

车帅,汪克亮.数智融合背景下智能制造对企业碳排放的影响与机制分析[J].中国人口·资源与环境,2026,36(2):135-147. [CHE S, WANG K L. Impact of intelligent manufacturing on corporate carbon emissions and its underlying mechanisms in the context of digital-intelligent integration[J]. China population, resources and environment, 2026, 36(2): 135-147.]

数智融合背景下智能制造对企业碳排放的影响与机制分析

车帅¹, 汪克亮²

(1. 郑州大学商学院, 河南 郑州, 450001;

2. 中国海洋大学经济学院, 山东 青岛, 266100)

摘要 在中国式现代化的发展道路上,智能制造和低碳发展的深度融合既是实现产业升级的关键路径,也是落实“双碳”目标的核心抓手。为突破传统高耗能、高排放的增长瓶颈,中国需要从依赖规模扩张的“大国制造”模式,加速转变为以技术赋能、效率提升为核心的“大国智造”范式,推动经济增长与生态保护协同共进。该研究利用2008—2022年中国A股上市公司的微观数据,采用多种计量模型检验了智能制造对企业碳排放的异质性影响及作用路径。研究发现:①依靠数字化转型的智能制造可以显著降低企业碳排放量。②离散型的智能制造模式在治理公司碳排放过程中表现不佳,流程型和定制型的智能制造模式是未来中国企业的绿色发展方向。③企业所有权性质、经营特征及领导者特质等因素对智能制造的碳减排效应存在显著的异质性影响。具体而言,民营企业相较于其他所有权性质的企业,在通过智能制造实现碳减排方面更具优势。在经营特征维度,内部控制机制有效的企业、以低策略性创新为导向的企业及资本密集度较高的企业,更能释放智能制造的环境红利。在领导者特质层面,女性领导力突出且具备国际化视野的企业,在借助智能制造发挥碳减排效应时表现得更为显著。④机制分析发现,智能制造主要通过促进产业链集约化、绿色技术创新和环境保护治理,进而降低企业碳排放。因此,政府应结合企业行业属性与发展阶段,引导企业选择适配的智能制造模式,避免盲目跟风;针对企业异质性特征提供差异化政策支持,为民营企业智能制造升级提供专项补贴、为资本密集型企业绿色技术研发提供税收优惠;同时不断强化产业链协同机制建设、绿色技术创新平台搭建及环境保护监督考核,持续畅通智能制造对企业碳排放的治理传导路径,以更好地释放其减排效应。

关键词 智能制造;数字化转型;碳排放;产业链

中图分类号 F205 文献标志码 A 文章编号 1002-2104(2026)02-0135-13 DOI:10.12062/cpre.20250619

在中国“双碳”目标的约束下,制造业作为碳排放主体,其低碳转型成效是实现经济高质量发展的关键环节。当前中国制造业正面临能源结构优化与技术升级的双重挑战。传统“高投入、高排放”的生产模式难以满足“双碳”目标要求,智能制造则可以通过全流程数字化管控、资源高效配置和绿色技术创新,为破解这一困境提供新路径。根据2024年工业和信息化部第二季度数据,中国工业企业关键工序数控化率已达64.9%,数字化研发设计工具普及率升至83.1%,较2023年底分别提高了1.9个百分点和1.1个百分点。智能制造作为新一代信息技术与先进制造技术深度融合的产物,不仅是重塑传统产业的重要引擎,更是破解环境约束的战略选择^[1]。这一系列数据表明,智能制造正在成为企业节能减排的有力

抓手。在此背景下,智能制造对碳排放的影响备受关注。一方面,智能制造通过技术创新、资源优化配置等手段,为企业减少碳排放量提供了新途径;另一方面,企业在所有权性质、管理效率和创新能力等方面的差异,可能导致智能制造的碳减排效果呈现显著异质性。现有研究对这一现象的解释尚不充分,尤其缺乏基于企业数据的微观实证检验。那么,在“双碳”目标的战略背景下,智能制造能否有效降低企业碳排放?不同所有制、经营特征和领导者特质的企业碳减排效果是否存在显著差异?智能制造实践的碳减排效应究竟通过哪些路径得以实现?回答上述问题,有助于为企业制定精准的智能制造战略,为出台促进企业绿色转型的政策提供参考依据,进而推动中国经济实现高质量发展。

收稿日期:2025-01-08 修回日期:2025-07-26

作者简介:车帅,博士,副教授,主要研究方向为数字化发展与环境经济学。E-mail:jgcheshuai@163.com。

通信作者:汪克亮,博士,教授,博导,主要研究方向为资源与环境经济学。E-mail:klwang@163.com。

基金项目:国家自然科学基金面上项目“复合系统视阈下制造业绿色转型的演化机理、绩效评价及调控策略研究”(批准号:72373138)。

1 文献综述

在全球应对气候变化和推进“双碳”目标的背景下,智能制造对碳排放的影响备受学术界关注。无论是在宏观层面还是在微观层面,现有研究为深入理解两者关系提供了丰富的理论和实践依据。

从宏观层面而言,现有研究发现中国智能制造总体水平呈上升趋势,对碳减排具有空间溢出效应,且主要通过结构和技术效应降低二氧化碳排放^[2]。进一步地,部分学者以工业机器人应用代表城市智能制造水平,证明了工业机器人应用能够降低城市碳排放^[3]。此外,工业智能化能够有效提升城市碳排放绩效的作用机制得到证实,产业结构升级与要素优化配置组成了二者之间的重要路径^[4]。在国家产业层面,智能制造技术在能源利用和碳排放控制方面也发挥着重要作用,为宏观政策制定提供了技术应用的方向^[5]。

从微观层面而言,李计广等^[6]研究发现人工智能可以通过提升管理效率,缓解融资约束,进而实现制造业企业碳减排。Cao等^[7]进一步发现数字智能转型能够显著降低制造业企业碳排放强度,劳动生产率和资本更新的间接作用被证实。此外,智能制造由于兼具数字化与智能化的双重优势,有学者认为企业应用智能制造技术不仅可以降低资本和劳动成本来提升碳全要素生产率^[8],而且能够推动企业绿色创新“增量提质”^[9]。除环境效益外,智能制造对企业劳动生产率、商业模式以及经营绩效也具有显著提升效果^[10-13]。

除上述实证研究之外,现有研究的理论层面成果也颇为丰富。肖静华等^[14]研究发现企业从大规模制造迈向智能制造的跨越式战略变革,历经了数字化发展和智能化创新阶段,而信息技术驱动的双跨越则为实现低碳发展提供战略支撑。比如,一方面,在互联网与大数据环境下,智能工厂通过自组织、自学习和自适应创新,实现兼顾经济效益与环境效益^[15];另一方面,高端装备智能制造的平台化转型,使企业可以基于价值共创机制整合资源,在资源组织和流程管控上实现环境保护^[16]。概括而言,智能制造本身所具备的数据串联、信息融合等特性,使得企业智能制造水平的环境效应得以实现^[17]。

相较于既有研究,作者主要在以下3个方面展开探讨:其一,在指标构建上,运用机器学习与文本分析技术,构建了融入数智融合背景下的企业智能制造指标,更精准地反映了企业智能制造水平;其二,在异质性分析层面进一步扩展了现有研究,全面考察了企业性质、内部治理、资本结构、创新行为、领导特征等因素对智能制造减排效应的影响;其三,在机制分析方面,完善了智能制造

