

## 产业智能化与城市低碳经济转型\*

罗良文 张郑秋 周倩

(中南财经政法大学经济学院,湖北 武汉 430073)



**内容提要:**在人工智能时代以及实现“双碳”目标的背景下,产业智能化是减少温室气体排放,推动经济实现低碳转型的有效途径。本文借助网络爬虫、手工搜集数据等方法,围绕智能化条件、智能化创新和智能化应用三个维度构建出中国283个地级市的产业智能化指数,探讨了产业智能化对低碳经济转型的影响;将产业结构升级划分为产业结构高级化和产业结构合理化,探析产业结构升级和技术创新在产业智能化与低碳经济转型之间的作用机理和门槛效应。研究发现:我国经济发展面临着较大的低碳转型压力,产业智能化能够显著促进低碳经济转型,在控制了内生性问题后结果依然稳健。产业智能化能够通过提升产业结构高级化、产业结构合理化和技术创新水平推动低碳经济转型。进一步研究表明,产业智能化对低碳经济转型存在显著的非线性门槛特征。在产业结构高级化和产业结构合理化位于中等水平时,产业智能化对低碳经济转型的推动作用最强;当技术创新跨过门槛值后,产业智能化对低碳经济转型的促进作用才得以显现。异质性检验结果显示,产业智能化主要作用于低碳试点城市、高碳排放强度城市、东部城市和一线城市的低碳经济转型。本文研究结论为促进我国产业智能化升级,推动低碳经济转型发展提供了有益借鉴。

**关键词:**产业智能化 低碳经济转型 产业结构升级 技术创新

**中图分类号:**F205;F062.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1002—5766(2023)05—0043—18

## 一、引言

全球气候变化对人类经济社会可持续发展带来了严峻挑战。为更好地应对由二氧化碳浓度增加导致的气候变暖,各经济体亟需从以依赖化石燃料为主的高碳排放经济发展模式向低碳排放经济发展模式转型。作为世界最大碳排放国,中国经济发展面临着巨大的低碳转型压力。世界资源研究所数据显示,中国二氧化碳排放量从2005年开始持续位居世界首位。2020年中国碳排放量为98.99亿吨,相比2010年的0.25亿吨增长了约395倍<sup>①</sup>。为此,中国在第七十五届联合国大会上作出了实现碳达峰和碳中和的“双碳”目标承诺。虽然2020年中国单位GDP二氧化碳排放量相

收稿日期:2022-11-25

\* 基金项目:国家社会科学基金一般项目“用能权交易制度驱动工业企业能源技术创新的机理、效应评价与政策优化研究”(21BJY111);中南财经政法大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目“能源技术创新视角下‘碳中和’目标实现的路径研究”(202110341)。

作者简介:罗良文,男,教授,经济学博士,研究领域是低碳经济,电子邮箱:llw@zuel.edu.cn;张郑秋,女,博士研究生,研究领域是产业经济和环经,电子邮箱:zhengqiu925@163.com;周倩,女,副教授,经济学博士,研究领域是城市与区域经济,电子邮箱:zhouqian200912@163.com。通讯作者:张郑秋。

①数据来源:英国石油公司(BP)《世界能源统计年鉴(第70版)》。

较2005年下降了48.4%<sup>①</sup>,超额完成向国际社会承诺的40%~45%目标,但距离实现“双碳”目标仍然任重道远。

低碳经济转型是以产业低碳化为导向的动态过程(余澜等,2022)<sup>[1]</sup>,人工智能技术与产业的深度融合为经济发展方式成功转型提供了新动能,支撑着经济高质量发展。近年来,我国产业智能化发展迅速。2021年世界人工智能大会公布中国人工智能领域专利申请量位居全球第一,智能产业规模仅次于美国。此外,美国经济研究公司Rhodium Group在2022年1月公布的数据显示,中国城市碳排放量接近全国的80%,城市已然成为碳排放的主要阵地。那么,产业智能化能否有效赋能城市低碳经济转型?若能,产业智能化对城市低碳经济转型的作用机制有哪些?厘清这些问题不仅有助于丰富产业智能化的相关研究,也可以为推动我国低碳经济转型提供针对性的政策参考。

## 二、文献综述

对于产业智能化的相关研究,学者们重点关注产业智能化的经济效应以及产业智能化与劳动力结构、劳动报酬之间的关系(Autor和Salomons,2018<sup>[2]</sup>;杨飞,2022<sup>[3]</sup>)。在产业智能化的经济效应上,主要持有两种不同观点:第一种观点认为产业智能化促进了经济增长(Brynjolfsson和McAfee,2014)<sup>[4]</sup>。陈彦斌等(2019)<sup>[5]</sup>研究发现,产业智能化能够通过提高生产活动自动化程度、资本回报率和全要素生产率三种方式,较好地应对人口老龄化对经济增长的不利影响。第二种观点认为产业智能化存在“索洛悖论”,人工智能可能会带来工业过度自动化,进而降低生产率(Acemoglu,2021)<sup>[6]</sup>。然而,少有学者关注产业智能化的环境效应。一方面,产业智能化兼具高产业附加值、高研发投入以及高知识密集度的特点,通过技术手段提高能源利用效率影响着二氧化碳的排放,使区域经济发展由依赖能源投入向以知识为主要生产要素投入的方式转变(韩民春和赵泽彬,2022)<sup>[7]</sup>;另一方面,产业智能化发展改变了区域间传统的产业单向梯度转移模式(孙早和侯玉琳,2021)<sup>[8]</sup>,以工业企业转出为代表的产业转移回流有利于提升碳排放效率(丁凡琳等,2022)<sup>[9]</sup>。

既有低碳经济转型的文献主要围绕其影响因素进行广泛探讨。学者们普遍认为碳减排政策(丁冠群等,2022)<sup>[10]</sup>、数字经济(渠慎宁等,2022)<sup>[11]</sup>、环境制度约束(Sinn,2008)<sup>[12]</sup>等影响着低碳经济转型。低碳经济转型发展从本质上来说是生产资源在“绿色化”方向实现重新配置的过程,虽然鲜有文献研究产业智能化对低碳经济转型的影响,但不乏有学者探讨人工智能与绿色低碳发展之间的关系。如师傅(2020)<sup>[13]</sup>认为人工智能能够在生产环节创新生产模式、促进技术外溢,在分配环节提升分配效率、改善分配结构,在消费环节引导公众由高耗能消费模式向绿色消费模式升级,促进了节能减排;Korinek和Stiglitz(2021)<sup>[14]</sup>研究表明,人工智能具有节约劳动力和节约资源的特点,满足了绿色经济发展的需要。

综上,现有文献广泛探讨了产业智能化的经济效应以及低碳经济转型的影响因素,对产业智能化环境效应的研究相对匮乏,尤其缺少产业智能化与低碳经济转型的相关研究以及具体作用机制。本文可能的边际贡献在于:(1)在研究视角上,系统地考察了产业智能化与低碳经济转型之间的关系,以及产业智能化对低碳经济转型的作用机制。在“双碳”目标背景下,整理归纳出产业结构升级和技术创新两条可能的影响路径,验证了产业智能化能够通过提高产业结构升级和技术创新水平推动城市低碳经济转型。进一步地,探究了产业智能化与低碳经济转型存在的非线性特征,为科学理解产业智能化与低碳经济转型的内在逻辑提供了基础。(2)在研究数据方面,构建城市层面产业智能化指标衡量体系。现有文献大多基于省级数据或世界投入产出表数据对产业智能化进行测算,本文将研究深入到城市层面。在工业智能化指标体系基础上,加入新型数字基础设施、智能

① 数据来源:中国生态环境部。

企业专利数等指标,较好地衡量了产业智能化水平。具体而言,借助网络爬虫、手工搜集数据等方法,围绕智能化条件、智能化创新和智能化应用三个维度构建产业智能化指数。基于此,本文的研究为城市低碳经济转型发展提供了实现路径。

### 三、理论分析与研究假设

#### 1. 产业智能化对城市低碳经济转型的直接影响

产业智能化水平反映了第三产业与智能化相融合的程度,凭借智能技术提高资源配置效率和全要素生产率(Graetz和Michaels,2018)<sup>[15]</sup>,进而推动低碳经济转型。产业智能化对低碳经济转型的直接影响主要表现在以下两个方面:第一,在企业供给端减排方面。产业智能化以智能设备和智能系统为依托,通过投入智能要素提高单位二氧化碳的经济产出。智能技术的应用有助于企业形成网络化协同生产模式,降低高能耗生产过程产生的碳排放,带动上下游企业在运输、仓储等环节的智能化改造,提高产业供应链的能源使用效率,减少整个产业链的温室气体排放(中国社会科学院工业经济研究所课题组,2011)<sup>[16]</sup>。第二,在碳排放治理方面。对于企业而言,产业智能化的发展有助于企业利用智能技术提高污染治理效率,打破重度依赖资源发展经济对技术创新产生的资源诅咒;对于政府而言,产业智能化可加强政府环保部门对企业二氧化碳等污染物排放的监控力度,通过实施合理的环境规制策略达到降碳目的。因此,本文提出如下研究假设:

H<sub>1</sub>:产业智能化对城市低碳经济转型总体上具有促进效应。

#### 2. 产业智能化对城市低碳经济转型的作用机制

在实现城市低碳经济转型战略目标的过程中,产业结构升级和技术创新是学术界已经形成共识的关键作用路径(葛立宇等,2022)<sup>[17]</sup>。首先,对于产业结构升级路径。李海奇和张晶(2022)<sup>[18]</sup>认为在中国经济增速明显放缓的情况下,推动经济高质量发展的关键在于产业结构升级。由于低碳经济转型是实现经济高质量发展的内在要求(林伯强,2022)<sup>[19]</sup>,因此产业结构升级已然成为中国实现低碳经济转型的必然选择。其次,对于技术创新路径。国家能源局发布的《2022年能源工作指导意见》指出,促进低碳经济转型的关键在于加快产业智能化升级,提升低碳技术创新能力。可见,技术创新既是实现碳减排的关键因素,也是经济可持续发展的核心驱动力(邵帅等,2022)<sup>[20]</sup>。

