

智能制造、技术整合与绿色技术创新

王贤彬 林彩斌*

摘要:充分发挥绿色技术的关键支撑作用是加快建立和健全绿色低碳循环发展经济体系的关键。本文将智能制造试点示范项目作为一项准自然实验,以2010—2021年中国A股制造业上市公司为研究对象,利用双重差分模型实证检验智能制造对企业绿色技术创新的影响效应。研究发现:智能制造能促进企业绿色技术创新水平的提高,技术整合在智能制造和企业绿色技术创新之间起正向中介作用。在异质性分析方面,智能制造对高水平和高难度的绿色技术创新活动、独立的研发创新和前端研发生产环节的创新活动的作用会更显著;当企业规模较大、资本较为密集以及位于东部地区时,智能制造对绿色技术创新的促进效应更为显著。研究结论可为提高企业绿色技术创新能力,进而推进制造业转型升级和高质量发展提供理论借鉴。

关键词:智能制造;绿色技术创新;技术整合;人工智能

一、引言

制造业是一个国家或地区经济实力和竞争力的重要标志,也是社会和谐的重要保障。近年来,我国制造业门类齐全,制造体系独立完整,制造规模名列前茅,已培育出众多高竞争力的优势产业。但“并联式”的工业发展过程也带来了诸多大而不强的问题,自主创新能力弱、资源能源利用率低、关键技术受制于人等短板仍较为突出。与此同时,新一轮科技革命和产业革命正在兴起,智能制造在全球范围内的快速发展为制造业转型升级提供新思路。作为一种新型生产方式,智能制造可以通过深度融合新一代信息技术和制造业技术,将数字化、网络

*王贤彬,暨南大学经济学院,暨南大学中观经济学研究中心,邮政编码:510620,电子邮箱:wangxianbin123@163.com;林彩斌(通讯作者),暨南大学经济学院,邮政编码:510620,电子邮箱:lincarissa@163.com。

本文系国家自然科学基金面上项目“中国政府创新目标规划的创新效应研究:理论机制、实证识别与政策设计”(72273052)、国家自然科学基金面上项目“行政审批改革的经济增长效应研究:理论机制、实证识别与政策设计”(71773038)和广东省自然科学基金面上项目“中国政府经济发展目标的经济效应研究”(2022A1515012025)的阶段性成果。感谢匿名审稿专家的宝贵建议,文责自负。

化和智能化贯穿于企业制造活动各环节,推动新型传感技术、高可靠实时通信等关键共性技术的创新,加快高档数控机床等关键技术装备和先进工艺的突破和推广,促进制造业重点领域智能转型,建立智能制造发展生态体系,推动制造业供给侧结构性改革的顺利进行。为在新一轮全球竞争中取得优势地位,我国出台的《智能制造发展规划(2016—2020年)》等一系列政策文件指出要把智能制造作为主攻方向,着力推动信息技术和制造技术的深度融合,加快建设制造强国和实现高质量发展。

资源消耗速度的错位与资源自我更新速度以及环境污染废弃物的排放速度与环境自我净化能力的不匹配问题是我国经济粗放式增长的衍生物之一。面对能源消耗速度加快和环境污染程度加深不断挤占经济发展空间的现状,习近平总书记在全国科技创新大会上指出我们要“依靠绿色技术创新破解绿色发展难题”。2022年,国家发展改革委和科技部联合印发的《关于进一步完善市场导向的绿色技术创新体系实施法案(2023—2025年)》也指示要充分利用绿色技术创新,加快节能减碳先进技术的研发和应用推广,推动绿色低碳循环发展经济体系的构建,促进碳达峰碳中和目标的实现,为高质量发展奠定良好基础。

企业是开展智能制造和绿色技术创新的关键主体,智能制造模式的实施定然会对企业绿色技术创新活动产生深刻影响(权小锋、李闯,2022)。同时,新产业组织理论曾提出“技术推动假说”,认为技术是创新的主要驱动力(芮明杰、余东华,2006),但技术并不能直接用于企业生产活动,而是需要对其进行识别整合(王文华等,2015)。面对技术多元化趋势,组合利用多样化技术的技术整合能力是企业高效利用技术进行研发创新和创造价值的关键。智能制造作为一种新型生产方式,可以通过大数据等新一代信息技术帮助企业提高技术整合能力,进而促进绿色技术创新。现有关于智能制造和绿色技术创新的文献较少,也鲜少将技术整合纳入考量范围。

因此,本文基于技术整合视角,利用双重差分模型实证检验智能制造对企业绿色技术创新水平的影响效应和技术整合能力的中介效应。本文研究的边际贡献体现在:第一,丰富有关定量分析智能制造实施效果的文献体系。囿于数据可得性,现有关于智能制造的研究较多停留在定性分析层面(王友发、周献中,2016;尹洪英、李闯,2022);而有关定量分析的文献,也多利用工业机器人、相关产业主营业务收入、人工智能技术水平等指标,难以真实全面体现智能制造的内涵(谷城、张树山,2023)。第二,拓展有关企业绿色技术创新的其他驱动因素。绿色技术创新是加快建立和健全绿色低碳循环发展经济体系的关键,对实现绿色转型和高质量发展具有重要意义。现有文献鲜少在技术整合的视角下,考虑智能制造对企业绿色技术创新的影响。第三,通过分析智能制造对绿色技术创新的传导路径和智能制造对绿色技术创新存在的异质性影响,力求为推动智能制造的实施和推广及提高企业绿色技术创新能力提供理论借鉴和启示。

二、文献综述

人工智能等新技术在制造领域的应用带动了智能制造相关研究的发展。智能制造概念最早由美国学者 Wright 和 Bourne(1988)在其出版的专著《智能制造》提出,他们将重心放在自主生产,认为智能制造是通过应用集成知识工程等技术使智能机器能够自主进行小批量生产。随后,学者们集中于对智能制造相关理论内容进行定性分析,其中包含智能制造的定义内涵、发展模式、发展现状、实施路径、影响因素等要素(左世全,2014;吕铁、韩娜,2015;李廉水等,2019;刘玉书、王文,2021)。

近年来,随着智能制造在中国的实践经验逐渐丰富,关于智能制造实施效果评估的定量分析研究也逐渐增加。在衡量指标上,大部分研究基于智能制造投入产出水平和智能化技术水平构建指标。在智能制造投入水平方面,主要使用工业机器人数据(杨晓锋,2018;Lv et al., 2022; Shen & Zhang, 2022; 林熙等, 2023)。在智能制造产出水平方面,郑江淮和冉征(2021)通过识别出的智能制造专利数量反映地区智能制造技术创新水平;宋旭光和杜军红(2021)采用高科技产业主营业务收入等指标分析智能制造发展对劳动收入份额的影响。在智能化技术水平方面,徐晔等(2022)利用人工智能技术水平作为智能制造的衡量指标,实证检验智能制造对出口技术复杂度的正向作用。杨浩昌等(2023)基于智能技术开发和服务水平构建指标体系分析智能制造对制造业高质量发展影响。但上述研究仅针对智能制造的某一方面或是采用间接指标,难以全面且真实反映智能制造的全部内涵。权小锋和李闯(2022)利用工信部发布的智能制造试点示范项目名单识别出智能制造企业,并利用此数据分析智能制造和企业成本粘性的关系。这种衡量方法基于工信部严格且多样的评选条件筛选出的试点企业名单,可以更为全面且真实体现智能制造的内涵。尹洪英和李闯(2022)、Sun 和 Saat(2023)、Zhu 等(2023)也采用此做法。

绿色技术创新是推动绿色转型和绿色发展的关键。学者们对此关注度较高,关于企业绿色技术创新的影响因素研究也较为丰富。一方面,与政府相关的环境规制、政府补助、宏观产业政策等外部因素会对企业绿色技术创新产生外在压力或是外在激励(王娟茹、张渝,2018;李青原、肖泽华,2020;Qin & Xie, 2023);另一方面,企业自身社会责任、经营状况、发展战略等内部因素也会影响企业绿色技术创新(王锋正、陈方圆,2018;Ma et al., 2021;Khan & Liu, 2022)。然而,尽管上述研究已对企业绿色技术创新的驱动因素进行了充分探讨,但仍较少涉及智能制造这一影响因素。已有研究表明,人工智能等新一代信息技术可以通过消除信息传递障碍、打破创新活动边界、提高旧技术的可扩展性等提高企业创新水平(王可、李连燕,2018;韩松岩,2022)。作为新一代信息技术和制造技术深度融合的产物,智能制造必然会对企业绿色技术创新产生深刻影响。此外,绿色技术创新是一项聚集多领域技术的活动,技术

