

引用格式:韩冬日,吕晓丽,董会忠,等.数字技术对降碳减污协同增效的门槛效应[J].资源科学,2023,45(11):2130-2143.[Han D R, Lv X L, Dong H Z, et al. Threshold effect of digital technology on the synergy of carbon reduction and pollution reduction[J]. Resources Science, 2023, 45(11): 2130-2143.] DOI: 10.18402/resci.2023.11.03

数字技术对降碳减污协同增效的门槛效应

韩冬日^{1,2},吕晓丽¹,董会忠¹,王洪宇¹

(1. 山东理工大学管理学院,淄博 255000;2. 黄河流域数据智能与低碳治理协同创新中心,淄博 255000)

摘要:【目的】“双碳”战略与数字经济的历史交汇期,依托数字化力量推动环境治理成为重要的研究焦点,探讨数字技术对降碳减污协同增效的影响及其机制意义凸显。【方法】本文基于2011—2020年中国省级面板数据,运用基准回归模型探讨数字技术对降碳减污协同增效的直接影响,并通过构建门槛回归模型分别探究了以产业结构升级、能源利用效率、生产工艺创新、环境规制为约束变量,全国以及东部、中部、西部3个地区的数字技术对降碳减污协同增效的非线性效应。【结果】①在全国以及东部、中部、西部3个地区,数字技术对降碳减污协同增效存在正向的直接影响,且呈现出“中部>西部>东部”的分布特点。②数字技术在全国层面对降碳减污协同增效存在显著的门槛效应。产业结构升级高于门槛值、能源利用效率高于第二门槛值、生产工艺创新在第一门槛值和第二门槛值之间、环境规制高于门槛值时,数字技术的推动作用更强。③对东部、中部、西部地区分别进行门槛效应检验,3个地区均呈现出显著的非线性效应。其中,除了在西部地区环境规制高于门槛值时,数字技术对降碳减污协同增效表现为负向的非线性影响;各门槛变量高于门槛值时,数字技术对降碳减污协同增效的积极作用均更强。【结论】数字技术有利于推动降碳减污协同增效,助力中国推进生态文明建设。因此,各地区应将全过程治理纳入降碳减污协同增效工作中,制定差异化政策,形成“数字+绿色”发展合力。

关键词:数字技术;降碳减污;协同增效;产业结构升级;能源利用效率;环境规制;门槛回归

DOI: 10.18402/resci.2023.11.03

1 引言

生态文明建设是关乎中华民族发展的根本大计^[1]。中国政府高度重视环境污染治理与温室气体减排两大现实性问题,并在战略层面不断规划设计减污低碳发展路径^[2]。“十四五”时期,中国生态文明建设进入了降碳减污协同增效的新阶段^[3]。中国作为发展中工业化大国,环境保护的结构性、根源性、趋势性压力总体上未根本缓解,实现降碳减污协同治理任务艰巨^[4]。这要求中国污碳治理必须改变传统“先污染后治理”的末端低效治理模式,向“源头—过程—末端”全过程治理视角下推动降碳减污协同增效的治理模式转变,从根本上实现经济发展与环境保护全面脱钩^[5,6]。第四次工业革命环境下,数字

孪生、人工智能等数字技术大量涌现,全面赋能生态环境生态文明建设^[7,8]。降碳减污协同推进是一个复杂的系统工程,在此过程中,数字技术的广泛应用很可能成为推动中国取得降碳减污历史性突破的关键力量,中国亟需抓住数字化变革大环境的主流优势,为降碳减污协同增效注入源源不断的动力,加快发展方式绿色化转型,深入推进环境污染防治^[9]。如果数字技术能够成为实现降碳减污协同增效的重要驱动力,那么进一步深入探究数字技术对降碳减污协同增效的影响作用。同时,考虑到中国各地区存在异质性的问题,剖析数字技术在不同地区对降碳减污协同增效的作用规律与特征,从而有针对性地制定适宜的发展政策,对推动生态文明

收稿日期:2023-03-17 修订日期:2023-09-24

基金项目:国家社会科学基金项目(23CGL041)。

作者简介:韩冬日,女,黑龙江哈尔滨人,副教授,博士,硕士生导师,研究方向为资源环境管理。E-mail: m18845105191@163.com

通讯作者:吕晓丽,女,山东潍坊人,硕士生,研究方向为资源环境管理。E-mail: m202316121401058@163.com

2023年11月

建设,建设社会主义现代化强国和美丽中国具有重要的理论价值和实践意义。

目前,有关数字技术对降碳减污协同增效的影响研究,还缺乏直接的理论支持,但有关数字经济的污碳治理研究为本文提供了借鉴。而关于数字技术与绿色发展之间的关系一直存在争议。一方面,部分研究认为,数字技术及其数字产业本身是高耗能的产业^[10],随着AI、大数据、云计算技术的发展,建设规模不断增加的数据中心被称为“吃电怪兽”,会产生严重的环境污染问题^[11],如2022年,全国的数据中心“吃”掉约全社会发电量的3%。另一方面,部分研究基于以下两个方面肯定了数字技术的环境治理效应:从政府层面来看,政府借助大数据、云计算、遥感等数字技术实时动态监测企业污染排放和环境治理行为,辅以网络公众参与等非正式环境规制方法^[12],有助于提升环境治理水平;从企业层面来看,企业依托数字技术,运用“网格化”“三维化”“星地一体化”等手段,构建海量数据库^[13],进而搭建数字交易平台,有助于精准对接消费端的生态产品需求,推动实现水权、排污权等调节服务类生态产品供需匹配^[14],形成“数字化”与“绿色化”的良性互动。

关于降碳减污协同增效的研究可以分为概念溯源、前因研究以及后效研究3个方面。在概念溯源方面,Haken^[15]首次正式提出协同的概念,1991年,Weidlich^[16]将协同学引入社会科学研究领域,并提出了一般性的社会科学定量分析框架。降碳减污协同增效研究源自协同效应与公共环境治理领域的交叉,基于协同治理理论,强调引导污染物减排子系统与温室气体减排子系统由无序减排转变为有序协同减排^[2]。在前因研究方面,既有研究证实了节能技术进步^[17]、能源结构转型^[18]、金融包容性^[19]和减排目标约束^[20]等对于减污治理或降碳治理的推动作用。在后效研究方面,协同推进降碳减污,对提高居民健康收益^[21]、降低全社会总减排成本^[22]以及推动工业绿色转型^[23]等均具有积极影响。