(1)产业智能化通过产业结构升级对低碳经济转型的影响。随着人工智能、物联网、区块链等技术与农业、工业和服务业的深度融合,生产过程的全自动化提高了劳动生产率,驱动着产业结构升级(Acemoglu和Restrepo,2019)<sup>[21]</sup>。产业结构升级既是三次产业向高级化调整的过程,也是产业结构趋向合理化的过程。只有当产业智能化同时推动产业结构高级化和合理化,并通过二者赋能低碳经济转型,才意味着产业智能化能够通过产业结构升级渠道推动城市低碳经济转型。

首先,关于产业智能化对产业结构升级的影响。一方面,产业智能化主要利用其智能化、自动化的特点取代程序性的劳动,依靠高端人才提高企业生产效率。在产业智能化的赋能下,第一产业逐渐向第二和第三产业顺向递进,产业结构由低级向高级转化。另一方面,产业智能化发展能够建立起由人工智能决策为主导的智能化要素配置系统,有效缓解市场信息的不完全和不对称性,通过优化资源配置促进产业结构合理化发展(张万里和宣畅,2020)<sup>[22]</sup>。其次,关于产业结构升级对低碳经济转型的影响。一是产业结构在向高级化转变的过程中增加了对高技术人才的需求,这有利于产业向高技术以及高附加值产业转变,降低依赖能源为主要投入的经济增长模式,推动城市低碳经济转型(叶娟惠和叶阿忠,2022)<sup>[23]</sup>。二是产业结构合理化增强了产业间的关联度和协调能力,提高了生产要素配置效率,避免企业的过度生产以及能源资源的过度损耗,有助于降低二氧化碳等污染物排放。因此,本文提出如下研究假设:

H<sub>2</sub>:产业智能化能够通过产业结构升级推动城市低碳经济转型。

(2)产业智能化通过技术创新对低碳经济转型的影响。技术创新既能有效减少碳排放,也能提升全要素生产率(鄢哲明等,2022)<sup>[24]</sup>,是城市低碳经济转型的重要驱动力。一方面,产业智能化的发展为技术创新提供了融资和获取专业信息的渠道(张昕蔚和刘刚,2022)<sup>[25]</sup>。一是囿于创新产出具有较强的不确定性,企业获取创新资金支持的融资渠道有限。产业智能化能够帮助企业充分展示自身的财务状况和科技创新实力,降低融资过程中的信息不对称性,获得金融机构绿色信贷以及政府部门创新资金支持。二是企业可以通过“互联网+”等技术以及各种网络平台获取最新研发信息,借此提高研发人员创新技能和企业技术创新实力。另一方面,技术创新是推动低碳经济转型的关键引擎。近年来,随着企业对碳减排技术需求的不断扩大,技术创新对碳减排的重要性逐渐显现。现有研究表明,技术创新有效地发挥了碳减排效应(Gerlag,2007)<sup>[26]</sup>。尤其是当企业在生产环节获得突破性技术创新时,便能实现高碳排放产出的绿色化生产,从而达到大幅降低碳排放总量的效果。因此,本文提出如下研究假设:

H<sub>3</sub>:产业智能化能够通过技术创新间接促进城市低碳经济转型。

### 3. 产业智能化对低碳经济转型的非线性影响

智能化发展是伴随着互联网和大数据的兴起,由机器设备、软件等在不断积累中产生突变而形成的一种基于信息化的生产力高级形态。当产业结构高级化和合理化水平较低时,智能化设备与信息、数据等的结合能力较差,智能化技术对高技能劳动的需求难以得到满足,以致信息—智能密集型资本无法对脑力劳动产生替代效应(贾根良,2016)<sup>[27]</sup>。此时,产业智能化对低碳经济转型的影响效果较弱,甚至导致低碳经济转型受到抑制。随着产业结构高级化和合理化水平的提高,产业与大数据、区块链等信息技术进行了深度融合,产业链的信息联动越发紧密,催生出新的产业发展模式(徐宇明,2022)<sup>[28]</sup>。较高的产业智能化发展水平也带动了产业技术前沿面不断向前推移,使得企业能够根据能源供给和成本状况自动调整生产方式,最大限度降低能源损耗。在这一阶段,产业智能化成为推动低碳经济转型的重要驱动力。基于此,本文认为在产业结构升级的不同阶段,产业智能化对低碳经济转型具有差异化的影响效果。此外,内生增长理论认为,技术创新来源于“干中学”,而“干中学”所带来的创新能力的高低取决于高技能劳动力在创新中的作用。当高技能劳动力的智能化技术创新成果得到顺利转化后,产业智能化对低碳经济转型的创新驱动作用才得以显现(汪前元等,2022)<sup>[29]</sup>。本文认为,只有当技术创新水平达到一定程度后,产业智能化才能显著推动低碳经济转型。因此,本文提出如下研究假设:

H<sub>4</sub>:随着产业结构升级和技术创新水平的提升,产业智能化对低碳经济转型的影响存在明显的非线性特征。

## 四、研究设计与数据说明

### 1. 模型设定

(1)基准模型。考虑到低碳经济转型是一个连续动态变化的过程,即当期低碳经济转型水平可能会受到上期低碳经济转型水平的影响。本文将滞后一期的低碳经济转型纳入计量模型,构建如下动态面板模型:

$$ctfp_{i,t} = \alpha_0 + \alpha_1 inte_{i,t} + \alpha_2 ctfp_{i,t-1} + \alpha_3 X_{i,t} + u_i + \lambda_t + \varepsilon_{i,t} \quad (1)$$

其中, $ctfp_{i,t}$ 为*i*城市*t*期低碳经济转型水平; $inte_{i,t}$ 为*i*城市*t*期产业智能化水平; $ctfp_{i,t-1}$ 为滞后一期的低碳经济转型水平; $X_{i,t}$ 为控制变量的集合; $u_i$ 为城市固定效应; $\lambda_t$ 为时间固定效应; $\varepsilon_{i,t}$ 为随机扰动项。

(2)中介效应模型。在式(1)基础上,本文采用中介效应模型检验产业智能化对低碳经济转型的影响机制,模型设计如下:



$$M_{i,t} = \gamma_0 + \gamma_1 \text{inte}_{i,t} + \gamma_2 M_{i,t-1} + \gamma_3 X_{i,t} + u_i + \lambda_t + \varepsilon_{i,t} \quad (2)$$

$$\text{ctfp}_{i,t} = \beta_0 + \beta_1 \text{inte}_{i,t} + \beta_2 M_{i,t} + \beta_3 \text{ctfp}_{i,t-1} + \beta_4 X_{i,t} + u_i + \lambda_t + \varepsilon_{i,t} \quad (3)$$

其中,  $M_{i,t}$  为产业智能化影响低碳经济转型的可能路径, 包括产业结构升级中的产业结构高级化和产业结构合理化以及技术创新; 考虑到本文中中介变量同样具有动态连续变化的过程, 在式(2)和式(3)中分别加入了被解释变量的滞后项。

## 2. 数据来源

本文选取 2003—2019 年中国 283 个城市作为研究样本, 数据主要来源于《中国城市统计年鉴》《中国统计年鉴》和国家统计局。市场化指数来源于《中国分省份市场化指数报告》; 智能化企业名称和注册地信息借助 Python 软件爬取智能制造网获得。此外, 利用价格指数将时间价格变量调整至以 2003 年为基期的可比价格。

## 3. 数据说明

(1) 被解释变量: 低碳经济转型 (ctfp)。对低碳经济转型的理解有狭义和广义之分, 狭义上的低碳经济转型是指降低二氧化碳排放量和能源消耗量, 使经济转型为“低能耗、低排放”的经济发展模式; 广义上的低碳经济转型不仅指经济发展由依赖高碳排放向低碳排放方式转型, 也包括由依赖高污染排放的经济发展模式向低污染排放的经济发展模式转变。这里的污染排放除二氧化碳外, 还包含氮氧化物、SO<sub>2</sub> 等多种空气污染物以及工业废水等液态污染物 (陈诗一, 2012)<sup>[30]</sup>。本文将广义概念上的低碳经济转型作为被解释变量, 采用考虑非期望产出的 SBM 模型测算出的低碳全要素生产率代表城市低碳经济转型。低碳全要素生产率越高, 城市低碳经济转型效果越好。

投入要素包括劳动力、资本和能源消耗量。1) 劳动力投入, 选取城市从业人员数量表示。2) 资本投入, 以永续盘存法测算出的资本存量作为衡量指标。资本存量的测算公式为  $K_{i,t} = I_{i,t}/P_{i,t} + (1 - \delta)K_{i,t-1}$ , 基期资本存量为  $K_{i,2003} = I_{i,2003}/(g_i + \delta)$ 。其中,  $K_{i,t}$ 、 $I_{i,t}$  和  $P_{i,t}$  分别为  $i$  城市  $t$  期的资本存量、全社会固定资产投资和固定资产投资价格指数;  $\delta$  为折旧率, 取值为 9.6% (田成诗和陈雨, 2022)<sup>[31]</sup>;  $g_i$  为样本期间  $i$  城市全社会固定资产投资年均增长率。3) 能源消耗量, 由城市天然气使用量、用电量和液化石油气消耗量统一换算成万吨标准煤加总得到<sup>①</sup>。