整合能力是企业创新效率高低的關鍵(余菲菲、王丽婷,2022;宋德勇等,2022),但较少研究将技术整合纳入考量范围。

综合上述对既有文献的回顾和总结,可以发现相关研究存在以下改进空间:第一,有关定量分析智能制造实施效果的研究尚处于发展阶段,智能制造衡量指标多为间接指标且仅能反映智能制造的部分内涵,需要能更为全面且真实反映智能制造全部内涵的指标;第二,较少有学者关注智能制造这一新型生产方式对企业绿色技术创新的影响,也鲜少有学者考虑技术整合的中介效应。上述改进空间为本文提供了继续探讨的余地,本文也将基于此进行理论分析和实证研究。

三、理论分析与研究假说

(一)智能制造对企业绿色技术创新的作用

结合《智能制造发展规划(2016—2020年)》对智能制造的定义可知,智能制造是以移动物联网、云计算、大数据、工业互联网等新一代信息技术和先进制造技术的深度融合为基础,通过形成智能产品、智能生产、智能物流、智能服务等综合技术体系,将数字化、网络化和智能化贯穿于制造活动的各个环节,最终实现企业智能决策的新型生产方式(刘敏、严隽薇,2019)。具体而言,智能产品是智能制造的主体,通过加入智能元素提升产品附加值和竞争力;智能生产是智能制造的主线,以智能工厂为载体,涵盖产品研发、工艺设计、运营管理等多方面内容;智能物流强调通过运输管理等系统实现上下游企业和客户的信息共享,高效满足各方需求;智能服务则是强调以客户为中心,自动辨识客户需求,主动、高效满足其需求,顺应定制化规模生产的产业模式趋势(周济,2015;刘强,2020)。

绿色技术创新是对节能减排和改善生态的新兴技术的创新,其主要特点有三:多层次、高风险和弱内生动力。第一,绿色技术创新不局限于某一生产环节,其贯穿企业生产周期各环节。核心创新活动不仅包括在前端研发生产环节设计低耗能、低耗材、易分解、可循环利用的绿色产品,开发可再生、低污染的新能源,创新清洁生产工艺和生产设施,也包括在末端处理环节创新废弃物和排放物回收处理和重复利用技术(Chen et al.,2006)。第二,作为一项高知识密度的创新活动,绿色技术创新需要长周期和高强度投入人力资本、资金、技术等创新要素,但其前沿性也意味着收益的不确定性,二者的错位造就了绿色技术创新的高风险。第三,绿色技术创新具有的双重外部性(知识溢出和对环境的正外部性)易造成企业成本回收周期长的问题,再叠加其高风险性,企业易缺乏进行绿色技术创新的内生动力(Rennings,2000)。

企业采购、生产、销售等经营管理各环节产生的需求是绿色技术创新的“指南针”。智能制造的引入可以助力企业明确研发设计需求,辅助研发人员高效产出绿色技术创新成果,加快研发速度,减少绿色技术创新面临的不确定性。首先,智能制造可以通过应用新型数字技

术高效收集、处理和分析企业内部组织各系统衍生的海量数据,及时将各环节亟需绿色技术创新变革的问题反馈给研发设计人员;其次,智能制造可以基于云服务平台,利用智能产品和智能服务将消费者和企业供应链连结起来,高效输送消费者行为数据,准确辨识消费者的显隐性需求,实现两端信息共享;最后,智能制造可以利用智能制造自感知、自决策、自执行的功能为上述需求制定高质量的解决方案,突破研发人员脑力边界,提高研发效率(苏贝、杨水利,2018;赵宸宇,2021)。

绿色技术创新易面临长研发周期和高风险的困境,智能制造的实施可帮助解决上述问题。数字孪生和虚拟现实是支撑智能制造发展的关键技术。基于这两项技术可为现实企业物理实体(如产品、制造工艺装备、生产线等)构建高度仿真的“孪生体”,让研发人员在虚拟空间内对产品和工艺进行设计创新和仿真优化(刘强,2020)。一方面,传统的创新活动需提前投入建设实体设施,为研发试错提供载体。但低试错成功率易衍生实体设施重复建设、高投入成本和长研发周期问题。“孪生体”的使用不仅可以极大降低研发创新的试错成本,简化研发流程,缩短研发设计周期,也为大规模试错提供可能性,利于突破创新边界(肖静华等,2021)。另一方面,“孪生体”能基于动态数据自主决策和自主执行,拓宽研发人员的创新思路,提高一次研发成功率。

高效的绿色技术创新活动依赖于高效的企业管理方式。智能制造的实施加速了智能化设备和数字技术的应用,促使企业组织结构趋于网络化和扁平化,推动企业内部管理方式的变革(戚聿东、肖旭,2020;韦庄禹,2022)。这种变化简化了内部控制流程,注重小型团队的分散决策,减少了冗余层级组织结构给研发决策和研发投入带来的低效率影响;加速了各部门核心信息在内部组织的流转,促进不同环节间资源的交互,利于为研发创新环节提供各类资源和支持(黄键斌等,2022)。

如上所述,智能制造的引入可以帮助企业脱离绿色技术创新活动所面临的高风险和长周期的困境,提高绿色技术创新效率,从根本上激励企业自主开展绿色技术创新活动。基于此,本文提出假说1:

实施智能制造可以促进企业绿色技术创新水平的提高。

(二)技术整合的中介作用

技术是企业开展经营活动的关键要素。消费者对产品和服务的多元化需求带动了技术的纵深发展,技术多元化已成为趋势。如何识别、组合、应用不同的技术是企业利用多元化技术创造价值的关键(Jansen et al.,2005),而这与技术整合是不谋而合的。本文认为技术整合不仅包括识别、获取、吸收与公司经营管理有关的外部技术(Zahra & George,2002;何琳,2013),也包括利用、组合、配置内外部新旧技术,将其用于企业经营管理各环节,通过发挥多样化技术的协同互补作用提高企业竞争力(王文华等,2015;王锋正等,2022)。因此,下文进

行中介效应检验时,将技术整合能力分为吸收能力和转移利用能力两部分。

技术整合本质上是对科学知识、技术知识、经验知识等知识的吸收和转移利用过程(陈劲等,2007)。智能制造可以通过提高知识传递效率和知识消化能力提升吸收能力。一方面,知识传递过程本质上是信息传递过程(王可、李连燕,2018),但信息传递易受空间距离的限制(Malecki,1993)。智能制造利用信息技术构建的一系列数字平台和信息系统有助于打破信息传递壁垒,消除时空约束对信息传递的抑制作用,降低企业获取外部信息的成本,提高企业与外界信息的交互效率,促进企业对外部知识的识别获取,提高知识传递效率,增加企业知识存量,为企业绿色技术创新活动奠定良好基础(Paunov & Rollo,2016;肖静华等,2021)。另一方面,海量收集到的外部知识只有经过内在消化才能转化为价值创造动能。智能制造的实施实质上是人-信息-物理系统的构建和应用,其中起主导作用的信息系统具有强大的学习认知和产生知识的能力,不仅能利用算法对人输入的各种知识抽丝剥茧,提取有价值的信息输出到“知识库”,也能游刃有余地学习人力难以精确描述和处理的知识,推动企业知识存量的不断积累和优化(周济等,2019)。信息系统的引入替代了人的部分脑力劳动,将人类从复杂的知识分析处理活动中解放出来,提高了知识分析和处理效率,助力企业更高效地消化和吸收知识,为能创造更高价值的绿色技术创新活动提供丰厚的知识基础和脑力基础。

智能制造的实施可以提高企业组合配置内外部新旧技术的转移利用能力。一方面,智能制造天然具有的集成式智能化创新特征将技术组合嵌入其中,这能为企业组合配置不同技术提供强大驱动力(周济,2015)。另一方面,智能制造能利用大数据、云计算等新一代信息技术实现对企业研发设计、生产制造、产品销售等制造活动各环节信息的收集和整理,推动数据和知识在企业内部的畅通流动,增强对不同环节和不同类型技术的了解,为高效技术整合创造前提条件(赵宸宇等,2021)。在此基础上,智能制造的实时分析和自主学习功能有助于对多样化技术进行组合配置,促进技术价值转化,让企业更高效地整合利用新旧技术,提高技术整合能力,从而提高企业绿色技术创新能力(Niebel et al.,2019)。

