

# 数智赋能与中国节能降碳效率: 机制与效应

何琨玟, 张文彬, 张楠

**摘要:** 作为数字经济时代的重要战略, 数智赋能已经成为提升中国节能降碳效率的核心驱动。本文基于 2011—2022 年省际面板数据, 采用熵值法与超效率 SBM 模型测度数智赋能指数与节能降碳效率, 并检验数智赋能对中国节能降碳效率的影响与作用机制。研究表明: 数智赋能显著提升了中国节能降碳效率, 赋能应用和环境支撑的影响效应大于数智基础, 这一结论在替换核心变量、缩尾处理、更换观测期并考虑内生性后依然成立; 数智赋能对中国节能降碳效率的影响存在异质性, 东部地区、碳交易试点地区及经济发展水平较高地区的该影响效应更显著; 在数智赋能提升节能降碳效率的过程中, 绿色技术创新、资源配置优化和高端产业集聚是重要的传导机制, 且存在空间溢出效应; 环境规制力度在数智赋能影响中国节能降碳效率中发挥重要调节作用和门槛作用, 命令型环境规制力度应控制在最优范围内, 加强引导型和公众参与型环境规制可以扩大数智赋能对节能降碳效率的促进作用。基于上述研究结论本文提出以下政策措施: 深化数字化与智能化发展, 采用差异化手段推动我国节能降碳工作, 畅通数智技术的作用渠道, 发挥空间效应, 并完善环境规制工具的制度作用。

**关键词:** 数智赋能; 节能降碳效率; TOE 分析框架; 环境规制; 空间溢出

**中图分类号:** F124.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-0169(2025)01-0082-18

**DOI:** 10.16493/j.cnki.42-1627/c.20241227.001

## 一、引言

中国作为全球最大的能源消费国与碳排放大国, 如何有效缓解日益严峻的能耗与碳排放压力, 是关乎高质量发展、经济绿色转型的重要问题。能源消耗在促进经济增长的同时, 必然会产生碳排放, 解决这一问题的关键在于协同实现节能降碳, 即在更少的能源消耗和碳排放条件下生产更多的物质财富。在此背景下, 推动“能耗双控”逐步转向“碳排放双控”成为我国节能降碳的重要措施和方向。国务院印发的《2024—2025 年节能降碳行动方案》明确了节能降碳工作的总体要求和重点任务, 提出要尽最大努力完成“十四五”节能降碳约束性指标。尽管节能降碳工作取得了一定成果, 但我国仍存在能耗强度大、碳排放效率低的问题。究其原因, 传统要素边际报酬递减的固有缺陷, 使得绿色经济转型面临技术性供给有限、人才资源匮乏、内生动力不足的多重困境<sup>[1]</sup>。“数”和“智”作为助推中国实现新旧动能转换的关键要素, 能够有效驱动传统产业绿色转

**基金项目:** 陕西省社会科学基金项目“数字化赋能陕西制造业绿色创新韧性提升的机制与路径研究”(2024D057); 陕西省社会科学基金项目“数字贸易驱动陕西外贸高质量发展的机制与路径研究”(2023D055); 陕西省创新能力支撑计划项目“数字技术赋能陕西传统制造业转型升级的机制与路径研究”(2024ZC-YBXM-105)

**作者简介:** 何琨玟, 西安财经大学经济学院, hxxxkw@163.com (陕西西安 710100); 张文彬, 西安财经大学管理学院; 张楠, 西安财经大学经济学院

型, 突破技术瓶颈<sup>[2]</sup>。

党的二十届三中全会作出“支持企业用数智技术、绿色技术改造提升传统产业”“健全绿色发展机制”的战略安排。然而, 现阶段中国在“质量优先”和“绿色转型”的压力下, 实现“能耗双控”向“碳排放双控”全面转型仍面临时间紧、任务重、困难多的现实挑战, 加之我国数智化转型正处于起步阶段, 规模化应用尚不充分, 数智赋能对节能降碳效率提升的实践效果仍不明朗。同时, 尽管数智赋能节能降碳在实践中得到了广泛认可, 但与之相关的理论研究却相对滞后, 尚未形成完整的数智赋能推动节能降碳效率提升的理论框架。那么, 数智赋能能否提升节能降碳效率, 影响机理如何, 何种政策可以加快这一进程? 对上述问题的论证与解答, 有助于揭示以数智化实现“能耗双控”向“碳排放双控”转变的内在逻辑, 为实现“双碳”目标和高质量发展提供科学依据与理论支撑。

## 二、文献综述

现有研究已经对数智赋能做出一定探讨, 一般认为数智化概念随着数字经济与智能经济的发展出现, 包含了数字化和智能化的双重内涵<sup>[3]</sup>。现有文献主要从数据、算法和赋能三个层面对数智赋能进行审视<sup>[4]</sup>。在数据层面, 数智技术使得数据“像素”急剧扩张与提升, 对数据治理提出新要求; 在算法层面, 高阶智能算法对现实世界进行多样化、动态化的刻画; 在赋能层面, 数据治理有利于强化数字经济的可持续发展, 赋能数字生态形成, 智能算法还将以“智能+”的形式赋能组织个体, 形成数智赋能新局面<sup>[5]</sup>。从“数字化”到“数智化”的转变意味着对经济社会的赋能模式由单向的数字驱动转向多维度的数字技术、智能技术的交叠驱动, 组织结构与业务模式因数智技术的更新而具有更强的环境适应性<sup>[6]</sup>。数智赋能的测度主要围绕着数智赋能内涵与研究视角展开, 测度方法主要分为综合指标法与准自然实验法。综合指标法主要集中于宏观视角, 张云等<sup>[3]</sup>、刘亮等<sup>[7]</sup>将数智化分为数字化与智能化两个维度。更进一步的细分研究方面, 在数字化维度, 张倩肖等<sup>[8]</sup>基于外部数字赋能和内部数字赋能对数字赋能进行考察; 在智能化维度, 王林辉等<sup>[9]</sup>从智能化条件、智能化应用、智能化技术分别对工业智能化进行了考察。具体测算方法主要包括熵值法<sup>[7][9]</sup>、主成分分析法<sup>[1][8]</sup>、纵横向拉开档次法<sup>[9]</sup>等。准自然实验法常用于微观企业视角的数智赋能研究, 构造的外部冲击识别策略主要包括上市公司所在城市是否获批建设国家新一代人工智能创新发展试验区<sup>[10]</sup>、是否属于数字密集型行业<sup>[11]</sup>、国家智能制造政策的颁布<sup>[12]</sup>等。

数智赋能与节能降碳效率的关联性问题是与本文高度相关的另一支文献。现阶段鲜有文献直接对数智赋能与节能降碳效率的关系进行研究, 但由于节能降碳效率是一个涵盖环境(节能降碳)、技术(绿色技术)和经济(效率提升)的综合性指标, 既有文献已经从数智赋能的节能降碳、绿色技术提升和效率提升效应层面进行展开。其一, 节能降碳层面。这类文献主要围绕节能和降碳两个视角展开。在节能效应上, 戴翔等<sup>[13]</sup>发现数字化、智能化生产线的引入有助于消除生产过程中的能源浪费; 在降碳效应上, 刘耀彬等<sup>[14]</sup>认为数智技术凭借其网络型、实时性的特点, 可以降低政府、企业、居民层面的二氧化碳排放, 王帅龙<sup>[15]</sup>则重点关注数智技术对碳排放影响的空间效应。其二, 绿色技术提升层面。李鑫等<sup>[16]</sup>研究发现大数据和人工智能技术是企业绿色技术创新的关键, 王锋正等<sup>[17]</sup>进一步考察了数字化转型对资源型企业绿色技术创新的影响。其三, 效率提升效应层面。数智化时代的经济发展路径逐渐由要素驱动向效率驱动转变<sup>[18]</sup>, 数智赋能对全要素生产率<sup>[19]</sup>、能源效率<sup>[20]</sup>、绿色生产效率<sup>[18][21]</sup>等的提升作用已受到学术界的关注, 作用机制主要包括劳动力技能结构调整<sup>[19]</sup>、加强服务业分工与协作<sup>[21]</sup>、优化企业生产与管理方式<sup>[22]</sup>等。

可以看到, 当前的研究在数智赋能与节能降碳效率关系研究上取得了一些进展, 但也存在一

定改进空间。第一,数智赋能测度指标体系构建方面,已有文献多数将数智赋能视作数字化和智能化的简单加总,指标体系的设计往往较为关注数智能力,对赋能关注比较匮乏,割裂了能力与赋能的关联。第二,数智赋能与节能降碳效率关系研究局限于数智赋能对节能降碳、绿色技术提升或效率提升效应的某一方面,忽略了节能降碳效率提升是环境、技术和经济提升的综合体现。本文的边际贡献在于以下几个方面。一是从“能力-赋能”的关系出发,构建了包括数智基础、赋能应用和环境支撑的数智赋能综合指标体系,是对数智赋能测度研究的拓展。二是基于系统观念,将数智赋能与节能降碳效率纳入统一分析,搭建起“绿色技术创新-资源配置优化-高端产业集聚”的TOE分析框架,厘清了前者对后者多维度、立体化的作用路径。三是考虑了异质性环境规制工具,将命令型、引导型和公众参与型环境规制工具纳入数智赋能与节能降碳效率的分析框架,为数智化时代政府环境规制政策的制定提供了更有针对性的理论参考。