产出指标包括地区生产总值、CO<sub>2</sub> 排放量和工业三废。1) 地区生产总值是期望产出, 使用城市所在省份的生产总值指数调整为不变价格。2) CO<sub>2</sub> 排放量为非期望产出。借鉴韩峰和谢锐 (2017)<sup>[32]</sup> 的研究, 将天然气、煤电发电量和液化石油气作为城市 CO<sub>2</sub> 排放的主要来源, 利用碳排放系数<sup>②</sup>测算得到城市 CO<sub>2</sub> 排放量。其中, 煤电发电量测算公式为  $E_{cp} = \lambda \times E_e$ ,  $\lambda$  为全国煤电发电量与总发电量的比值<sup>③</sup>。3) 工业三废为非期望产出, 包括工业废水、SO<sub>2</sub> 和烟 (粉) 尘, 使用熵值法获得综合指标。

图 1 为 2003—2019 年低碳经济转型按照 (非) 低碳试点城市<sup>④</sup>和碳排放强度<sup>⑤</sup>进行划分的时间变化趋势图。整体而言, 全国低碳经济转型形势依然严峻, 呈逐年下降的时间演变趋势。从是否为低碳试点城市的划分来看, 低碳试点城市的低碳经济转型发展较为稳定, 低碳经济转型水平保持

① 《中国能源统计年鉴》中, 天然气的能源换算系数为 1.215 千克标准煤/立方米、用电量的能源换算系数为 0.1229 千克标准煤/千瓦时、液化石油气的能源换算系数为 1.7143 千克标准煤/千克。

② 按照《2006 年国家温室气体排放清单》, 天然气碳排放系数为 2.1622 千克/立方米、液化石油气碳排放系数为 3.1013 千克/千克。在韩峰和谢锐 (2017)<sup>[32]</sup> 的研究中, 煤电燃料链碳排放系数取 1.3023 千克/千瓦时。

③ 根据国家统计局公布数据, 测算得到 2003—2019 年煤电发电量占总发电量的平均比重为 77.74%。

④ 国家发改委分别于 2010 年、2012 年和 2017 年批复了第三批低碳试点省市。经剔除试点城市中的非样本城市, 本文最终选取 81 个城市作为低碳试点城市。

⑤ 碳排放强度以碳排放量与 GDP 的比值表示, 将高于碳排放强度平均值的城市视为高碳排放强度城市, 反之则为低碳排放强度城市。

在 0.4 左右;非低碳试点城市低碳经济转型水平从 2013 年开始下降明显,低碳经济转型受阻。从碳排放强度的划分来看,高碳排放强度城市的低碳经济转型能力明显弱于低碳排放强度城市,拉低了全国低碳经济转型水平。

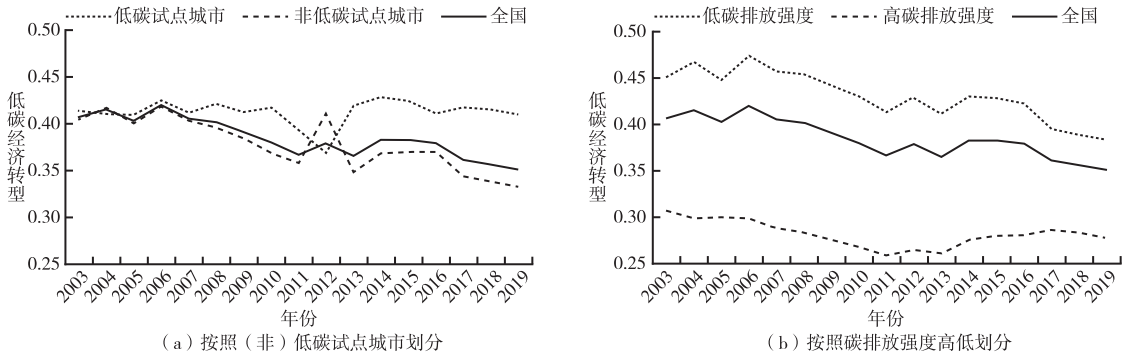


图 1 低碳经济转型时间变动趋势

资料来源:作者整理

(2)核心解释变量:产业智能化(inte)。产业智能化是运用人工智能、大数据、物联网等智能化技术,实现传统产业在生产、仓储和服务等方面的智能化发展。在王林辉等(2022)<sup>[33]</sup>研究的基础上,从智能化条件、智能化创新和智能化应用三个维度构建产业智能化衡量指标体系,通过主成分分析法测度城市产业智能化指数。1)智能化条件,采用新型数字基础设施、移动交换机容量和智能化专业人才三个指标表示。新型数字基础设施具备统一数据资源的功能,为 5G、AI 研发、云计算等技术提供可靠支撑,是产业智能化实现的前提条件。本文选取 CSMAR 数据库中计算机、通信等设备制造业,以及信息传输、软件和信息技术服务业等行业的上市公司营业收入作为新型数字基础设施的衡量指标。进一步地,利用注册地信息将上市公司分类至地级市层面,获得城市新型数字基础设施指标。考虑到移动交换机容量与通信业务量具有高度的相关性,本文移动交换机容量由省级移动交换机容量乘以城市电信收入占比间接测算得到。智能化专业人才以信息传输、计算机服务和软件业从业人员数量表示,为产业进行智能化创新、使用智能技术、接受智能产品或服务提供相应人才支持。2)智能化创新,使用智能化相关企业专利数进行衡量。智能制造网中包含了智能控制、机器人、云计算等智能化相关企业名称、注册地等信息<sup>①</sup>,根据所获得的智能化企业名称,手动搜集天眼查中智能化企业专利申请数量;按照智能化企业注册地信息,将历年智能化企业专利申请数量划分至各城市。3)智能化应用,选取信息采集和工业机器人渗透度两个指标进行衡量。信息采集以人均互联网宽带接入用户规模表示。按照韩民春等(2020)<sup>[34]</sup>的做法,将 IFR 数据库中国家层面的各行业机器人安装量细分到城市层面,并以各行业就业份额作为权重测算城市工业机器人渗透度。工业机器人渗透度的测算公式为: $ETR_{i,t} = \sum_{s=1}^m L'_{i,s} R'_s / L'_i$ ,其中: $L'_{i,s} = L_{i,s} / L'_i$ , $L'_{i,s}$ 为 t 时期 i 城市 s 行业从业人员数量; $L'_i$ 为 t 时期 i 城市从业人员数量; $R'_s$ 为 t 时期 s 行业工业机器人存量; $L'_i$ 为 t 时期 s 行业从业人员数量。

图 2 为 2003—2019 年产业智能化按照四大经济区域<sup>②</sup>和城市等级<sup>③</sup>进行划分的时间变化趋势图。从全国以及不同分类情况来看,产业智能化水平呈逐年上升的趋势。将城市划分为四大经济区域和不同等级之后,可以看出东部城市产业智能化水平明显高于全国平均水平,中西部和东北部

① 智能化相关企业名称由智能制造网中主营行业分类筛选得到,具体选取智能控制、智能制造装备、机器人、3D 打印、物联网和云计算行业。智能制造网网址:https://www.gkzhan.com/company\_p100/。

② 根据国家统计局 2015 年“东西中部和东北地区划分方法”进行分类。

③ 按照 2019 年《中国城市商业魅力排行榜》中的城市排行榜进行分类,本文将一线城市和新一线城市统称为一线城市。

城市拥有相似的产业智能化水平;一线城市产业智能化水平领先于全国,其次是二三线城市。这意味着中国产业智能化发展存在较大的地区差异。

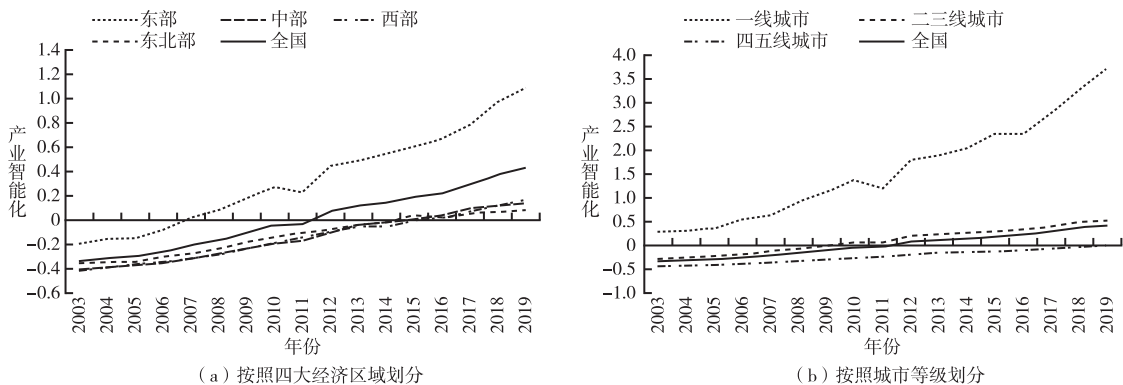


图2 产业智能化时间变动趋势

资料来源:作者整理

(3) 中介变量:产业结构升级和技术创新。1) 产业结构升级:包括产业结构高级化(*sh*)和产业结构合理化(*str*)两个维度。首先,产业结构高级化既包含第一、第二和第三产业间结构升级,也包括制造业向服务业转型升级。借鉴汪伟等(2015)<sup>[35]</sup>的研究,选取产业间结构指数和服务业占制造业从业人员比重作为度量产业结构高级化的分项指标,采用 Topsis 熵权法测算得到综合指数,并将其作为产业结构高级化的代理变量。具体而言,一是构造产业间结构指数,分别对第一、第二和第三产业赋予不同权重,测算公式为: $ais_{i,t} = \sum_{m=1}^3 y_{i,m,t} \times m, m = 1, 2, 3$ ,其中, $y_{i,m,t}$ 为  $t$  时期  $i$  城市第  $m$  产业占 GDP 的比重。二是测算服务业占制造业从业人员的比重。制造业向服务业转型有助于促进服务业就业,而服务业占制造业从业人员比重的上升也意味着产业结构向高级化发展,选取服务业中金融、房地产、交通运输仓储和邮电业从业人员数量比上制造业从业人员数量表示。其次,产业结构合理化采用泰尔指数的倒数进行测度。泰尔指数的倒数越大,说明产业结构合理化程度越高,产业之间协调能力和资源配置能力也越强。泰尔指数的测算公式为: $theil_{i,t} = \sum_{m=1}^3 y_{i,m,t} \ln(y_{i,m,t}/l_{i,m,t}), m = 1, 2, 3$ ,其中, $l_{i,m,t}$ 为  $t$  时期  $i$  城市第  $m$  产业从业人员占总从业人员比重。2) 技术创新(*invest*):借鉴邓荣荣和张翱翔(2021)<sup>[36]</sup>的研究,分别对 CNRDS 数据库中城市外观设计专利、实用新型专利和发明专利授权量赋予 0.2、0.3 和 0.5 的权重,加总后得到专利授权量综合指标。