如上所述,智能制造对企业吸收能力和转移利用能力具有促进作用。同时,二者对企业绿色技术创新也具有正向影响。一方面,吸收能力强的企业具有较强的学习能力和消化能力,可以高效地搜索吸纳与绿色技术创新相关的优质要素和知识,并将其为己所用,为绿色技术创新提供智力支持,提高企业绿色技术创新的研发成功率。Hashim等(2015)基于多元回归分析的结果证实了通过网络等途径学习和利用外部知识有助于企业利用相关技术来创造绿色创新成果,从外部知识中受益,即验证了企业吸收能力可以通过外部知识获取对绿色技术创新产生促进作用。Aboelmaged和Hashem(2019)发现吸收能力能对企业绿色技术创新产生积极的影响,论证了吸收能力不仅能帮助企业在可持续发展的导向下推动与环保相关举措的实施,还能促进企业与各利益相关者的绿色创新实践,从而为推进绿色环保新产品和服务的

开发以及推动企业绿色技术创新提供支撑。另一方面,转移利用能力强的企业可以高效地整合相关关键技术并组合配置内外部新旧技术,提高技术在生产实践中的应用能力,推动企业绿色技术创新水平的提高。Albort-Morant等(2018)利用结构方程模型发现企业知识技术的转化利用能力可以显著促进绿色技术创新,这种能力能帮助企业处理来自不同领域和组织内外部的大量知识,并将其与先前组织内部知识结合,最终转化为可供应对和解决环境问题的新产品、工艺、服务或流程,以此提高绿色创新绩效。Song等(2021)证明了知识转化能力和知识应用能力对企业绿色技术创新水平具有显著的正向影响,二者可以帮助企业重构认知结构以适应新的外部情况,并将知识、信息和资源转化为企业的新产品或新理念,促进绿色创新技术的交流和学习,培养绿色技术创新能力。

技术并不能直接用于企业生产活动,只有对其识别整合才能发挥其价值。智能制造可以通过促进技术整合推动绿色技术创新。一方面,智能制造可以通过提高知识传递效率和知识消化能力,帮助企业高效搜索吸收相关知识技术,推动新知识在企业内部的流转与传播,扩充组织内知识技术存量,为绿色技术创新提供源源不断的动力,提高企业绿色技术创新能力。另一方面,智能制造可以通过提高企业组合配置内外部新旧技术的转移利用能力,帮助企业处理整合复杂性高的新知识技术,推动新旧知识在绿色技术创新实践中的应用并转化为企业的新产品、新工艺、新理念等,进而实现企业绿色技术创新能力的再突破。基于此,本文提出假说2:

技术整合在智能制造和企业绿色技术创新之间起正向中介作用。

四、研究设计

(一)样本选取与数据来源

本文以2010—2021年中国A股上市的制造业公司为研究样本,借鉴权小锋和李闯(2022)的处理方法,根据工信部2015—2018年每年发布的《工业和信息化部关于公布智能制造试点示范项目名单的通告》遴选出已上市的智能制造试点企业。因企业正式启动时间和入选时间可能存在不一致,为保证准确性,采用手工查询的方法对试点企业历年年报进行检索和核实,识别遴选出的试点企业正式开展智能制造的年份。基于此,本文将遴选出的智能制造试点企业作为实施了智能制造的处理组企业,其他上市企业作为未实施智能制造的控制组企业,将智能制造试点示范项目作为一项准自然实验,利用双重差分方法实证检验智能制造的实施对企业绿色技术创新的促进作用。

本文的数据主要来源于中国研究数据服务平台(CNRDS)、希施玛数据库(CSMAR)和万德数据库(Wind)。在上述研究样本的基础上,剔除缺失相关数据和非正常交易的公司,并对主要连续变量做上下1%的缩尾处理,最终得到102个处理组企业和2970个控制组企业。

(二)模型构建与指标选取

1. 模型构建

基于双重差分模型,以智能制造试点示范项目作为政策冲击,构建如下模型检验智能制造对企业绿色技术创新的影响:

$$GIn_{it} = \beta_0 + \beta_1 IM_{it} + \beta_2 Z_{it} + \gamma_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

其中, GIn_{it} 为企业绿色技术创新水平。 IM_{it} 为企业是否在样本期间实施智能制造的虚拟变量,当企业为智能制造试点企业且考察年份大于等于该企业正式开展智能制造的年份,该虚拟变量为1,反之则为0。当其等于1时,表明该企业在该年实施了智能制造;当其等于0时,表明该企业在该年未实施智能制造。 Z_{it} 为控制变量集合; γ_i 为个体固定效应, γ_t 为时间固定效应, ε_{it} 为随机扰动项, i 表示企业, t 表示年份。 β_0 为截距项, β_1 为智能制造政策冲击系数,系数的绝对值和正负反映政策冲击对企业绿色技术创新能力的作用大小和作用方向。此外,本文将回归系数标准误聚类到企业层面。

2. 指标选取

(1)被解释变量。企业绿色技术创新水平的衡量指标一般有专利申请和授权量、研发投入以及新产品销售收入这三类(杨岷,2020)。基于数据可得性,本文采用绿色专利授权量作为被解释变量的衡量指标,原因如下:一是专利申请和授权已形成一套较为完整和规范的评审体系,相比于研发投入,绿色专利数据可以更为准确地反映企业绿色技术创新活动的成果;二是绿色专利数据可以在世界知识产权组织提出的“国际专利分类绿色清单”框架下划分不同类型,便于对企业绿色技术创新活动进行分类讨论;三是考虑到不同企业绿色专利申请成功率可能具有异质性,专利授权数据更能衡量企业创新活动的质量,因此采用绿色专利授权量以更精准地反映企业绿色技术创新的真实水平(齐绍洲等,2018;徐佳、崔静波,2020;陈洪涛等,2022)。

参考王馨和王营(2021)的处理方法,本文以绿色发明专利和绿色实用新型专利授权总量衡量企业绿色技术创新水平,并对授权总量加1后取自然对数。同时,因专利从申请到授权往往需要1~3年的时间(王班班、齐绍洲,2016),且企业研发是个长周期的过程,所以本文以 $t+3$ 期的绿色专利授权总量衡量 t 期的绿色技术创新水平,绿色专利授权总量越多,绿色技术创新水平越高。如无特别说明,本文采用的绿色专利授权数据都默认滞后3年。

(2)控制变量。为控制企业绿色技术创新的其他影响因素,结合现有研究,本文选取了以下控制变量:企业年龄,用考察年份减去企业注册年份的对数衡量;企业规模,用企业总资产的对数衡量;企业资产负债率,用企业总资产与总负债比值的对数衡量;企业流动比率,用企业流动资产与总资产的比值衡量;企业盈利水平,用企业净利润与总资产的比值衡量;企业现

现金流,用企业经营活动现金流量净额与总资产的比值衡量;资本密集度,用企业固定资产净额与营业收入的比值衡量。

(三)描述性统计

各主要变量的描述性统计如表1所示。由此可知,企业绿色技术创新水平的均值为0.379,标准差为0.741,说明企业间绿色技术创新能力仍有差异。

表1 主要变量描述性统计

变量	观测值	均值	标准差	最小值	最大值
绿色技术创新水平	17810	0.379	0.741	0	3.434
企业年龄	22489	2.771	0.381	0.693	3.434
企业规模	22489	21.870	1.236	18.970	25.470
资产负债率	22489	1.111	0.625	0.102	2.996
流动比率	22489	0.596	0.172	0.184	0.934
盈利水平	22489	0.152	0.169	-0.426	0.646
现金流	22489	0.124	0.207	-0.460	0.690
资本密集度	22489	0.136	0.110	0.007	0.612

五、实证结果及分析

(一)基准回归结果

根据模型(1),表2显示了智能制造对企业绿色技术创新的回归结果。在加入控制变量、个体和年份固定效应后,IM的估计系数在5%的显著性水平下仍显著为正,说明智能制造能促进企业绿色技术创新水平的提高,这也侧面反映了智能制造的实施对制造业绿色转型的作用,假说1成立。