影响企业碳排放的理论框架,构建了产业链集约化、绿色技术创新、环境保护治理3个关键机制,为该领域研究提供了新视角。

2 理论分析与研究假说

2.1 智能制造对碳排放的直接影响

智能制造对企业碳排放的直接抑制效应主要体现在生产流程优化与能源管理智能化两个关键方面。第一,从生产流程优化来看,智能制造依托工业互联网、大数据分析和自动化控制技术,能够对生产流程进行深度优化^[18]。在传统制造模式下,生产环节之间的衔接往往不够顺畅,这导致生产效率低下,能源浪费严重。智能制造则能够实现生产流程的无缝对接与协同运作,通过大数据分析技术进行实时处理和反馈,减少了因生产失误和返工造成的能源浪费,从而直接降低了企业的碳排放^[19]。第二,从能源管理智能化来看,智能制造系统集成了先进的能源监测与管理模块,能够对企业的能源消耗进行全方位、实时地监测与分析^[20]。企业可以精确掌握各生产环节、各类设备的能源使用情况,通过智能化的能源调度策略,实现能源的高效分配。此外,利用人工智能算法对能源消耗数据进行深度挖掘,能够预测能源需求趋势,提前调整能源供应策略,进一步提升能源利用效率,直接减少碳排放^[21]。据此,提出研究假说H1。

H1:智能制造对企业碳排放能够产生直接抑制效应。

2.2 智能制造对碳排放的间接影响

现有研究在宏观层面证明,智能制造水平的提升可以通过产业结构优化实现低碳发展^[22]。从微观企业层面而言,集约化的智能制造模式是中国智能制造的主攻方向。集约化的产业链可以有效解决智能制造目前面临的最主要的两个问题:降低成本和提升质量。一方面,降低成本主要是针对上游供应商,通过人和机器的有机结合以及供应链数据甄选,实现优化生产线设计和集约化供应。另一方面,智能制造要求企业改变过去“摊大饼”式的生产方式,根据消费需求变化生产独具特色的个性化商品。进一步地,企业可以利用人工智能和大数据技术分析出消费热点,形成专属的“客户群”,通过提升“供需匹配”效率,进而实现资源节约的目标。基于此,提出研究假说H2。

H2:智能制造可以通过上下游产业链的集约化来降低企业碳排放。

智能制造可以通过绿色技术创新降低碳排放量。第一,智能制造系统可以借助信息技术有效破解“孤岛”效应,通过知识溢出效应加强产业链上企业间的技术交流,从而提升绿色技术研发能力^[23]。第二,智能制造企业以

可持续发展理念为指导,能够将人工智能、5G等数字技术与高端制造、能效管理等先进生产技术融合,协同应用于制造业的整个流程,实现生产过程中的绿色技术创新^[24]。第三,依托智能制造打造的数字化工厂管理系统,可通过数据共享、流程协同等能力,有效赋能交通运输领域绿色技术创新,推动该领域技术迭代与应用升级^[25]。此外,在企业的智能化转型中,自动化技术可以实现对低质量劳动力和非环保型资本要素的替代,增加企业对替代能源生产技术的绿色创新意愿^[26]。基于此,提出研究假说H3。

H3: 智能制造可以通过绿色技术创新降低企业碳排放。

智能制造降低企业碳排放的第3种途径是全方位的环境保护治理。第一,智能制造的实施可以有效提升企业进行环保治理的意愿和行动^[27],新媒体技术带来的高曝光率使得企业实施智能制造并注重环保可持续发展^[28]。这不仅满足了消费者和投资者对环保的期望,而且有助于提升企业的社会责任形象。第二,智能制造系统能够通过先进的人工智能技术,比如高精度的传感器和设备实现生产环境数据的收集,为环境管理决策提供详尽的数据支撑,提升环境管理能力^[29]。第三,企业还可以通过实时数据监测,帮助企业准确了解环保法规的变化,并确保企业的生产活动符合环保法规的要求,达到监管部门的环境认证要求^[30]。基于此,提出研究假说H4。

H4: 智能制造可以通过全方位的环境保护治理行动来抑制企业碳排放。

综上所述,智能制造对企业碳排放的作用机制如图1所示。

3 研究设计

3.1 模型设定

根据上述理论分析,首先设定基准回归模型,检验智能制造对企业碳排放的直接影响,计量模型设定如下:

$$C_{bij} = \alpha + \beta M_{bij} + \varphi X_{bij} + \delta_b + u_i + \eta_j + \varepsilon_{bij} \quad (1)$$

式中: C_{bij} 表示企业的碳排放量; b 表示时间, i 表示企业, j 表示行业; α 表示截距项; β 是核心估计参数; M_{bij} 表示企业的智能制造水平; φ 表示控制变量的估计参数; X_{bij} 表示一组控制变量; δ_b 表示时间固定效应; u_i 表示地区固定效应; η_j 表示行业固定效应; ε_{bij} 表示随机扰动项。

此外,根据甄红线等^[31]的做法,采用工具变量法缓解潜在的内生性问题,以准确估计智能制造对企业碳排放的影响。计量模型具体如下:

$$M_{bij} = \alpha + \lambda V_{bij} + \varphi X_{bij} + \delta_b + u_i + \eta_j + \varepsilon_{bij} \quad (2)$$

$$C_{bij} = \alpha + \beta M' + \varphi X_{bij} + \delta_b + u_i + \eta_j + \varepsilon_{bij} \quad (3)$$

式(2)、式(3)中: V_{bij} 是智能制造水平的工具变量,变量 M' 是从第一阶段回归得到的拟合值。根据式(2)和式(3),可以进一步确定缓解内生性问题后,智能制造对企业碳排放的影响。其余变量的含义与式(1)相同。

考虑到智能制造对企业碳排放存在的3条间接路径,根据江艇^[32]对中介效应模型的研究和阐释,模型设定如下:

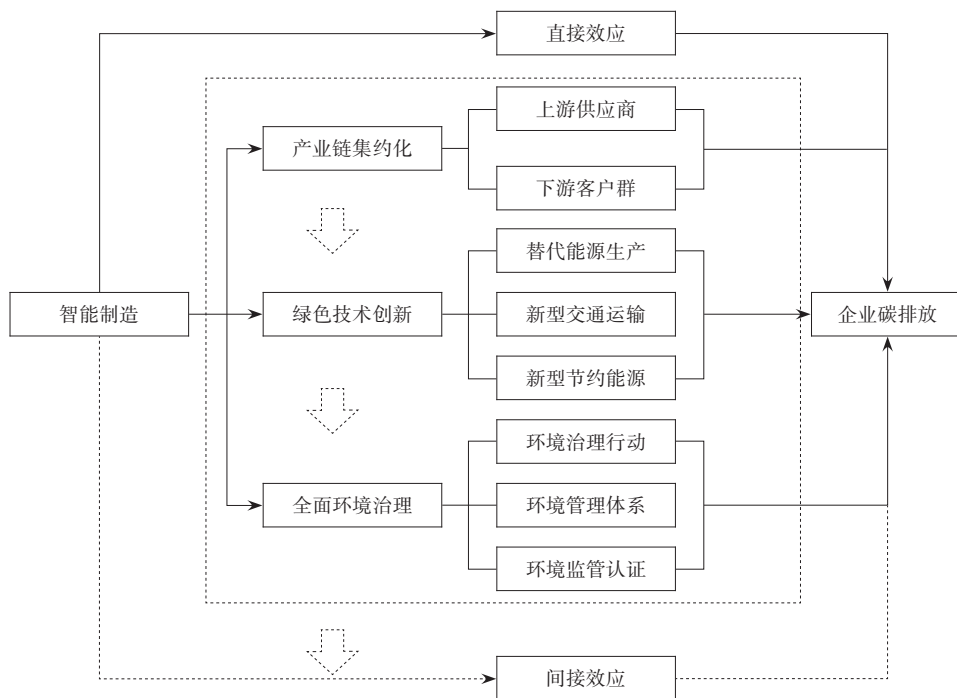


图1 智能制造对企业碳排放的作用机制

$$F = \alpha + \beta M_{bij} + \varphi X_{bij} + \delta_b + u_i + \eta_j + \varepsilon_{bij} \quad (4)$$

$$J = \alpha + \beta M_{bij} + \varphi X_{bij} + \delta_b + u_i + \eta_j + \varepsilon_{bij} \quad (5)$$

$$E = \alpha + \beta M_{bij} + \varphi X_{bij} + \delta_b + u_i + \eta_j + \varepsilon_{bij} \quad (6)$$