(4) 控制变量。本文控制了以下可能影响低碳经济转型的变量:1) 经济发展水平(*lnrgdp*)。周兵和刘婷婷(2022)<sup>[37]</sup>研究发现,不同经济发展阶段对碳排放绩效的影响效果存在差异。借鉴该研究,使用人均 GDP 表示经济发展水平。为消除价格因素的影响,采用国内生产总值指数将其换算为可比价格,并取自然对数。2) 劳动力密度(*labor*)。一般而言,劳动力密度越高的地区经济密度也越高,既能因能源集中供应产生碳减排效应,也会由于劳动人员大量涌入城市导致交通和市场拥堵提高碳排放总量(任晓松等,2020)<sup>[38]</sup>。本文选用单位土地面积上的劳动力数量衡量劳动力密度。3) 金融发展水平(*finance*)。金融发展水平的高低决定着城市是否具备改进碳排放效率的必要条件,如完备的基础设施、丰富的人力资本等。借鉴邓荣荣和张翱翔(2021)<sup>[36]</sup>的做法,使用年末金融机构贷款余额占 GDP 的比重表示金融发展水平。4) 产业结构(*indus*)。已有研究认为经济增长过程在本质上属于产业结构变迁过程,产业结构变迁代表着引进新技术并淘汰落后产能,推动清洁生产和要素高级化,进而提高碳排放效率(郭炳南和卜亚,2018)<sup>[39]</sup>。本文选用第三产业占 GDP 比重作为产业结构的代理变量。一般而言,第三产业占比越高,产业带来的环境污染越少,越有利于推动低碳经济转型。5) 市场化水平(*market*)。借鉴吴茵茵等(2021)<sup>[40]</sup>的做法,使用《中国分省

份市场化指数报告》发布的市场化指数表示市场化水平。6)外商直接投资(*fdi*)。外商直接投资既能通过外资企业的技术溢出促进本国技术创新,也可能使本国成为“污染天堂”(Zeng 和 Zhao, 2009)<sup>[41]</sup>,同样影响着低碳经济转型。本文使用实际利用外资额与地区生产总值的比重表示外商直接投资。7)环境规制(*er*)。学者们普遍认为环境规制具有“倒逼减排效应”,即环境规制强度越高,越能迫使高能耗、高污染企业开展技术创新活动,从而减少碳排放(Zhu 等,2014)<sup>[42]</sup>。本文采用固体废弃物综合利用率和污水处理厂集中处理率衡量环境规制强度,使用熵权法测算得到综合指标。

本文的具体变量定义如表 1 所示。

表 1 变量定义

变量类别	变量名称	变量符号	变量定义
被解释变量	低碳经济转型	<i>ctfp</i>	SBM 模型测算出的低碳全要素生产率
核心解释变量	产业智能化	<i>inte</i>	主成分分析法下的产业智能化指数
控制变量	经济发展水平	<i>lnrgdp</i>	人均实际 GDP 的自然对数
	劳动力密度	<i>labor</i>	单位土地面积上的劳动力数量(人/平方千米)
	金融发展水平	<i>finance</i>	年末金融机构贷款余额占 GDP 的比重(%)
	产业结构	<i>indus</i>	第三产业占 GDP 的比重(%)
	市场化水平	<i>market</i>	市场化指数
	外商直接投资	<i>fdi</i>	实际利用外资额与 GDP 的比值(%)
	环境规制	<i>er</i>	固体废弃物综合利用率和污水处理厂集中处理率综合值
中介变量	产业结构高级化	<i>sh</i>	Topsis 熵权法测算得到的综合值
	产业结构合理化	<i>str</i>	泰尔指数的倒数
	技术创新	<i>invest</i>	专利授权量(千件)

#### 4. 描述性统计

变量描述性统计结果如表 2 所示。低碳经济转型(*ctfp*)最小值为 0.066,最大值为 1,平均值为 0.385。这说明城市低碳经济转型水平距离生产前沿面还有 61.50% 的提升空间,不同城市之间低碳经济转型水平存在较大差异。产业智能化(*inte*)最小值为 -0.527,最大值为 14.726,标准差为 0.780,这意味着城市间产业智能化水平存在明显不同,数据波动幅度较小。对于中介变量,产业结构高级化(*sh*)平均值为 0.135,说明我国产业结构高级化尚处于较低水平;产业结构合理化(*str*)平均值为 0.153,意味着产业结构合理化程度不高;技术创新(*invest*)平均值为 0.989,最小值为 0,最大值为 49.725,表明不同城市之间技术创新水平差距较大。鉴于控制变量的描述性统计结果与现有研究大体相似,本文主要分析其数据分布特征。除劳动力密度(*labor*)标准差较大外,其他控制变量标准差较小,说明本文数据分布较为集中,呈现小幅波动的特点。

表 2 描述性统计

变量	样本量	均值	标准差	最小值	最大值
<i>ctfp</i>	4811	0.385	0.208	0.066	1
<i>inte</i>	4811	0	0.780	-0.527	14.726
<i>lnrgdp</i>	4811	9.927	0.833	7.545	12.642
<i>labor</i>	4811	61.012	137.397	0.476	2481.770
<i>finance</i>	4811	0.962	0.800	0.075	16.743
<i>indus</i>	4811	38.874	9.908	8.580	85.340
<i>market</i>	4811	6.706	1.708	2.330	11.710
<i>fdi</i>	4811	1.940	2.113	0	18.189
<i>er</i>	4811	0.364	0.119	0.009	0.603
<i>sh</i>	4811	0.135	0.132	0.009	0.981
<i>str</i>	4811	0.153	0.507	0.006	14.548
<i>invest</i>	4811	0.989	3.004	0	49.725



## 五、实证结果分析

### 1. 基准回归结果

基准回归结果如表 3 所示。列(1)控制了时间固定效应,列(2)控制了时间固定效应和城市固定效应,结果显示,产业智能化对低碳经济转型的回归系数显著为正,即产业智能化有助于促进我国城市低碳经济转型。列(3)在列(2)的基础上加入了控制变量,产业智能化回归系数由 1.692 上升至 4.246,说明在控制了较多影响因素后,产业智能化对低碳经济转型的促进作用得到明显增强。列(4)进一步引入了低碳经济转型的滞后一期项(*lctfp*),回归系数依然显著为正,这意味着产业智能化对低碳经济转型的促进作用存在一定的时滞性。由此,验证了假设  $H_1$ 。在控制变量中,劳动力密度(*labor*)和金融发展水平(*finance*)与低碳经济转型之间存在显著的负相关关系,产业结构(*indus*)对低碳经济转型具有显著的正向影响。

表 3 基准回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	<i>ctfp</i>	<i>ctfp</i>	<i>ctfp</i>	<i>ctfp</i>
<i>inte</i>	2.090 ** (0.874)	1.692 * (0.885)	4.246 ** (1.714)	1.702 *** (0.599)
<i>lnrgdp</i>			16.340 *** (6.099)	3.413 (2.665)
<i>labor</i>			-0.024 (0.023)	-0.015 * (0.008)
<i>finance</i>			-1.725 *** (0.557)	-1.800 *** (0.529)
<i>indus</i>			0.180 *** (0.068)	0.069 * (0.036)
<i>market</i>			-0.490 (0.727)	-0.049 (0.320)
<i>fdi</i>			0.008 (0.185)	0.064 (0.079)
<i>er</i>			-3.161 (3.337)	-0.474 (1.671)
<i>lctfp</i>				0.691 *** (0.027)
时间固定效应	是	是	是	是
城市固定效应	否	是	是	是
观测值	4811	4811	4811	4528
$R^2$	0.057	0.057	0.106	0.535

注: \*  $p < 0.1$ , \*\*  $p < 0.05$ , \*\*\*  $p < 0.01$ ; 括号内的数字为聚类标准误,聚类到城市层面,下同

### 2. 内生性问题

尽管本文在基准回归中通过固定效应模型消除了部分遗漏变量偏误,但仍然可能存在以下内生性问题:一是产业智能化水平更高的城市可能会更重视低碳减排,增加污染治理投资,促进低碳经济转型;低碳经济转型水平更高的城市也可能会更倾向于智能技术的研发创新,即产业智能化与低碳经济转型之间可能存在双向因果关系。二是可能存在某些难以观测变量同时影响产业智能化和低碳经济转型,即遗漏变量问题。为缓解内生性问题对研究结论的影响并保证估计结果的可靠性,本文采用以下方法进行检验:

(1)采用 SYS - GMM 模型估计。该模型使用水平变量滞后项作为差分方程的工具变量,能够有效缓解联立性问题以及由遗漏变量、度量误差等带来的内生性问题。表 4 列(1)中模型设定检验结果显示,AR(1)的  $p$  值为 0.002,AR(2)的  $p$  值为 0.506。说明差分后的残差项存在一阶自相关,但不存在二阶自相关,模型设置存在合理性。Hansen 检验的  $p$  值大于 0.1,表明模型拒绝接受工具变量过度识别的原假设,即 SYS - GMM 模型的估计结果是有效的。产业智能化的估计系数显著为正,本文主要结论成立。