通过对已有文献的梳理,可以发现目前学者大多是从碳排放或污染治理单一角度考察数字技术的影响,对数字技术降碳减污协同治理效果的研究较少,并未关注到两者之间可能存在的非线性关系;而且对污染物和CO₂排放的协同度的测度并未

形成统一的标准,对数字技术的测度主要采用主成分分析法、熵权法等进行降维,在权重赋值上存在主观偏误性。除此之外,对降碳减污治理路径的探讨大多聚焦在“源头预防”和“末端治理”上,鲜少有学者关注数字技术影响降碳减污“过程控制”阶段的研究。本文存在的边际贡献如下:第一,利用耦合协调度模型测度降碳减污协同度;在数字技术指标测度上,从数字基础设施、数字交易市场、数字要素投入、数字产业规模4个维度构建评价指标体系,运用投影寻踪模型进行降维,进而提高研究结论的可靠性;第二,本文基于全过程治理视角,从“源头预防”“过程控制”以及“末端治理”3个角度全方位深入探析数字技术影响地区降碳减污协同增效的非线性效应。

2 机理分析与研究假说

2.1 直接传导机制与研究假说

数字技术是人工智能、区块链、云计算等多种新兴数字化技术的集称,具有渗透性、替代性和协同性的“技术—经济”范式特征^[24]。内生经济增长理论认为经济持续增长的动力来自于技术进步和全要素生产率提升,数字技术全面渗透经济社会各领域,带来了以数据要素为核心的新型生产资料的普及,形成数据生产力,引导经济发展方式集约化变革,具有一定的环境福利效应^[25]。从社会组织层面看,依托于数字技术构建环境污染共治网络,可以激发社会环境意识,发挥各方面齐抓共管的作用,进而形成“人在干、网在看、云在算、激励向善、约束作恶”的新型现代化环境治理模式。从企业层面看,基于数字技术提供的海量连接能力和巨大算力,可以追踪经济主体污染排放动态足迹,有效地计算企业排放对于公共利益的损害程度,抑制环境保护中“搭便车”行为动机,进而约束企业污碳排放行为。从个体层面看,借助于数字技术搭建的“低门槛”、便捷性、互动性的数字平台,可以量化和放大个体低碳行为,鼓励居民积极践行绿色消费,并通过绿色消费需求推动绿色产业发展。

基于以上分析,本文提出研究假设1:数字技术能够直接促进降碳减污协同增效。

2.2 门槛效应机制与研究假说

基于经典文献和经济学理论,数字技术对降碳

减污协同增效的影响可能是非线性的,其影响方向和程度可能会随着相关重要变量达到一定的水平或门槛值之后改变。本文基于全过程治理视角,选取产业结构升级、能源利用效率、生产工艺创新、环境规制4个变量作为门槛变量,对门槛效应存在的原因和理论机制分析如下。

(1)产业结构升级的门槛作用分析

在产业结构升级的过程中,数字等高新技术产业蓬勃发展,推动新兴业态创新^[26],为数字技术应用提供支持,有助于环境治理效应发挥。当地区产业结构相对高级时,产业结构系统性地由资本、劳动密集向技术密集转变,意味着高级的产业结构逐步占据主导地位,“绿色化”程度较高的产业结构为减少生产过程中的碳排放以及污染物排放提供稳定基础^[27],在此类地区中,数字技术的高渗透性得以充分发挥,推动地区降碳减污的协同增效。而在产业结构相对低级的地区往往伴随着工业占比较高,环境污染问题比较突出,数字技术作用于污染防治的效果较弱。因此此类地区发展数字技术对降碳减污协同增效的作用得不到充分发挥。

(2)能源利用效率的门槛作用分析

在提高能源利用效率的过程中,数字技术通过与其他领域技术的广泛结合应用于能源管理环节,在生产过程中利用丰富的绿色技术创新应用场景,利用智能化绿色生产方式减少能源投入,发挥节能减排“智慧潜能”^[28]。在能源利用效率水平较高的地区,数字技术所发挥的协同效应和替代效应得以充分彰显,数字技术资源对物质资源的替代能迅速改变能源消耗需求结构^[28],从而促进降碳减污的协同增效,更大程度上彰显出数字技术对降碳减污协同的积极影响。值得注意的是,数字技术发展早期依赖于机器学习和强大算力,可能造成数据中心负载过重,根据国家能源局耗电量报告,2022年中国数据中心耗电量超过2300亿kW·h,数字技术发展带动能源消耗需求激增,可能会加剧能源消费,抑制降碳减污协同治理。

(3)生产工艺创新的门槛作用分析

生产工艺设备的研发或改造升级以及生产流程的绿色化改造与升级使得数字技术得以充分扩散,对减少污染物和CO₂排放有着重要支撑作用。

生产工艺创新投入可以促进新技术的研发和应用,包括降低能源消耗、减少污染物排放等低碳技术发展^[29],进一步促进资源优化和循环利用,降低污染物和碳排放水平。加大生产工艺创新投入,优化生产工艺,可以充分利用数字技术高扩散性的优势,推动企业间的生产数据共享和污染监测合作,促进降碳减污协同增效。反之,若生产工艺创新投入不足,生产过程中设备等较为落后,则大大限制了数字技术对降碳减污协同增效的作用效应。

(4)环境规制的门槛作用分析

环境规制作为社会性规制的重要组成部分,是指政府借助污染治理投资等规制方式,制定相应的政策和措施,调节区域内的企业经济活动,在一定程度上表现出政府的环境关注度,并决定着数字技术应用的硬性条件,对污染治理具有重要影响^[30]。在环境规制较强的地区,政府的环境约束较强,市场主体受到严格监督,有助于企业利用先进数字技术更新污染监测设备,减少污染排放行为;在环境规制较弱的地区,政府对经济发展的环境要求较低,基于利润最大化考虑,企业将数据等生产要素投入生产制造,并不会过多关注于污染治理。因此,尽管地区数字技术蓬勃发展,但并不会促使企业进行绿色技术研发和生产流程再造,无法发挥出对降碳减污协同增效的积极作用。

因此,本文提出假说2:数字技术对降碳减污协同增效呈现积极的非线性影响,并且在产业结构更高级、能源利用更有效率、生产工艺创新水平适中、环境规制更强时,这种积极影响更为显著。

3 模型构建与变量测度

3.1 模型构建

本文采用了基准回归模型和门槛回归模型分别考察数字技术对全国以及东部、中部、西部3个地区降碳减污协同增效的直接影响和非线性影响,以此来验证本文提出的2个假说。本文构建基准回归模型为:

$$gov_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 dig_{it} + \alpha_n X_{it} + \lambda_i + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

