

绿色创新、数字化转型与高耗能企业碳减排绩效

李婉红, 李 娜*

(哈尔滨工程大学 经济管理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:绿色创新和数字化转型是实现碳达峰、碳中和目标和经济高质量发展的有力举措。以 2011—2019 年高耗能上市企业为样本,构建双固定效应模型验证绿色创新对高耗能企业碳减排绩效的影响效应,并以数字化转型为调节变量,解析数字化转型作用下绿色创新影响高耗能企业碳减排绩效的内在机制。实证结果显示,绿色创新可显著提升高耗能企业碳减排绩效水平,数字化转型则正向调节绿色创新对高耗能企业碳减排绩效的提升作用。考虑行业异质性时,化学原料及化学制品制造业和电力热力的生产和供应业的数字化转型调节效应显著,但石油加工炼焦及核燃料加工业、非金属矿物制品业、黑色金属冶炼和压延加工业以及有色金属冶炼及压延加工业受到绿色创新和数字化转型的影响尚不明显。研究结论为推动我国高耗能企业提升碳减排绩效、实现“双碳”目标提供经验证据。

关键词:绿色创新;数字化转型;高耗能企业;碳减排绩效

中图分类号: F124.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-6062(2023)06-0066-011

DOI: 10.13587/j.cnki.jieem.2023.06.007

0 引言

习近平总书记在 2020 年第 75 届联合国大会上郑重宣布,我国将力争在 2030 年达到碳达峰、2060 年达到碳中和。“双碳”目标的提出体现了我国全面贯彻绿色发展理念、推进生态文明建设的决心^[1]。绿色低碳发展的核心是根据环保需求对产品、工艺以及服务进行更新和优化,以期高效配置和利用资源,减少碳排放对环境生态的破坏,为我国实现“双碳”目标、推动经济高质量发展提供有力支持。尤为值得关注的是,随着新一轮科技革命和产业变革的加速推进,数字化转型成为催生新发展动能的核心驱动力,是助力和推动绿色发展的重要手段,更是实现“双碳”目标的必由之路。就中国碳排放问题而言,高耗能企业是碳排放的主要源头,应作为碳减排的重点管控对象。因此,在我国实现“双碳”目标及构建经济发展新格局的背景下,高耗能企业应注重通过绿色化与数字化的协同实现转型升级。

绿色创新作为应对气候变化的有效手段,近年来备受国内外学者的高度关注。现有研究发现绿色创新对碳减排绩效可能存在复杂的“双刃效应”。一方面,绿色创新可以降低能源消耗或促进产业升级,进而提高碳减排绩效。如 Du 和 Li^[2]、周志方等^[3]指出,绿色创新能够提高能源利用效率,通过生产过程中以清洁能源替代化石燃料的方式提升碳减排绩效。此外,Du 等^[4]指出,绿色创新可以促进产业升级,将生产从低附加值、重污染行业转移到高附加值、无害环境的行业,以降低污染密集型行业产值在整个经济产值中的比重,加速碳减排绩效的提升。另一方面,部分学者认为能源回弹效应不容忽视。如 Du 等^[5]、李凯杰等^[6]指出,当绿色创新提高能源效率后,反而刺激了生产者消费更多的能源,使得减排效应远小于碳排放增长效应,反而降低了碳减排绩效。

申萌等^[7]也认为,绿色创新的直接效应会抑制碳排放,但间接效应却加剧碳排放。因此,高耗能企业进行绿色创新是否有助于提高碳减排绩效?对这一问题的解答既关系高耗能企业的绿色发展,又关系我国“双碳”目标的实现进程。

学术界有关数字化与碳减排绩效关系的探讨可追溯至信息与通信技术(ICT)或互联网对碳减排绩效作用的研究。这些研究观点主要分为两大类,其中部分学者将数字化视为环境治理的福音,认为其有助于传递与环境保护相关的信号,以激励企业实施环保技术。如 Schulte 等^[8]、张三峰和魏下海^[9]等提出,ICT 可以通过提高能源效率和降低可再生能源成本,在抑制气候变化负向效应领域发挥重要作用。此外,Chen^[10]、许宪春等^[11]指出,ICT 可通过预测生态风险、资源整合、环境监管等方式有效防控环境风险。与上述观点不同,另一部分学者则认为数字化并未节约能源,甚至产生额外的能源消耗与碳排放,阻碍绿色发展进程。例如 Salahuddin 和 Alam^[12]指出,ICT 或互联网的快速推广刺激了电力消费,对能源使用施加压力,进而导致碳排放量增加。Lange 等^[13]、Belkhir 和 Elmeligi^[14]也认为,因能源效率提高导致的“回弹效应”反而抵消了数字化对环境友好的影响,ICT 生产、使用和处置过程中能源增加效应远高于削减效应,导致碳排放量增加。因此,高耗能企业的数字化转型究竟是否对绿色创新和企业碳减排绩效起到促进作用?能否助力企业实现碳减排目标?这些问题尚有待验证。

基于此,本文聚焦我国“双碳”目标实现中的关键问题,通过解析高耗能企业绿色创新对碳减排绩效的影响机制,探讨数字化转型在绿色创新对企业碳减排绩效作用中的调节效应,并分析不同行业的异质性效应。本文主要边际贡献如下:第一,引入数字化转型,揭示数字化转型作用下绿色创新

收稿日期: 2022-08-30

基金项目: 国家社会科学基金资助项目(17BGL204);黑龙江省自然科学基金资助项目(LHG2021009);中央高校基本科研业务费重大培育项目(3072022WK0902)

*** 通讯作者:** 李娜(1991—),女,山西晋中人;哈尔滨工程大学经济管理学院,博士研究生;研究方向:绿色创新、数字化转型。

影响高耗能企业碳减排绩效的内在“黑箱”,为探究绿色化和数字化双转型驱动下的企业碳减排绩效问题提供新视角。第二,采用文本挖掘法,以数字化关键词作为判断标准,通过人工识别、数据可视化和 Python 的“Jieba”功能明确界定数字化转型事件,测度高耗能企业的数字化转型程度,为量化企业数字化转型提供思路。第三,考虑高耗能企业所属行业差异,探讨绿色创新、数字化转型与企业碳减排绩效的异质性效应。本文研究结论不仅拓展了绿色创新和数字化转型影响企业碳减排绩效的理论边界,也为推进我国碳达峰、碳中和目标的实现提供决策依据。

1 理论机制

1.1 绿色创新对企业碳减排绩效的影响效应分析

绿色创新是指以显著减轻环境负担或者提高资源利用率为目的的各种创新活动,包括节能型生产流程、环保型产品或服务、绿色管理和业务方法等^[15]。因此,绿色创新可主要分为绿色管理创新和绿色技术创新^[16],即从管理创新角度出发,企业通过实施绿色创新战略、培育绿色创新意识等提高碳减排绩效。此外,从技术创新角度出发,企业则通过末端治理技术、清洁生产技术及碳捕获、利用与封存(CCUS)技术等,可以减少碳排放,进而提升碳减排绩效,但绿色创新的回弹效应可能会抑制碳减排绩效^[6, 17]。

第一,基于绿色管理创新角度,企业通过实施绿色创新战略,对研发、生产、营销等环节进行“绿色化”总体布局,有利于企业合理配置资源,提高碳减排绩效。此外,企业通过制定绿色生产管理制度,对内培育节能减排意识、对外传递绿色环保信号,有助于企业碳减排绩效的加速提升。一方面,作为“双碳”目标的践行者和主力军,企业无疑会将绿色创新战略作为其履行减排职责的主导战略,按照节能减排要求优化产品研发、改进生产流程、升级技术设备、调整用能结构等,从而推动企业低碳或零碳排放。另一方面,基于意义赋权机制,“双碳”目标也会驱动企业通过制定并实施绿色管理制度,对内培育员工节能减排意识、强化环保生产行为,对外则通过信号传递机制,将企业履行社会责任的环保形象传递给外界,获得政府、金融机构等利益相关者对企业的认可,有助于缓解企业绿色创新中可能遇到的融资约束困境,从而提高企业碳减排绩效^[15, 18]。