表2 基准回归结果

	(1)	(2)	(3)	(4)
<i>IM</i>	0.684*** (0.121)	0.162** (0.070)	0.419*** (0.114)	0.180** (0.075)
常数项	0.368*** (0.013)	0.376*** (0.001)	-4.096*** (0.416)	-0.171 (0.400)
控制变量	否	否	是	是
个体固定	否	是	否	是
年份固定	否	是	否	是
样本量	17810	17432	13978	13882
R ²	0.013	0.747	0.130	0.752

注:括号内为标准误;***表示 $p < 0.01$, **表示 $p < 0.05$, *表示 $p < 0.1$ 。下表同。

(二)稳健性检验

1. 平行趋势检验

为确保处理组和控制组在政策冲击前保持相同的变化趋势,本文借鉴白俊红等(2022)的处理方法,采用事件分析法并构建如下模型进行平行趋势检验:

$$GIn_{it} = \beta_0 + \sum_{k \geq -6}^4 \beta_k D_{it}^k + \alpha Z_{it} + \gamma_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

其中, β_k 是各时间虚拟变量的估计系数,考虑智能制造实施前7年、当年和后4年的情况。为避免多重共线性,以-7期为基期,结果如图1所示。企业实施智能制造之前的时间虚拟变量估计系数不显著且数值较小,这表明政策冲击前,处理组和控制组企业在绿色技术创新水平上并无显著差异,即通过平行趋势检验。企业实施智能制造之后的时间虚拟变量估计系数是显著的且逐渐递增,这表明智能制造的实施对企业绿色技术创新水平具有正向效应。

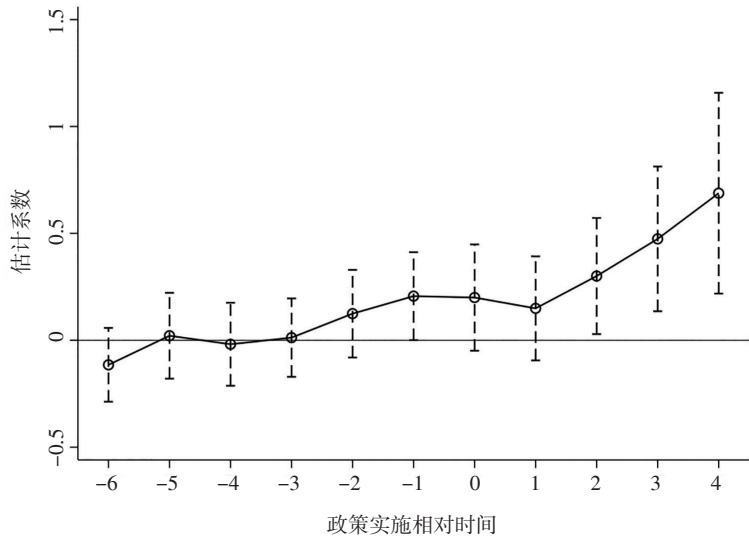


图1 平行趋势检验

2. 安慰剂检验

本文参考曹清峰(2020)的做法,从两方面进行安慰剂检验。一是随机提前企业实施智能制造的时间,在保证处理组企业名单不变的前提下,在2010年和企业实施智能制造的前一年中任选一年作为政策时点,利用新样本重新估计IM的系数,将此过程重复1000次,便可得到IM估计系数的分布情况。结果如图2所示。二是随机改变处理组,在不改变原先试点企业实施智能制造的年份分布情况的前提下,从未受过处理的控制组中随机抽取和该年处理组数目一样的控制组,也利用新样本重新估计IM的系数,将此过程重复1000次,得到结果如图3所

示。由图2和图3可知,两次安慰剂检验的 IM 估计系数分布都符合正态分布,且 IM 估计系数均值在0附近,相比于基准回归的0.18,该数值有明显的降低。这说明在考虑随机因素后,智能制造的实施仍会提高企业绿色技术创新水平。

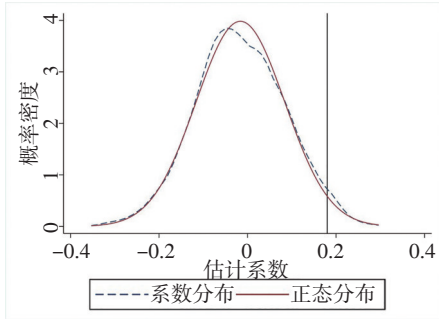


图2 随机提前政策时点

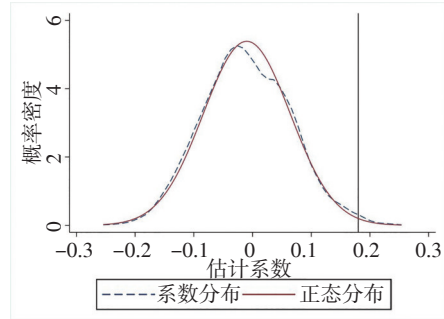


图3 随机改变处理组

3. 异质性处理效应

因多时点DID本质上是多个不同处理效应的加权平均,在存在负权重的情况下,估计结果会产生有偏性。为避免异质性处理效应对基准回归结果的干扰,本文先利用Stata软件命令估算所有处理效应参数的权重(De Chaisemartin & D'Haultfoeuille, 2020)。结果显示,有254个正权重和9个负权重,需做进一步稳健估计。本文借鉴刘冲等(2022)的思路,使用Borusyak等提出的插补估计量和Cengiz等提出的堆叠回归估计量。两种方法的结果显示,政策实施之前的估计系数都是不显著的,政策实施之后的估计系数是显著为正的,这表明考虑异质性处理效应后,智能制造的实施对绿色技术创新的促进作用仍然存在。

4. 考虑其他影响因素

环境规制是绿色技术创新的一大影响因素,关于其作用方向学界尚未有定论。“波特假说”认为政府可以通过环境规制降低企业竞争优势从而倒逼企业进行绿色技术革新(Porter, 1991);而传统的新古典学派认为环境规制会通过增加企业生产成本降低技术创新投入并抑制企业绿色技术创新,使企业生产效率和竞争优势大打折扣,最终形成恶性循环(Jaffe & Stavins, 1995)。但不论如何,环境规制能影响绿色技术创新是既定事实。

上市公司会定期披露相关环境治理信息,其中包含该公司是否属于环境保护部门公布的重点排污单位或是规定的重污染行业信息。若为重点排污单位,需按照相关政策规定安装自动监测设备、如实公开环境信息,在规定标准内进行排放,若超标排放将被挂牌督办。相比于非重点排污单位,重点排污单位受到的环境规制强度较高。因此,为排除环境规制的影响,本文仅使用非重点排污单位的企业进行回归。结果如表3的第(1)列所示, IM 的估计系数在10%的水平下显著为正,与基准回归结果一致,说明在考虑环境规制影响后,智能制造仍可以促进绿色技术创新水平的提高。

5. 考虑样本选择偏差

为避免样本选择性偏差对基准回归结果的干扰,本文参考白俊红等(2022)的处理方法,采用PSM-DID的方法进行稳健性检验。PSM一般适用于截面数据,而DID一般适用于面板数据,因此对于多时点PSM-DID有截面匹配和逐年匹配两种方法。本文依次采用两种方法进行匹配,匹配变量为基准回归中的控制变量,匹配方法采用1:1近邻匹配法。在完成匹配后,分别对平衡性假设和共同支撑假设进行检验,结果显示基本满足。最后使用满足共同支撑条件的样本进行回归,结果如表3的第(2)列和第(3)列所示, IM 的估计系数在10%的显著性水平下显著为正,说明智能制造的实施可以促进企业绿色技术创新水平的提高。

表3 稳健性检验结果 I

	(1)	(2)	(3)	(4)
	考虑其他影响因素	截面PSM	逐年PSM	CEM匹配
IM	0.173* (0.100)	0.179** (0.075)	0.173* (0.091)	0.226*** (0.0629)
常数项	-0.714* (0.421)	-0.205 (0.439)	-0.537 (0.472)	-10.130*** (0.489)
控制变量	是	是	是	是
个体固定	是	是	是	是
年份固定	是	是	是	是
样本量	11701	13342	10584	2800
R^2	0.768	0.751	0.747	0.264