### 三、理论分析与假设提出

#### (一) 数智赋能对节能降碳效率的直接影响

数智化引领技术升级与经济增长的同时,还具有显著的环境效应。数智赋能对节能降碳效率的直接影响主要体现在以下两个方面。其一,数智赋能具有“节能”效应。随着人工智能和大数据技术在企业生产及运营环节中的应用,企业生产流程得到了显著优化<sup>[23]</sup>。这一优化不仅减少了资源的不必要浪费,还使得企业能够实施智能化库存管理,降低能源消耗,提升节能降碳效率。其二,数智赋能具有“降碳”效应。一方面,大数据、人工智能技术催生出的手机购物、网络购物软件,使得居民从传统的实体购物形式转为网上购物,降低出行并节约包装、销售成本,从微观层面实现节能降碳。另一方面,数智技术使得政府在采集、整理与计算环境数据时更加高效,提升政府环境检测的准确性。同时,大数据技术有利于科学评判环境治理绩效,对于高污染企业与行业,人工智能技术帮助制定智慧化碳排放政策,可以对降碳政策的预期效果进行智能化预估,提升节能降碳效率。据此,提出如下假说。

H1: 数智赋能可以提升节能降碳效率。

#### (二) 数智赋能对节能降碳效率的传导机制

TOE分析框架<sup>①</sup>与“数智赋能节能降碳效率提升”在系统性、协同性与实践性方面具有较高的契合度。“T”与“绿色技术创新”相融合,致力于研究数智化如何赋能企业或其他主体掌握绿色技术从而提升节能降碳效率;“O”与“资源配置优化”相融合,有助于增强政府、企业等主体资源整合效率,从而加速节能降碳技术的实现;“E”与“高端产业集聚”相融合,是发挥数智赋能节能降碳作用的重要驱动与外部支撑。本文借鉴该框架展开传导机制分析。

1. 数智赋能、绿色技术创新与节能降碳效率。数智技术凭借其数字化与智能化的双重优势,能够显著推进绿色技术创新的实现,进而提升节能降碳效率。数智赋能可以推动绿色技术创新,具体体现在以下两个方面。其一,数智技术通过大数据分析帮助企业更好地理解资源利用、环境影响及产品生命周期,发现创新的绿色技术解决方案。自动化流水线和智能机器人等技术的应用实现了更高效的生产流程。物联网技术优化了能源利用,减少了浪费。云计算强大的计算和存储能力加速了绿色技术的研发进程。并且,人工智能技术能够加速绿色技术的创新,如优化能源系统、改进智能交通管理或预测环境影响。其二,数智化发展使企业采用智能化信息管理系统,通

<sup>①</sup> “技术-组织-环境”(TOE)分析框架中,技术路径(T)体现为实现特定目标的核心方法或工具的技术特征;组织路径(O)体现为实现特定目标技术使用的模式;环境路径(E)体现为技术应用与实现过程中的支持与保障。

过实时监测能源消耗和废物排放, 利用大数据分析支持智能决策和产品改进, 利用智能电表和监控系统优化能源使用, 减少碳足迹, 并通过数字化供应链管理减少资源浪费, 加强产品循环再生能力, 推动废弃物的再循环和回收, 进而实现绿色技术创新。

绿色技术创新对提升节能降碳效率具有重要作用, 具体表现在以下两个方面。其一, 提高传统能源利用效率方面。当前, 我国能源消费仍以煤炭、石油等传统能源为主, 这些能源的消耗带来了大量的碳排放<sup>[24]</sup>。绿色技术创新不仅能改进现有设备的生产性能, 还能研发推广节能型技术产品, 如节能型发动机、燃油添加剂等, 从而提升能源利用效率, 减少化石能源的消耗。其二, 加速清洁能源开发使用方面。绿色技术创新加速了太阳能、风能、水能等清洁能源的开发和利用, 有助于优化能源结构, 降低温室气体排放, 实现低碳经济转型。据此, 提出如下假说。

H2a: 数智赋能通过绿色技术创新提升节能降碳效率。

2. 数智赋能、资源配置优化与节能降碳效率。数智赋能能够优化资源配置, 而各地区节能降碳效率会受到绿色化资源配置的影响。数智赋能可以促进地区资源配置优化, 具体体现在以下两个方面。其一, 数智赋能通过新生产要素形成促进地区资源配置优化。数字化与智能化产业发展促使数据要素成为新的生产要素, 率先抢占数据要素资源的企业将在竞争中拔得头筹<sup>[25]</sup>, 提升产出效率, 实现资源配置优化。其二, 数智赋能通过降低资源错配促进地区资源配置优化。信息不对称是资源错配的主要原因, 而数智技术有利于拓宽信息沟通渠道, 打破信息沟通壁垒。这大大改善了要素市场的信息不对称状态, 促进要素的自由流动与合理配置, 实现资源配置优化。

资源配置优化对提升节能降碳效率具有重要作用, 具体体现在以下两个方面。其一, 人力资本结构优化方面。人力资本结构的优化是地区资源配置优化的重要体现。高素质人力资本具有较强的学习能力, 能够促进节能降碳技术进步的广度与深度<sup>[26]</sup>。同时, 人力资本优化意味着劳动收入份额的提升, 促进劳动力消费方式向低碳化、节能化的改变, 间接提高节能降碳效率。其二, 资本市场配置优化方面。节能降碳技术的提升需要充足的资金支持, 支付宝、蚂蚁金服等互联网金融平台有利于解决中小企业融资约束问题, 通过普惠金融发展为中小企业进行绿色技术提升、生产流程优化提供保障。同时, 数智技术通过实现资本市场配置多样化, 涌现出的绿色信贷、绿色债券等特色金融产品引导资金流向资源节约型产业, 提升节能降碳效率。据此, 提出如下假说。

H2b: 数智赋能通过资源配置优化提升节能降碳效率。

3. 数智赋能、高端化产业集聚与节能降碳效率。数智赋能可通过形成高端化产业集聚进而提升地区节能降碳效率。数智赋能促进高端化产业集聚, 具体体现在以下三个方面。其一, 数智赋能可以通过优化产业结构形成高端化产业集聚。数字普惠金融与人工智能可以降低金融服务准入门槛, 通过加快资本市场流通, 为高新技术企业提供资金支持<sup>[27]</sup>, 促进产业结构优化并形成高科技产业集聚。其二, 数智技术通过催生出基于互联技术的服务业新业态, 加快产业融合与制造业服务化水平, 推动产业结构实现高级化, 通过“两业融合”从而形成高端化产业集聚。其三, 由于在比较优势框架下区域产业结构定位的不同, 数智赋能有助于推动“产业梯度”或“产业辐射”等方式促进产业转移, 帮助落后地区突破传统产业形态, 提升落后地区高端化产业集聚水平。

高端化产业集聚对提升节能降碳效率有重要作用, 具体体现在以下三个方面。其一, 规模经济方面。高端化产业集聚可以促进地区间、企业间的公共基础设施的共享, 有效减少能源消耗, 降低运营费用, 提升资源使用效率<sup>[28]</sup>, 进而通过规模经济效应提升节能降碳效率。其二, 技术关联效应方面。高端化产业集聚通过行业间前后关联机制增进中低技术产业的知识水平, 减小产业间碳减排的技术差距, 全面提高资源利用率, 进而提升节能降碳效率。其三, 技术溢出效应方面, 高端化产业集聚加速了高技能劳动力与低技能劳动力交流的机会, 增加形成中间性创新组织的可能, 加快了低碳技术在行业内的应用。此外, 高端化产业集聚还会加速企业竞争, 迫使企业提升

绿色技术水平，从而提高节能降碳效率。据此，提出如下假说。

H2c：数智赋能通过高端化产业集聚提升节能降碳效率。

### （三）数智赋能提升节能降碳效率的政策工具

环境规制作为平衡经济增长与环境保护有力的政策工具，在数智赋能提升节能降碳效率过程中也起到重要作用。囿于生产资料的有限性以及生产过程污染的负外部性，各个地方政府采取了一系列环境规制工具对辖区内的污染主体进行约束，如“环境税”“三同时”政策等。然而，企业低碳行为不仅受到政府行政命令的影响，还受到市场调节和公众监督的作用。因此，本文将环境规制的政策工具划分为命令型环境规制、引导型环境规制和公众参与型环境规制，探讨数智赋能提升节能降碳效率过程中不同类型环境规制的异质性作用。

