

DOI: 10.13504/j.cnki.issn1008-2700.2023.03.002

环境规制对高碳制造业 绿色低碳发展的影响

——基于数字技术的调节效应

刘承毅, 李欣

(郑州航空工业管理学院 经济学院, 河南 郑州 450046)

摘要: 数字技术发展有助于提升资源要素重组能力和提高环境规制效能水平, 是推动经济高质量发展和实现“双碳”目标的新引擎。运用2006—2019年省级平衡面板数据, 考察数字技术发展视阈下环境规制驱动高碳制造业绿色低碳发展的内在机制, 实证分析数字技术对正式和非正式环境规制影响高碳制造业低碳转型的调节效应。研究结果显示: 正式和非正式环境规制均能够倒逼高碳制造业企业进行绿色创新, 促进高碳制造业绿色低碳发展; 数字技术能够显著推动高碳制造业绿色低碳发展, 增强正式和非正式环境规制对高碳制造业绿色低碳发展的促进作用; 正式和非正式环境规制均对高碳制造业绿色低碳发展具有正向的空间溢出效应, 且数字技术在这一过程中存在明显的调节作用。因此, 可通过加大数字化技术的创新和应用、强化正式和非正式环境规制的倒逼作用、创新区域高碳制造业绿色发展的协同机制等政策措施, 促进高碳制造业绿色低碳发展。

关键词: 数字技术; 正式环境规制; 非正式环境规制; 高碳制造业; 绿色低碳发展

中图分类号: F124.5; F426 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-2700(2023)03-0018-14

一、问题提出

过度依赖资源能源消耗和生态环境负债的传统发展模式, 导致资源能耗严重、生态环境破坏和产业结构失衡等问题。为解决经济社会发展面临的突出矛盾, 国家提出“双碳”目标, 旨在实现经济社会可持续发展。党的二十大报告提出“统筹产业结构调整 and 绿色低碳转型”, 明确通过协同推进“降碳、减污、扩绿、增长”实现高质量发展目标, 对持续推动制造业绿色低碳发展提出了新要求。近年来, 随着大数据、5G技术、人工智能、物联网、区块链等技术的广泛应用, 能够有效利用智慧型数字化监管手段提高政府监管效率, 还可以消解信息不对称障碍进而提高公共治理能力。数字技术是提升资源要素重组能力和提高政府规制效能水平的时代要素, 加快推进数字经济与实体经济的深度融合与

收稿日期: 2022-10-26; 修回日期: 2023-01-20

基金项目: 教育部人文社科研究青年基金项目“城市垃圾处理行业市场化改革与管制优化研究”(19YJC790078); 河南省哲学社科规划项目“社会资本视角下河南垃圾分类政策的绩效评估及优化路径研究”(2020BJJ059); 河南省科技厅软科学研究项目“河南省生活垃圾分类的绩效测度及协同监管研究”(212400410059); 河南省高校重点科研项目“我国航空运输产业结构重组、分类监管及协调政策研究”(21A790021)

作者简介: 刘承毅(1984—), 男, 郑州航空工业管理学院经济学院讲师; 李欣(1996—), 女, 郑州航空工业管理学院经济学院硕士研究生。

协调发展,能够有效实现传统经济向低碳经济发展模式的绿色转型。产业结构的低碳转型和优化升级可直接依靠要素、投资和创新等因素驱动,在“双碳”目标约束下,也可间接通过环境规制手段来实现。其中,环境规制不仅包括政府强制实施的正式环境规制,也包括依靠民间环保组织、新闻媒体舆论和公众环保意识等的非正式环境规制。据此,本文将环境规制推动高碳制造业绿色低碳发展嵌入数字经济视阈,探索数字技术增强正式和非正式环境规制促进制造业绿色低碳发展的调节机制。

考虑到中国制造业门类广泛,本文选择对节能减排有显著影响效应的高碳排细分制造行业作为研究对象。根据国泰安中国经济金融研究数据库(CSMAR)中2006—2019年细分行业碳排放数据进行测算可知,黑色金属冶炼及压延加工业、非金属矿物制品业、石油炼焦及核燃料加工业、化学原料制品业和有色金属冶炼加工业的碳排放量占制造业总碳排放量的累计比重由90.71%上升到92.2%,因此本文将高碳制造业作为重点研究对象是传统制造业优化产业结构和实现低碳发展的关键所在。考察数字技术视阈下环境规制驱动高碳制造业绿色低碳发展的内在机制,实证检验数字技术对正式和非正式环境规制影响高碳制造业绿色低碳发展的调节效应,有助于在实践上推动高耗能、高污染制造业企业绿色低碳发展与结构优化升级,为推进高碳制造业绿色低碳和高质量发展提供理论依据与决策参考。

二、文献综述

(一) 环境规制影响制造业结构升级和绿色发展

近年来,中国面临着一定的经济形势与资源环境压力,环境规制与制造业绿色低碳发展的关系受到广泛关注。党的二十大报告强调要“深入推进污染防治”,为政府加强环境污染治理指明了方向。目前环境规制影响制造业结构升级和绿色发展的研究主要包括:(1)环境规制促进制造业结构升级和绿色发展。波特和范(Porter & Van, 1995)认为企业长期内会利用技术创新来规避环境规制给企业带来的负面影响,从而倒逼产业结构升级^[1]。此后有较多学者认为环境规制有助于激励制造业企业探索绿色技术创新,通过创新补偿效应提高企业竞争力并促进制造业低碳转型^[2]。万攀兵等(2021)研究发现制定环境技术标准有助于降低污染排放强度并提高生产效率,驱动制造业企业实现绿色升级^[3]。(2)环境规制抑制制造业结构升级和绿色发展。吴敏洁等(2019)研究发现环境规制对中国制造业结构升级的影响存在区域异质性,即环境规制促进东部地区制造业结构升级但抑制中西部地区制造业结构升级^[4]。朱东波(2020)认为投资型和费用型环境规制对工业绿色发展存在负向影响作用^[5]。(3)环境规制对制造业结构升级和绿色发展存在非线性影响效应。有学者研究发现环境规制和制造业转型升级之间存在倒U型曲线关系^[6]。余东华和崔岩(2019)实证研究异质性环境规制对制造业结构升级和绿色发展的直接效应和间接效应,认为正式环境规制对制造业转型升级和绿色发展产生U型影响作用^[7]。