此外,考虑到PSM方法需满足一定的假设条件且对模型依赖性较强,为使基准回归结论更为稳健,本文在此基础上改变配对方法,采用CEM(Coarsened Exact Matching)方法进行匹配。CEM方法的核心在于先基于一定的准则对协变量进行分层,再根据样本分布精确匹配研究对象,得到相应的匹配权重,最后基于该权重对原始样本进行回归,估算处理效应(Iacus et al., 2012)。相较于PSM,其有如下优势:第一,CEM直接根据样本数据的经验分布进行匹配,满足共同支撑假设,无需再对此进行检验;第二,CEM只需在匹配前选择粗化程度,无需再通过调整模型设定来保证处理组和控制组之间的平衡性,增强了组间数据的可比性;第三,CEM根据协变量的理论分布进行匹配,无需利用Logistic等回归模型估算倾向得分值进行匹配,减少了对模型的依赖;第四,CEM通过在匹配过程中产生匹配权重,放松对处理组和控制组数量一致的要求,更能反映政策的真实效果(石大千等, 2020; 尹志锋等, 2021; 李磊等, 2021)。基于此,本文选取企业规模、所在行业、资产负债率这三个协变量进行匹配,最终结果显示L1统计量大大降低,表明匹配后处理组(在样本期间内实施了智能制造的企业)和控制组(在样本期间内未实施智能制造的企业)间的平衡性提高,匹配结果较好。最后在匹配权重的基础上

进一步考察智能制造对绿色技术创新的影响,结果如表3的第(4)列所示,IM的估计系数在1%的显著性水平下显著为正,进一步加强了基准回归结果的稳健性。

6. 替换被解释变量指标

考虑到有些专利在申请过程中就已经对企业创新活动产生影响(齐绍洲等,2018),本文选用有时效性的绿色专利申请总量作为补充指标。结果如表4的第(1)列和第(2)列所示,其中第(1)列未考虑时滞,采用 t 期的绿色专利申请总量作为绿色技术创新水平的衡量指标,第(2)列考虑研发长周期的特点,以 $t+1$ 期的绿色专利申请总量衡量 t 期的绿色技术创新水平。结果显示,两个模型的IM的估计系数在5%的显著性水平下都显著为正,这也进一步加强了基准回归结论的稳健性。

7. 考虑行业年度趋势

制造业门类众多,不同细分行业对智能制造的实施情况可能不一。同时,因样本考察年份跨度较大,制造业可能产生周期变动。为避免行业的异质性以及行业周期性变动对基础回归结果带来的偏差,本文参考潘越等(2020)的方法,在考虑行业固定效应的基础上,在基础回归中加入行业和年份的交乘项用以控制行业年度趋势,结果如表4的第(3)列和第(4)列所示,IM的估计系数在5%的显著性水平下都是显著为正的,与基准回归结果一致。

表4 稳健性检验结果II

	(1)	(2)	(3)	(4)
	绿色专利申请总量(t)	绿色专利申请总量($t+1$)	考虑行业固定效应	考虑行业年度趋势
IM	0.213** (0.085)	0.201*** (0.078)	0.180** (0.076)	0.171** (0.073)
常数项	-0.789* (0.429)	-0.386 (0.433)	-0.171 (0.402)	0.025 (0.396)
控制变量	是	是	是	是
个体固定	是	是	是	是
年份固定	是	是	是	是
行业固定			是	是
行业年份交乘			否	是
样本量	21046	18483	13882	13560
R ²	0.706	0.718	0.752	0.765

(三) 中介效应检验

传统中介效应检验依托于三步法,观察三个模型估计系数的显著性和大小。但是在把中介变量M加入处理变量D和结果变量Y回归的模型中,M易成为“坏控制”,导致估计的有偏性。因此,本文借鉴江艇(2022)提供的方法,仅检验两步:智能制造(D)对企业绿色技术创新(Y)的作用以及智能制造(D)对中介变量技术整合能力(M)的作用。前者基于模型(1),后者基于如下模型(3)。至于技术整合能力和绿色技术创新的关系,相关研究和前文理论分析可

提供佐证。

$$M_{it} = \beta_0 + \beta_1 IM_{it} + \beta_2 Z_{it} + \gamma_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

对于技术整合能力的衡量,既有研究大部分是通过问卷调查的形式获取数据。基于数据可得性,本文依据理论分析部分对技术整合能力划分的两种类型选取衡量指标。在吸收能力方面,人力资本水平是影响企业吸收能力的重要因素,本文选取研发人员占比和研究生及以上学历占比作为衡量企业吸收能力的代理变量,相关人员越多、学历越高,对外部技术的敏感性和吸收消化能力也越高(王锋正等,2022)。在转移利用能力方面,本文从产出的角度选取企业无形资产净额和开发支出的增量作为衡量企业转移利用能力的代理变量。企业无形资产净额主要包括专利权、非专利技术无形资产扣除摊销和减值准备后的金额,开发支出是指开发过程中资本化但未结转为无形资产的部分。二者之和的增量可以在一定程度上反映企业对内外部新旧技术进行整合和转移利用的产出,增量越大,企业技术转移利用能力也越高。同时,考虑企业间规模和创新基础的异质性,本文将企业无形资产净额和开发支出的增量占总资产的比重作为稳健性指标。

结果如表5所示,第(1)列企业吸收能力采用研发人员占比指标,第(2)列企业吸收能力采用研究生及以上学历占比指标,第(3)列和第(4)列企业转移利用能力分别采用企业无形资产净额和开发支出的增量及其占比指标。这四列 IM 的估计系数至少在10%的显著性水平下都显著为正,说明智能制造模式的推广可以促进企业技术整合能力的提高,中介效应存在且为正向中介,假说2成立。智能制造基于新数字基础设施加速了企业外部技术在企业内部组织的传播速度和消化速度,提高了内外部新旧技术的整合和配置效率,间接促进了企业绿色技术创新水平的提高。此外,这也为重视高技能高素质高水平人才的培养以增强企业对外部技术的学习能力从而促进绿色技术创新提供参考依据。

表5 中介效应检验结果

	(1)	(2)	(3)	(4)
	吸收能力	吸收能力	转移利用能力	转移利用能力
IM	0.626** (0.283)	1.123* (0.603)	0.448** (0.181)	0.428** (0.184)
常数项	-4.169 (4.128)	-3.383 (6.599)	-5.640*** (1.902)	-6.184*** (1.933)
控制变量	是	是	是	是
个体固定	是	是	是	是
年份固定	是	是	是	是
样本量	14339	20044	5093	5093
R^2	0.902	0.835	0.579	0.392

(四)异质性分析

1. 绿色技术创新的难度

专利有发明专利、实用新型专利和外观设计专利之分,三者的创新性、申请和授权的难度依次递减。其中发明专利技术门槛和研发难度都较高,一旦获得授权,产生的经济效益也是最高的(杨岫,2020)。依据不同绿色专利类型的申请和授权数据,本文分别构建绿色发明专利授权、绿色发明专利申请、绿色实用新型专利授权和绿色实用新型专利申请四个子样本,以进一步考察智能制造的实施对企业绿色技术创新活动不同难度等级的异质性影响。结果如表6所示,其中绿色发明专利申请和绿色实用新型专利申请分别用 t 期和 $t+1$ 期的申请量来衡量。

由表6可知,第(1)列至第(3)列 IM 的估计系数在至少5%的显著性水平下均是显著为正,而第(4)列至第(6)列 IM 的估计系数却不显著,意味着智能制造的实施对绿色发明专利有显著的正影响,但对绿色实用新型专利却没有显著影响。这说明了智能制造主要是对绿色发明专利这类高水平和高难度的绿色创新活动起作用,也从侧面反映了智能制造模式的推广对高质量发展战略的推动。其可能的原因在于以往传统的创新活动主要依靠人类的脑力和局限性较大的数字基础设施,难以突破人脑思维限制,造就关键核心技术难以攻克的尴尬局面。强大的智能制造系统能为企业高难度的创新活动提供密集智力支持,拓宽研发创新的思维边界,为高技术含量研发创新活动的成功提供更多可能性。相比于没有开展智能制造的企业,实施了智能制造的企业研发重心应在于高精尖技术的突破和高附加值产品的研发。如果仅围绕实用新型专利这类创新性较低的研发活动,未免有些大材小用。此外,理性经济人也不会允许高投入和低回报这类投入产出不对等局面的存在。