1. 数智赋能、命令型环境规制与节能降碳效率。命令型环境规制是指由政府部门制定的相关法律法规、政策制度，以及发放许可证、技术标准与相关禁令等。在政府执行命令型环境政策工具后，企业必须采取相应的环保标准，否则将受到严重的惩罚，这使得短期内命令型环境规制奏效。同时，当行政命令执行力度较低时，环保要求与排污标准会倒逼企业进行污染治理与绿色技术创新。数智化的发展可以为企业绿色创新提供数据支持与技术支撑，智能化融资平台的推广还会为企业增加融资渠道，从而有利于提升节能降碳效率。然而，长期内随着命令型环境规制力度加大，会产生“遵循成本”效应，挤占企业在数智化、创新等其他方面的投入，并削弱企业自主创新积极性<sup>[29]</sup>，使得数智赋能对节能降碳效率的促进作用减弱。据此，提出如下假说。

H3a：命令型环境规制工具有利于增强数智赋能对节能降碳效率的促进效果，但随着工具执行强度的加大，这种促进效果逐渐减弱。

2. 数智赋能、引导型环境规制与节能降碳效率。引导型环境规制是指排污收费、排污权交易等通过市场激励手段引导企业进行环境保护的政策工具。引导型环境规制可以激励企业从简单的污染治理转向数智化、绿色化的清洁生产方式，这对提高节能降碳效率具有持续的正向影响。由于引导型环境规制主要由“市场机制”发挥作用，随着政策力度加大，市场规模的扩大也会进一步强化政策工具作用的发挥，例如建立规模性排污许可证市场等<sup>[30]</sup>。因此，引导型环境规制工具的使用可以极大程度调动企业的自主创新的主动性，提升环境信息披露质量，为企业数智化发展提供准确的资源配置信号，增强数智赋能对节能降碳效率的提升作用。据此，提出如下假说。

H3b：引导型环境规制工具有利于增强数智赋能对节能降碳效率的促进效果，随着工具治理力度的加大，这种促进效果逐渐增强。

3. 数智赋能、公众参与型环境规制与节能降碳效率。公众参与型环境规制是指由公众、媒体等组织约束企业环境污染的政策工具。当前，我国公众的绿色环保理念处于起步阶段，公众开始对空气质量、环保等有一定需求。数智化依托数字媒体等公众监督工具，加强了公众对环保的监督，使得政府可以有效地提升环境治理水平<sup>[31]</sup>，企业能够精准地把握公众的环保需求，进而提高地区节能降碳效率。在长期，数字媒体的使用加大了公众的环保意识，随着公众的环保理念不断增强，公众参与型环境规制力度不断提高，公众对绿色消费的需求将进一步扩大<sup>[32]</sup>，倒逼企业进行绿色创新，同时，数字金融还会促使资金流向绿色产业，进一步推动节能降碳效率提升。据此，提出如下假说。

H3c：公众参与型环境规制工具有利于增强数智赋能对节能降碳效率的促进效果，随着工具治理力度的加大，这种促进效果逐渐增强。

### （四）数智赋能对节能降碳效率影响的空间效应

地理学第一定律认为地理事物在空间分布上互相关联，体现为集聚、随机、规则分布，且相关性随着距离的减少而增大。节能降碳经济活动本身存在外部性，而数智化通过现代信息技术使

得地区间交流打破传统地理分割, 跨地区的要素流动更为频繁, 使得邻近地区的数智赋能会对本地区的节能降碳效率产生溢出效应。具体体现在以下三个方面。其一, 邻近地区数智赋能会通过同伴效应加速提升本地区节能降碳效率。由于相近地区在进行低碳经济转型的过程中会产生激烈的竞争, 各地政府都想在竞争中获取优势, 因此邻近地区在发展数智化的过程中会引起本地区的重视程度, 从而推进本地学习数智化的节能降碳技术, 通过同伴效应促进提升节能降碳效率。其二, 邻近地区数智赋能会通过学习效应加速提升本地区节能降碳效率。地理位置相近的地区, 数智化企业的员工交流与生产合作更加频繁, 一定程度会促进数智技术、降碳技术等流动, 本地企业与员工更有机会学习到邻近地区的先进技术来提升本地节能降碳效率。并且, 数智化信息学习平台使得相邻地区的技术交流变得更加通畅, 因而能够更高效地学习绿色环保技术, 促进本地节能降碳效率提升。其三, 邻近地区数智赋能会通过涓流效应加速提升本地区节能降碳效率。根据“中心-外围”理论, 地区间经济活动会促进数智技术的溢出效应, 人力资本的跨区域流动使得数智化降碳技术在地区间形成扩散。因此, 数智化发展先进的地区会向周边落后地区溢出先进的绿色环保技术与理念等, 使得本地区的节能降碳水平进一步提升。据此, 提出如下假说。

H4: 数智赋能对节能降碳效率的影响过程存在空间溢出效应。

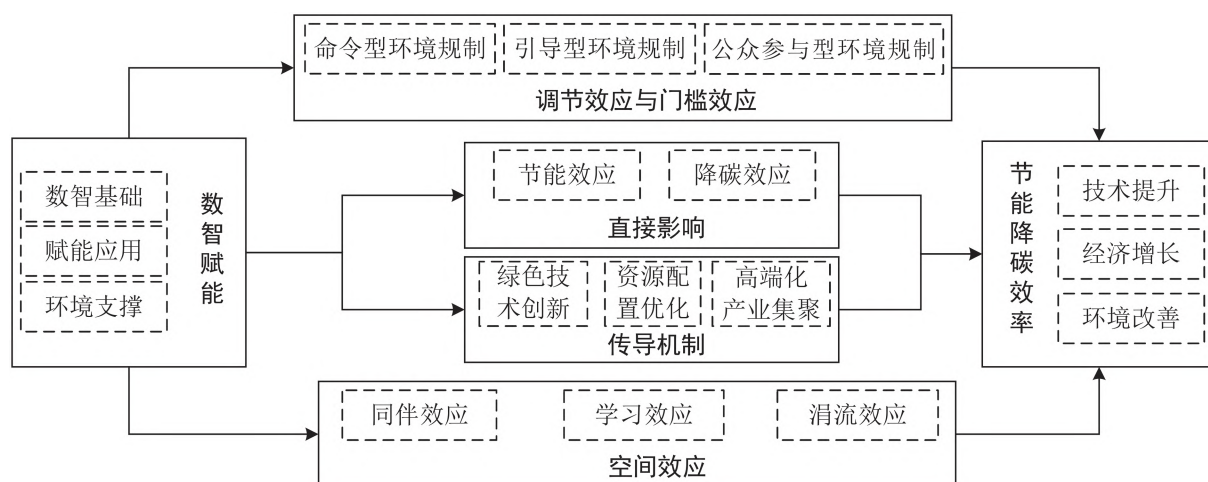


图1 数智赋能影响节能降碳效率的机制与路径

## 四、研究设计

### (一) 模型构建

为了检验数智赋能对节能降碳效率的提升作用, 构建基准模型如下:

$$LCE_{it} = \gamma_0 + \gamma_1 NI_{it} + \lambda Z_{it} + \mu_t + \sigma_i + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

其中,  $i$  为省份,  $t$  为时间; 被解释变量  $LCE_{it}$  为节能降碳效率; 核心解释变量  $NI_{it}$  为数智赋能;  $Z_{it}$  为控制变量集, 具体包括: 政府财政能力 ( $GF$ )、人力资本水平 ( $HCL$ )、对外开放程度 ( $OP$ )、交通基础设施水平 ( $IL$ )、企业信息化水平 ( $IN$ );  $\mu_t$  为时间固定效应;  $\sigma_i$  为个体固定效应;  $\varepsilon_{it}$  为随机误差项。

为检验数智赋能影响节能降碳效率的作用渠道, 参考江艇<sup>[33]</sup>针对国内中介效应使用现状所提出的操作建议, 即识别中介效应的因果关系和作用渠道时, 更多依赖于中介变量对于处理变量的回归结果, 构建如下计量模型:

$$MV_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 NI_{it} + \lambda \sum Z_{it} + \mu_t + \sigma_i + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

$MV_{it}$ 为待检验的传导机制,包括绿色技术创新(GI)、劳动力资源错配(TAUL)、资本资源错配(TAUK)、高端化产业集聚(HIA),其他指标含义与基准回归相同。

## (二) 变量选取

1. 被解释变量:节能降碳效率(LCE)。节能降碳效率是一个涵盖环境、技术、经济的综合指标,具有较强的复杂性,学术界尚未对其内涵有统一论。本文参考既有关于全要素能源效率<sup>[34]</sup>、碳排放效率<sup>[35]</sup>等概念的研究,认为节能降碳效率是表征能源消费量与引致碳排放之间关系的重要指标,即在一定的能源投入情况下实现最大产出并减少碳排放的能力。在节能降碳效率的投入产出指标设计中,不仅要体现“节能”,还要体现“降碳”。基于此界定,本文采用非期望产出的超效率SBM模型计算节能降碳效率,其不仅可以考虑松弛变量与生产中的非期望产出(碳排放),还可对决策单元进行有效比较。在投入产出指标设计上,投入指标包括劳动力、资本和能源投入,分别采用地区从业人员数、固定资产投资和能源消耗总量表示;产出指标包括期望产出与非期望产出,分别采用国民生产总值与碳排放量表示。