式(4)一式(6)中: F 表示产业链集约化, J 表示绿色技术创新, E 表示环境治理行动。

3.2 变量设置

(1)被解释变量:企业碳排放量(C)。由于上市公司并不披露碳排放数据,既往研究多采用行业碳排放结合企业营业收入或成本在行业中的占比来推算企业的碳排放量^[33],抑或是采用ESG评分中的环境评分来表征碳排放^[34]。但中国上市公司并没有完备地披露过连续年度的碳排放数据,仅靠公司年报中的各类资源消耗数据难以形成有效观测。本研究考虑到全球大气研究排放数据库公布的全球碳排放数据具有连贯性,首先将其转化为可以处理的栅格数据;其次,获得上市公司的办公地址经纬度数据,进而依据上市公司周围半径1 km的范围内的栅格数据加总得到碳排放总量。

(2)解释变量:智能制造水平(M)。现有文献中有两种测算企业智能制造水平的方式:其一是以中国智能制造示范项目为准自然实验^[35],其二是以工业机器人的应用表征智能制造^[36]。然而,本研究目的在于尽量全面评价中国企业的智能制造发展水平,解构不同模式下企业智能制造水平对碳排放的影响,前两种评价方式均无法满足研究初衷。同时,数字化是实现智能制造的基础和前提,企业的智能制造水平需要考虑数字化与智能制造的融合现状进行测算。

值得注意的是,既往研究中更多关注“数字化转型”的相关词汇^[37-38]。比如,吴非等^[39]所构建的词典涵盖人工智能、大数据、区块链以及数字化等方面,本研究则严格聚焦于“智能制造”相关词汇。具体而言,工业和信息化部在开展2018年智能制造试点示范项目中,曾明确智能制造模式的要素条件,主要包括:离散型智能制造、流程型智能制造、网络协同制造、大规模个性化定制、远程运维服务。本研究利用机器学习匹配算法,将智能制造发展模式分为5类,包括:离散型智能制造、流程型智能制造、协同型智能制造、定制型智能制造和远程型智能制造。基于此,进一步统计以上相关词汇在各企业中出现的频率,分别计算每家企业智能制造及其各维度子指标在数字化转型中占比情况,得到数智融合背景下中国上市公司企业智能制造水平。

(3)机制变量:一是产业链集约化,产业链集约化包括上游供应商的集约化与下游客户群的集约化。值得注意的是,供应商或者客户群过度集中容易产生依赖性,造成高度集中的情况,即“头部”供应商和大客户占据了过

度的话语权,造成上游和下游过度集中^[40]。因此,本研究不使用第一大供应商和第一大客户分别在上下游的占比情况来表征集约化,这常用于表征集中度或者依赖度。前者本研究以前五名供应商产生的采购额占比衡量,后者采用前五名客户产生的营业收入占比衡量。二是绿色技术创新,世界知识产权组织(WIPO)于2010年推出“国际专利分类绿色清单”,依据《联合国气候变化框架公约》对绿色专利进行了详细分类,旨在便于检索绿色技术相关专利信息^[41]。基于此,本研究从替代能源生产技术、交通运输技术、节约能源技术3个分类切入,依据上述分类号在创新专利研究数据库中进行识别统计,构建企业绿色技术创新指标。三是环境保护治理,本研究依据汤森路透数据库和上市公司年报数据,借鉴现有学者对环境治理指标的设置和内容分析法^[42],从环境行动、环境管理和环境认证3个层面构建环境保护治理指标。

(4)控制变量:根据李青原等^[43]的经验做法,选取以下控制变量以尽可能排除其他因素对研究结果带来的影响:企业规模(S),用公司总资产的自然对数表示;资产收益率(R),用税后净资产与总资产的比值来表示;现金流水平(Q),用货币资金加交易性金融资产的总和与总资产的比值表示;资产负债比(T),用负债总量与资产总量的比值表示;企业成长性(L),用总资产增长率表示;股权集中度(Z),用第一大股东持股比例表示;两权分离度(W),用实际控制人拥有上市公司所有权的比例表示。进一步对非比值变量进行对数化处理,以缓解异方差问题,相关变量的描述性统计见表1。

3.3 数据来源与处理

由于计算智能制造和碳排放的指标在2023年之后缺失严重,为保证研究结果的科学性和可信度,故选取2008—2022年的中国沪深A股上市公司为研究样本。被解释变量为企业碳排放,来自全球大气研究排放数据库。解释变量为企业智能制造水平,来自中国研究数据服务平台和国泰安研究服务中心(China Stock Market & Accounting Research Database, CSMAR)数据库。机制变量中的产业链集约化的数据来自国泰安新三板系列研究数据库,绿色技术创新的数据来自国家知识产权专利数据库和世界知识产权组织的国际专利分类绿色清单匹配数据,环境保护治理的数据来自汤森路透数据库和CSMAR公布的上市公司数据。控制变量相关指标数据,来自万得(Wind)和CSMAR数据库。基于此,对上述变量进行以下处理:其一,剔除当年交易状态为特别处理或面临终止上市风险类企业;其二,剔除主要变量缺失严重的样本;其三,为了降低异常值的影响,对样本中连续变量进行1%和99%的缩尾处理。



表1 描述性统计

变量类型	变量名称	变量符号	样本数	均值	标准差	最小值	最大值
被解释变量	碳排放量	C	31 800	10.140	1.719	5.362	13.500
解释变量	智能制造水平	M	34 072	0.296	0.275	0	1
机制变量一	上游集约化	F_1	28 792	3.150	0.768	-2.813	4.605
	下游集约化	F_2	28 442	3.091	0.942	-4.605	4.617
机制变量二	替代能源生产技术	J_1	25 782	0.170	2.229	0	189.000
	交通运输技术	J_2	25 782	0.118	1.221	0	89.000
	节约能源技术	J_3	25 782	0.307	2.326	0	106.000
机制变量三	环境行动	E_1	21 709	1.479	1.908	0	6.000
	环境管理	E_2	21 709	1.409	1.782	0	8.000
	环境认证	E_3	21 709	1.587	0.863	0	5.000
控制变量	企业规模	S	35 035	22.380	1.516	19.370	27.650
	资产收益率	R	35 035	0.034	0.067	-0.285	0.211
	现金流水平	Q	34 817	0.194	0.142	0.010	0.675
	资产负债比	T	35 035	0.470	0.218	0.062	0.985
	企业成长性	L	35 034	0.152	0.294	-0.359	1.700
	股权集中度	Z	35 036	35.300	15.410	8.420	75.780
	两权分离度	W	31 315	5.333	7.740	0	28.830

4 实证结果与分析

4.1 基准回归结果分析

表2是依次添加控制变量的估计结果。结果表明,若不控制有关变量,则会高估智能制造的碳减排效应,高估的碳减排量为2%左右。整体而言,当企业智能制造水平每提高1%,其碳减排量相对下降23.2%。

从理论基础来看,依据生产流程优化理论^[44],智能制造能够借助先进的自动化系统和控制系统深度介入生产流程。在生产过程中,通过精确的生产计划安排生产任务,依据实时的生产监测数据及时调整生产参数,减少生产过程中的能源浪费和废弃物产生,提高资源利用效率。规模经济与环境影响理论也为实证结果提供了有力支

持^[45]。随着企业智能制造水平提升,生产规模可能扩大,但智能制造并非简单地增加生产投入,而是实现生产系统的智能化升级。在智能化生产模式下,企业可以更高效地组织生产活动,避免因生产规模扩大导致的能效降低问题,有效控制碳排放。

在文献基础方面,诸多现有研究为实证结果提供了有力支撑。比如,韩松花等^[46]研究发现数字经济发展能显著降低能源消费总量并提高能源利用效率,助力能源“双控”目标实现。这一研究与本研究存在相似逻辑,在智能制造中,数字技术深度融入生产环节,实现生产流程智能化、资源配置高效化,进而降低企业碳排放。这为智能制造可以有效降低企业碳排放的研究结论提供了文献支撑,从侧面印证了研究结果的合理性。综上,研究假说H1得以证实。