表6 绿色技术创新难度的异质性分析

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	绿色发明专利授权	绿色发明专利申请(t)	绿色发明专利申请($t+1$)	绿色实用新型专利授权	绿色实用新型专利申请(t)	绿色实用新型专利申请($t+1$)
IM	0.161** (0.064)	0.207*** (0.072)	0.180*** (0.065)	0.105 (0.068)	0.078 (0.075)	0.082 (0.069)
常数项	-0.341 (0.230)	-0.871** (0.347)	-0.600* (0.357)	-0.002 (0.369)	-0.342 (0.330)	-0.118 (0.324)
控制变量	是	是	是	是	是	是
个体固定	是	是	是	是	是	是
年份固定	是	是	是	是	是	是
样本量	13882	21046	18483	13882	21046	18483
R^2	0.691	0.694	0.709	0.682	0.627	0.638

2. 绿色技术创新的组织形式

创新是一项知识密集型和技术密集型的活动,其组织形式有独立创新和联合创新之分。独立创新需要企业自行承担研发投入,但这也意味着创新收益可以自己独享;联合创新可以将研发成本分摊给合作人,但也面临着收益分配不均等诸多不确定性问题(陶锋等,2021)。依据绿色专利独立或联合申请及授权的数据,本文分别构建绿色专利独立授权、联合授权、独立申请和联合申请四个子样本,以进一步考察智能制造的实施对绿色技术创新活动组织形式的异质性影响。结果如表7所示,其中独立申请和联合申请分别用 t 期和 $t+1$ 期的申请量来衡量。

表7 绿色技术创新组织形式的异质性分析

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	独立授权	联合授权	独立申请(t)	独立申请($t+1$)	联合申请(t)	联合申请($t+1$)
IM	0.156** (0.069)	0.076 (0.051)	0.154** (0.078)	0.127* (0.070)	0.097** (0.042)	0.116** (0.048)
常数项	-0.198 (0.354)	-0.034 (0.243)	-0.330 (0.406)	-0.171 (0.401)	-0.497** (0.218)	-0.153 (0.225)
控制变量	是	是	是	是	是	是
个体固定	是	是	是	是	是	是
年份固定	是	是	是	是	是	是
样本量	13882	13882	21046	18483	21046	18483
R^2	0.733	0.629	0.682	0.693	0.569	0.586

由表7可知,除第(2)列 IM 的估计系数不显著外,其他列 IM 的估计系数均在10%的水平下显著为正。其中,独立申请样本的 IM 估计系数大于联合申请样本的 IM 估计系数。这意味着智能制造对企业独立进行绿色技术创新的作用更加显著,作用强度也更大,也暗含着智能制造模式的推广有利于企业自主创新能力的提高。智能制造的引入能帮助企业缓解绿色技术创新所面临的高风险和不确定性问题,起到降本增效和激励自主创新的作用。对于实施了智能制造的企业,其无需在成本压力下与他人联合创新,也无需承担最终收益分配不均等风险,创新收益独享会驱使企业独立进行创新。因此,这就致使智能制造对企业独立创新的作用更显著。

3. 绿色技术创新的领域

绿色技术创新具有多层次的特点,主要要求在前端研发生产环节要开发能源节约的产品和工艺,也要积极寻求能替代高耗能和高污染旧能源的新能源,实现提高能源使用效率和降低能源消耗量的目标;在末端治理环节要开发能治理废弃物和排放物的产品和工艺,达到环保减排的目的。根据世界知识产权组织推出的“国际专利分类绿色清单”,绿色专利可以分为七大类。基于已授权的绿色专利,本文选取与企业绿色技术核心创新活动相关的三类绿色专

利(能源节约类、替代能源生产类、废弃物管理类)构建子样本,考察智能制造的实施对企业绿色技术创新领域的异质性影响。结果如表8所示。

由表8可知,能源节约类和替代能源生产类样本的 IM 估计系数在10%的水平下显著为正,废弃物管理类样本的 IM 估计系数不显著。这反映了智能制造的实施对绿色技术创新的作用主要集中于前端研发生产环节,对末端治理环节的作用还不显著。这可能与企业进行绿色技术创新的出发点有关。以盈利为目的的企业进行绿色技术创新大多首要考虑经济绩效,通过研发高附加值的绿色产品和服务抢占市场份额,提高企业竞争力,从而导致目前智能制造模式的作用在前端研发生产环节比较显著。

表8 绿色技术创新领域的异质性分析

	(1)	(2)	(3)
	能源节约类	替代能源生产类	废弃物管理类
IM	0.238* (0.136)	0.272* (0.148)	-0.007 (0.199)
常数项	-3.781** (1.656)	-3.058 (1.977)	-1.158 (1.595)
控制变量	是	是	是
个体固定	是	是	是
年份固定	是	是	是
样本量	2783	2283	2154
R^2	0.674	0.592	0.624

4. 企业规模

为考察不同企业规模下智能制造对企业绿色技术创新是否存在异质性影响,本文根据前文采用的方法衡量企业规模,小于中位数的样本划为小规模企业,其余样本划为大规模企业。

结果如表9的第(1)列和第(2)列所示。由此可知,大规模企业的 IM 估计系数在5%的水平下显著为正,而小规模企业的 IM 估计系数却不显著。这表明智能制造对绿色技术创新的促进作用在大规模企业中更为显著,其原因可能在于以下两点。第一,相较于大规模企业,小规模企业的体量较小,相应的智能化发展基础较为薄弱,导致智能制造对绿色技术创新的促进作用并不显著。第二,与小规模企业相比,大规模企业体量大,所包含的组织机构的复杂性易造就信息获取成本高、管理效率低下、资源冗余等问题,阻碍企业创新活动的开展(尹洪英、李闯,2022)。而前文理论分析指出,智能制造的实施可以通过应用智能化设备和数字技术,加速各部门核心信息在内部组织的流转,简化内部控制流程,减少冗余层级组织结构给研发决策和研发投资带来的低效率影响,推动企业绿色技术创新。在此背景下,智能制造对绿色技术创新的促进作用在大规模企业中更为显著。

5. 企业要素密集度

为考察不同企业要素密集度下智能制造对企业绿色技术创新是否存在异质性影响,本文借鉴刘贯春等(2021)的做法,采用固定资产净值与员工总数的比值来度量企业要素密集度,小于中位数的样本划为劳动密集型企业,其余样本划为资本密集型企业。

结果如表9的第(3)列和第(4)列所示。由此可知,资本密集型企业的 IM 估计系数在1%的水平下显著为正,但劳动密集型企业的 IM 估计系数却不显著。这表明智能制造对资本密集型企业的绿色技术创新的影响更为显著,其原因可能在于,相较于劳动密集型企业,资本密集型企业对劳动力的依赖程度较小,对生产设备等资本要素需求较大,运用智能化设备的经验更加丰富,配套设施也更为齐全,更能发挥智能制造的促进作用。

6. 企业所在地区

囿于人文、自然要素禀赋等的差异,中国区域发展不平衡问题始终存在。在雄厚的要素基础支撑下,东部地区经济率先发展,这也带动了地区基础设施的完善,加速了资本、劳动等要素的区域集聚,为绿色技术创新活动注入源源不断的动力。相较于此,中西部地区人口密度较低,经济基础较为薄弱,绿色技术创新水平相对滞后。在此背景下,为检验地理区位因素的差异是否会导致智能制造对企业绿色技术创新的影响效应产生变化,本文按照企业所在地区将样本划分东部地区和中西部地区样本,考察不同地理区位条件下智能制造对企业绿色技术创新的影响的异质性。

结果如表9的第(5)列和第(6)列所示。由此可知,东部地区样本的 IM 估计系数在5%的显著性水平下显著为正,而中西部地区样本的 IM 估计系数却不显著。这表明了智能制造对企业绿色技术创新的促进作用仅在东部地区显著。尽管智能制造能通过生产方式的变革助力企业解决绿色技术创新面临的痛点和难点,推动绿色技术创新,但地理区位不同带来的区域基础设施、要素集聚等因素的差异仍会影响智能制造作用的发挥。

表9 不同企业特征的异质性分析

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	大规模	小规模	资本密集型	劳动密集型	东部地区	中西部地区
IM	0.198** (0.0926)	-0.009 (0.0568)	0.229*** (0.0780)	0.231 (0.141)	0.274** (0.112)	0.116 (0.117)
常数项	-0.418 (0.927)	-0.827* (0.469)	0.494 (0.593)	-0.251 (0.597)	-0.460 (0.525)	0.028 (0.506)
控制变量	是	是	是	是	是	是
个体固定	是	是	是	是	是	是
年份固定	是	是	是	是	是	是
样本量	6699	6959	6414	7165	9701	4181
R^2	0.802	0.704	0.772	0.792	0.769	0.753