第二,基于绿色技术创新角度,企业通过采用末端治理技术、清洁生产技术及 CCUS 技术有利于推动企业的碳减排。首先,企业末端治理技术创新主要聚焦末端污染物的有效治理,降低污水、废气等污染物排放量,在一定程度上减缓了生产活动对环境污染和破坏趋势^[19]。此外,企业末端治理技术创新同样可以提高生产废气的末端收集力度,为企业合理利用废弃物提供了条件,实现二氧化碳循环再利用,进而推动企业碳减排^[20]。其次,企业采用清洁生产技术,一是通过改善工艺技术,使用可替代能源及节能设备等,从源头上降低污染物产生^[15];二是通过产品创新,使用环境友好型产品去替代非清洁产品,减少产品的整个生命周期中对环境的不利影响,进而提高碳减排绩效^[21]。最后,企业运用 CCUS 技术,使得二氧化碳实现再生利用,即提纯处理生产环节产生的二氧化碳,再将其投入用于生产或者封存起来,能

够达到有效减排的目的^[22]。

第三,基于回弹效应视角。回弹效应指通过绿色创新提升能源资源利用率,减少能源消耗,但创新的同时也会产生对能源的新需求,新需求的能源甚至可抵消所减少的能源^[17]。在“双碳”目标下,高耗能企业势必会将行为限制到对碳减排有利的方面,即企业通过绿色创新提高能源使用效率,减少碳排放,与此同时可能会刺激高耗能企业消费更多的化石燃料等能源,拉动了新的能源需求,从而部分、甚至完全抵消所节约的能源,碳排放的增加量反而大于减少量,该现象被称为绿色创新引致的能源回弹效应,即绿色创新对碳减排绩效的间接效应^[6]。基于此,本文提出假设 H1。

H1 绿色创新的直接效应有助于提升企业碳减排绩效,但引致的能源回弹效应却抑制企业碳减排绩效。

1.2 数字化转型在绿色创新与企业碳减排绩效间的调节效应分析

数字化转型是指企业不断深化应用云计算、物联网、大数据等为代表的数字技术,加速业务优化升级和创新转型,改造传统动能和培育新动能,实现转型升级和创新过程^①。企业数字化转型既能够提高创新要素在企业间的流动效率,促进创新要素向企业的快速集聚,也有助于企业突破时空界限,形成有关能源投入结构、碳排放量以及绿色减排技术等信息共享与创新协同平台,加速企业碳减排绩效的提升。

第一,基于要素配置视角,数字化转型有利于提高企业绿色创新要素配置效率,并带动碳减排绩效的提升。首先,提升创新要素的流动速度。大数据、区块链等技术引发了创新要素流动机制的深度变革,通过突破创新主体间的要素流动壁垒,缩短不同创新要素间的流动路径,从而将创新要素加速配置到企业绿色创新和节能减排过程中,并带动企业碳减排绩效的提升^[23]。其次,实现创新要素的精准匹配。数字化转型可以解决企业之间存在的信息孤岛和数字鸿沟,打破创新各环节的时空界限,使企业在绿色创新过程中精准匹配创新要素和整合创新资源,实现产品研发、生产工艺等各环节的节能减排,从而提高企业碳减排绩效^[24]。最后,变革创新要素的组合模式。数字技术使得创新要素的组合方式和组合序列发生变革,不同要素可在时空上实现重叠与交叉组合,为企业绿色创新提供更加多样化的组合式要素供给,从而推动企业创新资源配置效率、提升低碳减排效果^[25-26]。

第二,基于信息共享视角,企业数字化转型能够提高企业绿色创新中的“信息力”,进而提升碳减排绩效。首先,大数据技术提高了企业对能源投入结构、碳排放量以及绿色减排技术等数据信息的聚集、融合能力,拓宽信息力的深度,使绿色创新能够突破资源困局,并协助企业进行碳减排预测和决策,快速掌握碳排放市场趋势。其次,数字技术可帮助企业整合内外部信息,并通过各种渠道传递、流动和共享绿色减排技术等方面的信息,提高信息力的广度,为跨部门绿色协同创新提供了机会。最后,数字技术提高了企业快速研发、迭代并交付的能力,加快企业信息力的速度,大幅提升企业绿色创新效率。因此,数字化转型能够提升企业绿色创新

① 资料来源:数字化转型工作手册。

中的“信息力”,通过数字化技术可有效跟踪原材料消耗、能源需求以及废弃物产出,便于管理人员对生产过程中能源消耗和生产情况的把控,并针对性地通过清洁生产技术或末端治理技术从源头到末端控制碳排放,进而实现“双碳”目标^[27-28]。基于此,本文提出假设 H2。

H2 数字化转型可正向调节绿色创新对企业碳减排绩效的促进效应。

2 研究设计

2.1 模型构建

借鉴李凯杰等^[6]的模型,本文结合 2011—2019 年中国 452 家高耗能上市企业相关数据验证绿色创新对企业碳减排绩效的影响效应,构建的基准计量模型如下:

$$Cerp_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 GreRatio_{it} + \alpha_2 (\overline{GreRatio_{it}} \times \overline{Energy_{it}}) + \alpha_3 Control_{it} + u_i + v_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

其中: $Cerp_{it}$ 为碳减排绩效; $GreRatio_{it}$ 为绿色创新; $Energy_{it}$ 为能源消费总量;为避免多重共线性问题,在模型中加入中心化后的绿色创新与能源消费总量的交互项 ($\overline{GreRatio_{it}} \times \overline{Energy_{it}}$); $Control_{it}$ 为控制变量; u_i 为企业固定效应; v_t 为时间固定效应; ε_{it} 为随机干扰项; i 为高耗能企业; t 为年份。

在此基础上,为进一步分析高耗能企业绿色创新与数字化转型交互作用对企业碳减排绩效的影响,在模型中加入中心化后的绿色创新与数字化转型的交互项 ($\overline{GreRatio_{it}} \times \overline{DigTra_{it}}$),得到计量模型如下:

$$Cerp_{it} = \beta_0 + \beta_1 GreRatio_{it} + \beta_2 DigTra_{it} + \beta_3 (\overline{GreRatio_{it}} \times \overline{DigTra_{it}}) + \beta_4 Control_{it} + u_i + v_t + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

其中: $DigTra_{it}$ 为数字化转型程度; β_3 为交互效应,当 $\beta_3 > 0$ 时,表明数字化转型对绿色创新与企业碳减排绩效关系具有正向调节效应,反之,当 $\beta_3 < 0$,则为负向调节效应。

2.2 变量测度

(1)被解释变量。鉴于企业极少披露二氧化碳排放量,故本文依据赵玉珍等^[29]的衡量方法,从 CEADs 数据库搜集行业碳排放量的数据,进而估算企业碳排放量。因此,本文以每单位碳排放所对应的营业收入作为碳减排绩效 ($Cerp$) 的代理变量,该指标数值越大,企业碳减排绩效越好,其具体计算方法见公式(3)。此外,本文借鉴李力等^[30]的方法,运用相对绩效思维,替换被解释变量以虚拟变量方式(企业是否获得政府环保认可)衡量碳减排绩效 ($EnvPro$)^①,进行稳健性检验。

$$\begin{aligned} & \text{碳减排绩效}(Cerp) \\ &= \frac{\text{企业营业收入}}{\left(\frac{\text{行业碳排放量}}{\text{行业主营业务成本}} + 1 \right)} \times \text{企业营业成本} \end{aligned} \quad (3)$$