式中: gov_{it} 表示 i 地区在第 t 年的降碳减污协同度; α_0 、 α_1 、 α_n 表示待估参数; dig_{it} 表示 i 地区在第 t 年的数字技术指数; X_{it} 表示模型中的控制变量,包含了环境政策(pol_{it})、教育水平(edu_{it})、城市化水平

2023年11月

(cit_{it})、能源消费结构(ecs_{it})、对外开放水平(ftl_{it})及经济发展水平(gdp_{it})6类变量; λ_i 表示不可观测的个体随机效应; ε_{it} 表示随机干扰项。

进一步地,本文利用Hansen^[31]提出的非动态面板门槛回归模型对数字技术与降碳减污协同治理效应之间的门槛效应进行检验,作为一种非线性关系检验的计量模型,该方法能够准确计算门槛值,并对内生的“门槛特征”进行显著性检验。本文分别以产业结构升级(ind_{it})、能源利用效率(ene_{it})、生产工艺创新(psi_{it})、环境规制(reg_{it})为门槛变量,建立单重门槛模型如下:

$$gov_{it} = \mu_i + \theta_1 dig_{it} \cdot I(threshold_{it} \leq \gamma) + \theta_2 dig_{it} \cdot I(threshold_{it} > \gamma) + \theta_n X_{it} + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

式中: μ_i 表示截距项; θ_1 、 θ_2 表示待估参数; θ_n 表示待估参数向量; $threshold_{it}$ 表示*i*地区第*t*年门槛变量的值; γ 表示门槛值; $I(\cdot)$ 表示指示性函数,相应的条件成立时取值为1,否则为0。当存在双重门槛时,可以建立面板模型如下:

$$gov_{it} = \mu_i + \theta_1 dig_{it} \cdot I(threshold_{it} \leq \gamma_1) + \theta_2 dig_{it} \cdot I(\gamma_1 < threshold_{it} \leq \gamma_2) + \theta_3 dig_{it} \cdot I(threshold_{it} > \gamma_2) + \theta_n X_{it} + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

式中: θ_3 为待估参数。

3.2 变量测度与说明

3.2.1 被解释变量

降碳减污协同增效(gov)。考虑到大气污染物排放和 CO_2 排放具有同根、同源、同过程的特征,降碳减污协同增效具有可行性。本文减污方面参考陈晓红等^[32]的研究,主要选取二氧化硫、烟尘以及氮氧化物的排放量进行折算得出大气污染物综合排放当量。计算方法参考《中华人民共和国环境保护税法》中对于大气污染物排放当量的定义,以及毛显强等^[33]对局地大气污染物排放当量的计算方法;减碳方面参考张瑜等^[6]的研究,选取 CO_2 排放量进行测度。 CO_2 排放量利用IPCC排放因子法,基于煤油、焦炭等化石能源消费量核算^[34]。

两个或者两个以上系统之间的相互作用、相互影响可以用耦合协调模型来分析,因此,降碳减污协同增效的评价可以运用耦合协调模型来研究,进而分析不同地区大气污染物排放控制和碳减排之

间的协同度差异。本文借鉴王淑佳等^[35]的方法划分耦合度和耦合协调度等级,模型计算方法如下:

$$C = \frac{2\sqrt{U_1 \cdot U_2}}{U_1 + U_2} \quad (4)$$

$$T = aU_1 + bU_2 \quad (5)$$

$$gov = \sqrt{C \cdot T} \quad (6)$$

式中: C 表示两系统的耦合度; U_1 表示污染物当量; U_2 表示碳排放量,本文采用极差标准化法对指标进行无量纲化处理; T 表示两个系统的综合协调指数; a 、 b 均表示比重,本文参考王淑佳^[35]研究,取 $a=b=0.5$,即认为大气污染物排放控制和碳减排同等重要; gov 表示降碳减污耦合协调度,取值[0, 1]。 gov 的值越大,表明污染物排放控制和碳减排这两个系统间的协调性越好,协同程度越强; gov 的值越小,表明污染物排放控制和碳减排系统间的耦合状态越差,协同程度越弱。

3.2.2 核心解释变量

数字技术指数(dig)。基于可获得数据,借鉴刘婧玲等^[36]的研究,进一步扩充数字技术的测度范围,从数字基础设施、数字交易市场、数字要素投入、数字产业规模4个方面对各地区数字技术综合发展水平予以评价。其中,数字基础设施包括互联网普及率、互联网接入端口数、长途光缆线路长度以及固定电话年末用户数^[36];数字交易市场采用数字普惠金融指数和电信业务总量衡量^[37,38];数字要素投入采用数字产业R&D全时当量和数字产业R&D内部经费支出衡量^[39];数字产业规模采用数字产业主营业务收入、数字产业企业数和数字产业从业人数进行测算^[37,40]。

表1细分了数字技术测度体系的各项指标,由于数字技术的指标是多维的,本文运用基于加速遗传算法的投影寻踪方法测度数字技术指数,即通过优化投影方向 $a(j)$ 将高维度的数据通过一定的组合投影到低纬度子空间上,最大程度反映原高维数据结构或特征,对原高维数据的投影方向进行全局寻优,达到投影指标函数 $Q(a)$ 的最优值,进而得到数字技术指标的一维产出投影值 $z(v)$,具体方程如下:

$$\begin{cases} \max Q(a) = S_z \cdot D_z \\ \text{s.t.} \sum_{j=1}^n a^2(j) = 1 \end{cases} \quad (7)$$

表1 数字技术评价指标体系

Table 1 Evaluation indicator system of digital technology

一级指标	二级指标	单位
数字基础设施	互联网普及率	%
	互联网接入端口数	万个
	长途光缆线路长度	km
	固定电话年末用户数	万户
数字交易市场	数字普惠金融指数	—
	电信业务总量	亿元
数字要素投入	数字产业R&D全时当量	人年
	数字产业R&D内部经费支出	万元
数字产业规模	数字产业主营业务收入	万元
	数字产业企业数	个
	数字产业从业人数	人

$$z(v) = \sum_{j=1}^n a(j)y(v,j) \quad (8)$$

式中: $Q(a)$ 表示投影指标函数; S_z 表示 $z(v)$ 的标准差; D_z 表示 $z(v)$ 的局部密度; $a(j)$ 表示指标 j 的投影方向; $z(v)$ 表示数字技术指数投影值; v 表示第 v 个样本; $y(v,j)$ 表示 v 样本的第 j 个细分指标经过无量纲处理后的数值。