六、结论与政策启示

充分发挥绿色技术的关键支撑作用是加快建立和健全绿色低碳循环发展经济体系的关键。作为市场经济活动的主要参与者,企业提高绿色技术创新水平有利于加快完善市场导向的绿色技术创新体系。作为一种新型生产方式,智能制造模式的推广必然会对企业绿色技术创新活动产生深刻影响。本文将智能制造试点示范项目作为一项准自然实验,以2010—2021年中国A股制造业上市公司为研究对象,利用双重差分模型实证检验智能制造的实施对企业绿色技术创新水平的影响效应和传导机制。研究发现:(1)智能制造模式的推广可以推动企业绿色技术创新水平的提高,经过一系列稳健性检验后该结论仍然成立。(2)智能制造模式的推广可以通过提高企业吸收能力和转移利用能力,也即通过提高技术整合能力提高绿色技术创新水平。(3)智能制造模式的推广对不同方面的绿色技术创新难度、绿色技术创新组织形式和绿色技术创新领域会产生异质性的影响。具体而言,智能制造对高水平和高难度的绿色技术创新活动、独立的研发创新和能源节约类、替代能源生产类的创新活动的作用会更显著。(4)智能制造对企业绿色技术创新的推动作用在大规模企业、资本密集型企业以及位于东部地区的企业更为显著。

基于上述结论,本文的政策启示如下:

第一,加强统筹组织协调能力,积极推进与智能制造相关的高技能高素质人才培养行动。从本文研究发现可知,智能制造可以通过提高技术整合能力促进绿色技术创新,而人力资本是决定技术整合能力高低的关键要素。因此,应鼓励支持创新活动主体单位建立实训基地和开发人才综合服务系统,促进智能制造人才供需匹配。

第二,健全财税金融支持体系和政策法规规范体系,增强企业开展有关节能减排创新活动的内生动力。从本文研究发现可知,智能制造对企业末端治理环节的创新活动作用并不显著,这可能与企业重经济绩效轻环境绩效有关。因此,可以通过补助、排污权交易等多形式的手段激发企业进行末端治理的内生动力。

第三,积极构建企业间协作平台,推动企业间智能制造协同发展。从本文研究发现可知,智能制造的影响效应在小规模企业和劳动密集型企业中并不显著,这可能与这些企业智能化发展基础较为薄弱有关。智能制造试点示范项目是推广智能制造的先头兵,目前智能制造模式在重点地区和行业已有标杆企业,后续如何在相关行业推广应用先进经验和模式是组织实施好智能制造工程的关键。因此,可以鼓励有条件的龙头企业建立协作平台,针对这些企业的实际需求向其提供相应的数据信息、产品和服务,引领带动小规模企业和劳动密集型企业智能化改造的落地生根,促进企业间智能制造的协同发展。

第四,充分调动各方积极性,积极推进区域间智能制造协同发展。从本文研究发现可知,

智能制造的影响效应在位于中西部地区的企业中并不显著,这可能与中西部地区基础设施较为薄弱、要素集聚能力较弱等因素有关。因此,地方政府可完善相应基础设施建设,改善营商环境,加强各方联系,推动与发展水平较好的地区的合作,促进区域间人才、资金等要素的流动,实现区域间智能制造协同发展。

参考文献:

- [1] 白俊红,张艺璇,卞元超.创新驱动政策是否提升城市创业活跃度——来自国家创新型城市试点政策的经验证据[J].中国工业经济,2022,(6):61-78.
- [2] 陈劲,邱嘉铭,沈海华.技术学习对企业创新绩效的影响因素分析[J].科学学研究,2007,(6):1223-1232.
- [3] 陈洪涛,骆辰姣,王彬龙.绿色技术创新对权益资本成本的影响——基于企业竞争力与投资者关注视角[J].环境经济研究,2022,7(4):103-123.
- [4] 曹清峰.国家级新区对区域经济增长的带动效应——基于70大中城市的经验证据[J].中国工业经济,2020,(7):43-60.
- [5] 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.
- [6] 黄键斌,宋铁波,姚浩.智能制造政策能否提升企业全要素生产率[J].科学学研究,2022,40(3):433-442.
- [7] 何琳.我国汽车企业外部技术整合发展路径及能力演化研究[D].北京:北京交通大学,2013.
- [8] 韩松岩.人工智能技术对企业数字创新的影响研究[J].工业技术经济,2022,41(11):13-22.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 李廉水,石喜爱,刘军.中国制造业40年:智能化进程与展望[J].中国软科学,2019,(1):1-9+30.
- [12] 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.
- [13] 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,(8):3-31.
- [14] 刘冲,沙学康,张妍.交错双重差分:处理效应异质性与估计方法选择[J].数量经济技术经济研究,2022,(9):177-204.
- [15] 刘贯春,叶永卫,张军.社会保险缴费、企业流动性约束与稳就业——基于《社会保险法》实施的准自然实验[J].中国工业经济,2021,(5):152-169.
- [16] 刘敏,严隽薇.智能制造理念、系统与建模方法[M].北京:清华大学出版社,2019.
- [17] 刘强.智能制造理论体系架构研究[J].中国机械工程,2020,31(1):24-36.
- [18] 刘玉书,王文.中国智能制造发展现状和未来挑战[J].人民论坛·学术前沿,2021,(23):64-77.
- [19] 吕铁,韩娜.智能制造:全球趋势与中国战略[J].人民论坛·学术前沿,2015,(11):6-17.
- [20] 潘越,汤旭东,宁博,等.连锁股东与企业投资效率:治理协同还是竞争合谋[J].中国工业经济,2020,(2):136-164.
- [21] 齐绍洲,林岫,崔静波.环境权益交易市场能否诱发绿色创新?——基于我国上市公司绿色专利数据的证据[J].经济研究,2018,(12):129-143.
- [22] 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.
- [23] 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,(4):68-84.
- [24] 芮明杰,余东华.西方产业组织理论中技术创新思想的演进与发展[J].研究与发展管理,2006,(4):1-7+14.
- [25] 石大千,李格,刘建江.信息化冲击、交易成本与企业TFP冲击基于国家智慧城市建设的自然实验[J].

财贸经济,2020,41(3):117-130.

[26] 宋德勇,朱文博,丁海. 企业数字化能否促进绿色技术创新?——基于重污染行业上市公司的考察[J]. 财经研究,2022,48(4):34-48.

[27] 宋旭光,杜军红. 智能制造如何影响劳动收入份额——基于中国省级面板数据的实证研究[J]. 经济理论与经济管理,2021,41(11):79-96.

[28] 苏贝,杨水利. 基于扎根理论的制造企业智能化转型升级影响因素研究[J]. 科技管理研究,2018,38(8):115-123.

[29] 陶锋,赵锦瑜,周浩. 环境规制实现了绿色技术创新的“增量提质”吗——来自环保目标责任制的证据[J]. 中国工业经济,2021,(2):136-154.

[30] 王班班,齐绍洲. 市场型和命令型政策工具的节能减排技术创新效应——基于中国工业行业专利数据的实证[J]. 中国工业经济,2016,(6):91-108.

[31] 王锋正,刘向龙,张蕾,等. 数字化促进了资源型企业绿色技术创新吗? [J]. 科学学研究,2022,40(2):332-344.

[32] 王锋正,陈方圆. 董事会治理、环境规制与绿色技术创新——基于我国重污染行业上市公司的实证检验[J]. 科学学研究,2018,36(2):361-369.

[33] 王娟茹,张渝. 环境规制、绿色技术创新意愿与绿色技术创新行为[J]. 科学学研究,2018,36(2):352-360.

[34] 王可,李连燕. “互联网+”对中国制造业发展影响的实证研究[J]. 数量经济技术经济研究,2018,35(6):3-20.

[35] 王文华,张卓,陈玉荣,等. 基于技术整合的技术多元化与企业绩效研究[J]. 科学学研究,2015,33(2):279-286.

[36] 王馨,王莹. 绿色信贷政策增进绿色创新研究[J]. 管理世界,2021,(6):173-188.

[37] 王友发,周献中. 国内外智能制造研究热点与发展趋势[J]. 中国科技论坛,2016,(4):154-160.