(2)解释变量。现有文献对于绿色创新的衡量多利用环保方面的研发投入和绿色专利数量,前者被视为创新活动的投入,而后者则被视为产出^[31-32]。鉴于专利数据更能准确刻画技术领域的特征及实际创新能力,本文选取绿色专利数

量来衡量企业的绿色创新能力。借鉴李青原和肖泽华^[33],通过在国家知识产权局检索企业的专利申请和授权数据,并结合绿色专利 IPC 分类号最终得到企业的绿色专利申请和授权数据。相较于绿色专利授权量而言,由于绿色专利的申请量反映企业开展创新的实际时间,且绿色专利占比较绿色专利数量更能有效控制影响企业创新的其他不可观测因素,因此本文采用企业绿色专利申请量与总专利申请量的比值 ($GreRatioA$) 来衡量企业绿色创新能力^[31]。在稳健性检验中,则采用两种方法重新衡量绿色创新,一是借鉴于飞等^[34]的方法,以当年企业环境管理披露情况测度企业绿色管理创新 ($GreMan$)^②;二是借鉴雷星晖等^[35]的方法,使用上市企业财务报告附注中在建工程明细项中同绿色工艺创新相关部分(“脱硫工程”“脱销工程”“环保工程”“超低排放工程”等)发生额总和测量绿色工艺创新 ($GrePro$)。

(3)调节变量。目前我国大部分传统企业处于数字化转型的初级阶段,从微观层面定量研究企业数字化转型的文献较少,且尚未提出评估数字化转型程度的科学方法。考虑到数字化转型作为助力企业高质量发展的新引擎,上市企业关于此方面的决策信息通常会公布在具有指导性质的年报中,通过文本挖掘上市企业年报的关键词汇可一定程度反映企业的未来发展战略^[36]。因此,本文采用文本挖掘法,从上市企业年报中提取与“数字化转型”相关的词频,以此刻画数字化转型程度。依据吴非等^[36]的测度方法,首先,运用 Python 从巨潮资讯网和东方财富网爬取高耗能上市企业的年度报告。其次,基于学术文献^[36-37]、政策文件及政府工作报告^③归纳整理出有关数字化转型的关键词,并咨询数字化转型专家团队,最终确定包括数字化、信息化等在内的 40 个数字化转型相关关键词^④。再次,采用 Python 的“Jieba”实现对各上市企业年报的 40 个关键词的汇总。最后,数字化转型程度 ($DigTra$) 采用数字化转型关键词的总频数占同行业企业关键词的总频数比例来衡量,具体测算方法见公式(4)。在稳健性检验中,使用两种方法衡量数字化转型,第一种方法借鉴袁淳等^[38]的做法,使用上市企业数字化转型关键词的总频数与年报中管理层讨论与分析部分的总字数的比值 ($DigMda$) 进行衡量;第二种方法,考虑到仅从年报提取关

① 虚拟变量设定方式:如企业在碳排放领域获得政府的认可,则被视为碳减排绩效好的企业并赋值为 1;反之,则被视为碳减排绩效差的企业并赋值为 0。

② 绿色管理创新测度方法:加总上市企业披露的环境管理得分。具体而言,按照未披露/披露进行量化打分,分值为 0~1。a 是否披露公司的环保理念、绿色发展等情况;b 是否披露公司的过去环保目标完成情况,及未来环保目标;c 是否披露公司制定相关环境管理制度、规定等一系列管理制度;d 是否披露公司参与的环保相关教育与培训;e 是否披露公司参与的环保专项活动、环保等社会公益活动;f 是否披露公司建立环境相关重大突发事件应急机制,采取的应急措施、对污染物的处理情况等;g 是否披露公司在环境保护方面获得的荣誉或奖励;h 是否披露公司执行“三同时”制度情况。

③ 以《中小企业数字化赋能专项行动方案》《关于推进“上云用数赋智”行动培育新经济发展实施方案》《2020 年数字化转型趋势报告》以及近年《政府工作报告》为蓝本。

④ 数字化转型关键词包括:数字化、智能制造、数智化、智能化、信息化、自动化、云计算、云平台、物联网、数据可视化、大数据、感知技术、云制造、主动制造、智慧制造、智能终端、机器人、工业 4.0、工业互联网、互联网+、人机交互、数据挖掘、移动互联、电子商务、智能营销、数字营销、互联网金融、数字金融、金融科技、量化金融、数据挖掘、人工智能、区块链、数字技术、新型工业化、智能技术、云存储、云联网、万物互联、工业云。

键词无法判断企业数字化转型的实现程度,本文借鉴张永坤等^[39]的做法使用上市企业财务报告附注中无形资产明细项中同数字化转型相关部分(“电脑软件”“电网接入系统”“计算机软件”“ERP 系统”“智能平台”等)与无形资产总额的比值(*DigAss*)对数字化转型进行衡量。

数字化转型程度(*DigTra*)

$$= \frac{\text{企业数字化转型关键词总频数}}{\text{同行业企业数字化转型关键词总频数}} \quad (4)$$

(4)控制变量。借鉴有关文献,本文控制了城市和企业两个层面的影响变量。其中,城市层面的变量包括:①产业结构(*Struct*):采用第二产业/GDP 来衡量^[40]。②环境规制强度(*Ers*):采用工业烟(粉)和二氧化硫去除率两个指标构建的综合指数来衡量^[40];③经济发展水平(*Pgdp*):采用各城市的实际人均 GDP 来衡量^[40]。企业层面的变量包括:①能源消费总量(*Energy*):采用行业能源消费总量除以行业主营业务成本再乘以企业营业成本,以测度绿色创新引致的能源回弹效应^[6]。②资产负债率(*Lev*):采用企业负债总计/资产总计来衡量,以控制企业的偿债能力^[33]。③净利润增长率(*Npgr*):采用(企业本期净利润-上期净利润)/上期

净利润来衡量,以控制企业的成长能力^[33]。④流动资产周转率(*Catr*):采用企业营业收入/流动资产期末余额来衡量,以控制企业的经营能力^[41]。⑤研发费用率(*Rder*):采用企业研发费用/营业收入来衡量,以控制企业的盈利能力^[15]。

2.3 数据来源

本文运用 2011—2019 年中国高耗能上市企业数据进行实证研究,数据主要来源于国泰安数据库、国家知识产权局、历年《上市公司年度报告》《中国城市统计年鉴》《中国能源统计年鉴》等。根据《2010 年国民经济和社会发展统计报告》六大高耗能行业^①以及 2020 年的证监会《上市公司行业分类指引》来匹配高耗能上市企业,并删除有 ST、*ST 和 PT 以及研究期内更换行业的上市公司。同时,为消除异方差的影响,对连续变量都进行对数模变换^[42];为消除离群值的影响,对全部连续变量均以 1%的标准缩尾;为消除价格变动的影响,企业财务数据和各城市 GDP 均转换为 2011 年的不变价格。变量描述性统计和相关系数矩阵见表 1。从表 1 可知,被解释变量和解释变量间有较强的相关性,这为基础回归提供了初步支持。