3.2.3 门槛变量

基于前文分析,源头预防是一种前瞻性环境治理策略,能够通过升级产业结构从根本上减小污碳产生的可能性,是环境治理中最基本的一环。劳动力和资本流动在产业结构从低级形态向高级形态转变过程中起到重要的推动作用。本文参考于斌斌^[41]的研究,以各产业部门产出占比和劳动生产率的乘积之和作为产业结构升级的表征变量,如式(9)所示。

$$IS_{it} = \sum_{m=1}^3 y_{i,m,t} \times LP_{i,m,t} \quad m=1,2,3 \quad (9)$$

式中: IS_{it} 表示产业结构升级; $y_{i,m,t}$ 表示 i 地区的第 m 项产业在 t 时期占地区生产总值的比重; $LP_{i,m,t}$ 表示 i 地区第 m 项产业在 t 时期的劳动生产率,计算公式为:

$$LP_{i,m,t} = Y_{i,m,t} / L_{i,m,t} \quad (10)$$

式中: $Y_{i,m,t}$ 表示 i 地区第 m 项产业在 t 时期的增加值; $L_{i,m,t}$ 表示 i 地区第 m 项产业在 t 时期的就业人数。由于产值占比 $y_{i,m,t}$ 没有量纲,而劳动生产率 $LP_{i,m,t}$ 具有量纲,本文采取极值法进行标准化消除

量纲。

过程控制是指通过提高资源利用效率、研发效率,在生产过程中对污染物产生量“做减法”,是在源头预防并未完全实现的基础上,对于污染处理的进一步举措。提升能源利用效率可以减少能源资源浪费,抑制资源无序过度使用,在能源使用过程中减少污染产生,本文参考孙慧等^[42]的研究,利用GDP与能源消费总量之比来表征能源利用效率。而生产工艺创新主要聚焦于工艺更新、设备改造、废物循环利用等,可以有效降低排污量,减少工艺活动对生态环境的破坏,本文借鉴王锋正等^[43]的研究,利用R&D经费内部支出与技术改造经费投入之和来度量生产工艺创新。

末端治理是指在产品生产终端对污染物进行处理,利用污染处理设备或相关技术工艺去处理已经产生的污染物,使之达到排放标准,降低污染排放强度。末端治理作为源头预防和过程控制的有益补充有利于消除污染事件,但难以完全消除污染物,也存在污染过程与生产过程脱节、污染治理费用大等缺陷。“竞争锦标赛”体制下,受任期制约束的政府官员倾向于利用投资方式对污染物和温室气体进行末端处理,以达到污染减排约束目标。借鉴Fare等^[44]的做法,用污染治理投资衡量环境规制。

3.2.4 控制变量

降碳减污协同治理效应除了会受到数字技术的影响外,还受到诸多内外部因素的影响。借鉴已有研究,为保证模型结果的稳健性,本文加入一系列控制变量,包括:①环境政策(pol):采用各省排污费表示^[42];②教育水平(edu):采用每10万人中在校高等学校学生数表示^[45];③城市化水平(cit):采用城镇人口占总人口的比重表示^[46];④能源消费结构(ecs):采用煤炭占能源消耗总量的比重表示^[46];⑤对外开放水平(fit):采用进出口总额占地区生产总值比重表示^[47];⑥经济发展水平(gdp):采用地区人均生产总值表示^[48]。各变量的描述性统计结果见表2,展示了各变量数据的集中趋势以及离散程度。

为了剔除价格因素的影响,根据《中国价格统计年鉴》对数字技术指标中的电信业务总量、数字产业R&D内部经费支出、数字产业主营业务收入、

2023年11月

表2 各变量的描述性统计

Table 2 Descriptive statistics of each variable

	单位	样本	平均值	标准差	最小值	最大值
<i>gov</i>	—	300	0.632	0.233	0.051	0.999
<i>dig</i>	—	300	0.270	0.358	0.015	2.596
<i>ind</i>	%	300	3.530	0.983	0.231	6.605
<i>ene</i>	亿元/万 t 标准煤	300	1.648	0.812	0.446	5.339
<i>psi</i>	万元	300	4.761	5.554	0.072	31.688
<i>reg</i>	亿元	300	5.078	1.008	2.477	9.833
<i>pol</i>	元	300	17.217	1.583	11.688	20.457
<i>edu</i>	千人	300	2.641	0.805	1.082	5.534
<i>cit</i>	%	300	0.583	0.122	0.350	0.960
<i>ecs</i>	%	300	0.526	0.164	0.012	0.849
<i>fil</i>	%	300	0.280	0.290	0.007	1.494
<i>gdp</i>	万元/人	300	5.421	2.726	1.602	17.420

地区生产总值、地区三次产业生产总值、地区三次产业增加值、污染治理投资、排污费、进出口总额、地区R&D经费内部支出以及技术改造经费投入进行相应的平减(2011年=100);为了提高估计准确性,本文对环境政策、产业结构升级以及生产工艺创新等的数据进行了取对数处理。

3.3 数据来源

本文数据来源于《中国统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国通信年鉴》《中国电子信息产业统计年鉴》以及各省份统计年鉴。本文选取2011—2020年中国30个省面板数据作为研究样本,考察数字技术对降碳减污协同增效的影响机制和门槛效应,由于数据缺失严重,本文不包括西藏、港澳台地区。

4 结果与分析

4.1 数字技术对降碳减污协同增效的基准回归结果分析

利用Hausman检验选择估计模型,本文判定选取随机效应模型更为合理。基准回归结果如表3所示,列(1)–(4)分别表示全国以及东部、中部、西部3个地区的数字技术对降碳减污协同增效的基准回归结果。在列(1)中,数字技术对降碳减污协同度的影响系数为0.273,在1%的水平上显著,说明数字技术的发展在总体上对降碳减污协同增效起到积极影响,验证了本文假说1。数字技术的发展有助于精确识别、检测追踪高污染、高碳排的问题,提高了企业实施减污和降碳举措的效率。就控制变量

表3 全国以及东部、中部、西部数字技术对降碳减污协同增效的基准回归结果

Table 3 Baseline regression results of digital technology on the synergy of carbon reduction and pollution reduction of China and Eastern Region, Central Region, Western Region