2. 核心解释变量:数智赋能(NI)。相较于数字化以数字要素为关键要素,数智化的核心在“智能”,优势在于能够极大替代人的脑力,赋予生产过程推理、决策的能力<sup>[4]</sup>。数智赋能是基于数字技术、人工智能、智能算法等数智技术对现有价值体系进行重塑的过程,是“能力—赋能”关系的集中体现,既包含了数字化和智能化的双重内涵,也是经济发展动能由数字化向智能化转变的过程。本文借鉴王林辉等<sup>[9]</sup>的研究,将数智赋能分为数智基础、赋能应用和环境支撑这3项一级指标,其中,数智基础主要反映数智能力的基础条件,赋能应用主要反映数智技术的应用与赋能过程,环境支撑主要反映能力形成赋能的必要环境。数智基础下设基础设施、互联网基础、人员基础和智能化设备投入这4项二级指标;赋能应用下设电子商务发展,软件、计算机、信息业务应用和高技术产业发展这3项二级指标;环境支撑下设内部环境与外部环境这2项二级指标,共计23项三级指标。构造的数智赋能指标体系如表1所示,并采用熵值法进行测算。

3. 传导机制变量。(1)绿色技术创新(GI)。采用《中国绿色专利统计报告》的绿色专利分类方式,在国家知识产权局进行专利搜索,以绿色专利数的对数表示绿色技术创新。

(2)资源配置优化。参考白俊红等<sup>[36]</sup>的做法,采用劳动力错配指数(TAUL)和资本错配指数(TAUK)来衡量地区资源配置情况。具体公式方法:首先,采用规模报酬不变的柯布道格拉斯生产函数: $Y_{it} = AK_{it}^{\beta_K} L_{it}^{\beta_L}$ ,其中,资本产出弹性 $\beta_K$ 与劳动力产出弹性 $\beta_L$ 之和为1;其次,对生产函数取对数,并加年份效应 $v_t$ 与地区效应 $\mu_i$ ,可得: $\ln(Y_{it}/L_{it}) = \ln A + \beta_{Ki} \ln(K_{it}/L_{it}) + \mu_i + v_t + \varepsilon_{it}$ ,其中, $Y_{it}$ 为地区的GDP,为消除价格波动的影响,以2011年为基期运用GDP指数进行平减, $L_{it}$ 和 $K_{it}$ 分别为各地区就业人员数和固定资产投资,固定资产投资采用永续盘存法计算;再次,计算相对价格扭曲指数,劳动力市场和资本市场相对价格扭曲指数分别为: $\widehat{\gamma}_{L_i} = (L_i/L)/(s_i \beta_{L_i}/\beta_L)$ 和 $\widehat{\gamma}_{K_i} = (K_i/K)/(s_i \beta_{K_i}/\beta_K)$ ;最后,计算资源错配指数,劳动力市场和资本市场错配指数分别为: $\widehat{\gamma}_{L_i} = \frac{1}{1 + \tau_{L_i}}$ 和 $\widehat{\gamma}_{K_i} = \frac{1}{1 + \tau_{K_i}}$ 。为保证回归的一致性,对结果取绝对值处理,劳动力错配指数和资本错配指数越大,表示资源错配情况越严重,资源配置情况越差。

(3)高端化产业集聚(HIA)。借鉴林伯强等<sup>[37]</sup>的做法,采用地理集中度来衡量省(区、市)的高端化产业集聚程度。具体公式: $HIA_{it} = \frac{\ln hia_{it} / \sum_{i=1}^N \ln hia_{it}}{A_{it} / \sum_{i=1}^N A_{it}}$ ,其中, $i$ 为省份(区、市), $t$ 为

表1 数智赋能综合指标体系

一级指标	二级指标	三级指标
数智基础	基础设施	长途光缆线路密度
		电信业务总量/GDP
	互联网基础	互联网宽带接入端口数
		互联网接入用户数/总人数
		每百家企业拥有网站数量
	人员基础	信息传输、软件和信息技术服务业从业人数/城镇单位从业人数
高技术企业 R&D 人员数/R&D 人员数		
智能化设备投入	电信、计算机和信息服务进口额/总进口额	
赋能应用	电子商务发展	有电子商务交易活动的企业数比重
		电子商务交易额/GDP
	软件、计算机、信息业务应用	软件业务收入+软件产品收入+嵌入式系统软件收入/工业企业主营业务收入
		信息技术服务收入+信息安全收入/工业企业主营业务收入
	高技术产业发展	高技术产业投资增长率
高技术企业新产品销售收入/工业企业主营业务收入		
高技术企业主营业务收入/工业企业主营业务收入		
环境支撑	内部环境	工业机器人安装密度
		人工智能专利数量/R&D 人员数
		人工智能企业数量/工业企业数量
		高技术产业企业数/规模以上工业企业数
	外部环境	数字经济、数字化媒体搜索指数
		数字经济政府工作报告词频数
		淘宝村数量
		数字普惠金融指数

年份,  $N$  为省份数量,  $A$  为各省的行政区域面积,  $hia$  为地区高端制造业产值<sup>①</sup>, 并取对数来衡量地区产业集聚程度,  $HIA$  越大, 则表明该省份高端化产业集聚程度越高。

4. 控制变量。在影响节能降碳效率的众多影响因素中, 除数智赋能的正向影响外, 本文还参考了相关研究<sup>[38]</sup>, 控制了其他可能影响节能降碳效率的因素, 主要包括: 政府财政能力 ( $GF$ ), 以一般公共预算支出的对数表示; 人力资本水平 ( $HCL$ ), 以高等学校在校生人数与地区总人口之比表示, 并对其取对数; 对外开放程度 ( $OP$ ), 以货物进出口总额与地区生产总值之比表示; 交通基础设施水平 ( $IL$ ), 以公路里程数取对数表示; 企业信息化水平 ( $IN$ ), 以电子商务交易活动企业数占企业总数的百分比表示。

### (三) 数据来源

本文选取 2011—2022 年中国 30 个省 (区、市) (不包含西藏与港澳台地区) 相关数据为样本, 主要数据来源如下: 节能降碳效率数据来源于《中国统计年鉴》《中国能源统计年鉴》及各省统计年鉴; 数智赋能数据来源于《中国统计年鉴》《中国高技术产业统计年鉴》《中国软件和信息技术服务业发展报告》《中国淘宝村研究报告》《北京大学数字普惠金融指数》、Patenthub 全球专利数据库、IFR 数据库、百度指数、政府工作报告、国家统计局、各省 (区、市) 统计年鉴与统计公报等; 机

<sup>①</sup> 参考《国民经济分类》(GB/T 4754—2014)、《高技术产业 (制造业) 分类》(2017) 并结合高端制造业行业特点, 选取以下 8 个行业作为高端制造业: 医药制造业, 金属制造业, 通用设备制造业, 专用设备制造业, 汽车制造业, 铁路、船舶、航空航天和其他运输设备制造业 (2012 年前为交通运输设备制造业), 电器机械及器材制造业、计算机、通信和其他电子设备制造业 (2012 年前为通信设备计算机及其他设备制造业), 仪器仪表制造业 (2012 年前为仪器仪表及文化办公机械制造业)。

制变量与控制变量数据来源于《中国统计年鉴》《中国工业统计年鉴》、国家统计局和国家知识产权局等。各变量的描述性统计结果如表2所示。

表2 变量描述性统计

变量类型	变量	样本量	均值	标准差	最小值	最大值
被解释变量	节能降碳效率(LCE)	360	0.393	0.193	0.146	1.106
核心解释变量	数智赋能(NI)	360	0.259	0.105	0.077	0.720
	数智基础(NIB)	360	0.114	0.041	0.021	0.237
	赋能应用(NIA)	360	0.065	0.038	0.012	0.303
	环境支撑(NIE)	360	0.081	0.038	0.006	0.218
机制变量	绿色技术创新(GI)	360	7.946	1.405	3.135	10.933
	劳动力资源错配(TAUL)	360	0.145	0.101	0.000	0.379
	资本资源错配(TAUK)	360	0.204	0.151	0.005	0.713
	高端化产业集聚(HIA)	360	1.252	2.553	0.066	15.190
控制变量	政府财政能力(GF)	360	8.425	0.625	6.559	9.827
	人力资本水平(HCL)	360	1.898	0.778	0.014	4.249
	对外开放程度(OP)	360	0.250	0.285	0.000	1.548
	交通基础设施水平(IL)	360	11.702	0.853	9.400	12.913
	企业信息化水平(IN)	360	7.731	4.299	0.401	24.721

## 五、实证分析

### (一) 基准回归

根据Hausman检验结果显示 $p$ 值小于0.05,即固定效应模型优于随机效应,故选用双向固定效应模型进行基准回归估计。回归结果如表3列(1)–(2)所示,列(1)为未加入控制变量的结