(2)采用工具变量法估计。由于 SYS - GMM 方法采用水平变量滞后项作为工具变量存在弱理性预期假设,本文试图将中国历史数据与美国工业机器人渗透度相结合构造产业智能化的工具变量。具体构造方法如下:首先,借鉴黄群慧等(2019)<sup>[43]</sup>的思路,选取各城市 1984 年邮电历史数据作为工

具变量的构成指标之一。一方面,历史上邮局和固定电话普及率较高的城市很可能未来信息通信技术水平也较高,影响着互联网在产业内部的普及与发展,满足相关性条件;另一方面,邮电主要为民众提供基础通信服务,并不直接影响产业智能化发展,满足外生性条件。其次,美国工业机器人渗透度。选择与中国工业机器人渗透度相似的美国工业机器人渗透度指标,意味着美国工业机器人渗透度与中国产业智能化存在着相关性;而美国工业产业发展受发展中国家的影响较小,将美国工业机器人渗透度作为产业智能化的工具变量也满足外生性要求(王林辉等,2022)<sup>[33]</sup>。参考 Acemoglu 和 Restrepo (2020)<sup>[44]</sup>的研究,采用“Bartik IV”法测算美国工业机器人渗透度,公式如下: $AETR_{i,t} = \sum_{s=1}^m (L_{i,s}^0/L_s^0) \times (AR_s^t/L_s^0)$ ,其中  $L_{i,s}^0$  为基期 2003 年  $i$  城市  $s$  行业从业人员数量; $L_s^0$  为基期 2003 年  $s$  行业从业人员数量; $AR_s^t$  为  $t$  时期  $s$  行业美国工业机器人存量。最后,将 1984 年每百万人邮局数量和每万人固定电话数量分别与上一年美国工业机器人渗透度相乘,最终得到产业智能化的工具变量( $iv\_rp$  和  $iv\_rt$ )<sup>①</sup>。

表 4 列(2)和列(3)为工具变量的估计结果。两阶段最小二乘法(2SLS)下两个工具变量的 K - PLM 统计量均通过了 1% 的显著性检验,说明工具变量不存在识别不足的问题;K - PF 统计量均大于 10,可以排除弱工具变量问题。因此,本文选取的工具变量具有合理性。工具变量的估计结果显示,产业智能化与低碳经济转型存在显著的正相关关系,支持了原结论。

(3) 增加控制变量。为避免遗漏关键变量带来内生性问题,本文首先增加了政府干预度( $gov$ )与工业企业规模( $lnent$ )两个控制变量。政府干预度由政府财政支出占 GDP 的比重进行衡量;工业企业规模以取自然对数后的工业企业数表示。如表 4 列(4)所示,产业智能化的回归系数依然显著为正。其次,考虑到中介变量可能存在潜在的内生性问题(江艇,2022)<sup>[45]</sup>,在回归中控制了中介变量。表 4 列(5)估计结果与基准回归结果大体一致,表明产业智能化与低碳经济转型之间的关系受产业结构高级化、产业结构合理化和技术创新的潜在内生性影响是有限的,这也意味着实证结果具有稳健性。

表 4 控制内生性问题检验结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	SYS - GMM	工具变量( $iv\_rp$ )	工具变量( $iv\_rt$ )	增加控制变量	控制中介变量
	$ctfp$	$ctfp$	$ctfp$	$ctfp$	$ctfp$
$inte$	3.819 * (2.014)	6.828 *** (1.905)	4.476 *** (1.372)	1.701 *** (0.646)	1.016 ** (0.407)
$gov$				6.070 ** (2.900)	
$lnent$				-1.498 *** (0.525)	
$sh$					6.636 *** (1.306)
$str$					-0.524 (0.324)
$invest$					0.199 ** (0.086)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制
时间/城市固定效应	是	是	是	是	是
AR(1)	0.002				
AR(2)	0.506				
Hansen 检验 P 值	0.192				
不可识别检验		13.845 ***	7.819 ***		
(K - P LM 统计量)		[0.000]	[0.005]		
弱识别检验		23.365	132.457		
(K - P F 统计量)		{16.38}	{16.38}		
观测值	4245	3792	3792	4528	4528
R <sup>2</sup>	0.025	0.059	0.078	0.537	0.538

注:列(1)~列(3)括号内的数字为稳健标准误;K - P 表示 Kleibergen - Paap 检验;中括号内为 P 值;大括号内为 10% 显著性水平上 Stock - Yogo 弱工具变量识别 F 检验的临界值;受篇幅限制,控制变量、被解释变量滞后项和常数项结果未列出,下同

① 剔除 1984 年数据缺失的 46 个样本城市。

### 3. 稳健性检验

(1) 替换核心变量。首先, 替换被解释变量。由上文分析可知, 对低碳经济转型可以有广义与狭义两种理解。除了从广义视角出发对低碳经济转型进行分析, 本文进一步围绕狭义上的低碳经济转型开展实证研究。狭义上的低碳经济转型是指经济发展过程中由依赖高 CO<sub>2</sub> 排放向低 CO<sub>2</sub> 排放转型, 因此在测算低碳经济转型时将 CO<sub>2</sub> 排放量作为唯一的非期望产出指标, 投入指标和期望产出指标保持不变。表 5 列(1) 列示了狭义视角下产业智能化对低碳经济转型的回归结果, 产业智能化的系数显著为正。说明在狭义视角下产业智能化对低碳经济转型同样具有促进作用。其次, 替换核心解释变量。在上文产业智能化构成指标的基础上, 将熵权法测算得到的产业智能化指数对核心解释变量进行替换, 表 5 列(2) 产业智能化的系数显著为正, 回归结果依然稳健。

(2) 排除政策干扰和缩短样本年份。首先, 排除政策干扰。为避免低碳城市试点政策 (*did*) 实施对本文估计结果的影响, 采用多期 DID 模型进行估计。对于低碳试点城市, 在政策实施当年及以后年度取 1, 否则取 0; 对于非低碳试点城市, 样本期间均取 0。表 5 列(3) 检验结果表明, 在控制了低碳城市试点政策之后, 产业智能化估计结果与基准回归结果大体相同。其次, 缩短样本年份。考虑到 2008 年金融危机对中国经济的冲击, 本文剔除 2009 年及以前的研究样本, 即将原有的 2003—2019 年研究时间段缩短为 2010—2019 年, 表 5 列(4) 估计结果与本文主要研究结论一致。

表 5 稳健性检验结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	替换被解释变量	替换核心解释变量	排除政策干扰	缩短样本年份
	<i>cctfp</i>	<i>ctfp</i>	<i>ctfp</i>	<i>ctfp</i>
<i>inte</i>	1.745*** (0.568)		1.549*** (0.596)	1.575*** (0.433)
<i>intee</i>		1.440* (0.759)		
<i>did</i>			1.401** (0.652)	
控制变量	控制	控制	控制	控制
时间/城市固定效应	是	是	是	是
观测值	4528	4528	4528	3113
R <sup>2</sup>	0.557	0.532	0.535	0.373

### 4. 机制检验

理论分析表明产业智能化能够通过产业结构升级和技术创新两条渠道间接促进城市低碳经济转型。表 6 为逐步回归法下产业智能化对低碳经济转型的机制检验结果。

(1) 产业结构升级渠道。一是产业结构高级化。表 6 列(1) 的回归结果显示产业智能化能够显著推动产业结构高级化, 表 6 列(2) 表明产业结构高级化对低碳经济转型同样具有显著的正向影响。这说明产业智能化能够通过产业结构高级化这一传导机制推动低碳经济转型。一方面, 产业结构高级化程度随产业智能化水平的提升而提高。这主要源于智能化技术推动了企业流程化、信息化和自动化生产, 由此形成的智能生产力为提高企业生产效率创造了可能, 进而促进产业结构向高级化发展。另一方面, 产业结构越高级, 低碳经济转型水平也越高。产业在向高技术产业、绿色清洁型产业调整的过程中, 降低了能源消耗和二氧化碳排放, 推动着低碳经济转型。二是产业结构合理化。表 6 列(3) 结果表明产业智能化显著提高了产业结构合理化, 表 6 列(4) 显示产业智能化系数显著为正, 但产业结构合理化的系数并不显著, 此时需进一步进行 Sobel 检验。Sobel 检验结果的 *p* 值为 0.004, 产业结构合理化起到了中介效应的作用。说明产业智能化能够通过改变要素投入结构、产业关联程度等影响产业结构合理化水平, 达到提高企业生产效率和碳排放治理能力的低碳经济转型效果。由回归结果还可看出, 中介效应检验的直接效应估计系数 (1.750) 与间接效

应估计系数(-0.021)符号相反,产业智能化对低碳经济转型的真实影响效果被产业结构合理化所遮掩。这意味着通过调整产业结构的合理化发展,产业智能化对低碳经济转型的推动作用能够得到进一步提高。目前,我国产业结构合理化发展水平较低,存在着企业生产高能耗、节能环保等新兴产业发展相对落后等问题,产业结构合理化对产业智能化与低碳经济转型之间的关系具有弱化效应。由上述分析可知,假设 H<sub>2</sub> 得到验证。

(2)技术创新渠道。表 6 列(5)和列(6),显示产业智能化显著促进了技术创新,技术创新系数在 1%的水平上显著为正,说明产业智能化可以通过技术创新渠道间接对低碳经济转型产生推动作用。占华等(2022)<sup>[46]</sup>研究发现,智能化发展为环保产业企业创新提供了资金和技术支持,同时,对相关企业的技术创新行为具有外溢辐射效应,推动着企业技术创新能力的提升。技术创新能够带来技术红利,强化二氧化碳等污染物的末端治理,通过降低脱碳成本推动低碳经济转型。因此,假设 H<sub>3</sub> 得到验证。