表2 基准回归结果

变量	碳排放量							
	核心解释变量	1个控制变量	2个控制变量	3个控制变量	4个控制变量	5个控制变量	6个控制变量	全部变量
M	-0.252**	-0.246**	-0.246**	-0.237**	-0.237**	-0.231**	-0.233**	-0.232**
	(-2.566)	(-2.543)	(-2.541)	(-2.478)	(-2.492)	(-2.426)	(-2.434)	(-2.388)
常数项	10.220***	8.381***	8.396***	8.268***	8.648***	8.621***	8.633***	8.468***
	(175.350)	(20.684)	(21.024)	(20.394)	(20.172)	(20.087)	(20.189)	(19.274)
控制变量	否	是	是	是	是	是	是	是
年份固定	是	是	是	是	是	是	是	是
地区固定	是	是	是	是	是	是	是	是
行业固定	是	是	是	是	是	是	是	是
观测值	30 858	30 856	30 856	30 691	30 691	30 688	30 687	29 570

注:** $P < 0.05$, *** $P < 0.01$; 括号内数值为 t 值。

4.2 多维智能制造模式比较结果

表3中依次报告了离散型智能制造、流程型智能制造、协同型智能制造、定制型智能制造和远程型智能制造对企业碳排放的影响。可以发现,除了离散型智能制造模式对碳排放有潜在的正向影响外,其余4种智能制造模式均对企业碳排放具有实质性或潜在的负向影响,证明了基准结果的稳健性。

表3 多维智能制造模式比较结果

变量	碳排放量				
	离散型	流程型	协同型	定制型	远程型
M_1	0.526 (1.563)				
M_2		-0.225** (-2.500)			
M_3			-0.178 (-1.419)		
M_4				-1.786** (-2.354)	
M_5					-0.192 (-0.255)
常数项	8.379*** (19.202)	8.466*** (19.148)	8.376*** (19.292)	8.377*** (19.192)	8.375*** (19.181)
控制变量	是	是	是	是	是
年份固定	是	是	是	是	是
地区固定	是	是	是	是	是
行业固定	是	是	是	是	是
观测值	29 570	29 570	29 570	29 570	29 570

注: ** $P < 0.05$, *** $P < 0.01$; 括号内数值为 t 值。

赵培雅等^[47]研究发现,产业智能化能够减少能源消耗和工业污染排放总量、降低排放强度,实现节能减排,这为流程型和定制型智能制造模式降低企业碳排放的结论提供了宏观层面证据支持。Chu等^[48]进一步研究发现,企业在数字化转型后期,智能设备使用增加,可以提升资源利用和能源管理效率,进而降低碳排放。流程型

和定制型智能制造模式与数字化转型中精准匹配供需、减少浪费的逻辑相通,同样有助于降低碳排放。

流程型智能制造模式和定制型智能制造模式的碳减排效应,符合精益生产理论^[49]。精益生产旨在根据客户需求灵活调整生产流程,避免过度生产和库存积压,精准配置资源,减少能源消耗,进而减少碳排放。离散型智能制造模式对企业碳排放有潜在正向影响,可能是因为在离散型生产过程中,生产环节相对独立,难以实现流程型智能制造模式的整体流程优化与协同,导致资源利用效率提升受限。

4.3 稳健性检验

为增强结论的稳健性,本研究采用更换被解释变量、更换固定效应、更换聚类标准误、排除环境政策干扰和供应链数字化政策干扰等多种方式进一步验证结论(表4)。具体而言:①更换被解释变量。碳强度控制是经济转型的重要方向,故通过计算碳排放量与企业营业收入比值得到碳强度指标,替换原有被解释变量进行回归。②更换固定效应变量。基准回归中为了尽可能地消除地区差异,在城市层面进行了固定效应估计。进一步地,将城市层面固定效应更换为省份层面固定效应进行回归,以消除更高级地区层面的差异。③更换聚类标准误。在基准回归中,根据《上市公司行业分类指引》,将估计系数的标准误聚类到行业细分类层面,稳健性检验中则将标准误聚类到行业大类层面进行回归。④剔除低碳试点省市政策的干扰。2010年,国家发展和改革委员会发布《关于开展低碳省区和低碳城市试点工作的通知》,明确将在广东、辽宁等五省八市开展试点工作,故将低碳试点政策所包含的企业予以剔除进行回归。⑤剔除碳排放权交易试点政策干扰。2011年,北京、天津、上海、重庆、湖北、广东及深圳开展碳排放权交易试点工作,故将碳交易试点政策所包含的企业予以剔除并进行回归。⑥剔除大气污染物限值政策干扰。2013年,环境保护部发布《关于执行大气污染物特别排放限值的公告》,将长三角等47个地级及

表4 稳健性检验结果

变量	碳强度	省份固定	更换聚类	低碳试点	碳交易试点	污染物限值	供应链试点
M	-0.001* (-1.718)	-0.240** (-2.030)	-0.231** (-2.263)	-0.180* (-1.768)	-0.255** (-2.134)	-0.358** (-2.126)	-0.209* (-1.778)
常数项	0.023* (1.742)	7.836*** (15.247)	8.468*** (17.270)	8.349*** (14.213)	8.078*** (13.029)	10.704*** (10.922)	8.338*** (9.976)
控制变量	是	是	是	是	是	是	是
年份固定	是	是	是	是	是	是	是
地区固定	是	否	是	是	是	是	是
行业固定	是	是	是	是	是	是	是
观测值	29 121	29 575	29 570	18 126	16 629	8 686	12 732

注: * $P < 0.10$, ** $P < 0.05$, *** $P < 0.01$; 括号内数值为 t 值。

以上城市作为试点,故将大气污染物限值政策所涉及的企业予以剔除并进行回归。⑦剔除供应链数字化转型试点政策干扰。2018年商务部等部门实施供应链创新与应用试点工作。供应链数字化作为试点地区的核心任务,力求通过现代供应链建设来赋能经济转型,故将试点范围内企业剔除后进行回归。经上述稳健性检验,智能制造的估计系数均显著为负,表明本研究的基本结论稳健。

4.4 内生性检验

借鉴李拓晨等^[50]的做法,选择企业所在地的地形起伏度与企业数字化转型水平的滞后一期构造交乘项作为工具变量。其合理性在于:一方面,智能制造的前提是互联网基础设施的建设,而地形起伏度较大则会直接限制智能制造的发展,满足相关性要求。另一方面,地形起伏度作为存储地理信息的地理变量,具有天生的自然性,与经济生产活动所导致的碳排放并无直接关联,满足排他性要求。表5报告了工具变量法的回归结果,在第一阶段中,地形起伏度与智能制造水平之间呈现显著的负相关关系。在第二阶段中,其结果通过了显著性水平检验,证明缓解内生性问题后,智能制造仍然能显著降低企业碳排放。在工具变量有效性检验中,K-P LM统计量为工具变量识别不足检验,结果拒绝原假设,说明不存在识别不足问题。K-P Wald统计量为弱工具变量检验,大于10%的临界值为16.380,拒绝原假设,说明不存在弱工具变量问题^[51]。

表5 内生性检验结果

变量	工具变量法		双重差分方法
	第一阶段	第二阶段	
<i>M</i>		-2.821*** (-4.214)	
<i>V</i>	-0.030*** (-6.590)		
智能制造行动 试点政策			-0.441*** (-7.138)
K-P LM 统计量		18.695***	
K-P Wald 统计量		43.363***	
控制变量	是	是	是
年份固定	是	是	是
地区固定	是	是	是
行业固定	是	是	是
观测值	10 779	10 779	30 479

注:*** $P < 0.01$;括号内数值为*t*值。

此外,按照沈坤荣等^[52]的处理方法,把《关于开展2015年智能制造试点示范专项行动的通知》作为政策冲击,相关的制造行业作为受政策影响的行业,其他行业为

控制组行业,构造双重差分模型进行回归。双重差分模型结果显示,以智能制造行动试点为表征的企业智能制造呈现出了较强的协同减排效果。这表明,智能制造行动不仅能够有效助推重点领域的行业减排,同时还能够通过示范引领产生行业溢出效应,呈现出全行业的智能制造减碳效果。