表3 数智赋能与节能降碳效率的基准回归

变量	被解释变量:LCE				
	X=NI		X=NIB	X=NIA	X=NIE
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
X	1.190*** (6.91)	0.720*** (3.44)	0.745* (1.69)	0.843** (2.09)	0.943*** (2.59)
常数项	0.107*** (3.98)	-2.388*** (-3.21)	-2.324*** (-3.07)	-2.363*** (-3.13)	-2.474*** (-3.29)
控制变量	否	是	是	是	是
固定效应	是	是	是	是	是
$R^2$	0.678	0.710	0.702	0.703	0.706
N	360	360	360	360	360

注: \*、\*\*、\*\*\*分别表示在10%、5%、1%的水平上显著,采用地区与年份的双向固定效应,括号内为经地区层面聚类调整的稳健 $t$ 值,下表同。

果,列(2)为加入控制变量并进行双向固定的回归结果,可以看到,数智赋能对节能降碳效率的回归系数均显著为正,表明数智赋能能够有效降低碳排放与能源消耗,提升节能降碳效率,H1得到验证。为进一步探究数智基础、赋能应用和环境支撑对节能降碳效率的影响,本文对数智赋能的分项指标进行回归估计,估计结果如表3列(3)–(5)所示。可以看到,数智基础、赋能应用和环境支撑对节能降碳效率的回归系数均显著为正,相比于数智基础,赋能应用和环境支撑对节能

降碳效率的提升作用更强。可能的原因在于: 数智化依赖于互联网、人员技能和智能设备等基础设施, 这些设施提高了数据传输效率和资源配置效率, 但也因化石能源使用而增加了碳排放, 抵消了数智基础的减排效果, 因此数智基础的促进作用较低。赋能应用则以大数据为核心, 通过云计算和AI技术与企业生产深度融合, 推动企业向清洁低碳生产转型, 并借助数智分析技术优化内外部数据处理, 实现决策科学化、精细化和智能化, 提升节能降碳效率。环境支撑是数智赋能内部与外部环境的综合改善, 它提升了企业的绿色创新能力和技术效率, 减少了碳排放与能源消耗。同时, 完善的数字基础设施增强了政府的监管能力并促进了公众参与, 进一步提高了生产效率和节能减排。因此, 相较于数智基础, 赋能应用和环境支撑对节能降碳效率的促进作用更显著。

## (二) 稳健性检验

1. 内生性检验。由于遗漏变量与反向因果可能会导致内生性问题, 因而需要考虑数智赋能影响节能降碳效率中的内生性问题。本文采用1984年人均邮电数量与互联网宽带接入用户量的交乘项作为数智赋能的工具变量。这是由于邮电业务是数字经济与智能化欠发达地区的人与人、企业与企业交流沟通的重要方式, 但是此前人均邮电业务较高的地区仍然可能是数智赋能水平较高的地区。换言之, 人均邮电业务量与数智赋能高度相关, 同时1984年的人均业务量基本不会对样本考察期的节能降碳效率产生影响, 因此选择该工具变量既能满足“相关性”要求, 又能满足“排他性”要求。选用IV-2SLS法对数智赋能影响节能降碳效率进行内生性检验, 结果如表4列(1)所示, 可以看到, *K-P rk LM statistic*和*C-D Wald F statistic*的结果表明了工具变量的合理性, 在考虑到内生性问题后, 数智赋能对节能降碳效率的作用依然是稳健的。

表4 数智赋能与节能降碳效率的稳健性检验

变量	2SLS	替换因变量		替换自变量		缩尾处理	更换观察期
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
<i>NI</i>	0.574** (2.39)	0.560*** (2.94)	0.634*** (3.08)	0.048*** (3.38)	0.223*** (2.88)	0.980*** (4.38)	0.541*** (3.19)
常数项	—	-1.410** (-2.08)	2.909*** (3.96)	-2.434*** (-3.26)	-2.314*** (-3.09)	-2.205*** (-3.00)	1.575** (2.13)
控制变量	是	是	是	是	是	是	是
<i>K-P rk LM statistic</i>	141.903 [0.000]	—	—	—	—	—	—
<i>C-D Wald F statistic</i>	493.045 {16.38}	—	—	—	—	—	—
固定效应	是	是	是	是	是	是	是
$R^2$	—	0.761	0.725	0.710	0.707	0.724	0.797
<i>N</i>	360	360	360	360	360	360	150

注: [ ] 内为相应统计量的 $p$ 值, { } 中数值为对应统计量在10%统计水平下的临界值。

2. 其他稳健性检验。在考虑内生性问题后, 本文进一步采用如下4种方式进行其他稳健性检验。(1) 替换因变量。为避免特定因变量所导致的偶然性结论, 重新选用DEA-SBM测度在规模报酬不变(CRS)条件下和规模报酬可变(VRS)条件下的节能降碳效率代替被解释变量。(2) 替换自变量。重新选用主成分分析法和纵横向拉开档次法测度得到的数智赋能代替原核心解释变量。(3) 缩尾处理。为避免极端值对估计结果的影响, 对连续变量进行5%的缩尾处理并重新进行估计。(4) 更换观察期。由于近年来低碳经济发展迅猛, 为了避免观察期选取导致的偏误, 本文对于“十二五”时期(2011—2015年)的样本进行重新估计。估计结果如表4列(2)—(7)所示, 可以看到, 在进行了替换因变量、替换自变量、缩尾处理与更换观察期后, 核心解释变量的系数

仍然显著为正，说明了本文结论是稳健的。

### （三）异质性分析

我国幅员辽阔，不同省（区、市）在地理位置、经济基础、产业结构及市场环境等均存在明显差异。基于此，本文依照“区域差异—政策导向—经济发展格局”的思路，对数智赋能与节能降碳效率的关系进行异质性分析。

1. 区域异质性。本文将全国划分为东、中、西三大地区<sup>①</sup>对基准模型进行分组回归，估计结果见表5列（1）—（3）。可以看到，数智赋能对东部地区节能降碳效率的回归系数为0.512，在5%的显著性水平下显著，对中西部地区的回归系数未达到统计显著。可能的原因在于：东部地区经济发展水平较高，科技创新与产业发展已经形成深度融合，因而数智赋能能够显著促进东部地区节能降碳效率提升。中西部地区能源与矿产资源丰富，但相对于东部地区经济发展基础较为薄弱，产业链还有待完善，数智赋能产业结构调整与生产模式改变是一个循序渐进的过程，因而数智赋能对中西部地区的节能降碳效率提升作用不显著。

2. 政策异质性。以降低碳排放量为目的，我国于2013年启动北京、上海、广东、天津、湖北、重庆、深圳这7个省市的碳排放交易权试点。本文将样本地区划分为碳交易市场试点与非试点省（区、市），并进行分组回归，结果见表5列（4）—（5）。可以看到，数智赋能对碳交易试点地区

表5 数智赋能与节能降碳效率的异质性分析

变量	被解释变量:LCE						
	区域异质性			政策异质性		经济发展水平异质性	
	东部	中部	西部	碳交易市场试点	非碳交易市场试点	经济发展水平高组	经济发展水平低组
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
NI	0.512** (2.38)	1.079 (1.00)	0.576 (1.77)	1.800*** (4.14)	0.449* (1.72)	1.265*** (4.50)	0.332 (1.08)
常数项	-6.400*** (-6.17)	4.220** (2.05)	-2.380 (-1.02)	-1.738** (-3.51)	-2.585*** (-2.92)	-3.549*** (-4.43)	-0.958 (-0.68)
控制变量	是	是	是	是	是	是	是
固定效应	是	是	是	是	是	是	是
R <sup>2</sup>	0.836	0.667	0.871	0.821	0.693	0.772	0.726
N	132	96	132	84	276	180	180

的节能降碳效率的回归系数为1.800，在1%的水平上显著，而对非碳交易市场试点的回归系数为0.449，在10%的水平上显著。可能的原因在于：高碳排放企业在利用数智技术进行规模扩大生产时，需要在碳交易市场上购买排放权，这种成本的压力导致企业倾向于低碳生产与经营，因而有利于绿色生产。同时，这种成本的增加还会迫使企业不得不进行生产技术革新，利用数智技术进行清洁生产的工艺革新的积极性将提升，从而降低能源消耗与碳排放，因而数智赋能对碳交易试点地区的节能降碳效率促进作用更明显。

3. 经济发展水平异质性。本文按照2022年各省（区、市）人均GDP的排名将各地区划分为经济发展水平高组与低组，分组回归结果如表5列（6）—（7）所示。可以看到，数智赋能对经济发展水平高组的节能降碳效率的回归系数为1.265，在1%的水平上显著，对经济发展水平低组的作用

<sup>①</sup> 东部地区包括北京、天津、河北、上海、江苏、浙江、福建、山东、广东、海南、辽宁11个省（市），中部地区包括山西、安徽、江西、河南、湖北、湖南、吉林和黑龙江8个省，西部地区包括内蒙古、广西、重庆、四川、贵州、云南、陕西、甘肃、青海、宁夏和新疆11个省（区、市）。