(二) 数字技术影响制造业转型与发展

数字技术在促进经济提速增质和高质量发展过程中的作用日益重要,国家“十四五”规划强调要“以数字化转型整体驱动生产方式变革”。数字技术具有强渗透性,能有效实现由虚拟空间嵌入实体经济,利用高效信息优势实现资源锁定与有效整合,推动传统制造业技术攻坚、结构升级和全产业链发展。一般认为,数字技术的快速发展能有效促进制造业转型升级与高质量发展。有学者提出数字技术是产业结构升级的催化剂^[8]。同时,数字经济的快速发展能够推动制造业加快转型发展^[9],其关键性生产要素就是数据信息和物联网技术等^[10-11]。有学者研究发现通信产业与其他产业互联互通所产生的溢出效应能够有效提升传统产业生产效率和促进产业结构升级^[12]。关于数字经济促进制造业转型与发展路径的研究主要有两个方面:一是产业链视角。即数字技术能够突破创新链障碍、提高制造链质量、优化供应链效率和拓展服务链范围,进而驱动制造业转型与发展^[13]。数字经济与实体经济的深度融合成为制造业高质量发展的新动能,驱动路径在于降低制造业产业链的交易成本、提高产业链上的分工效率和优化创新产业链上的价值分配方式等^[14-15]。廖信林和杨正源(2021)认为数字经济可通过优化资源配置、降低生产成本和提高创新水平等路径推动制造业转型与发展^[16]。二是价值链视角。李馥伊(2018)、何文彬(2020)

实证研究数字经济对制造业转型与发展的重构效应,发现投入数字要素能够促进知识密集型制造业实现全球价值链高端化^[17-18]。

现有研究环境规制影响制造业结构升级和绿色发展,以及数字技术影响制造业转型的成果相对丰富,但仍然存在可拓展之处:(1)目前鲜有学者将环境规制影响制造业绿色低碳发展嵌入由数字技术驱动的研究框架之中,基于数字技术的调节效应模型,考察正式和非正式环境规制驱动制造业绿色低碳发展的作用机制与影响效应;(2)现有文献一般将传统制造业结构升级与低碳转型作为研究对象,较少关注环境规制对制造业绿色低碳发展的数字驱动效应和空间溢出效应,并且对其中的驱动机制和溢出效应缺乏实证检验;(3)现有研究大都简单将大类制造业的低碳转型作为研究对象。本文结合“双碳”目标的战略方向和现实要求,把“绿色低碳发展”的研究对象聚焦于高碳制造业,便于从更深层次和细分环节甄别影响“双碳”目标实现的制约因素,分析环境规制如何助力高碳制造业绿色低碳发展。本文根据现有文献研究成果界定高碳制造业的内涵和范畴,系统构建高碳制造业绿色低碳发展指数、数字技术发展指数以及正式和非正式环境规制指标体系,采用双重固定效应模型研究正式和非正式环境规制影响高碳制造业企业绿色低碳发展的内在机制与实际效果,同时构建空间计量模型,实证考察在数字技术作用下正式和非正式环境规制驱动高碳制造业绿色低碳发展的空间溢出效应。

本文可能的边际贡献在于:(1)考虑到制造业碳排放中的现实问题,研究数字技术驱动下环境规制对高碳制造业绿色低碳发展的影响效应。高碳制造业是传统制造业门类中对碳排放贡献最大的特定细分行业,合理界定高碳制造业的内涵与范畴,厘清促进其绿色低碳发展的机制和路径,是实现“双碳”目标和高质量发展的关键所在。(2)在数字技术调节效应下研究正式和非正式环境规制驱动高碳制造业绿色低碳发展的机制与效果。数字技术不仅赋能政府,也能够通过缩减信息传递层级和化解信息不对称障碍,赋权其他主体,实现环境规制协同,最大限度确保环境规制的政策实施效果。(3)着眼于环境规制促进高碳制造业绿色低碳发展的机制分析。在统一研究框架内,实证考察数字技术能够通过赋能政府、赋权其他主体,提升环境规制效能并促进高碳制造业绿色低碳发展。(4)基于“提能”和“增权”双重维度,研究技术赋能条件下环境规制影响高碳制造业绿色低碳发展的空间溢出效应,对跨越数字鸿沟、促进数字经济与制造业转型发展的深度融合具有重要意义,并为加快制造业绿色低碳发展在区域间的协同推进提供政策参考。

三、研究假设

(一) 环境规制影响高碳制造业绿色低碳发展

环境规制包括正式环境规制和非正式环境规制。正式环境规制对高碳制造业绿色低碳发展的影响效应主要表现在遵循成本效应和创新补偿效应。一方面,政府制定严格的环境规制政策对经济活动主体及生产活动过程进行强制性约束,增加高碳排放制造业企业的生产成本。短期内企业为规避环境成本,会降低产品生产效率,阻碍高碳制造业绿色发展,但由于长期内环境规制日益严格,高碳制造业企业意识到环保成本是持续性的,可能会主动对原有高耗能、高碳排放的生产方式进行变革,从而降低能源消耗和减少污染物排放^[19]。另一方面,企业基于自身利润最大化追求,为规避政府环境规制所带来的成本,需要不断调整生产决策,改进污染治理技术,提升自主研发能力,开展绿色技术创新活动,将产生的减碳治污成本内部化,通过创新补偿以减少或抵消政府环境规制所带来的环境保护成本,进而减少碳排放量,促进高碳制造业绿色低碳和高质量发展。非正式环境规制对高碳制造业绿色低碳发展的影响效应主要体现在公众团体及社会组织的环保意识水平。当高碳制造业企业带来的环境污染被居民所感知和预规避时,其就会通过民意表达、参政议政等方式督促政府实施更严格的环境规制政策,并对企业环境治理行为和实施效果进行有效监督,进而降低高碳排放制造业企业碳排放,降低环境污染程度,加快绿色低碳发展。基于此,本文提出假设H1。