	(1) 全国	(2) 东部	(3) 中部	(4) 西部
<i>dig</i>	0.273*** (0.076)	0.306*** (0.035)	1.379*** (0.307)	0.309*** (0.035)
<i>pol</i>	0.023*** (0.007)	0.078*** (0.009)	0.015 (0.017)	0.076*** (0.009)
<i>edu</i>	0.031 (0.033)	0.128*** (0.030)	0.010 (0.046)	-0.140*** (0.028)
<i>cit</i>	1.101*** (0.247)	1.744*** (0.030)	-2.211*** (0.364)	1.822*** (0.313)
<i>ecs</i>	0.104 (0.166)	1.854*** (0.162)	-0.207 (0.199)	1.937*** (0.171)
<i>fil</i>	0.274*** (0.080)	0.094 (0.062)	-1.694*** (0.392)	0.089 (0.062)
<i>gdp</i>	0.017* (0.010)	0.006 (0.011)	0.040* (0.022)	0.008 (0.010)
<i>cons</i>	0.161 (0.226)	-1.955*** (0.206)	1.827*** (0.320)	-1.943*** (0.203)
<i>N</i>	300	110	80	110
<i>R</i> ²	0.439	0.982	0.987	0.982

注:***、**、*分别代表在1%、5%、10%显著性水平上显著。下表同。

而言,环境政策在1%显著性水平上促进全国降碳减污协同增效,验证了“波特假说”的存在性,环境政策能够通过负外部性成本内在化的方式增加企业成本,从而倒逼其技术创新和工艺升级。在此过程中,企业能够通过提高生产率等方式抵消污染治理的成本,对地区降碳减污协同增效产生积极影响;城市化水平对降碳减污协同增效的影响系数在1%的水平下显著为正,城市化带动了农村人口流动,促进农村植被覆盖与生物量增加,有助于提高生态系统的稳定性和可持续性;对外开放水平在1%显著性水平上促进降碳减污协同增效,对外开放水平可通过引进资金和先进技术而降低能耗,对降碳减污协同增效具有推动作用;经济发展水平对降碳减污协同增效的影响系数在10%的水平上显著为正,经济增长到一定阶段会引起技术与制度的改革,创新生产方式,降低生产过程中的能耗,进一步促进降碳减污协同增效。

表3列(2)–(4)显示,数字技术对降碳减污协同增效的影响呈现出“中部>西部>东部”的特点。原因可能在于,相比于中部与西部地区,东部地区初始技术禀赋相对较高,污碳治理情况较好,信息技术、大数据等要素对于降碳减污协同增效的红利存在限制空间;而在中部与西部地区,数字技术能在降碳减污协同治理上发挥更大的效益。

4.2 数字技术对降碳减污协同增效的非线性效应检验

4.2.1 全国层面

(1)门槛效应存在性检验

在进行门槛回归之前,需要进行门槛效应存在性检验。本文经过 Bootstrap 重复抽样,表4显示产业结构升级和环境规制通过了单门槛效应;能源利用效率和生产工艺创新通过了双重门槛效应。在4类门槛变量的调节下,数字技术对于降碳减污协同增效的非线性影响得到验证。

(2)门槛效应结果分析

表5报告了数字技术影响降碳减污协同增效的门槛面板回归结果。列(1)–(4)分别为以产业结构升级、能源利用效率、生产工艺创新、环境规制为门槛变量时门槛效应的回归结果。具体来看,各门槛变量约束作用如下:

列(1)表示以产业结构升级(*ind*)为门槛变量时的模型估计结果。伴随着 *ind* 跨越门槛值2.037,数字技术对降碳减污协同增效的影响由负向变为正向。当 *ind* 低于门槛值时,数字技术指数每增加1%,降碳减污协同度降低约1.329%;当 *ind* 高于门槛值时,数字技术指数每增加1%,降碳减污协同度提高约0.154%。在产业结构升级的过程中,各产品部门间的经济活动边界逐渐被弱化,数字技术凭借着信息共享低成本性等特征,使得更多的生产部门和创新部门参与绿色发展,并在更大的范围内享受数字红利和环境治理的正向激励,进而形成推动降碳减污协同增效的长效机制。

列(2)表示以能源利用效率(*ene*)为门槛变量时的模型估计结果。随着能源利用效率跨越第一、第二门槛值,数字技术对于降碳减污协同增效的正向影响逐渐加强,其影响系数在第一门槛值前为

表4 门槛效应显著性检验结果

Table 4 Test results of significance of threshold effect

门槛变量	门槛	F值	P值	BS次数	临界值		
					1%	5%	10%
<i>ind</i>	单一门槛	22.03*	0.093	1000	67.781	35.854	20.706
	双重门槛	6.86	0.437	1000	43.034	27.060	19.292
<i>ene</i>	单一门槛	70.29***	0.002	1000	49.454	37.069	28.304
	双重门槛	28.55*	0.065	1000	41.508	29.505	25.705
	三重门槛	21.94	0.408	1000	58.838	43.850	37.546
<i>psi</i>	单一门槛	41.69**	0.023	1000	53.591	35.080	29.739
	双重门槛	51.13***	0.005	1000	47.491	33.756	27.908
	三重门槛	22.04	0.577	1000	157.966	107.314	88.097
<i>reg</i>	单一门槛	56.22***	0.005	1000	46.245	29.231	23.691
	双重门槛	7.06	0.733	1000	41.011	27.960	22.288

2023年11月

表5 数字技术对全国降碳减污协同增效的门槛回归结果

Table 5 Threshold regression results of digital technology impact on the synergy of carbon reduction and pollution reduction in China

门槛变量	(1) <i>ind</i>	(2) <i>ene</i>	(3) <i>psi</i>	(4) <i>reg</i>
<i>dig</i>	-1.329***($q \leq 2.037$) (0.348)	0.203**($q \leq 0.522$) (0.080)	1.856***($q \leq 13.581$) (0.443)	0.229***($q \leq 3.774$) (0.082)
	0.154*($q > 2.037$) (0.086)	1.408***($0.522 < q \leq 0.816$) (0.258)	4.536***($13.581 < q \leq 13.633$) (0.915)	4.526***($q > 3.774$) (0.616)
		6.102***($q > 0.816$) (0.856)	0.214**($q > 13.633$) (0.084)	
控制变量	是	是	是	是
<i>cons</i>	0.040 (0.211)	0.199 (0.198)	0.088 (0.208)	-0.043 (0.201)
<i>F</i>	66.37	71.80	62.02	77.23
<i>N</i>	300	300	300	300
<i>R</i> ²	0.279	0.240	0.254	0.250

0.203,在第一和第二门槛值之间上升为1.408,越过第二门槛值继续升至6.102。这可能是因为中国长期以来的粗放型经济增长方式造成了对化石能源的“锁定效应”,尤其是山西等资源型地区,降碳减污治理的关键在于摆脱能源依赖。伴随着能源利用效率不断提升,地区经济发展与能源消耗逐渐脱钩,企业生产流程变革和低碳转型的需求增大,数字技术得以充分利用,通过数字化手段强化污染监管和绿色生产变革等均有助于推动降碳减污协同增效。