4.5 异质性分析

4.5.1 企业所有权性质

企业的所有权性质在企业运营中扮演着极为关键的角色。从理论逻辑层面来看,不同所有权性质的企业在资源获取、决策流程和发展目标等方面存在明显区别。非民营企业通常承担着保障国家战略安全、推动重大项目建设等重要使命,在决策过程中可能更注重长期战略规划和宏观政策导向,相对而言对短期的成本效益和市场变化的敏感度稍低。在实施智能制造战略时,由于其规模庞大、业务复杂,决策链条较长,可能难以迅速适应智能制造带来的变革,从而影响碳减排效果。

民营企业则面临着激烈的市场竞争,为了在市场中立足并取得竞争优势,它们更注重创新和效率提升,对市场变化的反应更为敏捷。在智能制造领域,民营企业能够更好地根据市场需求和技术发展趋势,合理配置资源,推动智能制造技术的有效应用,从而在碳减排方面展现出更强的优势。

借鉴王镛等^[53]的分类方式,并根据CSMAR数据库披露的公司所有权属性,把样本企业分为民营企业和非民营企业,结果见表6。可以发现,民营企业智能制造对碳排放的降低效果优于非民营企业。朱艳丽等^[54]指出,民营企业在碳排放权交易机制下,因具有更大的机动性和自主性,能更灵活地制定碳减排策略和绿色创新计划,以适应市场发展需求。上述研究既解释了为何民营企业在智能制造减碳方面更具优势,也进一步验证了不同所有权属性企业在智能制造减碳效果上存在差异这一结论。

表6 企业所有权性质的异质性检验结果

变量	非民营企业	民营企业
<i>M</i>	-0.030 (-0.158)	-0.194* (-1.803)
常数项	11.739*** (6.200)	8.660*** (13.894)
控制变量	是	是
年份固定	是	是
地区固定	是	是
行业固定	是	是
观测值	2 053	15 122

注:* $P < 0.10$,*** $P < 0.01$;括号内数值为*t*值。

4.5.2 企业经营特征与创新行为

第一,企业的经营特征和创新行为对智能制造的减碳效果具有重要影响,其中企业内部控制的有效性是关键考察维度之一。根据内部控制相关理论,有效的内部控制能够优化企业内部资源配置,加强对生产流程的监督与管理,进而提升企业运营效率^[55]。

陈智等^[56]对内部控制有效性的衡量方式具有一定的借鉴意义。借鉴该做法,使用CSMAR内部控制数据库来确定企业内部控制有效性,当上市公司评价自身内部控制有效时设置为1,无效则设置为2,依此将研究样本分为两类。从表7可以发现,在内部控制有效的企业中,智能制造发展水平的提升能够显著降低碳排放。可能原因是:在智能制造情境下,有效的内部控制有助于企业更好地实施智能制造战略,确保智能制造技术与设备的高效运行,从而充分发挥智能制造在降低碳排放方面的潜力。田利军等^[57]研究发现,内部控制是企业碳减排的重要驱动力,在数字化对碳排放的影响中起到显著的中介效应,这进一步佐证了本研究结果。

第二,在企业的生产运营过程中,资本密集度作为一个关键因素,有可能导致企业生产行为呈现出显著的异质性,进而对智能制造的碳减排成效产生差异化影响。从理论逻辑层面来看,资本密集度反映了企业资产构成中固定资产的相对占比,它与企业的生产方式、技术选择以及资源配置紧密相关。高资本密集度可能意味着企业在固定资产上投入较大,这类企业往往具备更强的技术吸纳能力和规模经济效应。

借鉴孙群力等^[58]研究,选用固定资产与总资产之比来衡量企业资本密集度,以资本密集度的中位数为临界点进行分样本检验,可以发现,高资本密集度的企业智能制造的碳减排效果更佳。可能原因是:相较于低资本密集度企业而言,高资本密集度企业,比如制造业和工业企

业具有更大的碳排放基数,从而有较大的转型需求。其充足的资本储备,也能够加快智能制造带来的生产工艺革新和先进技术研发,从而进一步助推碳减排进程。曹翔等^[59]研究发现,高碳排放行业的资本密集度较高,具备吸收国外先进碳减排技术抑制碳排放的能力,这进一步佐证了本研究的发现。

第三,在企业积极推进智能制造战略的进程中,技术创新作为革新传统生产方式的核心驱动力,其重要性不言而喻。然而,在现实的企业运营环境里,部分企业为营造转型成功的表象,可能会采取策略性创新行为。从理论逻辑来看,“外观设计”类专利主要聚焦于产品的外在形态、美感等方面,与产品核心技术和生产方式的实质性变革关联相对较弱。若企业热衷于申请此类专利,可能意味着其将过多资源投入到非关键的创新领域,而忽视了对生产流程优化、能源利用效率提升等实质性绿色技术创新的关注。

基于此,本研究以申请“外观设计”类专利作为策略性创新的表征变量,并以外观设计类专利数目的中位数为临界点,将样本企业分为高策略性创新行为(高于等于中位数)和低策略性创新行为(低于中位数)两组。可以发现,低策略性创新行为的企业进行智能制造转型可以有效降低碳排放,高策略性创新行为存在增加碳排放的潜在风险。这一结果表明,企业若过度关注非实质性创新的专利申请,会造成资源的不合理配置与浪费,使得智能制造原本应带来的环境红利转化为负担。曹虹剑等^[60]研究指出,只有通过实质性创新才能降低碳排放强度,缓解环境成本压力,而策略性创新在降低碳排放强度方面作用甚微,进一步支撑了本研究结果。

4.5.3 企业领导者特质与国际视野

第一,企业领导者的个人特质在公司决策制定和战略方向选择中占据着举足轻重的地位,那些在企业中拥

表7 企业经营特征与创新行为的异质性检验结果

变量	内部控制有效性		资本密集度		策略性创新	
	是	否	高	低	高	低
<i>M</i>	-0.216** (-2.096)	0.147 (0.229)	-0.277** (-2.311)	-0.203** (-2.334)	0.026 (0.258)	-0.254** (-2.569)
常数项	8.353*** (18.299)	6.684** (2.253)	8.313*** (15.093)	8.767*** (14.293)	6.092*** (6.394)	8.818*** (18.944)
控制变量	是	是	是	是	是	是
年份固定	是	是	是	是	是	是
地区固定	是	是	是	是	是	是
行业固定	是	是	是	是	是	是
观测值	25 546	203	14 501	15 044	4 527	25 003

注:** $P < 0.05$, *** $P < 0.01$; 括号内数值为 *t* 值。

有重要话语权的领导者,往往能够在企业转型发展进程中发挥关键的决定性作用。从理论逻辑角度来看,女性领导者在领导风格和价值观念上具有独特之处。在领导风格方面,女性领导者通常更为注重团队合作与沟通交流,倾向于采用多元化、包容性的领导方式。在企业推动智能制造的过程中,这种领导风格有助于打破部门间的壁垒,促进跨部门的创新与协同。现有研究指出,女性高管在企业社会责任和碳排放信息披露方面发挥着积极作用,女性高管能够显著提升企业社会责任报告的可读性,并且更倾向于支持企业提高碳排放和温室气体排放的披露质量^[61]。

本研究以女性监管层人数占在职人员比重的中间值作为分界线,将样本企业分为女性领导力强和女性领导力弱两组。表8报告了两组企业智能制造对碳排放的影响。结果表明,女性领导力强的企业在以智能制造推动低碳发展方面更具优势。这一研究结果与理论预期相符,进一步验证了女性领导力在企业智能制造与低碳发展之间的积极作用。