H1: 环境规制通过倒逼高碳制造业节能减排,促进高碳制造业绿色低碳和可持续发展。

(二) 数字技术驱动下的高碳制造业绿色低碳发展

“十四五”规划和2035年远景目标纲要提出“坚持节能优先方针,推动能源清洁低碳安全高效利用,深入推进工业、建筑、交通等领域低碳转型”,同时要求“以数字化转型整体驱动生产方式、生活方式和治理方式变革”,这为加快推动制造业绿色低碳发展指明了方向。党的二十大报告提出“加快建设数字中国”“加快发展数字经济,促进数字经济与实体经济深度融合”,产业发展和社会治理的数字化转型为高碳制造业绿色低碳发展提供了战略指引和推进路径。在新时代,数字经济已经成为中国产业结构改革和企业创新发展的重要力量^[20],其对高碳制造业的碳减排效应主要体现在:(1)数字基础设施建设能够促进高碳制造业动能转换。数字基础设施具有很强的技术属性和不可分割性,自2020年开始,国家在制造业领域逐渐加大对互联网、5G等数字基础设施的投入力度^[21]。这不仅加强了信息传递、知识溢出以及研发协同,还有助于利用规模经济效应和网络分工效应不断提升高碳制造业绿色创新能力,促进高碳制造业实现动能转换,全方位推进高碳制造业生产模式转变与创新水平提高,从而减少碳排放^[22]。(2)数字技术相关产业的发展可以促进高碳制造业绿色发展。数字化产业本身具有环境友好型特征,其绿色化水平普遍高于传统制造业。数字化产业可凭借其数字技术的高渗透性和衍生性对高碳排放产业进行改造与变革,推动高碳制造业绿色发展。同时,企业管理者在人工智能广泛应用条件下创建智能化工厂,并根据消费者信息作出智能决策,不仅能够提高制造业的整体生产效率,而且有助于推进高碳制造业绿色低碳发展。(3)数字技术创新能够改进高碳制造业生产技术。数字化网络平台能够实现信息的开放共享、互联互通,加快了物质和技术的自由配置,保障资源要素的充分利用。作为数字经济的载体,数字技术可以内嵌到产品制造生产的全过程,能够有效促进高碳制造业资源要素的合理配置,从而降低能源消耗,减少碳排放。同时,数字技术可以突破时空的障碍,能够将杂乱无章的知识汇总整理,随着信息和知识的不断丰富,为新一轮高碳制造业绿色低碳发展提供源源不断的经验和动力。基于上述分析,本文提出假设H2。

H2: 数字技术能够驱动高碳制造业绿色低碳发展。

(三) 数字技术强化环境规制对高碳制造业绿色低碳发展的驱动作用

数字技术主要通过影响环境规制执行力度和公众参与环保程度,进而优化生产技术,加快推动高排放和高污染制造业企业绿色低碳发展。(1)政府环境规制执行力度。政府环境规制执行力度是影响制造业企业绿色低碳发展的重要因素^[23]。一方面,随着数字技术的广泛应用,地方政府逐步确立数字化治理理念,能够实现对所管辖地区制造业的环境污染源、企业环境治理情况实时化、精准化和全程化监管,这大幅度提升了监管质量,有利于消除政府和企业之间的信息不对称,从而倒逼高碳制造业企业选择绿色技术创新和改进生产技术,以减少污染物及碳排放。另一方面,随着网络等数字化平台的建设,地方政府环境治理效果和制造业企业环境污染状况的信息逐渐透明化,有利于提高中央政府对地方政府环境规制行为的监管能力,促使地方政府更好地履行环境治理和碳减排责任。(2)公众参与环保程度。数字技术的应用降低了政府、个人与企业之间的信息不对称程度,增强了知识信息的传播力度、广度和深度,拓宽了信息传播媒介和途径^[23]。公众不仅可以学习到更多环保知识,增强环保意识,还可借助数字化信息平台加强社会监督,这能够有效激励高碳制造业企业重视节能减排,积极承担治污责任。基于以上分析,本文提出假设H3。

H3: 数字经济可通过其调节效应,加强环境规制对高碳制造业绿色低碳发展的驱动作用。

(四) 环境规制影响高碳制造业绿色低碳发展的空间溢出效应

环境规制在影响本地高碳制造业绿色低碳发展的同时,也会通过空间溢出效应影响邻地高碳制造业绿色低碳发展。生态环境作为一种公共物品,存在着“搭便车”现象^[24-25]。环境规制的空间溢出效应主要有:(1)技术溢出效应。政府制定实施严格的环境规制,会使得当地高碳排放制造业企业减少污染物和二氧化碳的排放。同时,邻地制造业企业会搭上改善环境的“便车”,改进生产技术,提升绿色创新水平,即本地环境规制会对邻地的高碳制造业产生正向的空间溢出效应。同时,由于本地政府实施的环境

规制政策会使得高污染企业转移到邻近地区, 邻近地区则会参考当地的环境规制以制定更为严格的环境规制政策, 从而促使高碳制造业企业进行生产技术革新以满足环保要求, 实现绿色低碳与高质量发展。(2) 信息溢出效应。数字技术的快速发展打破了时空上的距离, 促使社会公众借助高效连通的信息网络获取更加多元化的绿色信息, 自觉积极地参与环境监督, 推动环境规制更加快速高效地辐射到其他周边地区, 从而产生了非正式环境规制的空间溢出。(3) 人力资本溢出效应。与正式环境规制相比, 非正式环境规制推动高碳制造业低碳转型的溢出效应还表现在高技术人才流动上。高质量的人力资本流动不仅对周边地区高碳企业绿色技术创新和高质量发展产生正向溢出效应, 而且会使得居民对高污染高排放制造业企业的环境治理提出更高的要求, 从而加快推动高碳制造业企业绿色低碳和可持续发展。基于以上分析, 本文提出假设 H4。

H4: 环境规制对高碳制造业绿色低碳发展存在正向的空间溢出效应。

四、研究设计

(一) 高碳制造业界定

由于制造业涵盖多种工业行业, 且 2006—2019 年行业分类发生了变化, 为了保证数据统计口径的一致性, 本文选取制造业中的 20 个细分行业作为研究对象。对于高碳制造业的界定, 本文参考王霞 (2020)^[26] 的研究, 采用制造业细分行业能源消费所导致的二氧化碳排放总量与总的制造业二氧化碳排放总量的比值进行测算^①。测算结果显示, 石油炼焦及核燃料加工业占比均值最高, 为 0.374; 其次是黑色金属冶炼及压延加工业, 占比为 0.279; 化学原料制品业占比为 0.121; 非金属矿物制品业占比为 0.103; 有色金属冶炼加工业占比为 0.037。这五类行业碳排放总量均值之和占比已达 90% 以上, 即占比位于前五位的有石油炼焦及核燃料加工业、黑色金属冶炼及压延加工业、化学原料制品业、非金属矿物制品业和有色金属冶炼加工业。同时, 在样本省份中, 这五大高碳行业的二氧化碳排放总量均位于该省份制造业二氧化碳排放总量的前十位。因此, 本文将石油炼焦及核燃料加工业、黑色金属冶炼及压延加工业、化学原料制品业、非金属矿物制品业和有色金属冶炼加工业界定为高碳制造业。

(二) 计量模型设定

由于高碳制造业低碳转型受多重因素影响, 为缓解遗漏变量问题对估计系数的干扰和提高估计结果的准确性, 本文使用包含控制变量的面板回归模型进行实证检验, 计量模型设定如下:

$$LCO_{i,t} = \alpha_0 + \alpha_1 ERS_{i,t} + \sum \alpha_j X_{i,t} + \varepsilon_{i,t} \quad (1)$$

$$LCO_{i,t} = \beta_0 + \beta_1 IERS_{i,t} + \sum \beta_j X_{i,t} + \varepsilon_{i,t} \quad (2)$$