系数尚未达到统计显著。可能的原因在于: 经济发展水平高的地区具有基础设施、技术与人才储备、政策与资金支持的多重优势, 例如, 北京、上海等超一线城市 5G 网络覆盖发达, 使企业的生产设备可以迅速接入物联网中, 实现智能化能源监控与调配, 从而提升节能降碳效率。而经济欠发达地区可能存在数智基础设施薄弱的问题, 掌握数智技术的专业人才也较少, 难以自主开展节能降碳技术提升的项目, 因而数智赋能对经济发展水平较低地区的节能降碳效率提升不显著。

#### (四) 传导机制检验

1. 绿色技术创新机制检验。由表 6 列 (1) 可知, 数智赋能的回归系数为 1.994, 在 1% 的水平下显著为正, 这说明数智赋能可以显著提升绿色技术创新。进一步地, 绿色技术创新程度的提高为碳减排与节能提供了动力与技术支持, 进而推动节能降碳的提升实现低碳经济转型。假设 H2a 得到验证。

2. 资源配置优化机制检验。由表 6 列 (2) 和 (3) 可知, 数智赋能对劳动力错配指数的系数为 -0.268, 对资本错配指数的系数为 -0.454, 均在 10% 的水平下显著, 说明数智赋能可以促进资源配置优化。进一步地, 在劳动力市场方面, 劳动要素配置优化有助于精准匹配人才技能与节能降碳任务; 在资本市场方面, 资本要素配置优化有助于引导资金流向绿色创新企业, 加速节能技术研发与应用推广, 促进产业低碳转型。假设 H2b 得到验证。

3. 高端化产业集聚机制检验。由表 6 列 (4) 可知, 数智赋能的回归系数为 0.874, 在 1% 的水平下显著为正, 说明数智赋能可以促进高端化产业集聚。进一步地, 高端化产业中的企业更易采用先进节能技术, 具有较强的“头雁”效应, 从而促进地区节能降碳效率提升。假设 H2c 得到验证。

表 6 数智赋能与节能降碳效率的传导机制分析

变量	GI	TAUL	TAUK	HIA
	(1)	(2)	(3)	(4)
NI	1.994***	-0.268*	-0.454*	0.874***
	(2.84)	(-1.75)	(-1.79)	(3.68)
常数项	7.018***	-0.943*	-0.452	-0.566
	(73.67)	(-1.73)	(-0.50)	(-0.75)
控制变量	是	是	是	是
固定效应	是	是	是	是
R <sup>2</sup>	0.918	0.100	0.130	0.160
N	360	360	360	360

## 六、进一步分析

### (一) 政策工具分析

1. 模型构建。为检验数智赋能影响中国节能降碳效率的政策工具的使用是否有效, 选取环境规制作为调节变量, 将调节变量与核心解释变量的交互项纳入基准模型中, 考察环境规制对数智赋能与节能降碳效率之间关系的调节效应。具体模型如下所示:

$$LCE_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 NI_{it} + \alpha_2 NI_{it} \times M_{it} + \alpha_3 M_{it} + \lambda \sum Z_{it} + \mu_t + \sigma_i + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

其中,  $M_{it}$  为环境规制, 具体包括命令型环境规制 ( $M_1$ )、引导型环境规制 ( $M_2$ ) 和公众参与型环境规制 ( $M_3$ ), 其他变量与基准模型相同。

考虑到数智赋能对节能降碳效率的促进作用会随着异质性环境规制力度的加大而不同, 即存在门槛特征。本文构建面板门槛模型如下:

$$LCE_{it} = \gamma_0 + \lambda Z_{it} + \beta_1 NI_{it} \times I(M \leq \gamma) + \beta_2 NI_{it} \times I(M > \gamma) + \mu_t + \lambda_i + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

式中,  $I(\cdot)$  为示性变量;  $\gamma$  为门槛值;  $\beta_1$  为门槛变量在  $M \leq \gamma$  时数智赋能对节能降碳效率的影响系数,  $\beta_2$  为门槛变量在  $M > \gamma$  时数智赋能对节能降碳效率的影响系数, 其他变量与模型 (1) 含义相同。

根据前文的理论分析,数智赋能影响中国节能降碳效率的政策工具——环境规制,即本文的调节变量与门槛变量有三类。(1)命令型环境规制( $M_1$ )。借鉴叶琴等<sup>[39]</sup>的做法,采用各省份三废排放量构建综合指标体系并采用熵值法计算得出。(2)引导型环境规制( $M_2$ )。借鉴陈诗一等<sup>[40]</sup>的做法,搜集2011—2022年省政府工作报告,进行引导型环境规制的相关关键词搜索<sup>①</sup>,进而对关键词数量做对数化处理来衡量引导型环境规制。(3)公众参与型环境规制( $M_3$ )。以“环境污染”作为关键词进行百度指数搜索,并做对数化处理得到公众参与型环境规制强度。

2. 结果分析。以环境规制为调节变量,考察异质性环境规制在数智赋能影响节能降碳效率的过程中的调节作用,结果如表7所示。从列(1)的结果可以看到,在加入命令型环境规制与数智赋能的交互项后,交互项系数未达到统计显著,可能的原因在于:当命令型环境规制的力度较低时,企业纷纷积极对政策进行响应,因此绿色发展效应比较显著,而随着命令型环境规制政策力度的加大,企业的自主创新性会遭受打击,因而这种节能降碳效应会下降,导致交互项系数不显著,需要进一步进行门槛效应检验。

从列(2)的结果可以看到,引导型环境规制的调节系数为0.220,在10%的水平下显著为正,表明引导型环境规制会增强数智赋能对节能降碳效率的影响。引导型环境规制主要通过市场激励机制实现,由于企业生产的逐利性,引导型环境规制政策力度加大可以引导企业由污染末端治理转向前端清洁生产,使企业更具绿色创新的积极性,因此能够正向调节数智赋能与节能降碳效率之间的关系,H3b得到初步验证。

从列(3)的结果可以看到,公众参与型环境规制的调节系数为0.099,在5%的水平下显著为正,说明公众参与型环境规制可以正向调节数智赋能对节能降碳效率的促进作用。党的十九大提出要构建公众参与的环境治理体系,以数智技术为核心的数字媒体提高了环保观念在公众领域的普及程度,公众对环保产品需求的增加倒逼企业进行清洁化生产,因而随着公众参与型环境规制力度的提升,数智赋能对中国节能降碳效率的促进作用逐渐增强,H3c得到初步验证。

前文的调节效应模型已经通过环境规制对数智赋能与节能降碳效率的调节作用进行研判,由于异质性环境规制可能引致数智赋能对节能降碳效率影响的阶段性特征,接下来采用门槛模型进行进一步检验。首先采用自助抽样法(Bootstrap)获得F统计量的渐进值,并得到P值,分别在200次格点搜索及300次自举抽样对门槛值进行检验。环境规制的门槛效应显著性检验结果如表8所示。结果表明,命令型环境规制通过双重门槛显著性检验,第一重和第二重门槛值分别为0.804和0.816,三门槛检验未达到统计显著;引导型环境规制和公众参与型环境规制的门槛效应检验通过单一门槛显著性检验,门槛值为3.466和4.260,而双门槛检验均未达到统计显著。由此可知,数智赋能与节能降碳效率的影响会受到不同种类环境规制的门槛效应影响。

在进行门槛效应显著性检验的基础上,本文进一步对异质性环境规制的门槛回归结果进行分析,如表9所示。观测期内,数智赋能与节能降碳效率的关系随着环境规制门槛值的变化而变化。

① 关键词设置为:环境、环保、能耗、污染、减排。

表7 数智赋能与节能降碳效率的调节效应分析

变量	被解释变量:LCE		
	命令型 ( $i=1$ )	引导型 ( $i=2$ )	公众参与型 ( $i=3$ )
	(1)	(2)	(3)
$NI$	0.132* (1.87)	0.064 (1.19)	0.112* (1.70)
$NI \times M_i$	0.422 (0.73)	0.220* (1.89)	0.099** (2.47)
$M_i$	-0.063 (-0.24)	0.051* (1.81)	-0.032 (-1.56)
常数项	-2.441*** (-3.15)	-2.362*** (-3.32)	-2.452* (-1.89)
控制变量	是	是	是
固定效应	是	是	是
$R^2$	0.712	0.644	0.715
$N$	360	360	360

表8 环境规制的门槛效应显著性检验结果

门槛变量	门槛类型	RSS	MSE	F统计量	P值	临界值		
						10%	5%	1%
$M_1$	单一门槛	1.097	0.003	15.81**	0.050	12.373	15.323	25.143
	双重门槛	1.155	0.004	25.78***	0.007	14.098	19.089	25.033
	三重门槛	1.128	0.003	7.92	0.260	14.175	19.602	27.368
$M_2$	单一门槛	1.086	0.003	19.49*	0.070	16.371	21.256	29.081
	双重门槛	1.060	0.003	8.11	0.227	10.729	13.689	19.431
$M_3$	单一门槛	1.123	0.003	16.92***	0.010	13.406	15.233	22.952
	双重门槛	1.101	0.003	6.81	0.697	20.536	25.831	32.700