第二,在经济全球化不断深入的当下,国际合作与交流已成为推动中国企业智能制造快速发展的核心动力之一。企业领导者作为战略决策的关键人物,其国际视野的强弱对公司的创新进程有着深远影响。就理论而言,具有国际视野的领导者,凭借其在海外积累的丰富经验、前沿知识以及广泛的国际人脉资源,能够敏锐捕捉到全球智能制造领域的最新技术动态、市场趋势和创新理念。在生产流程优化方面,通过引入国外先进的精益生产理念,提高生产效率,降低能源消耗,从而减少碳排放。

本研究选择将有海外背景的董事数量作为衡量企业领导者国际视野的标准,并以中位数为界限,将样本划分为国际视野强的企业和国际视野弱的企业。研究发现,在国际视野强的领导者的企业中,其智能制造对抑制碳排放

表8 企业领导者特质与国际视野的异质性检验结果

变量	女性领导力		领导者国际视野	
	强	弱	强	弱
<i>M</i>	-0.285** (-2.516)	-0.159 (-1.546)	-0.261** (-2.630)	-0.203** (-2.128)
常数项	8.875*** (15.354)	8.127*** (15.197)	8.734*** (15.049)	8.257*** (14.416)
控制变量	是	是	是	是
年份固定	是	是	是	是
地区固定	是	是	是	是
行业固定	是	是	是	是
观测值	11 954	17 595	13 989	15 575

注:** $P < 0.05$, *** $P < 0.01$; 括号内数值为 t 值。

的效应更为显著。邓建平等^[62]研究发现,具有海外背景的董事能够显著提升企业环境信息披露质量。这表明具有海外背景的董事能够为企业带来积极的影响,有助于推动企业在环境管理和绿色创新方面取得更好的成果。

4.6 机制分析

在验证智能制造对企业碳减排的作用机制时,本研究通过实证分析识别出三大核心路径,各路径的检验结果见表9。具体如下:第一,产业链集约化的系数通过了显著性水平检验,这表明智能制造确实推动了上游供应商的集约化和下游客户群的集约化,即智能制造能够通过产业链集约化实现企业碳排放的降低。

张伯伟等^[63]指出,智能制造能够通过影响企业的协调成本、弱匹配成本和生产成本来产生“扩链”效应和“稳链”效应。这意味着智能制造可以通过多种方式提升产业链的运行效率和协同性,进而为产业链集约化创造有利条件。进一步地,产业链集约化可以对企业碳排放产生显著的抑制效应。现有研究表明,客户企业数字技术创新能够通过供应链资金溢出和创新溢出等方式传导至供应商企

表9 机制检验结果

变量	产业链集约化		绿色技术创新			环境治理行动		
	上游集约化	下游集约化	替代能源	交通运输	节约能源	环境行动	环境管理	环境认证
<i>M</i>	0.235*** (2.953)	0.511*** (3.868)	0.224** (2.474)	0.123** (2.255)	0.382*** (3.276)	0.447*** (2.720)	0.321** (2.573)	0.269*** (4.815)
常数项	6.538*** (12.109)	6.847*** (8.226)	-4.623* (-1.951)	-2.061* (-1.768)	-4.639*** (-2.859)	-6.522*** (-7.299)	-9.965*** (-13.262)	1.168*** (3.518)
控制变量	是	是	是	是	是	是	是	是
年份固定	是	是	是	是	是	是	是	是
地区固定	是	是	是	是	是	是	是	是
行业固定	是	是	是	是	是	是	是	是
观测值	27 049	26 718	23 885	23 885	23 885	20 069	20 069	20 069

注:* $P < 0.10$, ** $P < 0.05$, *** $P < 0.01$; 括号内数值为 t 值。

业,进而抑制碳排放^[64]。在产业链集约化的过程中,企业间信息共享和协同合作更加高效,有助于避免过度生产和资源浪费,减少碳排放。综上,研究假说H2得以证实。

第二,不同种类绿色技术创新的系数均通过了显著性水平检验,这充分表明智能制造确实能够通过促进绿色技术创新实现碳减排效果。

王贤彬等^[65]发现智能制造能够促进企业绿色技术创新水平的提高。在智能制造环境下,企业可以更高效地整合内外部技术资源,加速相关绿色技术的研发与应用。此外,既有研究通过构建包含绿色技术创新和数字化转型的一般均衡模型,发现绿色技术创新对碳排放具有持续降低效应^[66]。这表明绿色技术创新在达到一定程度后,能够有效抑制碳排放。具体而言,替代能源生产技术有助于减少对传统高碳能源的依赖,交通运输类技术可以降低运输过程中的碳排放,节约能源类技术则提高了能源利用效率。综上,研究假说H3得以证实。

第三,环境行动、环境管理和环境认证的系数均通过了显著性水平检验,这充分表明智能制造能够通过推动公司的全面环境保护治理行动来降低碳排放。

李波等^[67]发现企业数字化转型能产生显著的减污效应,环境治理的三方协同也扮演了重要角色。这一发现有力地支持了本研究结论,即智能制造作为企业数字化转型的重要组成部分,同样能够遵循类似的逻辑推动企业环境治理。在环境行动方面,企业可以利用智能制造技术优化生产流程,减少污染物的产生,提升清洁生产水平;在环境管理方面,企业也可以借助数字化管理手段,完善环保管理制度体系,提高环境管理的效率和效果;在环境认证行为上,通过对生产过程和环境数据的实时监测与分析,企业可以更高效地满足各类环境认证标准,妥善处理环境违法事件等。综上,假说H4得以证实。

5 结论与启示

本研究构建了数智融合背景下的企业智能制造指标体系,并使用中国上市公司2008—2022年的数据实证分析了智能制造对企业碳排放的影响及其作用机理。得出如下结论:①企业智能制造的发展能够有效降低碳排放量。相较于离散型、协同型、远程型智能制造模式,流程型和定制型智能制造模式对企业碳排放的降低效果更显著。②异质性分析表明,在民营企业,智能制造的碳减排效应更显著;相较于内部控制无效、资本密集度低和高策略性创新行为的企业,智能制造对内部控制有效、资本密集度高、低策略性创新行为的企业碳减排效应更显著。此外,女性领导力强、领导者国际化视野强的企业智能制造的减碳效果更为明显。③由上游供应商集约化和下游

客户群集约化构成的产业链集约化,由替代能源生产类技术、交通运输类技术和节约能源类技术构成的绿色技术创新,由环境行动、环境管理和环境认证组成的环境保护治理,共同构成了智能制造降低企业碳排放的传导路径。

基于以上结论,得出如下启示。

第一,鉴于流程型和定制型智能制造模式在降低企业碳排放方面效果更为显著,政府应制定相关产业政策,引导企业根据自身特点选择合适的智能制造模式。①对于具有连续生产流程特点的企业,如化工、钢铁等行业,鼓励其加大对流程型智能制造的投入,推动生产流程的智能化升级,提高资源利用效率,降低碳排放。②对于产品定制化程度较高的企业,如高端装备制造、个性化定制服装等行业,支持其发展定制型智能制造,精准匹配供需,减少生产过程中的浪费和碳排放。③设立专项扶持资金,对积极采用这两种模式且碳减排效果突出的企业给予奖励,激励企业主动进行模式转型。

第二,针对不同所有权性质、经营特征以及领导者特质的企业,应该制定差异化策略。①政府应通过深化非民营企业改革,优化治理结构与决策机制,提升企业对智能制造和降碳的积极性与灵活性。②政府可搭建经验分享平台,促进企业间交流智能制造与内部控制协同发展的经验,提升整体智能制造水平和碳减排效果。③针对资本密集度高的企业,支持其与科研机构合作开展智能制造技术研发,加速先进碳减排技术的应用和推广。④为避免企业出现策略性创新行为,政府应加大对实质性绿色技术创新的考核权重,引导企业将资源投入到真正有助于降低碳排放的创新活动中。⑤对于女性领导力强、领导者国际化视野强的企业,政府可设立专项奖励基金,表彰其突出贡献,提升企业的社会声誉,激励更多企业重视领导者相关特质的培养。