其中, i 、 t 分别表示地区和时期; $LCO_{i,t}$ 为 i 省份第 t 年的高碳制造业绿色低碳发展水平; $ERS_{i,t}$ 表示 i 省份第 t 年的正式环境规制强度; $IERS_{i,t}$ 表示 i 省份第 t 年的非正式环境规制强度; $X_{i,t}$ 为一系列的控制变量; $\varepsilon_{i,t}$ 为随机扰动项。其中 α_1 、 β_1 为本文最为关注的估计系数, 衡量正式环境规制与非正式环境规制对高碳制造业低碳发展的影响。若 α_1 、 β_1 均为正, 表明假设 H1 成立, 即环境规制能够显著促进高碳制造业绿色低碳发展。针对面板数据模型进行豪斯曼 (Hausman) 检验, 结果均强烈拒绝原假设, 因此模型采用固定效应模型。

基于前文理论分析, 为了检验数字技术对高碳制造业绿色低碳发展的影响效应, 本文构建面板数据计量模型进行实证分析, 基准模型如式 (3) 所示:

$$LCO_{i,t} = \gamma_0 + \gamma_1 DIG_{i,t} + \sum \gamma_j X_{i,t} + \varepsilon_{i,t} \quad (3)$$

其中, $DIG_{i,t}$ 表示 i 省份第 t 年的数字技术水平, 若估计系数 γ_1 显著为正, 则说明数字技术能够促进高碳制造业绿色低碳发展, 从而假设 H2 成立。

① 由于篇幅所限, 未列示全部结果。

(三) 指标选取与变量说明

1. 被解释变量

高碳制造业绿色低碳发展水平指数 (*LCO*)。“双碳”承诺的提出为中国高碳制造业绿色低碳发展提出了新的要求,长期的资源环境约束下的节能降耗、产业资源的高效利用、绿色清洁生产等低碳技术创新均有助于快速实现产业绿色低碳发展。何宁和夏友富(2018)从绿色发展、技术创新、人才结构、产业结构、资产结构以及两化融合等方面,构建制造业升级的评价指标体系^[27]。因此,本文参考已有研究^[28],综合考虑“双碳”目标下高碳制造业低碳发展的影响因素,从产业效益、产业效率、能源消耗、低碳产出和创新能力五个方面构建高碳制造业绿色低碳发展水平综合指标评价体系,最终形成8个测度指标,如表1所示。

表1 高碳制造业绿色低碳发展水平综合指标体系

一级指标	二级指标	二级指标计算方式	单位
产业效益	投资回报率	高碳制造业利润总额/高碳制造业固定资产投资	%
产业效率	劳动生产率	高碳制造业总产值/高碳制造业平均从业人数	元/人
	制造业单位产值能源消耗	高碳制造业能源消耗总量/高碳制造业产值	吨标准煤/元
能源消耗	制造业人均能源消耗	高碳制造业能源消耗总量/高碳从业人员	吨标准煤/人
	制造业能源碳排放因子	高碳制造业碳排放量/高碳制造业能源消耗总量	万吨碳/万吨标准煤
低碳产出	制造业碳生产力	高碳制造业产值/碳排放量	元/吨碳
	人均碳排放量	高碳制造业碳排放量/高碳从业人员	吨碳/人
创新能力	绿色技术创新	当年获得的绿色发明数量与绿色实用新型数量总和	个

考虑到不同指标在量纲和性质方面存在差异,首先将正负指标进行标准化,正向指标按照式(4)进行标准化,负向指标按照式(5)标准化,然后根据客观赋权的熵值法进行权重计算,具体测算方法如下:

$$Z_{ij} = (X_{ij} - \min X_j) / (\max X_j - \min X_j) \quad (4)$$

$$Z_{ij} = (\max X_j - X_{ij}) / (\max X_j - \min X_j) \quad (5)$$

其中, X_{ij} 表示省份 i 的第 j 项指标的数值, Z_{ij} 表示将各项指标进行标准化的结果, $\max X_j$ 表示样本省份中第 j 项指标的最大值, $\min X_j$ 表示样本省份中第 j 项指标的最小值。

计算各项指标的权重:

$$W_j = X / \bar{X}_{ij} \quad (6)$$

其中, \bar{X}_{ij} 表示各年度样本省份的第 j 项指标数值的平均水平。

高碳制造业绿色低碳发展水平的综合指数为:

$$LCO_i = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 W_j Z_{ij} \quad (7)$$

2. 核心解释变量

环境规制作为主要的解释变量,在具体作用过程中又分为正式环境规制和非正式环境规制。正式环境规制是以政府的行政性命令为主要手段来对环境资源进行直接干预;相反,非正式环境规制是社会团体组织以及个人出于追求自身利益的目的而主动参与环境治理的行为。

(1) 正式环境规制 (*ERS*)。地方政府作为环境治理的主体之一,其环保财政支出因具有引致经济和环境规制的双重属性,成为政府干预经济和保护环境的重要政策手段。基于数据的可获得性和统一性,本文参考姜楠(2018)^[29]的研究,采用地方财政环境保护支出与地区生产总值(GDP)的比值来衡量正

式环境规制强度。由于正式环境规制是政府以行政性命令直接干预环境资源, 因此当地政府财政环境保护支出与 GDP 的比值越大, 表明环境规制强度越强。

(2) 非正式环境规制 (*IERS*)。本文借鉴原毅军和谢荣辉 (2014)^[30] 的做法, 并依据数据的可获得性, 选取各地区收入水平、地区人口密度和突发性环境事件次数三类指标来衡量非正式环境规制强度。并利用上述熵值法对各地区制造业城镇单位就业人员平均工资、人口密度和突发性环境事件次数进行加权赋值, 构造出非正式环境规制指数。

3. 调节变量

数字技术水平 (*DIG*)。数字技术是信息时代国家竞争优势的先导力量, 学术界尚未形成统一的内涵界定和评价标准。本文在方湖柳等 (2022)^[31] 的研究基础上, 从通信技术基础设施建设、信息技术相关服务业发展和数字技术创新科研水平三个维度选取 13 个细分指标构建数字技术综合指标评价体系 (见表 2)。