表 1 变量的描述性统计和相关系数

Table 1 Descriptive statistics and correlation coefficient of variables

变量	均值	标准差	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1 <i>Cerp</i>	1.302	0.413	1										
2 <i>GreRatioA</i>	0.296	0.417	0.184***	1									
3 <i>DigTra</i>	0.013	0.031	0.014**	0.220***	1								
4 <i>Energy</i>	16.124	3.295	-0.225***	0.090***	0.119***	1							
5 <i>Lev</i>	0.487	0.280	-0.268***	0.005	0.025	0.342***	1						
6 <i>Npgr</i>	-0.668	27.087	0.211***	0.190***	0.079***	-0.001	-0.117***	1					
7 <i>Catr</i>	1.746	1.381	-0.310***	0.022	0.018	0.253***	0.184***	0.008	1				
8 <i>Rder</i>	0.004	0.014	0.205***	0.075***	0.052***	-0.091***	-0.111***	-0.002	-0.117***	1			
9 <i>Struct</i>	0.453	0.112	-0.160***	-0.222***	-0.124***	0.031*	-0.017	-0.129***	0.062***	-0.001	1		
10 <i>Ers</i>	1.199	2.644	0.056***	0.211***	0.122***	0.075***	0.045**	0.127***	0.027*	-0.004	-0.178***	1	
11 <i>Pgdp</i>	9.701	8.024	0.121***	0.197***	0.087***	-0.038**	-0.006	0.111***	-0.083***	0.065***	-0.156***	0.223***	1

注:***、**和*分别表示 $p < 0.01$ 、 $p < 0.05$ 和 $p < 0.1$ 。

3 实证分析

3.1 基准回归结果

本文首先进行 VIF 检验,VIF 均小于 2,故变量间均不存在多重共线性现象。其次,进行 Hausman 检验,结果拒绝原假设,故选取固定效应模型。最后,进行组间异方差检验、序列相关检验,结果均拒绝原假设,表明企业各类组间异方差、组间自相关。综上,为消除截面个体间可能存在的异方差性,本文采用固定效应模型并通过随机抽样重复 500 次获取标准误,估计绿色创新对高耗能企业碳减排绩效的影响,表 2 第 I 列显示的是控制变量未引入情况下的估计结果,II、III 两列显示的是分别引入企业层面、企业和城市层面控制变量情况下的估计结果。

第一,从表 2 第 I 列可知,绿色创新对高耗能企业碳减排绩效的直接影响系数为 0.147,且在 1%水平下正向显著,表明绿色创新每提高 1%,可使高耗能企业碳减排绩效提升 0.147%。同时绿色创新与能源消费总量的交叉项对碳减排绩效的间接影响系数为-0.007,且在 10%水平下负向显著,

说明绿色创新也会通过能源消费总量负向影响碳减排绩效,表明绿色创新可能引致一定程度的能源回弹效应,但能源回弹带来的间接效应远小于绿色创新的直接效应,则绿色创新对高耗能企业碳减排绩效主要存在正向促进效应,假设 H1 得以验证。第 II 和 III 列引入控制变量后,绿色创新的系数仍显著为正,可见绿色创新有利于提升高耗能企业碳减排绩效,这一实证结果与周键和刘阳^[41]的研究结论一致。由此可见,石化、化工等传统高耗能行业企业通过实施绿色创新可有效缓解高碳排放问题。

第二,由表 2 中控制变量的回归结果可知,净利润增长率、研发费用率、环境规制强度及经济发展水平的提高均有利于提升高耗能企业碳减排绩效,即企业的成长能力、盈利能力越强越利于企业推动经济发展与碳排放逐渐“脱钩”,城市的环境规制强度以及经济发展水平越高越利于提高企业

① 六大高耗能行业:C25:石油加工炼焦及核燃料加工业;C26:化学原料及化学制品制造业;C30:非金属矿物制品业;C31:黑色金属冶炼和压延加工业;C32:有色金属冶炼及压延加工业;D44:电力热力的生产和供应业。

表 2 绿色创新对高耗能企业碳减排绩效的影响
Table 2 Impact of green innovation on carbon emission reduction performance of energy-intensive enterprises

变量	I	II	III
	Cerp	Cerp	Cerp
GreRatioA	0.147*** (0.009)	0.132*** (0.009)	0.032** (0.013)
GreRatioA × Energy	-0.007* (0.004)	-0.007* (0.004)	-0.007* (0.004)
Lev		-0.052** (0.024)	-0.034 (0.021)
Npgr		0.012*** (0.002)	0.004*** (0.001)
Catr		-0.040** (0.016)	-0.029** (0.015)
Rder		0.654** (0.261)	0.521** (0.251)
Struct			-0.722*** (0.109)
Ers			0.014** (0.006)
Pgdp			0.083*** (0.018)
时间固定效应	是	是	是
企业固定效应	是	是	是
常数	0.779*** (0.004)	0.840*** (0.018)	0.929*** (0.069)
观测值	4068	4068	4068
R ²	0.216	0.251	0.376

注:括号内为稳健标准误;***、**和*分别表示 $p<0.01$ 、 $p<0.05$ 和 $p<0.1$ 。下同。

碳减排绩效。而流动资产周转率、资产负债率及产业结构则为负向影响,具体表现为:企业面临的财务风险随资产负债率增大而变大,此时不利于高耗能企业碳减排绩效的提高;

企业的经营能力随流动资产周转率增大而变强,导致企业生产活动中产生的碳排放较多,进而降低企业碳减排绩效;第二产业比其他产业消耗更多能源和造成污染,第二产业占GDP的比重越大,碳排放量也越多。

3.2 稳健性检验

(1) 内生性问题

由于内生性会破坏参数估计的“一致性”,因此成为实证研究中不可忽视的问题。内生性的来源主要有变量的测量误差、遗漏变量偏误以及逆向因果等,故本文运用下列方法处理该问题,以确保基准回归结果具有稳健性。

第一,测量误差。为了分析测量误差是否会影响回归结果,本文更换绿色创新和企业碳减排绩效的衡量方式重新进行回归,绿色创新采用加总上市企业披露的环境管理得分加1后取对数以及当年绿色工艺创新所有项目发生额总和加1后取对数两种方法来衡量,企业碳减排绩效采用企业是否获得政府环保认可的虚拟变量来衡量,以此进一步检验绿色创新对企业碳减排绩效的影响,其回归结果呈现在表3第I-III列中。由I-II列的回归结果可知,无论是从管理层面或是技术层面测度绿色创新,基准回归均稳健。由III列的回归结果可知,替换碳减排绩效的测度方法后,基准回归仍稳健。综上,在考虑核心解释变量和被解释变量的测量误差后,绿色创新的系数符号和显著性与基础回归基本一致,证实了基准回归结果的稳健性。

第二,遗漏变量。考虑到遗漏变量也可能带来内生性问题,本文进一步加入了企业层面的企业年龄(采用企业成立年限来衡量)和企业规模(采用企业实际总资产来衡量)以及城市和行业固定效应,表3第IV列报告了解决遗漏变量问题的回归结果。由表3第IV列可知,绿色创新仍正向影响高耗能企业碳减排绩效,说明基准回归结论具有稳健性。

表 3 变量的测量误差和遗漏变量偏误的稳健性检验
Table 3 Robustness test of measurement error and missing variable bias variables

变量	测量误差			遗漏变量
	I	II	III	IV
	Cerp-GreMan	Cerp-GrePro	EnvPro-GreRatioA	Cerp-GreRatioA
Gre(Man/Pro/RatioA)	0.012**(0.005)	0.006*** (0.001)	0.208*** (0.034)	0.032** (0.013)
Gre(Man/Pro/RatioA) × Energy	-0.001** (0.000)	-0.001** (0.000)	-0.092*** (0.017)	-0.007* (0.004)
Age				0.126 (0.123)
Size				0.025 (0.045)
控制变量	是	是	是	是
时间固定效应	是	是	是	是
企业固定效应	是	是	是	是
城市固定效应	否	否	否	是
行业固定效应	否	否	否	是
常数	0.933*** (0.0676)	0.922*** (0.065)	0.552*** (0.194)	0.500 (0.401)
观测值	4068	4068	4068	4068
R ²	0.372	0.381	0.278	0.380