第三,要强化智能制造降低企业碳排放的传导路径建设。①政府应加强对产业链上下游企业的引导和协调,鼓励企业通过大数据、物联网等技术实现信息共享,优化供应链管理。支持企业开展供应商和客户关系管理系统建设,推动产业链上下游企业深度合作,提高供应商集约化和客户群集约化程度。②加大对绿色技术创新的研发投入,设立国家级绿色技术创新专项基金,重点支持替代能源生产、交通运输和节约能源等领域的技术研发。鼓励高校和科研机构与企业联合开展绿色技术创新项目,加速科研成果转化。③完善企业环境保护治理的法律法规和标准体系,加强对企业环境行动、环境管理和环境认证行为的监管。组织环保专家为企业提供技术指导和咨询服务,帮助企业提升环境保护治理能力,更好地发

挥智能制造在环境保护治理中的作用,实现碳排放有效降低。

参考文献

- [1] 成琼文,郭波武,张延平,等. 后发企业智能制造技术标准竞争的动态过程机制:基于三一重工的纵向案例研究[J]. 管理世界, 2023,39(4):119-140.
- [2] ABUDUREHEMAN M, JIANG Q Z, GONG J, et al. Technology-driven smart manufacturing and its spatial impacts on carbon emissions: evidence from China[J]. Computers & industrial engineering, 2023, 181: 109283.
- [3] 仲崇阳,张雨朦,马新啸. 智能制造对中国城市低碳发展的赋能效应:基于工业机器人应用视角[J]. 资源科学, 2024,46(4): 728-743.
- [4] 谭玉松,董直庆. 工业智能化能促进碳排放绩效的提升吗:基于中国城市层面的经验证据[J]. 商业研究, 2023(5):20-28.
- [5] FU H, SHI Y Y, ZENG Y C. Estimating smart grid's carbon emission reduction potential in China's manufacturing industry based on decomposition analysis[J]. Frontiers in energy research, 2021, 9: 681244.
- [6] 李计广,宫方茗,王元彬. 人工智能技术创新如何影响制造业碳减排?[J]. 中国人口·资源与环境, 2025,35(2):14-24.
- [7] CAO B, LI L Q, ZHANG K, et al. The influence of digital intelligence transformation on carbon emission reduction in manufacturing firms [J]. Journal of environmental management, 2024, 367: 121987.
- [8] 王玉燕,唐辰新. 智能制造如何提升企业碳全要素生产率:基于要素投入成本与结构的视角[J]. 技术经济, 2025,44(7):76-92.
- [9] 谷城,张树山. 智能制造何以实现企业绿色创新“增量提质”[J]. 产业经济研究, 2023(1):129-142.
- [10] ZHU M H, LIANG C, YEUNG A C L, et al. The impact of intelligent manufacturing on labor productivity: an empirical analysis of Chinese listed manufacturing companies[J]. International journal of production economics, 2024, 267: 109070.
- [11] YU K K, QIAN C, CHEN J L. How does intelligent manufacturing reconcile the conflict between process standards and technological innovation? [J]. Journal of engineering and technology management, 2022, 65: 101698.
- [12] LI Z S, XIE W H, WANG Z, et al. Antecedent configurations and performance of business models of intelligent manufacturing enterprises[J]. Technological forecasting and social change, 2023, 193: 122550.
- [13] LIU J, YANG Y J, CAO Y R, et al. Stimulating effects of intelligent policy on the performance of listed manufacturing companies in China[J]. Journal of policy modeling, 2021, 43(3):558-573.
- [14] 肖静华,吴小龙,谢康,等. 信息技术驱动中国制造转型升级:美的智能制造跨越式战略变革纵向案例研究[J]. 管理世界, 2021,37(3):161-179.
- [15] 裴军,周娅,彭张林,等. 高端装备智能制造创新运作:从平台型企业到平台型供应链[J]. 管理世界, 2023,39(1):226-240.
- [16] 杨善林,王建民,侍乐媛,等. 新一代信息技术环境下高端装备智能制造工程管理理论与方法[J]. 管理世界, 2023, 39(1): 177-190.
- [17] 张强,赵爽耀,蔡正阳. 高端装备智能制造价值链的生产自组织与协同管理:设计制造一体化协同研发实践[J]. 管理世界, 2023,39(3):127-140.
- [18] QI Q S, XU Z Y, RANI P. Big data analytics challenges to implementing the intelligent Industrial Internet of Things (IIoT) systems in sustainable manufacturing operations [J]. Technological forecasting and social change, 2023, 190: 122401.
- [19] 黄卓,陶云清,刘兆达,等. 智能制造如何提升企业产能利用率:基于产消合一的视角[J]. 管理世界, 2024,40(5):40-59.
- [20] MA S Y, DING W, LIU Y, et al. Industry 4.0 and cleaner production: a comprehensive review of sustainable and intelligent manufacturing for energy-intensive manufacturing industries [J]. Journal of cleaner production, 2024, 467: 142879.
- [21] FONTOURA L, LUIZ DE MATTOS NASCIMENTO D, NETO J V, et al. Energy gen-AI technology framework: a perspective of energy efficiency and business ethics in operation management [J]. Technology in society, 2025, 81: 102847.
- [22] ZHOU S J, SHAN F X. Discovery of innovation effect and spillover effect: evidence from intelligent manufacturing promoting low-carbon development [J]. Journal of innovation & knowledge, 2023, 8(3):100383.
- [23] NING J, JIANG X Y, LUO J M. Relationship between enterprise digitalization and green innovation: a mediated moderation model [J]. Journal of innovation & knowledge, 2023, 8(1): 100326.
- [24] SHEN Y, ZHANG X W. Intelligent manufacturing, green technological innovation and environmental pollution[J]. Journal of innovation & knowledge, 2023, 8(3): 100384.
- [25] IYER L S. AI enabled applications towards intelligent transportation[J]. Transportation engineering, 2021, 5: 100083.
- [26] ZHANG Q N, ZHANG F F, MAI Q. Robot adoption and green productivity: curse or boon [J]. Sustainable production and consumption, 2022, 34: 1-11.
- [27] REN X H, ZENG G D, SUN X M. The peer effect of digital transformation and corporate environmental performance: empirical evidence from listed companies in China [J]. Economic modelling, 2023, 128: 106515.
- [28] 周泽将,汪顺,张悦. 税制绿色化的微观政策效应:基于企业环保新闻文本情绪数据的检验[J]. 中国工业经济, 2023(7): 103-121.
- [29] SHEN Y C, FU Y Y, SONG M L. Does digital transformation make enterprises greener: evidence from China [J]. Economic analysis and policy, 2023, 80: 1642-1654.
- [30] 车帅. “节能低碳”政策能否实现企业绩效双赢[J]. 财经科学, 2022(9):91-106.
- [31] 甄红线,王玺,方红星. 知识产权行政保护与企业数字化转型[J]. 经济研究, 2023,58(11):62-79.
- [32] 江艇. 因果推断经验研究中的中介效应与调节效应[J]. 中国工业经济, 2022(5):100-120.