表 2 数字经济综合指标体系

一级指标	二级指标	单位
通信技术基础设施建设	邮政业务总量	亿元
	电信业务总量	万件
	移动电话用户	万户
	长途光缆线路长度	万公里
	互联网宽带接入端口	万个
信息技术相关服务业发展	交通运输仓储与邮电通信业 GDP	亿元
	信息传输、计算机服务和软件业平均工资	元
	电子信息业主营业务收入	亿元
	信息传输、计算机服务和软件业职工人数	万人
数字技术创新科研水平	高技术产业 R&D 人员折合全时当量	人年
	高技术产业 R&D 项目数	个
	技术市场成交额	亿元
	本科毕业生数	人

4. 控制变量

为保证研究结论的一致性, 对以下变量进行控制: 政府支持力度 (*GOV*), 本文选取财政一般公共预算支出占 GDP 的比重来表征, 比重越大, 说明该地区政府相应的支持力度越大; 人力资本水平 (*HUM*), 本文采用人力资本结构高级化来表征, 参考刘智勇等 (2018)^[32] 的做法, 先将各地区人口按照受教育水平分为五类, 然后利用人力资本空间向量与它们的夹角计算得出; 金融发展水平 (*FIN*), 采用区域内金融机构人民币贷款余额占地区生产总值的比重来表示; 外商投资力度 (*FDI*), 选取实际利用外商直接投资金额与 GDP 的比重来衡量, 其比值越大, 表示外商投资力度就越大。

(四) 数据样本和描述性统计

本文运用中国 30 个省份 (不包括香港、澳门、台湾和西藏) 2006—2019 年的平衡面板数据进行实证分析。其中, 碳排放数据源于中国碳核算数据库 (CEADs) 和国泰安数据库; 公众参与型环境规制中的突发性环境事件次数来源于《中国环境统计年鉴》和《中国统计年鉴》; 其他部分数据来源于国泰安数据库、《中国统计年鉴》《中国工业统计年鉴》《中国科技统计年鉴》以及各省份统计年鉴。由于部分地区高碳制造业产值、平均从业人数和碳排放等指标数值存在缺失, 为保证数据的连续性和完整性, 本文对指标缺失值采用滑动平均法和线性插值法进行插值填充。

表3是各个变量的描述性统计结果,高碳制造业绿色低碳发展综合指数(LCO)均值为0.176,标准差为0.108,表明各区域高碳制造业减碳程度存在明显差异性,这与以往的研究结果相一致。

表3 变量的描述性统计

变量	样本数	均值	标准差	最小值	中位数	最大值
LCO	420	0.176	0.108	0.037	0.145	0.774
ERS	420	0.722	0.504	0.041	0.605	3.614
IERS	420	0.107	0.107	0.006	0.083	0.921
DIG	420	0.096	0.103	0.004	0.065	0.867
GOV	420	0.228	0.098	0.084	0.209	0.628
HUM	420	18.060	0.736	16.240	18.070	20.910
FIN	420	1.244	0.440	0.537	1.165	2.585
FDI	420	0.334	0.271	0.002	0.276	2.176

五、研究结果

(一) 基准回归模型检验

本文首先采用固定效应模型对式(1)、式(2)和式(3)进行基础回归分析,初步研究环境规制和数字技术对高碳制造业绿色低碳发展的影响,基准回归结果见表4。如表4列(1)和列(2)所示,无论是否加入控制变量,正式环境规制的回归系数始终在1%的显著性水平下为正,表明政府增加环境保护财政支出能够促进高碳制造业绿色低碳发展。列(3)和列(4)的结果显示,非正式环境规制强度和正式环境规制强度和高碳制造业绿色低碳发展指数的回归系数在1%的统计水平下显著为正,这表明正式和非正式环境规制均能够有效缓解高碳制造业的污染排放问题,提高绿色技术创新水平,进而加快促进高碳制造业绿色低碳发展。列(6)在列(5)的基础上增加了控制变量,结果显示数字技术对高碳制造业绿色低碳发展的影响效应依然存在,并且通过了1%统计水平下的检验,这表明数字技术给高碳制造业带来了真正的技术突破,改变了传统的生产技术模式,有助于高碳制造业摆脱以往的低端锁定而造成的发展困境,加快实现绿色低碳转型。

表4 基准回归结果

变量	正式环境规制		非正式环境规制		数字技术	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
ERS	0.146*** (0.033)	0.071*** (0.019)				
IERS			0.542*** (0.080)	0.203*** (0.064)		
DIG					1.207*** (0.110)	1.097*** (0.124)
控制变量	不控制	控制	不控制	控制	不控制	控制
常数项	0.071*** (0.023)	-2.747*** (0.518)	0.118*** (0.009)	-2.733*** (0.204)	0.060*** (0.010)	-0.566** (0.273)

表4(续)

变量	正式环境规制		非正式环境规制		数字技术	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
个体效应	控制	控制	控制	控制	控制	控制
样本数	420	420	420	420	420	420
R^2	0.156	0.526	0.105	0.510	0.892	0.906

注: 估计系数下括号里的数为标准误; *、**和***分别表示在10%、5%和1%的显著性水平上显著, 后表同。

(二) 模型稳健性检验

为确保以上研究结果的稳健性和可靠性, 本文进行了相关的稳健性检验, 表5是正式环境规制促进高碳制造业绿色低碳发展基准回归的稳健性检验结果。其中, 列(1)为替换核心解释变量的稳健性检验结果。考虑到数据可获得性和方法可操作性, 本文采用工业废气污染治理投资与国内生产总值的比值来衡量正式环境规制, 其回归结果显示, 替换变量后正式环境规制与高碳制造业绿色低碳发展呈正相关关系, 说明基准回归结果具有稳健性。列(2)结果显示, 替换成随机效应检验后, 与表4列(2)相比, 环境规制和高碳制造业绿色低碳发展关系的回归系数显著性和作用方向基本一致。为解决模型估计结果可能因内生性而导致的估计偏误和遗漏变量偏差等问题, 本文参考张建鹏和陈诗一(2021)^[33]的思路, 采用两阶段最小二乘法(2SLS)进行参数估计以解决内生性的问题, 选择 ERS_{t-1} 作为工具变量进行内生性检验。估计结果如表5列(3)所示, 工具变量内生性检验 LM 统计量和相关性检验 F 统计量均拒绝了原假设, 表明本文工具变量满足选择要求, 与基准回归结果一致。这说明环境规制对高碳制造业绿色低碳发展作用效果仍然正向显著。参考邓慧慧和杨露鑫(2019)^[34]的方法, 将北京、上海、天津、重庆四个直辖市从全样本剔除后再次进行回归, 结果如表5列(4)所示。其结果显示, 剔除直辖市后的核心解释变量作用方向及显著性仍然可靠。