表9 环境规制的门槛效应回归结果

变量	命令型	变量	引导型	变量	公众参与型
	(1)		(2)		(3)
$NI(M_1 \leq 0.804)$	0.629***	$NI(M_2 \leq 3.466)$	0.587***	$NI(M_3 \leq 4.260)$	0.586***
	(2.88)		(2.85)		(2.76)
$NI(0.804 < M_1 \leq 0.816)$	0.719***	$NI(M_2 > 3.466)$	0.723***	$NI(M_3 > 4.260)$	0.685***
	(3.45)		(3.55)		(3.31)
$NI(M_1 > 0.816)$	0.572***	—	—	—	—
	(2.68)	—	—	—	—
常数项	-2.322***	常数项	-2.121***	常数项	-2.641***
	(-3.14)		(-2.92)		(-3.55)
控制变量	是	控制变量	是	控制变量	是
固定效应	是	固定效应	是	固定效应	是
$R^2$	0.717	$R^2$	0.726	$R^2$	0.717
$N$	360	$N$	360	$N$	360

列(1)展示了命令型环境规制为门槛变量的回归结果,数智赋能对节能降碳效率的促进效果会随着命令型环境规制政策力度的提高而降低。当命令型环境规制的力度低于0.804时,数智赋能的回归系数为0.629,显著性水平为1%;当命令型环境规制的力度处于两个门槛之间( $0.804 < M_1 \leq 0.816$ )时,数智赋能的回归系数提高到0.719,显著性水平为1%;当命令型环境规制的力度跨越门槛值(0.816)后,数智赋能的回归系数下降至0.572,显著性水平仍为1%。结果表明,当命令型环境规制开始执行时,数智赋能对节能降碳效率的促进作用升高,而政策力度持续加强后,数智赋能对节能降碳效率的促进作用会降低。可能的原因在于,命令型环境规制往往是强制性行政命令,企业不得不面临高强度的环境监管,因而企业将会倾向于更多的减排投资而降低创新投资,同时,过度的命令型环境规制政策还会降低企业的自主创新积极性,从而使数智赋能对节能降碳效率的促进作用减弱。假设H3a得到验证。

列(2)展示了引导型环境规制为门槛变量的回归结果,数智赋能对节能降碳效率的促进效果会随着引导型环境规制力度的提高而提高。当引导型环境规制的力度低于3.466时,数智赋能的回归系数为0.587,显著性水平为1%;当引导型环境规制的力度跨越门槛值(3.466)后,数智赋能的回归系数提高至0.723,显著性水平仍保持1%不变。结果表明,加大引导型环境规制的政策力度后,数智赋能对节能降碳效率的促进效果会提升。可能的原因在于:在短期,引导型环境规制主要依靠市场机制(排污税、市场补贴等)进行节能减排,通过提高资源配置效率进而促进低碳经济转型;在长期,引导型环境规制的力度加大后,排污权交易市场等企业环保市场的建立将发挥“规模效应”,进一步提升数智赋能对节能降碳效率的促进作用。假设H3b得到验证。

列（3）展示了公众参与型环境规制为门槛变量的回归结果，数智赋能对节能降碳效率的促进效果会随着公众参与型环境规制力度的提高而提高。当公众参与型环境规制力度低于4.260时，数智赋能的回归系数为0.586，显著性水平为1%；当公众参与型环境规制的力度跨越门槛值（4.260）后，数智赋能的回归系数提升到0.685，显著性水平仍为1%。结果表明，公众参与型环境规制的推进可以有效提升数智赋能对节能降碳效率的促进作用。可能的原因在于：在短期，由于我国公众的绿色环保理念仍处于起步阶段，公众参与型环境规制要求公众具有科学、合理的环保消费观念，因而在公众参与型环境规制力度较低时，数智赋能效果也较弱；在长期，随着公众环保意识的提升，这种绿色消费的需求将会引致企业有针对性地进行绿色创新与低碳转型，因而数智赋能对节能降碳效率的促进效果会增强。假设H3c得到验证。

## （二）空间效应分析

1. 空间自相关检验。在进行空间计量模型分析之前，需要对数智赋能与节能降碳效率的空间相关性进行验证。本文以全局Moran's I指数检验数智赋能与节能降碳效率的空间分布的集群情况，结果显示，地理距离空间权重矩阵<sup>①</sup>下2011—2022年我国数智赋能与节能降碳效率的Moran's I均介于0~1间，且P值均小于0.1，表明我国数智赋能与节能降碳效率均存在空间正自相关性。在分析了全局Moran's I指数的基础上，本文还对数智赋能与节能降碳效率的局部Moran's I指数进行分析，不同区域间数智赋能与节能降碳效率的空间关联状态呈现不同特征。空间自相关检验结果表明数智赋能在现实中会表现出空间外溢性，且不同区域呈现不同集聚特征，因此将空间外溢特征纳入数智赋能影响节能降碳效率的分析中是有必要的。

2. 模型选择。在进行空间相关性检验后，本文进一步采用多项检验对空间计量模型进行甄别<sup>②</sup>。LM检验及Robust-LM检验下模型P值均显著，表明存在空间滞后效应以及空间误差效应，拒绝利用混合面板回归分析。根据Wald检验及LR检验可知，LR spatial lag与Wald spatial lag均在1%显著性水平下拒绝 $\beta$ 及 $\theta + \delta\beta$ 为零的原假设，表明与SAR模型相比，SDM模型更优，LR spatial error与Wald spatial error亦均在1%显著性水平下拒绝 $\beta$ 及 $\theta + \delta\beta$ 为零的原假设，表明与SEM模型相比，SDM模型更优，故选择空间杜宾模型。

3. 结果分析。采用双向固定效应的SDM模型的回归结果如表10所示。数智赋能的空间自回归系数显著为负，说明对节能降碳效率的影响具有显著的内生交互效应，而数智赋能的空间交互项的系数显著为正，说明对节能降碳效率的影响存在外生的数智化交互效应。进一步考察SDM模型的空间溢出效应分解可知，数智赋能的直接效应、间接效应及总效应影响系数均显著为正，系数值分别为0.887、1.513与2.400，且分别在1%、10%及1%的显著性水平下显著，说明数智赋能影响节能降碳效率的过程存在显著的空间溢出效应。可见，数智创新发展推动了一系列节能减排等低碳技术面世，从而提升本区域产业资源利用效率并推动碳减排，随着地区间生产联系逐渐加强，产业链的关联性使得技术、人才、资金等生产要素流动成本显著降低，一些先进

表10 空间杜宾模型回归结果

变量名称	被解释变量LCE
NI	0.920***
	(5.22)
$w \times NI$	2.509**
	(2.16)
$\rho$	-0.437**
	(-1.97)
$R^2$	0.604
$\sigma^2$	0.002***
	(13.33)
直接效应	0.887***
	(4.93)
间接效应	1.513*
	(1.72)
总效应	2.400***
	(2.72)
控制变量	是
固定效应	是
N	360

① 计算方法为两省（区、市）的省会城市之间距离的倒数。

② 为节约篇幅，空间相关性检验与空间计量模型甄别检验的结果未列出，可联系作者索取。

省份的低碳节能技术能够流向邻近地区,从而使得数智赋能对节能降碳效率的影响产生空间溢出效应。H4得到验证。

## 七、结论与政策启示

### (一) 结论

本文分析了数智赋能对节能降碳效率的影响及传导机制,探究了异质性环境规制的调节作用与门槛作用,并考察了数智赋能对节能降碳效率影响的空间溢出效应。研究发现以下四点。第一,数智赋能有利于提升中国节能降碳效率,相比于数智基础,赋能应用与环境支撑对节能降碳效率的提升作用更显著,在替换核心变量、更换观测期并考虑内生性的基础上,该结论依然成立。第二,异质性分析结果表明,相比于中西部地区,数智赋能对东部地区的节能降碳效率作用更显著;相比于非碳交易试点省市,数智赋能对碳交易试点省市的节能降碳效率作用更显著;相比于经济发展水平较低地区,数智赋能对经济发展水平较高地区的节能降碳效率作用更显著。第三,数智赋能影响节能降碳效率的过程中,绿色技术创新、资源配置优化和高端化产业集聚是重要的传导机制;同时,数智赋能对中国节能降碳效率的影响具有空间溢出效应。第四,环境规制力度在数智赋能对中国节能降碳效率的影响中发挥重要调节作用和门槛作用,命令型环境规制有利于增强数智赋能对中国节能降碳效率的作用效果,但是政策力度过大会使赋能效果减弱,引导型环境规制和公众参与型环境规制会增强数智赋能的节能降碳效应。