第三,逆向因果。由于绿色创新可能会和高耗能企业碳减排绩效存在逆向因果关系而导致内生性问题,因此采用工具变量加以克服。在已有文献中,绿色产品创新是有效的工具变量,一方面,如解学梅和朱琪玮^[15]指出企业进行绿色产品创新主要是对产品进行绿色理念的设计及改进,而企业绿

色专利申请则主要是基于绿色创新的发明和实用型专利,因此其满足工具变量的“相关性”假设。另一方面,绿色产品创新是对产品进行开发,其目的主要在于为用户提供新产品,与企业绿色专利申请不存在直接关系,能够较好地满足工具变量的“外生性”假设^[43]。此外,借鉴 Davidson 和

MacKinnon^[43]的方法,解释变量的滞后项也可作为工具变量。因此,本文选取绿色产品创新^①(*GrePro*)和滞后一期的绿色专利申请量与总专利申请量的比值(*L. GreRatioA*)作为绿色创新的工具变量。表4报告了采用工具变量法的检验结果。

表4 绿色创新影响高耗能企业碳减排绩效的工具变量检验

Table 4 Test of instrumental variables of green innovation affecting carbon emission reduction performance of energy-intensive enterprises

变量	I	II
	<i>GreRatioA</i>	<i>Cerp</i>
<i>GrePro</i>	0.100*** (0.011)	
<i>L. GreRatioA</i>	0.071*** (0.018)	
<i>GreRatioA</i>		0.049* (0.030)
<i>GreRatioA</i> × <i>Energy</i>	0.007 (0.006)	-0.009*** (0.001)
控制变量	是	是
时间固定效应	是	是
企业固定效应	是	是
常数	0.071 (0.229)	0.856*** (0.051)
观测值	3616	3616
<i>R</i> ²	0.673	0.814
Anderson canon. corr. LM (伪识别检验)	150.932 [p=0.0000]	
Cragg-Donald Wald (弱工具变量检验)	27.000 [p=0.0000]	
Sargan statistic (过度识别检验)	6.102 [p=0.1917]	
Durbin-Wu-Hausman (内生性检验)	0.216 [p=0.0000]	

由表4可知,将绿色产品创新和滞后一期的绿色专利申请量与总专利申请量的比值作为绿色创新的联合工具变量,第I列中绿色产品创新和滞后一期的绿色专利申请量与总专利申请量的比值的系数显著,并且伪识别、弱工具变量和内生性检验显著以及过度识别不显著,说明选取的联合工具变量合理、有效。此外,从第II列可知,绿色创新的系数仍显著为正,因此能够证实绿色创新促进高耗能企业碳减排绩效的稳健性。

(2) 其他稳健性检验

为进一步确保基准回归结果的稳健性,本文还运用以下两种方式进行检验。第一,由于标准误聚类偏差可能导致绿色创新显著性结果出现误判,因此重新对标准误进行聚类处理,使其锁定在行业和城市层面。第二,考虑到动态面板选择偏差可能导致估计结果有偏,本文采用系统GMM法进一步检验绿色创新对企业碳减排绩效的影响。回归结果见表5。

从表5的I~II列可知,将标准误重新聚类在城市和行业层面后,绿色创新的系数符号和显著性并未发生明显变化,证实了研究结果的稳健性。此外,动态面板选择偏差也可能影响基准回归结果,但从表5第III列可知,AR(1)显著而AR(2)不显著,Sargan检验不显著,表明模型选择合理。进一步分析,企业碳减排绩效的一阶滞后项系数显著,说明企业上一期碳减排绩效的变化对当期产生影响。绿色创新

表5 标准误聚类偏差和动态面板选择偏差的稳健性检验

Table 5 Robustness test of standard error clustering deviation and dynamic panel selection deviation

变量	标准误聚类偏差		动态面板选择偏差
	I	II	III
	<i>Cerp</i>	<i>Cerp</i>	<i>Cerp</i>
<i>L. Cerp</i>			0.807*** (0.069)
<i>GreRatioA</i>	0.032** (0.014)	0.032* (0.018)	0.037** (0.022)
<i>GreRatioA</i> × <i>Energy</i>	-0.007** (0.003)	-0.007* (0.005)	-0.037** (0.015)
控制变量	是	是	是
时间固定效应	是	是	是
企业固定效应	是	是	是
常数	0.929*** (0.080)	0.929*** (0.066)	0.369** (0.167)
观测值	4068	4068	3616
<i>R</i> ²	0.376	0.376	
AR(1)			-4.600***
AR(2)			1.350
Sargan 检验			58.170

的回归系数仍显著为正,这与本文的基准回归结果也保持了一致性。

4 数字化转型的调节效应检验

4.1 调节效应的实证检验

“十四五”是中国“碳达峰”的窗口期,绿色创新和数字化转型作为能够实现经济和环境效益双赢的有效手段,两者间存在一定内在关系。因此,考虑到绿色创新对企业碳减排绩效的影响可能受到数字化转型的作用,本文引入数字化转型调节变量,考察其对于绿色创新与企业碳减排绩效关系的调节效应,回归结果如表6所示。

表6 绿色创新、数字化转型与企业碳减排绩效关系的回归结果

Table 6 Regression results of the relationship among green innovation, digital transformation and enterprise carbon emission reduction performance

变量	I	II	III
	<i>Cerp-DigTra</i>	<i>Cerp-DigAss</i>	<i>Cerp-DigMda</i>
<i>GreRatioA</i>	0.031** (0.013)	0.023** (0.011)	0.008* (0.015)
<i>Dig(Tra/Ass/Mda)</i>	-0.037 (0.125)	0.135*** (0.034)	0.020*** (0.003)
<i>GreRatioA</i> × <i>Dig(Tra/Ass/Mda)</i>	0.178* (0.092)	0.102* (0.131)	0.019** (0.009)
控制变量	是	是	是
时间固定效应	是	是	是
企业固定效应	是	是	是
常数	0.921*** (0.070)	0.915*** (0.068)	0.851*** (0.058)
观测值	4068	4068	4068
<i>R</i> ²	0.372	0.392	0.397

① 绿色产品创新采用内容分析法,以未披露/披露、定性/定量结合的原则对企业社会责任报告内容进行量化打分,0=无描述,1=定性描述,2=定量描述,最终数值为所有指标的评分总和。

如表6第I列所示,绿色创新的系数和绿色创新与数字化转型的交互项系数均显著为正,表明数字化转型能够促进绿色创新对企业碳减排绩效的正向影响,假设H2得以验证。表6的II列和III列是将*DigTra*分别替换为*DigAss*和*DigMda*的回归结果,II列和III列的估计系数符号和显著性水平均未发生根本性变化,进一步表明数字化转型正向调节绿色创新对企业碳减排绩效的影响。上述结果产生的原因可能在于:第一,数字化转型赋予了数据新的资源属性,削弱了信息不对称负面影响要素流通效应,有助于要素加速流动,提高了企业资源的综合配置效率,进一步催生企业绿色创新动力、改变绿色创新方式,从而提升企业碳减排绩效

效^[25]。第二,数字化转型提高了企业的生产与运营管控能力,企业能够实现对生产排污全过程进行实时监测,企业针对排污情况可有效通过清洁生产技术或末端治理技术实现绿色低碳发展^[44]。

4.2 调节效应的异质性检验

考虑到不同行业以及不同类型企业之间因特质不同,致使绿色创新、数字化转型路径出现差异,故数字化转型对其绿色创新与碳减排绩效的影响存在一定异质性。因此,本文从行业异质性角度对6种类型行业的绿色创新、数字化转型与企业碳减排绩效关系进行估计,回归结果如表7所示。