表5 稳健性检验

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
ERI	0.433*** (0.140)			
ERS		0.054*** (0.014)	0.106*** (0.027)	0.053* (0.027)
控制变量	控制	控制	控制	控制
K-P LM 统计量			27.694	
K-P F 统计量			56.882	
常数项	-0.715 (0.488)	-0.593** (0.256)		-1.089 (0.841)
样本数	420	420	420	364
R^2	0.690	0.681	0.519	0.650

(三) 影响机制检验

在采用基准回归模型验证环境规制对高碳制造业绿色低碳发展具有显著促进作用的基础上, 本文进一步构建如下调节效应模型, 考察数字技术作为调节变量能否影响环境规制对高碳制造业绿色低碳发展

的促进作用。

$$LCO_{i,t} = \lambda_0 + \lambda_1 ERS_{i,t} + \lambda_2 DIG_{i,t} \times ERS_{i,t} + \sum \lambda_j X_{i,t} + \mu_i + \mu_t + \varepsilon_{i,t} \quad (8)$$

$$LCO_{i,t} = \sigma_0 + \sigma_1 IERS_{i,t} + \sigma_2 DIG_{i,t} \times IERS_{i,t} + \sum \sigma_j X_{i,t} + \mu_i + \mu_t + \varepsilon_{i,t} \quad (9)$$

$$LCO_{i,t} = v_0 + v_1 IERS_{i,t} + v_2 ERS_{i,t} \times IERS_{i,t} + \sum v_j X_{i,t} + \mu_i + \mu_t + \varepsilon_{i,t} \quad (10)$$

其中, $DIG_{i,t} \times ERS_{i,t}$ 省份 i 第 t 年的数字技术与正式环境规制的交互项, $DIG_{i,t} \times IERS_{i,t}$ 省份 i 第 t 年的数字技术和非正式环境规制的交互项, $ERS_{i,t} \times IERS_{i,t}$ 省份 i 第 t 年的正式环境规制与非正式环境规制的交互项, μ_i 和 μ_t 分别表示个体固定效应和时间固定效应, 其他变量含义同模型 (1)。基于基准回归模型, 依次检验交互项系数 λ_2 、 σ_2 和 v_2 的显著性。

表 6 的列 (1) 和列 (2) 报告了数字技术调节作用的回归结果, 其中, 列 (1) 是数字技术水平和正式环境规制交互项的回归结果, 交互项系数显著为正, 表明数字技术水平可以通过互联网技术公开环境保护信息等途径促进政府增强正式环境规制强度, 此外, 数字技术可以缓解企业的融资约束, 从而促进高碳制造业低碳发展。列 (2) 的调节机制检验结果显示, 数字技术和非正式环境规制交互项系数通过了 1% 的显著性水平统计检验, 说明数字技术为社会公众提供了更为便捷的环保监督方式, 可通过环保宣传、社会团体等公众环境监督渠道来影响非正式环境规制强度, 从而倒逼高污染制造业企业加快绿色创新, 因此, 数字技术水平与非正式环境规制能够共同提升高碳制造业绿色发展水平、改进生产技术和减少碳排放, 进而促进高碳制造业低碳转型和高质量发展。列 (3) 为正式环境规制与非正式环境规制交互项的回归结果, 结果显示, 正式和非正式环境规制均对高碳制造业绿色低碳发展呈显著的促进作用, 但其交互项系数在 10% 的显著性水平下为负, 这意味着两类环境规制之间存在明显的替代关系, 当一种环境规制增强时, 会削弱另一类环境规制对高碳制造业绿色低碳发展的促进作用。

表 6 影响机制检验

变量	(1)	(2)	(3)
<i>ERS</i>	-0.040 (0.026)		0.072 *** (0.017)
<i>ERS</i> × <i>DIG</i>	0.815 *** (0.199)		
<i>IERS</i>		-0.352 *** (0.114)	0.193 *** (0.067)
<i>IERS</i> × <i>DIG</i>		3.416 *** (0.365)	
<i>ERS</i> × <i>IERS</i>			-0.176 * (0.106)
控制变量	控制	控制	控制
个体固定效应	控制	控制	控制
时间固定效应	控制	控制	控制
常数项	-0.121 (0.424)	0.201 (0.348)	-1.028 *** (0.288)
样本数	420	420	420
R^2	0.779	0.857	0.691

六、进一步分析

(一) 模型构建及空间相关性检验

1. 空间计量模型构建

为检验环境规制对高碳制造业绿色低碳发展是否存在空间溢出效应, 本文构建如下计量模型:

$$LCO_{i,t} = \rho W \times LCO_{i,t} + \rho_1 W \times ERS_{i,t} + \rho_2 ERS_{i,t} + \sum \rho_j X_{i,t} + \mu_i + \mu_t + \varepsilon_{i,t} \quad (11)$$

其中, W 表示空间权重矩阵, ρ 和 ρ_1 表示空间自回归系数, 其他变量含义同模型 (1)。

2. 空间自相关性检验

本文测算了 2006—2019 年经济距离权重矩阵和空间相邻权重矩阵条件下高碳制造业绿色低碳发展指数的空间分布的全局莫兰 (Moran) 指数 (由于篇幅所限, 未列示全部结果)。全域空间自相关可反映各省份高碳制造业绿色低碳发展在空间上的相互依赖程度, 并且全局莫兰指数在 $(-1, 1)$ 变动, 指数为正表示高碳制造业绿色低碳发展的空间相关性为正, 指数绝对值越大表明空间关联程度越深, 指数为 0 则表示地区之间无关联。从本文的计算结果可发现, 无论是经济距离权重矩阵还是空间相邻权重矩阵, 高碳制造业绿色低碳发展的莫兰指数均在 1% 的显著性水平上显著, 同时莫兰指数值均显著大于零, 反映出高碳制造业绿色低碳发展存在明显的正的空间自相关关系。换言之, 这说明各地区制造业绿色低碳发展具有很强的集聚特征, 即表明区域间存在较为显著的空间邻近效应。因此, 基于以上的自相关检验, 可以认为变量在地区之间存在空间溢出效应。

(二) 回归结果分析

1. 模型估计结果分析

本文利用经济距离空间权重矩阵, 并通过豪斯曼检验和测算 LR 统计量发现, 固定效应空间杜宾模型更适合本文的实证研究, 不能退化使用空间自回归模型以及空间误差模型, 因此本文采用固定效应空间杜宾模型进行空间回归检验, 其中空间自回归模型和空间误差模型作为对照进行分析。