表 6 产业智能化对城市低碳经济转型的影响机制检验

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	产业结构高级化		产业结构合理化		技术创新	
	<i>sh</i>	<i>ctfp</i>	<i>str</i>	<i>ctfp</i>	<i>invest</i>	<i>ctfp</i>
<i>inte</i>	0.009 ** (0.004)	1.605 ** (0.651)	0.051 *** (0.013)	1.750 *** (0.551)	0.509 *** (0.095)	1.087 *** (0.408)
<i>sh</i>		6.656 *** (1.357)				
<i>str</i>				-0.408 (0.348)		
<i>invest</i>						0.188 ** (0.086)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制	控制
时间/城市固定效应	是	是	是	是	是	是
观测值	4528	4528	4528	4528	4528	4528
R <sup>2</sup>	0.527	0.538	0.210	0.535	0.952	0.535

### 5. 门槛效应检验与分析

为进一步验证产业结构升级和技术创新渠道在产业智能化与低碳经济转型之间发挥的作用,本文将其作为门槛变量进行门槛效应检验,由此探讨产业智能化与低碳经济转型之间的非线性关系。构建如下门槛效应模型:

$$ctfp_{i,t} = \alpha + \beta_1 inte_{i,t} \times I(M_{i,t} \leq \gamma_1) + \beta_2 inte_{i,t} \times I(\gamma_1 < M_{i,t} \leq \gamma_2) + \dots + \beta_n inte_{i,t} \times I(\gamma_{n-1} < M_{i,t} \leq \gamma_n) + \beta_{n+1} inte_{i,t} \times I(M_{i,t} > \gamma_n) + \delta_i X_{i,t} + u_i + \lambda_t + \varepsilon_{i,t} \quad (4)$$

其中,  $M_{i,t}$  为门槛变量;  $\gamma$  为待估算的门槛值;  $I(\cdot)$  为门槛示性函数,当  $I(\cdot) = 1$  时,括号内表达式为真,当  $I(\cdot) = 0$  时,则表达式为假。

(1)门槛效应检验。表 7 列出了 Bootstrap 法 300 次下得到的产业结构高级化、产业结构合理化以及技术创新的门槛值和门槛效应检验结果。具体而言,产业结构高级化单一门槛和双重门槛的 F 值分别在 10% 和 5% 的水平上显著,三重门槛的 F 值不显著;产业结构合理化单一门槛和双重门槛的 F 值分别在 1% 和 5% 的水平上显著,三重门槛的 F 值不显著;技术创新仅存在单一门槛的 F 值在 5% 水平上显著,双重门槛和三重门槛的 F 值均不显著。基于此,本文采用双重门槛模型对产业结构高级化和产业结构合理化进行回归,采用单一门槛模型对技术创新开展实证分析,结果如表 7 所示。

(2)门槛模型估计结果分析。在门槛变量的门槛值估计和门槛效应检验基础上,本文采用面板门槛模型对产业结构高级化、产业结构合理化和技术创新分别进行实证检验,估计结果如表 8 所示。



表 7 门槛值估计和门槛效应检验

门槛变量	门槛	门槛值	F 值	P 值	BS 次数	临界值		
						1%	5%	10%
产业结构高级化	单一门槛	0.434	33.130	0.066	300	71.396	36.177	27.266
	双重门槛	0.072 0.106	44.580	0.016	300	49.690	26.027	20.880
	三重门槛	0.050	43.350	0.376	300	92.910	68.106	59.903
产业结构合理化	单一门槛	0.045	222.790	0.000	300	53.871	35.716	29.640
	双重门槛	0.049 1.321	53.780	0.013	300	55.289	30.872	26.234
	三重门槛	0.102	71.180	0.450	300	170.251	142.732	122.578
技术创新	单一门槛	2.890	53.060	0.013	300	56.175	39.702	34.066
	双重门槛	0.003 2.890	10.770	0.616	300	50.340	34.603	28.678
	三重门槛	8.548	10.250	0.450	300	32.076	26.108	20.180

1) 门槛变量为产业结构高级化。表 8 列(1)回归结果显示,当产业结构高级化小于等于 0.072 时,产业智能化对低碳经济转型的影响显著为正,系数为 2.759;当产业结构高级化位于中等区间(0.072,0.106]时,产业智能化对低碳经济转型的促进作用显著增强,系数值为 7.280;当产业结构高级化水平超过 0.106 后,产业智能化对低碳经济转型的影响系数下降至 3.654,且在 1% 的水平上显著。表明在中等产业结构高级化水平区,产业智能化对低碳经济转型的推动作用最强;在低产业智能化或高产业智能化水平区,这种推动作用较弱。亦即当产业结构高级化作为门槛变量时,产业智能化对低碳经济转型的影响呈现出明显的非线性特征。

表 8 门槛模型估计结果

变量	(1)		(2)		(3)	
	产业结构高级化		产业结构合理化		技术创新	
	门槛区间	<i>ctfp</i>	门槛区间	<i>ctfp</i>	门槛区间	<i>ctfp</i>
<i>inte</i>	$sh \leq 0.072$	2.759*** (4.540)	$str \leq 0.049$	-5.373*** (-6.090)	$invest \leq 2.890$	-0.873 (-1.060)
	$0.072 < sh \leq 0.106$	7.280*** (12.870)	$0.049 < str \leq 1.321$	6.234*** (13.580)	$invest > 2.890$	4.546*** (11.370)
	$sh > 0.106$	3.654*** (8.610)	$str > 1.321$	2.147*** (4.300)		
控制变量	控制		控制		控制	
时间/城市固定效应	是		是		是	
观测值	4811		4811		4811	
R <sup>2</sup>	0.189		0.215		0.185	

注:括号内为 t 值

2) 门槛变量为产业结构合理化。从表 8 列(2)中可以看出,在不同产业结构合理化阶段,产业智能化对低碳经济转型的影响效果有所差异。在低产业结构合理化水平区,即当产业结构合理化小于等于 0.049 时,产业智能化对低碳经济转型表现出显著的抑制作用;当产业结构合理化位于(0.049,1.321]区间时,产业智能化显著促进了低碳经济转型,系数值为 6.234;当产业结构合理化高于 1.321 后,产业智能化仍表现出正向作用,但影响系数下降至 2.147。说明在将产业结构合理化作为门槛变量的情况下,产业智能化与低碳经济转型之间存在类似“U 型”的非线性关系。在低产业结构合理化水平区,资源错配现象较为严重,降低了企业生产效率。此时,产业智能化难以推

动低碳经济转型。在高产业结构合理化水平区,生产要素配置效率也随之提高,产业智能化能够通过优化资源配置提高企业生产效率,避免能源资源的过度损耗,进而促进低碳经济转型。

3) 门槛变量为技术创新。如表 8 列(3)所示,当技术创新水平小于等于 2.890 时,产业智能化对低碳经济转型不存在显著的作用效果;当技术创新水平高于 2.890 后,产业智能化在 1% 的水平上显著促进低碳经济转型,系数值为 4.546。这说明只有当技术创新位于较高水平时,产业智能化才能显著推动低碳经济转型,与理论分析相符。

综上,产业智能化对低碳经济转型的推动作用是非线性的。当产业结构高级化、产业结构合理化和技术创新水平较低时,产业智能化对低碳经济转型的促进作用较弱,甚至表现为负向影响。当产业结构高级化和产业结构合理化位于中等区间,以及技术创新处于高水平区时,城市低碳经济转型能力会随着产业智能化水平的提高而显著增强。但是,随着产业结构高级化和产业结构合理化程度的持续提升,即二者均位于高水平区时,产业智能化对低碳经济转型的促进作用明显减弱。假设  $H_4$  得到验证。

### 6. 异质性分析

上文图 1 显示低碳城市试点政策实施和碳排放强度差异导致了差异化的低碳经济转型水平,图 2 中不同经济区域和不同等级城市的产业智能化发展程度也存在差别,这使得产业智能化可能对不同类型城市的低碳经济转型存在异质性影响。因此,本文按照城市是否为低碳试点城市、碳排放强度差异、所在经济区域以及所属城市等级四种划分方式对城市进行分类,异质性检验结果如表 9 和表 10 所示。

(1) 低碳城市试点政策实施异质性分析。表 9 的列(1)和列(2)显示,产业智能化显著促进了低碳试点城市的低碳经济转型,对非低碳试点城市的影响不显著。低碳试点城市作为低碳生产、低碳消费的低碳经济试点地区,地方政府为完成碳减排目标发布了一系列促进绿色低碳发展的产业政策,并通过向低碳行业开展税收减免、制定特定行业补贴等财税激励政策引导企业进行绿色创新(龚星宇等,2022)<sup>[47]</sup>。在政府政策支持下,低碳试点城市更易通过技术创新实现产业升级,形成智能化产业链的同时降低碳排放。

(2) 碳排放强度异质性分析。为进一步区分在碳排放强度不同时产业智能化对低碳经济转型的影响是否存在差异,本文将样本城市分为低碳排放强度城市和高碳排放强度城市进行实证分析。如表 9 中的列(3)和列(4)所示,产业智能化显著推动了高碳排放强度城市的低碳经济转型,对低碳排放强度城市的促进作用不显著。样本中高碳排放强度城市包括北京、上海、深圳等经济发达城市。这些城市拥有完备的产业结构、营商环境和智能化条件,吸引着智能企业入驻,汇聚了高技术密集型产业和信息密集型产业等低碳经济产业,具有较大的碳减排空间。依托智能技术发展经济,既有助于城市的经济实力,也有利于降低城市碳排放,推动着城市低碳经济转型。对于低碳排放强度城市,产业智能化水平也相对较低,其对低碳经济转型的促进作用尚未显现。