表7 行业异质性分析
Table 7 Industry heterogeneity analysis

变量	I C25	II C26	III C30	IV C31	V C32	VI D44
	<i>Cerp</i>	<i>Cerp</i>	<i>Cerp</i>	<i>Cerp</i>	<i>Cerp</i>	<i>Cerp</i>
<i>GreRatioA</i>	-0.082 (0.050)	0.043* (0.024)	-0.021 (0.030)	0.019 (0.012)	0.013 (0.013)	0.059*** (0.022)
<i>DigTra</i>	0.126 (0.179)	2.052** (0.831)	-0.370 (0.374)	0.009 (0.142)	0.749*** (0.278)	0.311 (0.398)
<i>GreRatioA</i> × <i>DigTra</i>	0.116 (0.097)	1.821* (0.963)	0.417 (0.289)	0.062 (0.054)	0.071 (0.271)	0.874** (0.342)
控制变量	是	是	是	是	是	是
时间固定效应	是	是	是	是	是	是
企业固定效应	是	是	是	是	是	是
常数	0.029** (0.014)	0.368*** (0.029)	0.230*** (0.042)	0.033*** (0.006)	0.086*** (0.013)	0.144*** (0.036)
观测值	4068	4068	4068	4068	4068	4068
<i>R</i> ²	0.460	0.413	0.401	0.721	0.379	0.450

由表7可知,除化学原料及化学制品制造业、电力热力的生产和供应业两个行业的数字化转型对绿色创新与企业碳减排绩效的调节效应显著为正,其他交互项系数均不显著,这说明对于不同行业的企业而言,数字化转型的调节作用体现出异质性。其中,C26和D44在绿色化和数字化融合作用下,行业减碳效果明显,但C25、C30、C31和C32受到绿色创新和数字化转型的影响尚不明显。根据《中国企业数字化转型研究报告(2020)》可知^[45],制造业企业是参评企业中数字化转型的“先行者”,占比高达42.3%,制造业中化学原料及化学制品制造业占比最高为20%,先行化学原料及化学制品制造业企业的数字化转型已步入良性循环,通过数字化转型促进了企业的绿色低碳发展。相比其他行业,电力热力的生产和供应业行业可以实时产生大量数据,具备适应工业互联网的技术基础,基于云平台,实现供电、供热等设备智能化管理,对供电、供热等实时监控,帮助企业实现供电、供热等精准调节和能源高效应用,其数字化转型也逐渐发挥作用,其他高耗能行业的数字化转型的影响作用尚不明显。因此,亟需按照不同高耗能行业的自身特质,根据各行业数字化程度差异、所处阶段差异,有针对性地将新一代信息技术应用到生产、管理等过程中,逐步提高各行业的数字化能力,通过数字化技术提升能源使用效率,进而实现减排效应。

5 结论与政策建议

考虑到绿色创新和数字化转型是实现我国碳达峰、碳中和

的重要途径,本文以452家高耗能上市企业为研究样本,运用双固定效应模型探讨绿色创新对高耗能企业碳减排绩效的影响效应及数字化转型的调节效应。研究结果表明,第一,绿色创新对高耗能企业碳减排绩效水平存在正向促进效应,且通过内生性、标准误聚类偏差、动态面板选择偏差等进行检验,结果均具有稳健性。第二,数字化转型可提高绿色创新对高耗能企业碳减排绩效的促进作用。第三,行业间特质的差异使得数字化转型对绿色创新和高耗能企业碳减排绩效关系的影响产生异质性,化学原料及化学制品制造业和电力热力的生产和供应业的数字化转型调节效应显著,但石油加工炼焦及核燃料加工业、非金属矿物制品业、黑色金属冶炼和压延加工业以及有色金属冶炼及压延加工业受到绿色创新和数字化转型的影响尚不明显。

为提升高耗能企业绿色创新能力、数字化转型程度以及碳减排绩效,本文提出如下建议:第一,政府应制定高耗能行业绿色化、数字化的结构性改革方案,加快推进以绿色化、数字化为核心的新型基础设施,推动绿色创新与数字化的深度融合,为高耗能企业推进两化转型提供条件。同时,政府还应推动高等院校和科研机构开展与绿色创新和数字化相关的基础研究,着重培养绿色创新、数字化转型人才,为企业输送具备绿色、数字素养的人才,进而通过绿色创新和数字化转型提升企业碳减排绩效,加快实现由高碳向低碳、再由低碳向碳中和的重大转型。第二,高耗能行业应根据行业特点

和发展阶段,针对性制定绿色化、数字化转型方案,并采取分阶段、分步骤方式,在秉持问题导向、急用先行的原则下,逐步实现各行业绿色化、数字化转型。此外,高耗能行业还应充分考虑行业发展规律,科学有序推进节能降碳改造,避免“运动式”节能减碳,并强调“先立后破”,先将减碳的绿色创新和数字化转型的基础设施做好,再去煤减碳,进而推动高耗能行业全面转向绿色发展。第三,高耗能企业应积极打造低碳文化,建立健全绿色管理体系和数字化管理体系,在绿色化、数字化转型中使管理者乃至员工最大程度地获得参与感,推动绿色低碳发展。与此同时,高耗能企业的投入方向应尽快向绿色创新、数字化转型的资金、人才等资源方面倾斜,从产品、生产、管理有序推进绿色化、数字化转型,努力构筑起“绿色与数字”共舞平台,充分结合源头控制和末端治理,提升绿色创新效率,履行节能减排职责,最终实现碳达峰、碳中和目标。