为探究环境规制对高碳制造业绿色低碳发展的空间溢出效应, 得到空间计量实证回归分析结果 (由于篇幅所限, 未列示全部结果)。回归结果显示, 就正式环境规制的回归系数而言, 无论是哪种空间计量模型, 正式环境规制都能够显著促进高碳制造业绿色低碳发展。这主要的原因在于政府采取强制性的环境治理政策, 倒逼高污染、高碳排放制造业企业积极参与绿色技术创新, 改进产品生产技术, 推动高碳制造业绿色低碳发展。相关回归结果说明, 非正式环境规制对高碳制造业绿色低碳发展起促进作用。

2. 空间溢出效应分析

上文分析表明, 高碳制造业绿色低碳发展存在明显的空间溢出效应。为进一步分析双向固定空间杜宾模型的边际影响特征, 本文使用经济距离权重矩阵来分析正式和非正式环境规制对高碳制造业绿色低碳发展的空间效应。首先对环境规制对绿色低碳发展的效应分解, 然后加入数字技术和环境规制交互项, 原因在于两者共同影响高碳制造业绿色低碳发展的空间效应分析。其中直接效应、间接效应和总效应分别反映了各解释变量的变化对本地、邻地及整体高碳制造业绿色低碳发展的作用效果。

从相关回归结果 (限于篇幅未全部列示, 后文同) 来看, 正式环境规制的直接效应显著为正, 表明正式环境规制能够有效促进当地高碳制造业绿色低碳减排; 其间接效应显著为正, 表明正式环境规制对于邻近省份的高碳制造业绿色低碳发展具有正向的空间溢出效应。从交互项估计系数来看, 直接效应和间接效应均显著为正, 说明数字技术和正式环境规制共同对本地和邻近地区的高碳制造业绿色低碳发展具有显著的促进作用。

同样地, 从相关估计结果可看出, 非正式环境规制对高碳制造业绿色低碳发展的直接影响效应和间接影响效应分别是 0.088、0.045, 均在 1% 的显著性水平下通过检验, 表明当前本地区的非正式环境规制

强度不仅对当地高碳制造业低碳发展具有促进作用,对周边地区的高碳制造业绿色低碳发展也具有显著的推动作用,使非正式环境规制对高碳制造业绿色发展的总效应得到充分发挥。相关回归结果显示,数字技术和非正式环境规制的交互项对高碳制造业低碳发展的直接效应和间接效应的估计系数均显著为正,表明加快数字技术能够有效增强非正式环境规制对本地及邻近省市的高碳制造业绿色低碳发展的促进作用,进而积极推动各地区“双碳”目标的实现。

七、研究结论与政策启示

在传统要素红利持续下滑的经济发展新时代,全球高碳制造业正在进入新一轮的绿色变革,数字技术与实体经济相互融合共同驱动经济高质量可持续发展。

本文利用省级面板数据实证检验了环境规制、数字技术与高碳制造业绿色低碳发展的关系,并考察了数字技术赋能条件下环境规制对高碳制造业绿色低碳发展的调节作用,主要结论为:(1)环境规制能够倒逼高污染制造业企业绿色创新,促进高碳制造业绿色低碳发展;(2)数字技术能够促进高碳制造业绿色低碳发展,且数字技术能够赋能于正式和非正式环境规制,进而推进高碳制造业绿色低碳发展;(3)正式和非正式环境规制均对高碳制造业绿色低碳发展具有正向的空间溢出效应,且数字技术在这一过程中存在明显的调节作用。

为应对全球高碳制造业绿色变革和国内产业的数字化转型,应当以数字经济和实体经济“双融合”的形式降低高碳制造业碳排放水平,减少环境污染物排放。(1)加强数字化技术的创新和应用。加快5G网络、物联网和大数据等为引领的数字基础设施的建设、推广和普及,推动高碳制造业企业加快转变发展方式,并逐渐打破资源瓶颈约束,进一步推进数字设备在生产中的创新,加快数字化技术改造向工业生产端渗透,高标准高效率推进“数字中国”建设,实现“中国制造”向“中国智造”的转变。同时利用数字化技术的应用引导和推动制造业生产经营模式发生根本性变革,实现生产资源的合理配置和高效利用。(2)提升环境规制政策的倒逼作用。借助严苛的环境规制政策工具提升高碳制造业企业绿色创新水平,倒逼高污染制造业企业低碳转型,同时强化数字技术对节能减排、降低碳排放新技术、新产品的智力支持,实现数字技术与正式环境规制政策协同推进高碳制造业低碳转型和高质量发展。(3)创新区域高碳制造业低碳发展的协同机制。由于环境规制政策具有典型的外部性,同时数字化技术具备高度渗透性和融合性特征,当地政府推行的环境规制政策和数字经济的飞速发展,会影响到邻地高碳制造业绿色发展和减碳效果,因此还需进一步完善和创新区域治理污染的协同机制,构建跨区域性的反映节能、治污、减排功能效果的协同预警监测体系,以更好地监察督促区域高碳制造业实现绿色低碳和高质量发展目标。

参考文献:

- [1] PORTER M E, VAN DER LINDE C. Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship[J]. *Journal of Economic Perspectives*, 1995, 9(4): 97-118.
- [2] MATSUHASHI R, TAKASE K. Green innovation and green growth for realizing an affluent low-carbon society[J]. *Low Carbon Economy*, 2015, 6(4): 87-95.
- [3] 万攀兵, 杨冕, 陈林. 环境技术标准何以影响中国制造业绿色转型——基于技术改造的视角[J]. *中国工业经济*, 2021(9): 118-136.
- [4] 吴敏洁, 徐常萍, 唐磊. 环境规制与制造业产业结构升级——影响机理及实证分析[J]. *经济体制改革*, 2019(1): 135-139.
- [5] 朱东波. 环境规制、技术创新与中国工业结构绿色转型[J]. *工业技术经济*, 2020, 39(10): 57-64.
- [6] GONG M Q, YOU Z, WANG L T, et al. Environmental regulation, trade comparative advantage, and the manufacturing industry's green transformation and upgrading[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(8): 2823.
- [7] 余东华, 崔岩. 双重环境规制、技术创新与制造业转型升级[J]. *财贸研究*, 2019, 30(7): 15-24.
- [8] LEE S, KIM M S, PARK Y. ICT co-evolution and Korean ICT strategy—an analysis based on patent data[J]. *Telecommunications Policy*, 2009, 33(5/6): 253-271.