列(3)是以生产工艺创新(*psi*)为门槛变量时的模型估计结果。当生产工艺创新处于第二个门槛区间($13.581 < psi \leq 13.633$)时,数字技术对降碳减污协同增效的影响系数最大,为4.536。可能是因为科技投入充足,更容易吸引技术和高科技人才流入,加快数字技术发展速度,进而加速生产过程绿色化,因此数字技术对降碳减污协同增效的正向影响增大。当*psi*跨越第二门槛值13.633时,数字技术对降碳减污协同增效的影响系数由4.536降为0.214,说明随着*psi*投入加大,数字技术影响降碳减污协同增效效果呈现出“边际递减”的趋势。原因可能在于部分行业出现“创新成本”大于“创新弥补”的现象,从而拖慢了整体的降碳减污协同增效进程。这说明,只有适当提高生产工艺创新水平,其对数字技术影响降碳减污协同增效的促进作用才会显著增强,过高的生产工艺投入反而会抑制这种促进

作用。

列(4)是在环境规制(*reg*)调节下的门槛回归估计结果。在*reg*跨越门槛值3.774时,数字技术对降碳减污协同增效的弹性系数由0.229提高至4.526,表明环境规制强度更大时,数字技术对降碳减污协同增效的积极影响更大。在环境规制第一个门槛区间内,由于环境规制较为宽松,通过“搭便车”行为可以为企业带来利益,企业更倾向于将数字技术应用于扩大生产和提高产量等环节,对于污染治理的作用较弱。伴随着环境规制跨越门槛值,企业需要开展绿色生产以达到政府严格的规制标准,利用多样化的数字技术,可以有效地降低绿色技术创新成本和难度,形成“蓝色循环”等污染物数字化治理模式。在此过程中,数字技术对降碳减污协同增效的积极作用得到充分发挥。

总体上,在4类门槛变量的约束下,数字技术对于降碳减污协同增效存在显著的非线性效应,验证了本文的假说2。

4.2.2 按地区分组

通过使用bootstrap自抽样方法对东部、中部、西部3个地区的门槛效应进行存在性检验,得到产业结构升级、能源利用效率、生产工艺创新、环境规制4个门槛变量在东部、中部、西部3个地区的单一门槛效果均显著,中部地区生产工艺创新通过双重门槛检验,其余变量均未通过双门槛检验^①。这说明,在4个门槛变量的调节作用下,数字技术在东

① 限于篇幅,东、中、西3个地区的门槛效应显著性检验结果及似然比函数图未列示,留存备案。

部、中部、西部3个地区均对降碳减污协同增效起到了非线性影响。具体分析如下:

(1)表6报告了东部地区数字技术影响降碳减污协同的门槛面板回归结果。可以看出,当产业结构升级(*ind*)高于门槛值(3.432)、能源利用效率(*ene*)高于门槛值(0.880)、生产工艺创新(*psi*)高于门槛值(16.801)、环境规制(*reg*)高于门槛值(6.095)时,数字技术指数增加对降碳减污协同度的正向影响变大。可见,若通过调整产业结构、减少能源浪费、重视科研发展、改善环境污染来推动数字技术应用,加上数字技术在绿色化发展上具有一定基础优势,对降碳和减污协同发展的助力更大。

(2)表7报告了中部地区数字技术影响降碳减污协同的门槛面板回归结果。由表中看出,当产业结构升级(*ind*)高于门槛值(4.349)、能源利用效率

(*ene*)高于门槛值(2.368)、生产工艺创新(*psi*)高于门槛值(15.353)、环境规制(*reg*)高于门槛值(4.604)时,数字技术对降碳减污协同增效的影响越积极。在4个门槛变量的门槛值前后,中部地区数字技术对降碳减污协同增效的作用效应始终为正,但影响系数变化不大,其原因可能是该地区资源禀赋较高,污染性能源消费行业占重要地位,导致能源和环境的三重压力,弱化了数字技术对环境治理的影响。

(3)表8报告了西部地区数字技术影响降碳减污协同增效的门槛面板回归结果。当产业结构升级(*ind*)高于门槛值(2.206)、能源利用效率(*ene*)高于门槛值(0.533)、生产工艺创新(*psi*)高于门槛值(13.633)、环境规制(*reg*)低于门槛值(3.741)时,降碳减污协同增效受数字技术的正向影响更大。与

表6 东部地区数字技术对降碳减污协同增效的门槛回归结果

Table 6 Threshold regression results of digital technology impact on the synergy of carbon reduction and pollution reduction of eastern China

门槛变量	(1) <i>ind</i>	(2) <i>ene</i>	(3) <i>psi</i>	(4) <i>reg</i>
<i>dig</i>	0.263***($q \leq 3.432$) (0.049)	-1.061***($q \leq 0.880$) (0.305)	0.269***($q \leq 16.801$) (0.051)	0.263***($q \leq 6.095$) (0.052)
	0.329***($q > 3.432$) (0.057)	0.172***($q > 0.880$) (0.044)	0.330***($q > 16.801$) (0.060)	0.318***($q > 6.095$) (0.062)
控制变量	是	是	是	是
<i>cons</i>	0.618*** (0.198)	0.900*** (0.201)	0.699*** (0.199)	0.771*** (0.202)
<i>F</i>	35.52	35.06	34.18	32.81
<i>N</i>	110	110	110	110
<i>R</i> ²	0.650	0.514	0.670	0.641

表7 中部地区数字技术对降碳减污协同增效的门槛回归结果

Table 7 Threshold regression results of digital technology impact on the synergy of carbon reduction and pollution reduction of central China

门槛变量	(1) <i>ind</i>	(2) <i>ene</i>	(3) <i>psi</i>	(4) <i>reg</i>
<i>dig</i>	1.930***($q \leq 4.349$) (0.258)	2.090***($q \leq 2.368$) (0.255)	2.423***($q \leq 14.829$) (0.284)	1.362***($q \leq 4.604$) (0.399)
	2.224***($q > 4.349$) (0.258)	2.382***($q > 2.368$) (0.266)	2.698***($14.829 < q \leq 15.353$) (0.290)	1.996***($q > 4.604$) (0.276)
			3.301***($q > 15.353$) (0.400)	
控制变量	是	是	是	是
<i>cons</i>	0.431 (0.299)	0.463 (0.297)	0.310 (0.313)	0.862** (0.333)
<i>F</i>	78.28	78.89	73.87	66.94
<i>N</i>	80	80	80	80
<i>R</i> ²	0.719	0.727	0.640	0.661