参 考 文 献

- [1] 蔡博峰,曹丽斌,雷宇,等.中国碳中和目标下的二氧化碳排放路径[J].中国人口·资源与环境,2021,31(1):7-14.
Cai B F, Cao L B, Lei Y, et al. China's carbon emission pathway under the carbon neutrality target[J]. China Population, Resources and Environment, 2021, 31(1): 7-14.
- [2] Du K, Li J. Towards a green world: How do green technology innovations affect total-factor carbon productivity [J]. Energy Policy, 2019, 131(8): 240-250.
- [3] 周志方,李祎,肖恬,等.碳风险意识、低碳创新与碳绩效[J].研究与发展管理,2019,31(3):72-83.
Zhou Z F, Li Y, Xiao T, et al. Carbon Risk Awareness, Low Carbon Innovation and Carbon Performance [J]. R&D Management, 2019, 31(3): 72-83.
- [4] Du K R, Li P Z, Yan Z M. Do green technology innovations contribute to carbon dioxide emission reduction? Empirical evidence from patent data[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2019, 146: 297-303.
- [5] Du K, Shao S, Yan Z. Urban Residential Energy Demand and Rebound Effect in China: A Stochastic Energy Demand Frontier Approach[J]. The Energy Journal, 2020, 42(2): 175-194.
- [6] 李凯杰,董丹丹,韩亚峰.绿色创新的环境绩效研究——基于空间溢出和回弹效应的检验[J].中国软科学,2020(7):112-121.
Li K J, Dong D D, Han Y F. The Analysis on the Environmental Performance of Green Innovation An Examination Based on Spatial Spillover Effect and Rebound Effect[J]. China Soft Science, 2020 (7): 112-121.
- [7] 申萌,李凯杰,曲如晓.技术进步、经济增长与二氧化碳排放:理论和经验研究[J].世界经济,2012,35(7):83-100.
Shen M, Li K J, Qu R X. Technological progress, economic growth and carbon dioxide emissions: Theoretical and empirical research[J]. World Economy, 2012, 35(7): 83-100.
- [8] Schulte P, Welsch H, Rexhaeuser S. ICT and the Demand for Energy: Evidence from OECD Countries [J]. Environmental & Resource Economics, 2016, 63(1): 119-146.
- [9] 张三峰,魏下海.信息与通信技术是否降低了企业能源消耗——来自中国制造业企业调查数据的证据[J].中国工业经济,2019(2):155-173.
Zhang S F, Wei X H. Does Information and Communication Technology Reduce Enterprise's Energy Consumption-Evidence from Chinese Manufacturing Enterprises Survey [J]. China Industrial Economics, 2019(2): 155-173.
- [10] Chen L J. How CO2 emissions respond to changes in government size and level of digitalization? Evidence from the BRICS countries [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29: 457-467.
- [11] 许宪春,任雪,常子豪.大数据与绿色发展[J].中国工业经济,2019(4):5-22.
Xu X C, Ren X, Chang Z H. Big Data and Green Development [J]. China Industrial Economics, 2019(4): 5-22.
- [12] Salahuddin M, Alam K. Internet usage, electricity consumption and economic growth in Australia: A time series evidence [J]. Telematics and Informatics, 2015, 32(4): 862-878.
- [13] Lange S, Santarius T, Pohl J. Digitalization and Energy Consumption. Does ICT Reduce Energy Demand? [J]. Ecological Economics, 2020, 176: 106760.
- [14] Belkhir L, Elmeli A. Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 177(3): 448-463.
- [15] 解学梅,朱琪玮.企业绿色创新实践如何破解“和谐共生”难题? [J]. 管理世界, 2021, 37(1): 128-149.
Xie X M, Zhu Q W. How Can Green Innovation Solve the Dilemmas of “Harmonious Coexistence”? [J]. Management World, 2021, 37 (1): 128-149.
- [16] Xu L, Fan M T, Yang L L, et al. Heterogeneous green innovations and carbon emission performance: Evidence at China's city level [J]. Energy Economics, 2021, 99: 105269.
- [17] 田云,尹恣昊.技术进步促进了农业能源碳减排吗?——基于回弹效应与空间溢出效应的检验[J].改革,2021(12):45-58.
Tian Y, Yin M H. Does Technological Progress Promote Carbon Emission Reduction of Agricultural Energy? Test Based on Rebound Effect and Spatial Spillover Effect [J]. Reform, 2021 (12): 45-58.
- [18] 徐建中,贯君,林艳.制度压力、高管环保意识与企业绿色创新实践——基于新制度主义理论和高阶理论视角[J].管理评论,2017,29(9):72-83.
Xu J Z, Guan J, Lin Y. Institutional Pressures, Top Managers' Environmental Awareness and Environmental Innovation Practices: An Institutional Theory and Upper Echelons Theory Perspective [J]. Business Review, 2017, 29(9): 72-83.
- [19] 解学梅,霍佳阁,王宏伟.绿色工艺创新与制造业行业财务绩效关系研究[J].科研管理,2019,40(3):63-73.
Xie X M, Huo J G, Wang H W. A research on the relationship between green process innovation and financial performance of the manufacturing industry [J]. Science Research Management, 2019, 40(3): 63-73.
- [20] 汪明月,李颖明.企业绿色技术创新升级及政府价格型规制的调节作用研究[J].科研管理,2022,43(10):71-80.
Wang M Y, Li Y M. Research on upgrading of enterprises' green technology innovation and the moderation effect of government price regulation [J]. Science Research Management, 2022, 43 (10):

- 71-80.
- [21] 汪明月, 张浩, 李颖明, 等. 绿色技术创新绩效传导路径的双重异质性研究——基于642家工业企业的调查数据[J]. 科学学与科学技术管理, 2021,42(8):141-166.
Wang M Y, Zhang H, Li Y M, et al. Research on the Dual Heterogeneity of Performance Transmission Paths of Green Technology Innovation: Based on the Data of 642 Industrial Enterprises in China [J]. Science of Science and Management of S. & T., 2021,42(8): 141-166.
- [22] 肖涵彬, 李明, 田世杰, 等. 碳中和背景下碳捕集、利用与封存技术专利发展研究——基于知识图谱的可视化分析[J]. 热力发电, 2021,50(12):122-131.
Xiao H B, Li M, Tian S J, et al. Carbon capture, utilization and storage technology under carbon neutral background Research on Patent Development-Visual analysis based on knowledge graph[J]. Thermal Power Generation, 2021,50(12):122-131.
- [23] 王如玉, 梁琦, 李广乾. 虚拟集聚:新一代信息技术与实体经济深度融合的空间组织新形态[J]. 管理世界, 2018,34(2):13-21.
Wang R Y, Liang Q, Li G Q. A New form Of the Spatial Agglomeration Under the Deep Integration Of a New Generation Of Information Technology and the Real Economy[J]. Management World, 2018,34(2):13-21.
- [24] 赵剑波. 推动新一代信息技术与实体经济融合发展:基于智能制造视角[J]. 科学学与科学技术管理, 2020,41(3):3-16.
Zhao J B. The Integration of the New Generation of Information Technology with the Real Economy: Based on the Paradigm of Smart Manufacturing[J]. Science of Science and Management of S. & T., 2020,41(3):3-16.
- [25] 刘启雷, 张媛, 雷雨嫣, 等. 数字化赋能企业创新的过程、逻辑及机制研究[J]. 科学学研究, 2022,40(1):150-159.
Liu Q L, Zhang Y, Lei Y Y, et al. Research on Process, Logic and Implementation Mechanism of Digital Enabling Enterprise Innovation[J]. Studies in Science of Science, 2022,40(1):150-159.
- [26] 白全民, 贾永飞. 加快数字化转型 促进创新要素向企业集聚[N]. 科技日报, 2021-03-05(10).
Bai Q M, Jia Y F. Accelerate digital transformation and promote the aggregation of innovation elements to enterprises[N]. Science and Technology Daily, 2021-03-05(10).
- [27] 陈少威, 贾开. 数字化转型背景下中国环境治理研究:理论基础的反思与创新[J]. 电子政务, 2020(10):20-28.
Chen S W, Jia K. Research on China's Environmental Governance in the Context of Digital Transformation: Reflection and Innovation of Theoretical Basis[J]. E-Government, 2020(10):20-28.
- [28] 陈凯华, 冯泽, 孙茜. 创新大数据、创新治理效能和数字化转型[J]. 研究与发展管理, 2020,32(6):1-12.
Chen K H, Feng Z, Sun Q. Big Data of Innovation, Innovation Governance Efficacy and Digital Transformation [J]. R&D Management, 2020,32(6):1-12.
- [29] 赵玉珍, 乔亚杰, 周黎, 等. 减排措施如何提升高能耗企业财务绩效——碳绩效的中介作用[J]. 系统工程, 2021,39(6):14-24.
Zhao Y Z, Qiao Y J, Zhou Li, et al. How to improve financial performance of high energy consumption enterprises by emission reduction measures-Mediating role of carbon performance [J]. Systems Engineering, 2021,39(6):14-24.
- [30] 李力, 刘全齐, 唐登莉. 碳绩效、碳信息披露质量与股权融资成本[J]. 管理评论, 2019,31(1):221-235.
Li L, Liu Q Q, Tang D L. Carbon Performance, Carbon Information Disclosure Quality and Cost of Equity Financing [J]. Business Review, 2019,31(1):221-235.
- [31] 宋德勇, 朱文博, 王班班. 中国碳交易试点覆盖企业的微观实证:碳排放权交易、配额分配方法与企业绿色创新[J]. 中国人口·资源与环境, 2021,31(1):37-47.
Song D Y, Zhu W B, Wang B B. Micro-empirical evidence based on China's carbon trading companies: Carbon emissions trading, quota allocation methods and corporate green innovation[J]. China Population, Resources and Environment, 2021,31(1):37-47.
- [32] 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.
Tao F, Zhao J Y, Zhou H. Does Environmental Regulation Improve the Quantity and Quality of Green Innovation-Evidence from the Target Responsibility System of Environmental Protection [J]. China Industrial Economics, 2021(2):136-154.
- [33] 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.
Li Q Y, Xiao Z H. Heterogeneous Environmental Regulation Tools and Green Innovation Incentives: Evidence from Green Patents of Listed Companies[J]. Economic Research Journal, 2020,55(9):192-208.
- [34] 于飞, 袁胜军, 胡泽民. 知识基础、知识距离对企业绿色创新影响研究[J]. 科研管理, 2021,42(1):100-112.
Yu F, Yuan S J, Hu Z M. Impact of knowledge base and knowledge distance on firm's green innovation [J]. Science Research Management, 2021,42(1):100-112.
- [35] 雷星晖, 张金涛, 苏涛永, 等. 生态问责、媒体报道与企业绿色工艺创新——基于中央环保督察的准自然实验研究[J]. 外国经济与管理, 2022,44(4):51-64.
Lei X H, Zhang J T, Su T Y, et al. Ecological Accountability, Media Reports and Enterprises' Green Process Innovation: A Quasi-natural Experiment from Central Environmental Inspection [J]. Foreign Economics and Management, 2022,44(4):51-64.
- [36] 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.
Wu F, Hu H Z, Lin H Y, et al. Enterprise Digital Transformation and Capital Market Performance: Empirical Evidence from Stock Liquidity[J]. Management World, 2021,37(7):130-144.
- [37] 李婉红, 王帆. 智能化转型、成本黏性与企业绩效——基于传统制造企业的实证检验[J]. 科学学研究, 2022,40(1):91-102.
Li W H, Wang F. Intelligent Transformation, Cost Stickiness and Enterprise Performance-An Empirical Study Based on Traditional Manufacturing Enterprises [J]. Studies in Science of Science, 2022,40(1):91-102.
- [38] 袁淳, 肖士盛, 耿春晓, 等. 数字化转型与企业分工:专业化还是纵向一体化[J]. 中国工业经济, 2021(9):137-155.

