管理变革[J]. *管理世界*, 2020, 36(6): 135-152+250.
- [27] 邵帅, 张可, 豆建民. 经济集聚的节能减排效应: 理论与中国经验[J]. *管理世界*, 2019, 35(1): 36-60+226.
- [28] 许健, 季康先, 刘晓亭, 等. 工业机器人应用、性别工资差距与共同富裕[J]. *数量经济技术经济研究*, 2022, 39(9): 134-156.
- [29] 王海, 吴梦萱, 尹俊雅. 地区金融机构与僵尸企业——基于城商行设立的准自然实验[J]. *统计研究*, 2021, 38(3): 58-70.
- [30] 王永钦, 董雯. 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[J]. *经济研究*, 2020, 55(10): 159-175.
- [31] 王文, 牛泽东, 孙早. 工业机器人冲击下的服务业: 结构升级还是低端锁定[J]. *统计研究*, 2020, 37(7): 54-65.
- [32] 王海, 尹俊雅. 地方产业政策与行业创新发展——来自新能源汽车产业政策文本的经验证据[J]. *财经研究*, 2021, 47(5): 64-78.
- [33] 胡山, 余泳泽. 数字经济与企业创新: 突破性创新还是渐进性创新?[J]. *财经问题研究*, 2022(1): 42-51.
- [34] 尹俊雅, 王海. 高新区政策的技术追赶效应——基于内外资企业TFP差距的分析[J]. *经济学动态*, 2020(11): 115-130.
- [35] 史丹, 李少林. 排污权交易制度与能源利用效率——对地级及以上城市的测度与实证[J]. *中国工业经济*, 2020(9): 5-23.

Research on the Mechanism and Effect of Robot Application
on Urban Carbon Emissions

WANG Hai, GUO Guan-yu, YAN Zhuo-yu

(School of Economics, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China)

Summary: The implementation of robot application action is a requirement for boosting China’s strength in manufacturing and digital development in the new era, and also a key measure to lead the high-quality economic development. It remains to be determined whether accelerating the application of robots, as an important carrier for the integration of informatization and industrialization, in the industrial production system can help cities achieve carbon emission reduction. However, the studies make more use of national or provincial data, which does not reveal the heterogeneous impact at the regional level. Thus, it is important to conduct research using carbon emission measurement data of prefecture-level cities.

On the basis of the robot data of the International Federation of Robotics, we combine the panel data of cities and adopt the fixed effect model to test the impact of robot application on urban carbon emissions and its mechanism. The results show that robot application will reduce urban carbon emissions. After considering the influences of endogeneity, spatial spillover effect, interference of other policy events and other factors, the results remain robust. The mechanism analysis shows that robot application can reduce urban carbon emissions by green innovation, science and technology expenditure and market competition environment. The heterogeneity analysis finds that the application of robots in the central and western regions, non-old industrial bases and cities with a low administrative level exerts a more obvious impact on carbon emissions.

The paper contributes to the existing literature from the following aspects. First, the early literature focuses on the role of environmental policies in driving low-carbon economic development. With the development of such emerging digital technologies as artificial intelligence, whether robot application can reduce carbon emissions has attracted attention. However, the specific influence and mechanism have not been fully interpreted. This paper uses data of prefecture-level cities to test the impact of robot application on urban carbon emissions, thus enriching the literature on robot application. Second, it verifies the positive impact of robot application on urban carbon emission reduction, and thus defines the key role of accelerating the application of robots and even promoting the development of digital economy in achieving carbon peak and carbon neutrality. More importantly, it provides evidence for China to promote the integration of the digital economy and the real economy, and to achieve coordinated digital and green development.

This study reveals the internal mechanism of the impact of robot application on urban carbon emissions, which can not only offer a new perspective for understanding the positive role of robots in urban low-carbon development, but also provide reference for China to formulate plans to enhance the depth and breadth of robot application, and cultivate the development ecology of the robot industry.

Key words: robot application; urban carbon emissions; carbon emission reduction effect; green innovation capability; degree of market competition

(责任编辑：孙 艳)

[DOI]10.19654/j.cnki.cjwtyj.2023.05.005
[引用格式]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.