2023年11月

表8 西部地区数字技术对降碳减污协同增效的门槛回归结果

Table 8 Threshold regression results of digital technology impact on the synergy of carbon reduction and pollution reduction of western China

门槛变量	(1) <i>ind</i>	(2) <i>ene</i>	(3) <i>psi</i>	(4) <i>reg</i>
<i>dig</i>	1.062***($q \leq 2.206$) (0.365)	-1.167***($q \leq 0.533$) (0.352)	0.522($q \leq 13.633$) (0.624)	2.853**($q \leq 3.741$) (1.0606)
	2.739***($q > 2.206$) (0.594)	1.938*($q > 0.533$) (0.990)	1.175***($q > 13.633$) (0.352)	-0.937***($q > 3.741$) (0.353)
控制变量	是	是	是	是
<i>cons</i>	0.994*** (0.378)	1.070*** (0.370)	1.003*** (0.360)	0.809** (0.369)
<i>F</i>	52.84	55.01	52.92	58.16
<i>N</i>	110	110	110	110
<i>R</i> ²	0.061	0.121	0.142	0.116

东部和中部地区不同的是,环境规制高于门槛值反而抑制了数字技术对降碳减污协同增效的作用。可能是因为西部地区数字技术发展较弱,难以兼顾经济效益和环境效益,阻碍了降碳减污协同增效的进程。

4.3 稳健性检验

为考察结果是否稳健,本文通过细化被解释变量、减少控制变量以及调整研究样本3种方法对数字技术的降碳减污协同增效进行稳健性检验^②。

(1)降碳减污协同增效要求同时控制CO₂和其他污染物排放,是降碳和减污“合而治之”的过程。将被解释变量细化为CO₂排放量和其他污染物排放量,分别进行回归分析。检验结果显示模型系数和显著性水平与前文研究结果基本一致,验证了本文模型结果的稳健性。

(2)借鉴孙慧等^[42]的研究,以减少控制变量的方法进行稳健性检验,剔除能源消费结构后对数字技术降碳减污的协同作用进行回归分析,分析得到数字技术对降碳减污协同增效仍有显著的积极影响,与基本回归结果一致,验证了本文模型结果的稳健性。

(3)借鉴齐绍洲^[49]的稳健性检验方法,对研究样本数量进行调整,检验离群值对结果可能造成的偏误,以验证上文的稳健性。依次删除数字技术指数最大和最小的1%、5%和10%左右的样本,对中国28个省份、26个省份和24个省份分别进行3次模型检验,结果中的解释变量影响系数和显著性水平均与

前文检验结果相类似,没有明显差别,同样表现为较强的稳健性。

5 结论与建议

5.1 结论

关注于数字技术赋能降碳减污协同增效的现实需求,为实现中国式绿色现代化的建设目标,本文利用基准回归模型和门槛回归模型从全国以及东部、中部、西部3个地区探究了数字技术对降碳减污协同增效的直接影响和非线性影响。主要结论如下:

(1)数字技术对降碳减污协同增效在全国以及东部、中部、西部3个地区均发挥出显著的积极作用,并呈现出“中部>西部>东部”的分布特点。

(2)在全国层面,数字技术对降碳减污协同增效存在显著的门槛效应。产业结构更高级、能源利用更有效率、生产工艺创新水平适中以及环境规制更强时,数字技术对降碳减污协同增效的推动作用更积极。

(3)东部、中部、西部3个地区以产业结构升级、能源利用效率、生产工艺创新以及环境规制为门槛变量的非线性效应检验均显著通过。在东部地区 and 中部地区,各门槛变量高于其门槛值时,数字技术对降碳减污协同增效的积极影响更大;在西部地区,随着环境规制跨越门槛值,数字技术对降碳减污协同增效的影响由正向变为负向,而其他门槛变量高于门槛值时,数字技术对降碳减污协同增效的积极作用均更强。

② 限于篇幅,稳健性检验的结果未列示,留存备索。

5.2 建议

基于以上研究结论,在加大数字技术发展力度、打造更生态化的数字技术发展模式的同时,根据东部、中部、西部3个地区因经济、技术等发展水平不平衡具有的异质性特点,贯彻因地制宜、分级分类施策的基本原则,推动形成以地区为节点、行业为支点、企业为重点的绿色发展模式,从“源头预防”“过程控制”“末端治理”3个环节构建全过程、一体化污染防治体系,有助于形成闭环管控链条促进降碳减污协同增效。

(1)东部地区数字化水平偏高,数字技术发展较快,此类地区应稳扎稳打,发挥好辐射带动作用,不断推动治理重心前移,转移到“源头预防”和“过程控制”上。一方面,东部地区应积极与中、西部地区展开全方位、深层次的技术合作和经验共享,推进“生态共同富裕”;另一方面,政府应发挥好对资源市场的调节作用,按照当地的发展现状,实施“分级分类”的调控措施,使资源分配更加合理,从而提高污染治理和碳排放治理的效率,实现降碳减污协同增效。

(2)中部地区具有较好的资源禀赋,要充分发挥自身资源优势,加强环境规制力度,健全资源要素市场化配置体系,注重发挥市场在资源配置中的作用,提高能源利用效率,重视设备优化和技术更新,改造和提升传统工业,实现绿色发展。同时要加快数字化发展进程,通过引进先进技术和人才发展数字产业,为数字技术有效增强降碳减污协同治理效应提供良好的发展环境。

(3)西部地区一方面应加大数字技术投资力度,促进数字技术与实体产业的融合,持续推动产业结构升级,淘汰落后产能,引导该地区企业在新能源利用、节约集约等方面进行创新,不断提高能源利用效率,改造升级工艺技术,推动实体产业绿色化升级。另一方面,实行适当的环境规制政策,注重异质性环境规制工具联动对降碳减污协同增效的组合作用,利用环境规制组合破解“绿色悖论”和污染治理外部性弊端。

参考文献(References):

[1] 刘华军, 乔列成, 郭立祥. 减污降碳协同推进与中国3E绩效[J].

财经研究, 2022, 48(9): 4-17. [Liu H J, Qiao L C, Guo L X. Coordinated promotion of pollution and carbon reduction and China's 3E performance[J]. Journal of Finance Economics, 2022, 48(9): 4-17.]