表 9 基于低碳城市试点政策与碳排放强度的异质性分析结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	低碳试点城市	非低碳试点城市	高碳排放强度城市	低碳排放强度城市
	<i>ctfp</i>	<i>ctfp</i>	<i>ctfp</i>	<i>ctfp</i>
<i>inte</i>	0.602* (0.348)	0.205 (1.020)	1.270** (0.496)	0.840 (0.839)
控制变量	控制	控制	控制	控制
时间/城市固定效应	是	是	是	是
观测值	1088	3440	2256	2272
R <sup>2</sup>	0.623	0.538	0.480	0.414
Chow 检验	24.110*** [0.000]		422.580*** [0.000]	

注:Chow 检验是引入交叉项的组间系数差异检验方法,用以检验分样本间回归系数是否相等;中括号内为  $p$  值,下同

(3)经济区域异质性分析。表10第(1)~(4)列为按照中国四大经济区域进行分类的回归结果。结果显示,东部、中部和西部城市产业智能化能显著促进低碳经济转型,影响系数呈由大到小排列,对东北部城市的影响不显著。这说明产业智能化对低碳经济转型的正向效应主要作用于东部、中部和西部城市。东部城市具有区位优势,能凭借特有的优势资源形成“总部经济”。《财富》数据显示,2020年世界500强中有133家中国企业,其中75家分布于北上广深。总部经济的这种生产制造布局给东部地区带来“社会资本效应”和“产业乘数效应”,即企业总部在某一区域聚集不仅能提高区域产值,而且也会带动发达信息设备制造业、知识型服务业等产业发展,建立起相对完善的智能化产业链。随着地理位置由东部地区转移至中部和西部地区,产业智能化水平逐渐减弱,其对低碳经济转型的推动作用也随之减弱。东北地区拥有以资源要素为载体的老工业基地,长久以来面临着区域发展环境较差、新兴产业发展不足以及资源外流等问题,阻碍了东北部城市的产业智能化发展。

(4)城市等级异质性分析。按照城市等级进行划分的实证结果如表10第(5)~(7)列所示。产业智能化对各等级城市低碳经济发展均表现出显著的正向影响,对一线城市的促进作用明显大于二三线城市,而二三线城市又优于四五线城市。一线城市集聚了大量的商业资源、城市人口活跃度高,营造了良好的营商环境和智能化创新条件,产业智能化发展位于领先地位。二三线城市智能化产业结构较为完善,产业智能化具有后发优势。在产业智能化升级过程中,城市空间经济格局呈现马太效应(王书斌,2020)<sup>[48]</sup>,优势资源向大城市集聚,四五线城市处于相对劣势地位。

表10 基于四大经济区域与城市等级的异质性分析结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
	东部	中部	西部	东北部	一线城市	二三线城市	四五线城市
	<i>ctfp</i>	<i>ctfp</i>	<i>ctfp</i>	<i>ctfp</i>	<i>ctfp</i>	<i>ctfp</i>	<i>ctfp</i>
<i>inte</i>	2.903*** (0.934)	1.385* (0.730)	1.370** (0.676)	1.866 (1.542)	6.478* (3.749)	4.027*** (1.225)	0.653** (0.323)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制	控制	控制
时间/城市 固定效应	是	是	是	是	是	是	是
观测值	1376	1280	1328	544	304	1616	2608
R <sup>2</sup>	0.443	0.577	0.445	0.654	0.562	0.495	0.534
Chow 检验	4.710*** [0.000]	9.650*** [0.000]	15.860*** [0.000]	1.700* [0.083]	2.010** [0.034]		

## 六、结论与建议

### 1. 研究结论

本文研究发现:(1)我国城市经济发展面临较大的低碳转型压力,产业智能化能够推动城市低碳经济转型。在控制了可能存在的内生性问题以及替换低碳经济转型衡量指标等多种稳健性检验后,产业智能化对低碳经济转型的影响依然稳健。(2)产业智能化能够通过提高产业结构升级中的产业结构高级化和产业结构合理化推动低碳经济转型。面板门槛模型回归结果表明,产业智能化对低碳经济转型的影响在产业结构高级化和合理化上存在显著的非线性门槛特征。具体而言,在产业结构高级化的不同阶段,产业智能化对低碳经济转型的影响效果存在显著差异;将产业结构合理化作为门槛变量,可以发现产业智能化与低碳经济转型存在类似“U型”的非线性关系。(3)技术创新在产业智能化推动低碳经济转型的过程中起到部分中介作用。在技术创新的门槛效应下,只有当技术创新跨过门槛值后,产业智能化才能显著推动低碳经济转型。(4)异质性检验结果表明,产业智能化主要作用于低碳试点城市、高碳排放强度城市、东部城市和一线城市的低碳经济转型,对

非低碳试点城市、低碳排放强度城市、东北部城市低碳经济转型效果不显著。

## 2. 对策建议

第一,加快突破人工智能关键技术,推动产业智能化升级。人工智能作为产业智能化的核心,应为人工智能发展建立完善的智能化基础设施、提供充足的资金支持以及培养专业的人工智能人才。在智能化基础设施建设方面,通过政府部门与企业合力新建 AI 算力中心、新型网络基础设施等方式,提升产业信息采集能力和数字化水平,为产业智能化奠定坚实基础;在资金支持方面,完善支持产业智能化的投融资政策,引导风险投资基金等社会资本进入产业智能化领域;在人工智能人才培养方面,教育部门应结合产业智能化发展需求调整人工智能相关学科专业的人才培养规划,政府应鼓励高校学者及业界专家开展人工智能技能线上公开课,企业需结合产业智能化发展水平与智能化发展方向培养高质量、富有创新能力的智能化人才队伍,提高人力资本水平。

第二,充分发挥产业结构升级和技术创新对低碳经济转型的间接驱动作用。一是稳步推进产业结构高级化和合理化发展,缩减资源依赖度高、碳排放量大的企业规模,提升智能制造产业和中高端服务业占 GDP 的比重。二是鼓励产业部门加强低碳技术创新。一方面,政府应加强对开展绿色技术创新企业的补贴力度,在特定产业中开展减排技术试点工作,积极引导高耗能产业通过技术创新降低碳排放;另一方面,政府部门需要继续完善环境规制等环保政策手段,为企业低碳转型发展施加外部压力,倒逼企业开展低碳技术创新。

第三,实行差异化的产业智能化驱动低碳经济转型策略。低碳试点城市、高碳排放强度城市、东部城市以及一线城市要充分发挥产业智能化的发展优势,结合优势产业培育产业智能化新的增长点。积极推动产业智能化升级,打造智能化产业集群和智能化产业链,带动智能化水平落后产业和地区的智能技术研发与应用,为我国低碳经济转型发展提供强劲动能。非低碳试点城市、东北经济区域城市要转变过度依赖能源资源等粗放式经济发展模式,因地制宜发展战略性新兴产业,在传统生产过程中引进人工智能等智能化技术,实现生产过程自动化管理和碳排放自动化控制。

## 参考文献

- [1] 余澜,张兵兵,闫志俊. 环境立法如何驱动城市低碳转型[J]. 上海:财经研究,2022,(9):18-31.
- [2] Autor, D., and A. Salomons. Is Automation Labor-Displacing? Productivity Growth, Employment, and the Labor Share[R]. NBER Working Paper,2018.
- [3] 杨飞. 产业智能化如何影响劳动报酬份额——基于产业内效应与产业关联效应的研究[J]. 北京:统计研究,2022,(2):80-95.
- [4] Brynjolfsson, E., and A. McAfee. The Second Machine Age: Work, Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technology[M]. New York, NY: WW Norton & Company, 2014.
- [5] 陈彦斌,林晨,陈小亮. 人工智能、老龄化与经济增长[J]. 北京:经济研究,2019,(7):47-63.
- [6] Acemoglu, D. Harms of AI[R]. NBER Working Paper, 2021.
- [7] 韩民春,赵泽彬. 碳排放约束视角下产业智能化对区域经济差距的影响研究[J]. 长春:工业技术经济,2022,(1):3-11.
- [8] 孙早,侯玉琳. 工业智能化与产业梯度转移:对“雁阵理论”的再检验[J]. 北京:世界经济,2021,(7):29-54.
- [9] 丁凡琳,陆军,赵文杰. 中国省际产业转移对碳效率的影响分析[J]. 昆明:经济问题探索,2022,(12):100-113.
- [10] 丁冠群,王铮,孙翊. 基于多行业 DSGE 模型的中国碳减排政策效应[J]. 济南:中国人口·资源与环境,2022,(1):19-30.
- [11] 渠慎宁,史丹,杨丹辉. 中国数字经济碳排放:总量测算与趋势展望[J]. 济南:中国人口·资源与环境,2022,(9):11-21.
- [12] Sinn, W. H. Public Policies Against Global Warming: A Supply Side Approach[J]. International Tax and Public Finance, 2008, 15,(4):360-394.
- [13] 师博. 人工智能助推经济高质量发展的机理诠释[J]. 重庆:改革,2020,(1):30-38.
- [14] Korinek, A., and J. E. Stiglitz. Artificial Intelligence, Globalization, and Strategies for Economic Development[R]. NBER Working Paper, 2021.
- [15] Graetz, G., and G. Michaels. Robots at Work[J]. Review of Economics and Statistics, 2018, 100,(5):753-768.
- [16] 中国社会科学院工业经济研究所课题组,李平. 中国工业绿色转型研究[J]. 北京:中国工业经济,2011,(4):5-14.