[38] 韦庄禹. 数字经济发展对制造业企业资源配置效率的影响研究[J]. 数量经济技术经济研究,2022,39(3):66-85.

[39] 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.

[40] 徐佳,崔静波. 低碳城市和企业绿色技术创新[J]. 中国工业经济,2020,(12):178-196.

[41] 徐晔,朱婕,陶长琪. 智能制造、劳动力技能结构与出口技术复杂度[J]. 财贸研究,2022,33(3):16-27.

[42] 杨浩昌,罗雨成,李廉水. 智能制造对制造业高质量发展的影响研究——基于“量”与“质”的视角[J/OL]. 科学学研究:1-15[2023-09-28]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1805.G3.20230906.0935.002.html>.

[43] 杨媚. 股票市场对企业绿色技术创新的影响研究——以A股上市公司为例[D]. 武汉:武汉大学,2020.

[44] 杨晓锋. 智能制造是否有助于提升制造业平均工资?——基于2001~2016年17省工业机器人数据研究[J]. 经济体制改革,2018,(6):169-176.

[45] 尹洪英,李闯. 智能制造赋能企业创新了吗?——基于中国智能制造试点项目的准自然实验[J]. 金融研究,2022,(10):98-115.

[46] 尹志锋,余玲,邵艳芳. 高管物质激励及非物质激励对中国小微企业创新水平影响研究[J]. 中央财经大学学报,2021,(3):115-128.

[47] 余菲菲,王丽婷. 数字技术赋能我国制造企业技术创新路径研究[J]. 科研管理,2022,43(4):11-19.

[48] 赵宸宇. 数字化发展与服务化转型——来自制造业上市公司的经验证据[J]. 南开管理评论,2021,24(2):149-163.

[49] 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.

- [50] 郑江淮, 冉征. 智能制造技术创新的产业结构与经济增长效应——基于两部门模型的实证分析[J]. 中国人民大学学报, 2021, 35(6): 86–101.
- [51] 周济. 智能制造——“中国制造 2025”的主攻方向[J]. 中国机械工程, 2015, 26(17): 2273–2284.
- [52] 周济, 周艳红, 王柏村, 等. 面向新一代智能制造的人–信息–物理系统(HCPS)[J]. Engineering, 2019, 5(4): 71–97.
- [53] 左世全. 我国智能制造发展战略与对策研究[J]. 世界制造技术与装备市场, 2014, (3): 36–41+59.
- [54] Aboelmaged, M. and G. Hashem. Absorptive Capacity and Green Innovation Adoption in SMEs: The Mediating Effects of Sustainable Organisational Capabilities[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 220, 853–863.
- [55] Albort–Morant, G., A. L. Leal– Rodríguez, and V. De Marchi. Absorptive Capacity and Relationship Learning Mechanisms as Complementary Drivers of Green Innovation Performance[J]. Journal of Knowledge Management, 2018, 22(2): 432–452.
- [56] Chen, Y., S. Lai, and C. Wen. The Influence of Green Innovation Performance on Corporate Advantage in Taiwan[J]. Journal of Business Ethics, 2006, 67(4): 331–339.
- [57] De Chaisemartin, C. and X. D'Haultfoeuille. Two–Way Fixed Effects Estimators with Heterogeneous Treatment Effects[J]. American Economic Review, 2020, 110(9), 2964–2996.
- [58] Hashim, R., A. Bock, and S. Cooper. The Relationship between Absorptive Capacity and Green Innovation[J]. International Journal of Industrial and Manufacturing Engineering, 2015, 9(4), 1065–1072.
- [59] Iacus, S. M., G. King, and G. Porro. Causal Inference without Balance Checking: Coarsened Exact Matching[J]. Political Analysis, 2012, 20(1): 1–24.
- [60] Jaffe, A. B. and R. N. Stavins. Dynamic Incentives of Environmental Regulations: The Effects of Alternative Policy Instruments on Technology Diffusion[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 1995, 29(3): S43–S63.
- [61] Jansen, J. J. P., F. A. J. Van Den Bosch, and H. W. Volberda. Managing Potential and Realized Absorptive Capacity: How Do Organizational Antecedents Matter[J]. Academy of Management Journal, 2005, 48(6): 999–1015.
- [62] Khan, U. and W. Liu. Does Environmental Responsible Effect Human Resources Management Practice on Firm Effectiveness and Green Technology Innovation? [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 30(13): 36160–36175.
- [63] Lv, H., B. Shi, N. Li, and R. Kang. Intelligent Manufacturing and Carbon Emissions Reduction: Evidence from the Use of Industrial Robots in China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(23): 15538.
- [64] Ma, Y., Q. Zhang, and Q. Yin. Top Management Team Faultlines, Green Technology Innovation and Firm Financial Performance[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 285: 112095.
- [65] Malecki, E. J. Entrepreneurship in Regional and Local Development[J]. International Regional Science Review, 1993, 16(1–2): 119–153.
- [66] Niebel, T., F. Rasel, and S. Viete. Big Data–Big Gains? Understanding the Link between Big Data Analytics and Innovation[J]. Economics of Innovation and New Technology, 2019, 28(3): 296–316.
- [67] Paunov, C. and V. Rollo. Has the Internet Fostered Inclusive Innovation in the Developing World?[J]. World Development, 2016, (78): 587–609.
- [68] Porter, M. America Green Strategy[J]. Scientific American, 1991, 264(4): 168–168.
- [69] Qin, W. and Y. Xie. The Impact of China’s Emission Trading Scheme Policy on Enterprise Green Technological Innovation Quality: Evidence from Eight High–Carbon Emission Industries[J]. Environmental Science and

Pollution Research, 2023, 30(47), 103877–103897.

[70] Rennings, K. Redefining Innovation–Eco–Innovation Research and the Contribution from Ecological Economics[J]. Ecological Economics, 2000, 32(2), 319–332.

[71] Shen, Y. and X. Zhang. Digital Economy, Intelligent Manufacturing, and Labor Mismatch[J]. Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 2022, 26(4): 655–664.

[72] Song, S., M. A. Hossain, X. Yin, and M. S. Hosain. Accelerating Green Innovation Performance from the Relations of Network Potential, Absorptive Capacity, and Environmental Turbulence[J]. Sustainability, 2021, 13(14), 7765.

[73] Sun, L. and N. A. M. Saat. How Does Intelligent Manufacturing Affect the ESG Performance of Manufacturing Firms? Evidence from China[J]. Sustainability, 2023, 15(4): 2898.

[74] Wright, P. K. and D. A. Bourne. Manufacturing Intelligence[M]. USA: Addison–Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1988.

[75] Zahra, S. A. and G. George. Absorptive Capacity: A Review, Reconceptualization, and Extension[J]. Academy of Management Review, 2002, 27(2): 185–203.

[76] Zhu, Z., Y. Chen, J. Zhao, and Z. Yu. Intelligent Manufacturing and Value Creation in Enterprises: Lessons from a Quasi–Natural Experiment in a Chinese Demonstration Project[J]. Sustainability, 2023, 15(15): 11611.

Intelligent Manufacturing, Technology Integration and Green Technology Innovation

Wang Xianbin^{ab}, Lin Caibin^a

(a: School of Economics, Jinan University; b: Institute of Mezzoeconomics, Jinan University)

Abstract: Giving full play to the supporting role of green technology innovation is the key to accelerating the establishment of green low-carbon circular development economy system. This article regards the intelligent manufacturing pilot and demonstration project as a quasi-natural experiment and takes the listed manufacturing companies of A-share in China from 2010 to 2021 as the research object. Its main purpose is to empirically test the impact of intelligent manufacturing on green technology innovation by using Difference-in-Difference model. The study finds that intelligent manufacturing can promote green technology innovation and technology integration plays the mediating role in the relationship between intelligent manufacturing and green technology innovation. In terms of heterogeneity analysis, the effect of intelligent manufacturing is more significant in high-level and high-difficulty green technology innovation activities, independent innovation activities and the innovation activities in front-end production processes. And the positive effects of intelligent manufacturing on green technology innovation are more pronounced for enterprises that are larger, capital-intensive, and located in east area. The research conclusion of this paper provides theoretical implications for improving enterprise green technology innovation and promoting the upgrading and high-quality development of the manufacturing industry.

Keywords: Intelligent Manufacturing; Green Technology Innovation; Technology Integration; AI

JEL Classification: D22, L60, Q55

(责任编辑:朱静静)