- [9] MANYIKA J, ROXBURGH C. The great transformer: the impact of the internet on economic growth and prosperity[R]. Chicago, IL: McKinsey Global Institute, 2011.
- [10] DEL GIUDICE M. Discovering the Internet of Things (IoT) within the business process management: a literature review on technological revitalization[J]. Business Process Management Journal, 2016, 22(2): 263-270.
- [11] CAPUTO A, MARZI G, PELLEGRINI M M. The Internet of Things in manufacturing innovation processes: development and application of a conceptual framework[J]. Business Process Management Journal, 2016, 22(2): 383-402.
- [12] HEO P S, LEE D H. Evolution of the linkage structure of ICT industry and its role in the economic system: the case of Korea[J]. Information Technology for Development, 2019, 25(3): 424-454.
- [13] 赵西三. 数字经济驱动中国制造转型升级研究[J]. 中州学刊, 2017(12): 36-41.
- [14] 张于喆. 数字经济驱动产业结构向中高端迈进的发展思路与主要任务[J]. 经济纵横, 2018(9): 85-91.
- [15] 李春发, 李冬冬, 周驰. 数字经济驱动制造业转型升级的作用机理——基于产业链视角的分析[J]. 商业研究, 2020(2): 73-82.
- [16] 廖信林, 杨正源. 数字经济赋能长三角地区制造业转型升级的效应测度与实现路径[J]. 华东经济管理, 2021, 35(6): 22-30.
- [17] 李馥伊. 美墨加贸易协定(USMCA)内容及特点分析[J]. 中国经贸导刊, 2018(34): 26-28.
- [18] 何文彬. 数字化推动中国制造业价值链高端化效应解析——基于全球价值链视角[J]. 华东经济管理, 2020, 34(12): 29-38.
- [19] 张小筠, 刘戒骄, 李斌. 环境规制、技术创新与制造业绿色发展[J]. 广东财经大学学报, 2020, 35(5): 48-57.
- [20] 马中东, 宁朝山. 数字经济、要素配置与制造业质量升级[J]. 经济体制改革, 2020(3): 24-30.
- [21] 惠宁, 刘鑫鑫. 互联网发展对中国区域创新能力的影响效应[J]. 社会科学研究, 2020(6): 30-37.
- [22] 钞小静, 廉园梅, 罗鑫皓. 新型数字基础设施对制造业高质量发展的影响[J]. 财贸研究, 2021, 32(10): 1-13.
- [23] 庞瑞芝, 张帅, 王群勇. 数字化能提升环境治理绩效吗?——来自省际面板数据的经验证据[J]. 西安交通大学学报(社会科学版), 2021, 41(5): 1-10.
- [24] 张明斗, 任衍婷. 环境规制对生态韧性的影响——基于“本地-邻地”效应的视角[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2022, 24(6): 16-29.
- [25] 孔海涛, 荆依梦. 地区间环境规制互动、区域市场整合与制造业转型升级[J]. 管理现代化, 2022, 42(4): 148-153.
- [26] 王霞. 中国高碳制造业碳锁定及其驱动因素研究[D]. 开封: 河南大学, 2020.
- [27] 何宁, 夏友富. 新一轮技术革命背景下中国装备制造业产业升级路径与评价指标体系研究[J]. 科技管理研究, 2018, 38(9): 68-76.
- [28] 张楠. 低碳经济背景下黑龙江省制造业发展模式研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- [29] 姜楠. 环保财政支出有助于实现经济和环境双赢吗? [J]. 中南财经政法大学学报, 2018(1): 95-103.
- [30] 原毅军, 谢荣辉. 环境规制的产业结构调整效应研究——基于中国省际面板数据的实证检验[J]. 中国工业经济, 2014(8): 57-69.
- [31] 方湖柳, 潘娟, 马九杰. 数字技术对长三角产业结构升级的影响研究[J]. 浙江社会科学, 2022(4): 25-35, 156-157.
- [32] 刘智勇, 李海峥, 胡永远, 等. 人力资本结构高级化与经济增长——兼论东中西部地区差距的形成和缩小[J]. 经济研究, 2018, 53(3): 50-63.
- [33] 张建鹏, 陈诗一. 金融发展、环境规制与经济绿色转型[J]. 财经研究, 2021, 47(11): 78-93.
- [34] 邓慧慧, 杨露鑫. 雾霾治理、地方竞争与工业绿色转型[J]. 中国工业经济, 2019(10): 118-136.

The Impact of Environmental Regulation on the Green and Low-carbon Development of High Carbon Manufacturing Industry —Based on the Regulatory Effect of Digital Technology

LIU Chengyi, LI Xin

(Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450046)

Abstract: This paper examines the internal mechanism of environmental regulation driving the green and low-carbon development of high-carbon manufacturing industry from the perspective of digital technology development, and empirically tests the regulatory effect of digital technology on the impact of formal and informal environmental regulation on the low-carbon transformation of high-carbon manufacturing industry. The results show that: (1) Both formal and informal environmental regulations can force high-carbon manufacturing enterprises to carry out green innovation and promote the green and low-carbon development of high-carbon manufacturing; (2) Digital technology can significantly promote the green and low-carbon development of high-carbon manufacturing, and enhance the role of formal and informal environmental regulations in promoting the green and low-carbon development of high-carbon manufacturing; (3) Both formal and informal environmental regulations have positive spatial spillover effects on the green and low-carbon development of high-carbon manufacturing, and digital technology has obvious moderating effects in this process. Therefore, the green, low-carbon and high-quality development of high-carbon manufacturing can be promoted by increasing the innovation and application of digital technology, strengthening the negative role of formal and informal environmental regulatory policies, and innovating the synergy mechanism for the green development of high-carbon manufacturing in regions.

Compared with previous studies, the marginal contributions of this paper are as follows: (1) Considering the practical problems in manufacturing carbon emissions, high-carbon manufacturing is a specific sub-industry that contributes the most to carbon emissions in the traditional manufacturing category, and reasonably defining the connotation and scope of high-carbon manufacturing is the key to achieving the “dual carbon” goal and high-quality development; (2) Research on the mechanism and effect of formal and informal environmental regulation to drive the green and low-carbon development of high-carbon manufacturing under the regulatory effect of digital technology; (3) Focusing on environmental regulation to promote the green and low-carbon development of high-carbon manufacturing industry, the mechanism analysis. Investigate how digital technology can improve the efficiency of environmental regulation and promote the green and low-carbon development of high-carbon manufacturing by enabling the digitalization of government environmental supervision and empowering the diversification of environmental regulation subjects; (4) Based on the dual dimensions of “empowerment” and “empowerment” of digital technology, studying the spatial spillover effect of environmental regulation on the green and low-carbon development of high-carbon manufacturing under the conditions of technology empowerment is of great significance to cross the digital divide and promote the deep integration of digital economy and manufacturing transformation and development, and provide policy reference for accelerating the coordinated promotion of green and low-carbon development of manufacturing industry across regions.

Keywords: digital technology; formal environmental regulation; informal environmental regulation; high-carbon manufacturing; green and low-carbon development

(责任编辑:姜 菜;姚望春)