### (二) 政策启示

基于上述结论,本文得到如下四点政策启示。一是继续深化数字化与智能化发展,充分发挥数智赋能的节能降碳效应。一方面,注重人工智能、大数据技术等与制造业的深度融合,加快实施智能制造与绿色制造工程;另一方面,以地区低碳经济转型为目标,充分把握区块链、人工智能等科技革命带来的历史机遇,关注数智化与企业前期设计、生产等各流程的有机结合,为节能降碳减排提供专业化、精细化的技术支持。二是关注数智赋能对节能降碳效率的异质性作用,采用差异化手段推动我国节能降碳。要充分考虑不同地区特征差异,在数智赋能发达的地区应深化绿色智能技术的发展,加大员工数智技能的培育力度,充分发挥数智化的绿色效应;在数智赋能水平较低的地区应以数字技术与实体经济的融合为导向,推动智能化制造、智能化服务在地区的推广,加大节能降碳攻坚力度。三是充分发挥数智技术的绿色技术创新、资源配置优化和高端化产业集聚机制,激发数智赋能对我国节能降碳的空间溢出效应。一方面,加大相关政策布局,从绿色技术创新、产业结构和资源配置方面疏通数智赋能影响节能降碳效率的作用渠道;另一方面,应发挥邻近地区数智化的联动作用,签订数智化合作协议,共同打造“点一线一面”的协同模式,发挥高数智赋能地区的带动作用,更好地推进节能降碳工作实行。四是完善环境规制工具的制度作用,通过政策工具协同推进我国节能降碳行动方案落地。在执行环境管制时,应有效利用现有的命令型与引导型环境管制措施的互补优势,并加强公众参与机制与二者之间的协作。此外,还需考虑不同管制手段的时间效果,增强市场机制在环境管制中的长期激励作用。

## 参考文献

- [1] 胡贝贝,王胜光,张秀峰.创新经济体知识生产中的规模递增效应——基于我国高新区的实证检验[J].科研管理,2017(2).
- [2] 蔡跃洲,马文君.数据要素对高质量发展影响与数据流动制约[J].数量经济技术经济研究,2021(3).
- [3] 张云,柏培文.数智化如何影响双循环参与度与收入差距——基于省级一行业层面数据[J].管理世界,

2023(10).

- [4] 陈国青,任明,卫强,等.数智赋能:信息系统研究的新跃迁[J].管理世界,2022(1).
- [5] 单宇,许晖,周连喜,等.数智赋能:危机情境下组织韧性如何形成?——基于林清轩转危为机的探索性案例研究[J].管理世界,2021(3).
- [6] 刘启雷,赵威,苏锦旗,等.基于数智化转型的制造业“双碳”发展:逻辑、路径与政策[J].科学管理研究,2023(3).
- [7] 刘亮,阮俊杰,庄海涛.数智化赋能长三角城市群绿色发展的效应研究[J].经济地理,2024(9).
- [8] 张倩肖,段义学.数字赋能、市场分割与出口产品质量[J].当代经济科学,2024(3).
- [9] 王林辉,姜昊,董直庆.工业智能化会重塑企业地理格局吗[J].中国工业经济,2022(2).
- [10] 刘华珂,李旭超,聂禾,等.AI时代:城市数智化转型与企业创新[J].中国软科学,2024(2).
- [11] 温湖炜,王圣云.数字技术应用对企业创新的影响研究[J].科研管理,2022(4).
- [12] 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(2).
- [13] 戴翔,杨双至.数字赋能、数字投入来源与制造业绿色化转型[J].中国工业经济,2022(9).
- [14] 刘耀彬,邓伟凤,李硕硕,等.数字产业集聚对减污降碳协同的影响——以长江经济带为例[J].资源科学,2024(4).
- [15] 王帅龙.数字经济之于城市碳排放:“加速器”抑或“减速带”?[J].中国人口·资源与环境,2023(6).
- [16] 李鑫,徐琼,王核成.企业数字化转型与绿色技术创新[J].统计研究,2023(9).
- [17] 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(2).
- [18] 刘强,马彦瑞,徐生霞.数字经济发展是否提高了中国绿色经济效率?[J].中国人口·资源与环境,2022(3).
- [19] 姚加权,张锬澎,郭李鹏,等.人工智能如何提升企业生产效率?——基于劳动力技能结构调整的视角[J].管理世界,2024(2).
- [20] 张万里,宣旸.智能化如何提高地区能源效率?——基于中国省级面板数据的实证检验[J].经济管理,2022(1).
- [21] 江小涓,靳景.数字技术提升经济效率:服务分工、产业协同和数实孪生[J].管理世界,2022(12).
- [22] 于世海,许慧欣,孔令乾.数字经济水平对中国制造业资源配置效率的影响研究[J].财贸研究,2022(12).
- [23] Johnson, J. S., S. B. Friend, H. S. Lee. Big data facilitation, utilization, and monetization: Exploring the 3Vs in a new product development process [J]. *Journal of Product Innovation Management*, 2017(5).
- [24] 孙兴,刘熙.中国城市碳排放效率的时空演变及影响因素——基于异质性空间随机前沿模型[J].地理研究,2023(12).
- [25] 张志,易恩文,王军.中国城市数字经济发展的资源配置效应[J].中国软科学,2024(7).
- [26] 田云,贺宜畅.农村劳动力转移促进了农业碳减排吗——基于30个省份的面板数据检验[J].中国地质大学学报(社会科学版),2023(5).
- [27] 周南,张龙耀.传统金融基础、数字禀赋与农村数字金融普惠[J].财贸研究,2022(12).
- [28] 赵凡,罗良文.长江经济带产业集聚对城市碳排放的影响:异质性与作用机制[J].改革,2022(1).
- [29] 刘金科,肖翊阳.中国环境保护税与绿色创新:杠杆效应还是挤出效应?[J].经济研究,2022(1).
- [30] 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).
- [31] Zhao, S., L. Teng, V. E. Arkorful, et al. Impacts of digital government on regional eco-innovation: Moderating role of dual environmental regulations[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2023, 196.
- [32] 王磊,马金铭.非正式环境规制促进农业碳减排了吗——基于社会公众环境关注的视角[J].中国地质大学学报(社会科学版),2024(6).
- [33] 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).
- [34] 张平淡,屠西伟.制造业集聚、技术进步与企业全要素能源效率[J].中国工业经济,2022(7).

- [35]李金铠,马静静,魏伟.中国八大综合经济区能源碳排放效率的区域差异研究[J].数量经济技术经济研究,2020(6).
- [36]白俊红,刘宇英.对外直接投资能否改善中国的资源错配[J].中国工业经济,2018(1).
- [37]林伯强,谭睿鹏.中国经济集聚与绿色经济效率[J].经济研究,2019(2).
- [38]韩先锋,李佳佳.数字金融发展的动态减污降碳效应——基于二元环境约束的新视角[J].中国地质大学学报(社会科学版),2024(5).
- [39]叶琴,曾刚,戴劭劭,等.不同环境规制工具对中国节能减排技术创新的影响——基于285个地级市面板数据[J].中国人口·资源与环境,2018(2).
- [40]陈诗一,陈登科.雾霾污染、政府治理与经济高质量发展[J].经济研究,2018(2).

## Digital Intelligence Empowerment and China's Energy Saving and Carbon Reduction Efficiency: Mechanism and Effect

HE Kun-wen, ZHANG Wen-bin, ZHANG Nan

**Abstract:** As an important strategy in the era of digital economy, digital intelligence empowerment has become a key deployment measure to improve China's energy conservation and carbon reduction efficiency. Based on the inter-provincial panel data from 2011 to 2022, this paper measures data intelligence empowerment index and energy saving and carbon reduction efficiency with entropy method and super-efficiency SBM model and empirically tests the influence and mechanism of data intelligence empowerment on energy saving and carbon reduction efficiency in China. The research results show that: Digital intelligence empowerment significantly improves China's energy saving and carbon reduction efficiency. Empowerment application and environmental support have greater enhancement effects than digital intelligence foundation. This conclusion is still valid after replacing core variables, shrinking tail treatment, changing observation period and considering endogeneity. The impact of digital intelligence empowerment on China's energy conservation and carbon reduction efficiency is obviously heterogeneous, and the promotion effect is more significant in eastern regions, carbon trading pilot regions and regions with higher economic development level. In the process of improving China's energy conservation and carbon reduction efficiency, green technology innovation, resource allocation optimization and high-end industrial agglomeration are important transmission mechanisms, and there are spatial spillover effects. The intensity of environmental regulation plays an important regulatory and threshold role in the influence of digital intelligence empowerment on China's energy conservation and carbon reduction efficiency. The intensity of command-type environmental regulation should be controlled within the optimal range. The increase of guiding and public participation environmental regulation intensity can expand the promotion effect of digital intelligence empowerment on energy conservation and carbon reduction efficiency. Based on the above research conclusions, this paper puts forward the following policy measures: further develop digitalization and intelligence, adopt differentiated means to promote the work of energy conservation and carbon reduction in China, smooth the role of digital intelligence technology channels, leverage spatial effect, and improve the institutional role of environmental regulation tools.

**Key words:** digital intelligence empowerment; energy saving and carbon reduction efficiency; TOE analysis framework; environmental regulation; space overflow

(责任编辑 孙洁)