- Yuan C, Xiao T S, Geng C X, et al. Digital Transformation and Division of Labor between Enterprises: Vertical Specialization or Vertical Integration[J]. *China Industrial Economics*, 2021(9): 137-155.
- [39] 张永坤, 李小波, 邢铭强. 企业数字化转型与审定价[J]. *审计研究*, 2021(3): 62-71.
- Zhang Y S, Li X B, Xing M Q. Enterprise Digital Transformation and Audit Pricing[J]. *Auditing Research*, 2021(3): 62-71.
- [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.
- Xu J, Cui J B. Low-Carbon Cities and Firms' Green Technological Innovation[J]. *China Industrial Economics*, 2020(12): 178-196.
- [41] 周键, 刘阳. 制度嵌入、绿色技术创新与创业企业碳减排[J]. *中国人口·资源与环境*, 2021, 31(6): 90-101.
- Zhou J, Liu Y. Institutional embeddedness, green technology innovation and carbon emission reduction of new ventures [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2021, 31(6): 90-101.
- [42] John J A, Draper N R. An Alternative Family of Transformations[J]. *Journal of the Royal Statistical Society*, 1980, 29(2): 190-197.
- [43] Russell D, MacKinnon J G. Estimation and inference in econometrics[M]. America: Oxford University Press, 1993.
- [44] 许宪春, 王洋. 大数据在企业生产经营中的应用[J]. *改革*, 2021(1): 18-35.
- Xu X C, Wang Y. The Application of Big Data in Enterprise Production and Operation[J]. *Reform*, 2021(1): 18-35.
- [45] 李东红, 葛菲, 杨主格, 等. 中国企业数字化转型研究报告(2020)[R]. 清华大学全球产业研究院, 2020.
- Li D H, Ge F, Yang Z G, et al. Research Report on Digital Transformation of Chinese Enterprises (2020) [R]. Tsinghua University Institute of Global Industry, 2020.

Green innovation, digital transformation and energy-intensive enterprises carbon emission reduction performance

LI Wanhong, LI Na*

(School of Economics & Management, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: General Secretary Xi Jinping solemnly announced at the 75th United Nations General Assembly that China will strive to achieve carbon peak in 2030 and carbon neutrality in 2060. The proposal of the dual carbon goal reflects China's determination to fully implement the concept of green development and promote the construction of ecological civilization. Green innovation and digital transformation are powerful measures to achieve carbon peak and carbon neutral goals, and for sustained high-quality economic and social development. As far as China's carbon emissions are concerned, energy-intensive enterprises are the main source of carbon emissions and should be the key control object of carbon emission reduction. Therefore, in the context of the national realization of "double carbon" and the construction of a new pattern of economic development, the development planning of energy-intensive enterprises should consider the problem of keeping pace with greening and digitization.

As for the above problems, enterprises can improve carbon emission reduction performance by implementing green innovation strategy and cultivating green innovation awareness. At the same time, enterprises can also reduce carbon emissions through final treatment technology, cleaner production technology and carbon capture and storage technology, so as to improve carbon emission reduction performance. In addition, through digital transformation, enterprises promote the agglomeration of innovation elements, realize the sharing of information resources among enterprises about energy input structure, carbon emissions and green emission reduction technology, effectively improve the efficiency of innovation resource allocation and carbon emission reduction, and further drive enterprises' green innovation, so as to achieve energy conservation and emission reduction. In conclusion, we believe that green innovation helps to improve enterprise carbon emission reduction performance. In addition, green innovation will also affect enterprise carbon emission reduction performance by digital transformation, which has a moderator effect on the relationship between green innovation and enterprise carbon emission reduction performance.

This paper takes energy-intensive listed enterprises from 2011 to 2019 as a sample, constructs a dual fixed effect model to analyze the impact of green innovation on the carbon emission reduction performance of energy-intensive enterprises, and uses the digital transformation as the moderating variable to explore the black box of the impact mechanism of green innovation on the carbon emission reduction performance of energy-intensive enterprises under the action of digital transformation. In addition, considering that different industries and different types of enterprises have different characteristics, this paper estimates the relationship between green innovation, digital transformation and enterprises carbon emission reduction performance in six types of industries from the perspective of industry heterogeneity.

The study found that green innovation has significantly improved the carbon emission reduction performance of energy-intensive enterprises. Digital transformation is positively regulating the effect of green innovation on the carbon emission reduction performance of energy-intensive enterprises. When considering industry heterogeneity, the digital transformation adjustment effect of Raw Chemical

Materials and Chemical Products and Production and Supply of Electric Power and Steam is significant, but the impact of green innovation and digital transformation in the Petroleum Processing and Coking, Nonmetal Mineral Products, Smelting and Pressing of Ferrous Metals and Smelting and Pressing of Nonferrous Metals is not obvious.

The research conclusions provide a theoretical reference for promoting green innovation and digital transformation of energy-intensive enterprises and improving enterprises carbon emission reduction performance. This paper gives the following suggestions: first, the government should give full play to the role of “tangible hand”, formulate a green and digital structural reform plan for energy-intensive enterprises and accelerate the promotion of new infrastructure with green and digital as the core. Second, energy-intensive industries should formulate green and digital transformation schemes according to industry characteristics and development stages, so as to make them suitable for the development of various industries. At the same time, industries should adopt a phased and step-by-step approach to gradually realize the green and digital transformation of various industries. Third, the investment direction of energy-intensive enterprises should tilt to the capital, talents and other resources of green innovation and digital transformation as soon as possible, and establish a corporate culture in line with the needs of green and digital transformation, so that managers and employees are generally involved in the green and digital transformation of enterprises.

Key words: Green innovation; Digital transformation; Energy-intensive enterprises; Carbon emission reduction performance

Received Date: 2022-08-30

Funded Project: Supported by the Project of National Social Science Foundation of China (17BGL204), the Natural Science Foundation of Heilongjiang Province (LHG2021009), and the Major Cultivation Project of Basic Scientific Research Funds for Central Universities (3072022WK0902).

* Corresponding author