- [17] 葛立宇, 莫龙炯, 黄念兵. 数字经济发展、产业结构升级与城市碳排放[J]. 天津: 现代财经(天津财经大学学报), 2022, (10): 20-37.
- [18] 李海奇, 张晶. 金融科技对我国产业结构优化与产业升级的影响[J]. 北京: 统计研究, 2022, (10): 102-118.
- [19] 林伯强. 碳中和进程中的中国经济高质量增长[J]. 北京: 经济研究, 2022, (1): 56-71.
- [20] 邵帅, 尹俊雅, 范美婷, 杨莉莉. 僵尸企业与低碳转型发展: 基于碳排放绩效的视角[J]. 北京: 数量经济技术经济研究, 2022, (10): 89-108.
- [21] Acemoglu, D., and P. Restrepo. Automation and New Tasks: How Technology Displaces and Reinstates Labor[J]. Journal of Economic Perspectives, 2019, 33, (2): 3-30.
- [22] 张万里, 宣畅. 产业智能化对产业结构升级的空间溢出效应——劳动力结构和收入分配不平等的调节作用[J]. 北京: 经济管理, 2020, (10): 77-101.
- [23] 叶娟惠, 叶阿忠. 科技创新、产业结构升级与碳排放的传导效应——基于半参数空间面板 VAR 模型[J]. 北京: 技术经济, 2022, (10): 12-23.
- [24] 鄢哲明, 杜克锐, 张宁. 可再生能源技术创新与碳减排——基于地区经济发展不平衡视角[J]. 武汉: 环境经济研究, 2022, (1): 56-77.
- [25] 张昕蔚, 刘刚. 人工智能与传统产业融合创新机制研究——基于对中国智能安防产业创新网络的分析[J]. 北京: 科学学 研究, 2022, (6): 1105-1116.
- [26] Gerlag, R. Measuring the Value of Induced Technological Change[J]. Energy Policy, 2007, 35, (11): 5287-5297.
- [27] 贾根良. 第三次工业革命与工业智能化[J]. 北京: 中国社会科学, 2016, (6): 87-106, 206.
- [28] 徐宇明. 产业智能化对我国城乡收入差距的影响研究[J]. 南昌: 金融与经济, 2022, (1): 64-74.
- [29] 汪前元, 魏守道, 金山, 陈辉. 工业智能化的就业效应研究——基于劳动者技能和性别的面板数据空间计量分析[J]. 北京: 管理世界, 2022, (10): 110-126.
- [30] 陈诗一. 中国各地区低碳经济转型进程评估[J]. 北京: 经济研究, 2012, (8): 32-44.
- [31] 田成诗, 陈雨. 人口虹吸、集聚与城市能源效率——以沪苏浙皖地区为例[J]. 北京: 统计研究, 2022, (5): 93-106.
- [32] 韩峰, 谢锐. 生产性服务业集聚降低碳排放了吗? ——对我国地级及以上城市面板数据的面板数据空间计量分析[J]. 北京: 数量经济技术经济研究, 2017, (3): 40-58.
- [33] 王林辉, 姜昊, 董直庆. 工业智能化会重塑企业地理格局吗[J]. 北京: 中国工业经济, 2022, (2): 137-155.
- [34] 韩民春, 韩青江, 夏蕾. 工业机器人应用对制造业就业的影响——基于中国地级市数据的实证研究[J]. 重庆: 改革, 2020, (3): 22-39.
- [35] 汪伟, 刘玉飞, 彭冬冬. 人口老龄化的产业结构升级效应研究[J]. 北京: 中国工业经济, 2015, (11): 47-61.
- [36] 邓荣荣, 张翔祥. 中国城市数字金融发展对碳排放绩效的影响及机理[J]. 北京: 资源科学, 2021, (11): 2316-2330.
- [37] 周兵, 刘婷婷. 区域环境治理压力、经济发展水平与碳中和绩效[J]. 北京: 数量经济技术经济研究, 2022, (8): 100-118.
- [38] 任晓松, 刘宇佳, 赵国浩. 经济集聚对碳排放强度的影响及传导机制[J]. 济南: 中国人口·资源与环境, 2020, (4): 95-106.
- [39] 郭炳南, 卜亚. 人力资本、产业结构与中国碳排放效率——基于 SBM 与 Tobit 模型的实证研究[J]. 石家庄: 当代经济管理, 2018, (6): 13-20.
- [40] 吴茵茵, 齐杰, 鲜琴, 陈建东. 中国碳市场的碳减排效应研究——基于市场机制与行政干预的协同作用视角[J]. 北京: 中国工业经济, 2021, (8): 114-132.
- [41] Zeng, D. Z., and L. Zhao. Pollution Havens and Industrial Agglomeration[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2009, 58, (2): 141-153.
- [42] Zhu, S. J., C. F. He, and Y. Liu. Going Green or Going Away: Environmental Regulation, Economic Geography and Firms' Strategies in China's Pollution Intensive Industries[J]. Geoforum, 2014, (55): 53-65.
- [43] 黄群慧, 余泳泽, 张松林. 互联网发展与制造业生产率提升: 内在机制与中国经验[J]. 北京: 中国工业经济, 2019, (8): 5-23.
- [44] Acemoglu, D., and P. Restrepo. Robots and Jobs: Evidence from U. S. Labor Markets[J]. Journal of Political Economy, 2020, 128, (6): 2188-2244.
- [45] 江艇. 因果推断经验研究中的中介效应与调节效应[J]. 北京: 中国工业经济, 2022, (5): 100-120.
- [46] 占华, 后梦婷, 檀菲菲. 智能化发展对中国企业绿色创新的影响——基于新能源产业上市公司的证据[J]. 北京: 资源科学, 2022, (5): 984-993.
- [47] 龚星宇, 姜凌, 余进韬. 不止于减碳: 低碳城市建设与绿色经济增长[J]. 成都: 财经科学, 2022, (5): 90-104.
- [48] 王书斌. 工业智能化升级与城市层级结构分化[J]. 北京: 世界经济, 2020, (12): 102-125.

# Industrial Intelligence and Urban Low-Carbon Economic Transformation

LUO Liang-wen, ZHANG Zheng-qiu, ZHOU Qian

(School of Economics, Zhongnan University of Economics and Law, Wuhan, Hubei, 430073, China)

**Abstract:** Under the grim global climate change situation, the double carbon target of carbon peak and carbon neutrality requires the Chinese economy to shift to a low-carbon development approach. Low-carbon economic transformation is dynamically changing, oriented by industrial decarbonization. The deep integration of artificial intelligence technology and industry provides new momentum for the successful transformation of economic development mode and supports high-quality economic development. In recent years, Chinese industrial intelligence has developed rapidly, with the number of patent applications in artificial intelligence and the scale of the intelligence industry ranking at the forefront of the world. Chinese urban carbon emissions are now close to four-fifths of the country, and cities have become the primary source of carbon emissions. It is necessary to examine whether industrial intelligence can effectively enable urban low-carbon economic transformation, as well as to explore in depth the mechanism of the role of industrial intelligence on urban low-carbon economic transformation.

In the era of artificial intelligence, industrial intelligence is an effective way to reduce greenhouse gas emissions and promote low-carbon economic transformation. Based on web crawler and manual data collection methods, this paper constructs an industrial intelligence index of 283 cities in China from three dimensions: intelligent condition, intelligent innovation, and intelligent application. We explore the impact of industrial intelligence on low-carbon economic transformation. Besides, we divide industrial structure upgrading into two parts, that is, industrial structure optimization and industrial structure rationalization. As well as analyzing the mechanism and threshold effect of industrial structure upgrading and technological innovation between industrial intellectualization and low-carbon economy transformation. The results are as follows: Firstly, Chinese economic development is under greater pressure of low-carbon transformation, while industrial intelligence significantly promotes the low-carbon economic transformation. The results remain robust after controlling for endogenous problems. Secondly, industrial intelligence promotes low-carbon economic transformation by enhancing the industrial structure upgrading and technological innovation. Further research shows a significant nonlinear threshold feature of the impact of industrial intelligence on low-carbon economic transformation. When industrial structure optimization and rationalization are at the middle level, the promotion effect of industrial intelligence on low-carbon economic transformation is the strongest. When technological innovation crosses the threshold, industrial intelligence significantly promotes the low-carbon economy transformation. Thirdly, the heterogeneity test results show that industrial intelligence mainly acts on the low-carbon economic transformation of low-carbon pilot cities, high-carbon emissions intensity cities, eastern regions, and first-tier cities.

The possible marginal contributions of this paper are as follows. First, we systematically examine the relationship between industrial intelligence and low-carbon economic transformation and its mechanism. There are two possible influence paths of industrial structure upgrading and technological innovation. And this verifies that industrial intelligence can promote the low-carbon economic transformation of cities by improving industrial structure upgrading and technological innovation. Further, the paper explores the nonlinear characteristics of industrial intelligence and low-carbon economic transformation, which provides a basis for a scientific understanding of the internal logic between industrial intelligence and low-carbon economic transformation. Second, regarding research data, this paper constructs a city-level industrial intelligence index measurement system. Most prior literature measures industrial intelligence based on provincial or world input-output table data, but this paper takes the research deeper to the city level. Based on the industrial intelligence index system, indicators such as new digital infrastructure and the number of patents of intelligent enterprises are added to better measure the level of industrial intelligence. Specifically, utilizing web crawler, manual data collection, and other methods, the industrial intelligence index is constructed around three dimensions: intelligent conditions, intelligent innovation, and intelligent application. The findings of this paper provide valuable references for upgrading Chinese industrial intelligence, and promoting the urban low-carbon economic transformation.

**Key Words:** industrial intelligence; low-carbon economic transformation; industrial structure upgrading; technology innovation

**JEL Classification:** L16, O14, R11

**DOI:** 10.19616/j.cnki.bmj.2023.05.003

(责任编辑:吴海军)