- [33] GAIOTTI E. Credit availability and investment: lessons from the “great recession” [J]. *European economic review*, 2013, 59: 212–227.
- [34] 张云, 韩云, 吕纤. 机构投资者绿色关注的减排作用与溢出效应[J]. *经济学动态*, 2023(10): 90–107.
- [35] 权小锋, 李闯. 智能制造与成本粘性: 来自中国智能制造示范项目的准自然实验[J]. *经济研究*, 2022, 57(4): 68–84.
- [36] 林熙, 刘啟仁, 冯桂媚. 智能制造与绿色发展: 基于工业机器人进口视角[J]. *世界经济*, 2023, 46(8): 3–31.
- [37] 杨德明, 刘泳文. “互联网+”为什么加出了业绩[J]. *中国工业经济*, 2018(5): 80–98.
- [38] 赵宸宇, 王文春, 李雪松. 数字化转型如何影响企业全要素生产率[J]. *财贸经济*, 2021, 42(7): 114–129.
- [39] 吴非, 胡慧芷, 林慧妍, 等. 企业数字化转型与资本市场表现: 来自股票流动性的经验证据[J]. *管理世界*, 2021, 37(7): 130–144.
- [40] 吴安兵, 龚星宇, 陈创练, 等. 非金融企业影子银行化的风险承担效应: 内在机制与经验证据[J]. *中国工业经济*, 2023(4): 174–192.
- [41] 徐佳, 崔碧波. 低碳城市和企业绿色技术创新[J]. *中国工业经济*, 2020(12): 178–196.
- [42] CLARKSON P M, LI Y, RICHARDSON G D, et al. Revisiting the relation between environmental performance and environmental disclosure: an empirical analysis [J]. *Accounting, organizations and society*, 2008, 33(4/5): 303–327.
- [43] 李青原, 肖泽华. 异质性环境规制工具与企业绿色创新激励: 来自上市企业绿色专利的证据[J]. *经济研究*, 2020, 55(9): 192–208.
- [44] RASMUSSEN S. *Production economics: the basic theory of production optimisation* [M]. Berlin: Springer, 2013.
- [45] 姚常成, 宋冬林, 范欣. 城市“规模”偏小不利于经济增长吗: 两种借用规模视角下的再审视[J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(8): 62–71.
- [46] 韩松花, 赵艺璇. 数字经济对中国能源“双控”目标的影响[J]. *中国人口·资源与环境*, 2024, 34(9): 67–75.
- [47] 赵培雅, 高煜, 孙雪. “双控”目标下产业智能化的节能降碳减排效应[J]. *中国人口·资源与环境*, 2023, 33(9): 59–69.
- [48] CHU Y Z, CHENG M W, ZHAO X Y, et al. Digital transformation, intelligent device utilization, and carbon emission reduction [J]. *Journal of digital economy*, 2023, 2: 175–189.
- [49] 孙伟. 精益生产理论在洗煤生产安全管理中的应用[J]. *能源与节能*, 2024(3): 234–237.
- [50] 李拓晨, 石籽祎, 韩冬日, 等. 数字经济发展与省域创新质量: 来自专利质量的证据[J]. *统计研究*, 2023, 40(9): 92–106.
- [51] ANDREWS D W K, STOCK J H. *Identification and inference for econometric models: essays in Honor of Thomas Rothenberg* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [52] 沈坤荣, 乔刚, 林剑威. 智能制造政策与中国企业高质量发展[J]. *数量经济技术经济研究*, 2024, 41(2): 5–25.
- [53] 王颖, 章扬. 企业数字化转型、策略性绿色创新与企业环境表现[J]. *经济研究*, 2024, 59(10): 113–131.
- [54] 朱艳丽, 张群芳, 姚遥. 碳排放权交易政策促进企业绿色二元创新了吗?[J]. *大连理工大学学报(社会科学版)*, 2025, 46(1): 65–76.
- [55] 刘春丽, 林斌. 基于深度学习的上市公司内部控制缺陷预测研究: 新理论与新方法[J]. *会计研究*, 2024(6): 119–134.
- [56] 陈智, 陈学广, 邓路. 内部控制质量影响公司债券契约条款吗?[J]. *会计研究*, 2023(6): 150–166.
- [57] 田利军, 李一博. 数字化转型对航空碳减排的影响研究: 基于内部控制与绿色技术创新双重效应的分析[J]. *价格理论与实践*, 2024(2): 174–178.
- [58] 孙群力, 韩朝升. 人才引进、个人所得税优惠与企业劳动收入份额[J]. *当代财经*, 2024(5): 44–57.
- [59] 曹翔, 姜璐, 于洋. 外资进入的碳排放效应及其对碳达峰的影响[J]. *气候变化研究进展*, 2024, 20(2): 205–219.
- [60] 曹虹剑, 易玉凌峰, 姜建刚. 碳市场绿色创新的动力机制: 产权界定还是市场交易?[J]. *财经研究*. 2024, 50(7): 80–94.
- [61] 范定祥, 余燕婷. 高管绿色认知对企业漂绿行为的影响: 兼论女性高管的调节作用[J]. *当代经济*, 2025, 42(1): 58–67.
- [62] 邓建平, 白宇昕. 海外背景董事能否改善企业环境信息披露质量[J]. *中国经济问题*, 2023(5): 53–67.
- [63] 张伯伟, 马凡慧. 智能制造如何提升产业链供应链韧性: 理论机制与实证检验[J]. *经济学动态*, 2024(11): 20–37.
- [64] 芦彩梅, 方真. 客户数字技术创新对供应商碳排放的影响: 供应链资金和创新“双溢出”的传导机制[J]. *西部论坛*. 2025, 35(1): 84–96.
- [65] 王贤彬, 林彩斌. 智能制造、技术整合与绿色技术创新[J]. *环境经济研究*, 2023, 8(4): 1–23.
- [66] 赵向琴, 赵超, 陈国进. 绿色技术创新、数字经济发展与经济绿色增长: 基于“增长”和“降碳”的视角[J]. *计量经济学报*, 2025, 5(1): 81–108.
- [67] 李波, 王权鼎, 甘天琦, 等. 企业数字化转型的减污效应研究: 基于“三方共治”的分析框架[J]. *产业经济研究*, 2023(5): 115–128.



Impact of intelligent manufacturing on corporate carbon emissions and its underlying mechanisms in the context of digital-intelligent integration

CHE Shuai¹, WANG Keliang²

(1. Business School, Zhengzhou University, Zhengzhou Henan 450001, China;

2. School of Economics, Ocean University of China, Qingdao Shandong 266100, China)

Abstract On the path of Chinese modernization, the deep integration of intelligent manufacturing and low-carbon development is not only a key path to achieve industrial upgrading, but also an important lever to implement the “dual carbon” goals. To break through the growth bottlenecks of traditional high energy consumption and high emissions, China needs to accelerate the transformation from being a “manufacturing power” relying on scale expansion to an “intelligent manufacturing power” focusing on technological empowerment and efficiency improvement, thereby promoting the coordinated progress of economic growth and ecological protection. This study utilized micro-level data of Chinese A-share listed companies from 2008 to 2022 and employed various econometric models to examine the heterogeneous impact of intelligent manufacturing on corporate carbon emissions and its underlying mechanisms. The findings revealed that: ① Intelligent manufacturing based on digital transformation could significantly reduce corporate carbon emissions. ② The discrete intelligent manufacturing model performed poorly in governing corporate carbon emissions, while the process-type and customized intelligent manufacturing models seem to be the future green development directions for Chinese enterprises. ③ Factors such as the nature of enterprise ownership, operational characteristics, and leadership traits exerted significant heterogeneous impacts on the carbon emission reduction effects of intelligent manufacturing. Specifically, compared with the enterprises of other ownership natures, private enterprises had more advantages in achieving carbon emission reduction through intelligent manufacturing. In terms of operational characteristics, enterprises with effective internal control mechanisms, those oriented towards low strategic innovation, and those with high capital intensity were more capable of releasing the environmental dividends of intelligent manufacturing. At the level of leadership traits, enterprises with prominent female leadership and international perspectives showed more significant performance in achieving carbon emission reduction effects through intelligent manufacturing. ④ Mechanism analysis revealed that intelligent manufacturing could reduce carbon emissions through promoting industrial chain intensification, green technology innovation, and environmental protection and governance. Therefore, the government should, based on the industry attributes and development stages of enterprises, guide them to choose suitable intelligent manufacturing models to avoid blindly following trends and provide differentiated policy support according to the heterogeneous characteristics of enterprises, such as offering special subsidies for private enterprises in upgrading their intelligent manufacturing and providing tax incentives for capital-intensive enterprises in green technology research and development. At the same time, the government should continuously strengthen the construction of industrial chain collaboration mechanisms, the establishment of green technology innovation platforms, and the supervision and assessment of environmental protection, and continuously facilitate the governance transmission path of intelligent manufacturing on corporate carbon emissions, so as to better realize its emission reduction effects.

Key words intelligent manufacturing; digital transformation; carbon emission; industrial chain

(责任编辑:田红)