[2] 狄乾斌, 陈小龙, 侯智文. “双碳”目标下中国三大城市群减污降碳协同治理区域差异及关键路径识别[J]. 资源科学, 2022, 44(6): 1155-1167. [Di Q B, Chen X L, Hou Z W. Regional differences and key pathway identification of the coordinated governance of pollution control and carbon emission reduction in the three major urban agglomerations of China under the “Double-Carbon” targets [J]. Resources Science, 2022, 44(6): 1155-1167.]

[3] Gao X W, Liu N, Hua Y J. Environmental protection tax law on the synergy of pollution reduction and carbon reduction in China: Evidence from a panel data of 107 cities[J]. Sustainable Production and Consumption, 2022, DOI: 10.1016/j.spc.2022.07.006.

[4] Zhang W, Li G X. Environmental decentralization, environmental protection investment, and green technology innovation[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, DOI: 10.1007/s11356-020-09849-z.

[5] Hang Y, Wang Q W, Wang Y Z, et al. Industrial SO₂ emissions treatment in China: A temporal-spatial whole process decomposition analysis[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 243: 419-434.

[6] 张瑜, 孙倩, 薛进军, 等. 减污降碳的协同效应分析及其路径探究[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(5): 1-13. [Zhang Y, Sun Q, Xue J J, et al. Synergistic effects of pollution control and carbon reduction and their pathways[J]. China Population, Resources and Environment, 2022, 32(5): 1-13.]

[7] Wang L, Chen Y Y, Stephen T R, et al. Will researching digital technology really empower green development?[J]. Technology in Society, 2021, DOI: 10.1016/j.techsoc.2021.101638.

[8] Bartczak K, Lobejko S. The implementation environment for a digital technology platform of renewable energy sources[J]. Energies, 2022, DOI: 10.3390/en15165793.

[9] Wang K L, Zhu R R, Cheng Y H. Does the development of digital finance contribute to haze pollution control? Evidence from China [J]. Energies, 2022, DOI: 10.3390/en15072660.

[10] 史丹. 数字经济条件下产业发展趋势的演变[J]. 中国工业经济, 2022, (11): 26-42. [Shi D. Evolution of industrial development trend under digital economy[J]. China Industrial Economics, 2022, (11): 26-42.]

[11] 魏丽莉, 侯宇琦. 数字经济对中国城市绿色发展的影响作用研究[J]. 数量经济技术经济研究, 2022, 39(8): 60-79. [Wei L L, Hou Y Q. Research on the impact of China's digital economy on urban green development[J]. Journal of Quantitative & Technological Economics, 2022, 39(8): 60-79.]

[12] Liang L, Li Y. How does government support promote digital econ-

2023年11月

- omy development in China? The mediating role of regional innovation ecosystem resilience[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2023, DOI: 10.1016/j.techfore.2023.122328.
- [13] 杨刚强, 王海森, 范恒山, 等. 数字经济的碳减排效应: 理论分析与经验证据[J]. *中国工业经济*, 2023, (5): 80–98. [Yang G Q, Wang H S, Fan H S, et al. Carbon reduction effect of digital economy: Theoretical analysis and empirical evidence[J]. *China Industrial Economics*, 2023, (5): 80–98.]
- [14] 赵卉心, 孟煜杰. 中国城市数字经济与绿色技术创新耦合协调测度与评价[J]. *中国软科学*, 2022, (9): 97–107. [Zhao H X, Meng Y J. Coupling coordination measurement and evaluation of urban digital economy and green technology innovation in China[J]. *China Soft Science*, 2022, (9): 97–107.]
- [15] Haken H. *Synergetics: Introduction and Advanced Topics*[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2004.
- [16] Weidlich W. Physics and social science: The approach of synergetics[J]. *Physics Reports*, 1991, 204(1): 1–163.
- [17] Qian H, Xu S, Cao J, et al. Air pollution reduction and climate co-benefits in China's industries[J]. *Nature Sustainability*, 2021, 4(5): 1–9.
- [18] 宋鹏, 张慧敏, 毛显强. 面向碳达峰目标的重庆市碳减排路径[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(3): 1446–1455. [Song P, Zhang H M, Mao X Q. Research on Chongqing's carbon emission reduction path towards the goal of carbon peak[J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(3): 1446–1455.]
- [19] 韩先锋, 肖坚, 董明放. 绿色金融发展的碳减排效应[J]. *资源科学*, 2023, 45(4): 843–856. [Han X F, Xiao J, Dong M F. The carbon emission reduction effect of green finance development[J]. *Resources Science*, 2023, 45(4): 843–856.]
- [20] 翁智雄, 马忠玉, 葛察忠, 等. 差异化碳减排目标对区域产业部门经济与碳减排的影响[J]. *环境科学研究*, 2019, 32(8): 1264–1274. [Weng Z X, Ma Z Y, Ge C Z, et al. Economic and mitigating impacts of differential carbon reduction targets on regional industries[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(8): 1264–1274.]
- [21] Gallagher K S, Zhang F, Orvis R, et al. Assessing the policy gaps for achieving China's climate targets in the Paris agreement[J]. *Nature Communications*, 2019, DOI: 10.1038/s41467-019-09159-0.
- [22] Jiang H D, Liu L J, Deng H M. Co-benefit comparison of carbon tax, sulfur tax and nitrogen tax: The case of China[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2021, 29: 239–248.
- [23] 肖滢, 卢丽文. 资源型城市工业绿色转型发展测度: 基于全国108个资源型城市的面板数据分析[J]. *财经科学*, 2019, (9): 86–98. [Xiao Y, Lu L W. Measurement of industrial green transformation efficiency in resource-based cities: Based on 108 resource-based cities' panel data[J]. *Finance & Economics*, 2019, (9): 86–98.]
- [24] 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, 38(12): 9–26. [Jiang X J, Jin J. Digital technology promotes economic efficiency: Labor division of service, industrial synergy and digital-real twins[J]. *Journal of Management World*, 2022, 38(12): 9–26.]
- [25] 田秀娟, 李睿. 数字技术赋能实体经济转型发展: 基于熊彼特内生增长理论的分析框架[J]. *管理世界*, 2022, 38(5): 56–74. [Tian X J, Li R. Digital technology empowers the transformation and development of real economy: An analysis framework based on schumpeter's endogenous growth theory[J]. *Journal of Management World*, 2022, 38(5): 56–74.]
- [26] 昌忠泽, 孟倩. 信息技术影响产业结构优化升级的中介效应分析: 来自中国省级层面的经验证据[J]. *经济理论与经济管理*, 2018, (6): 39–50. [Chang Z Z, Meng Q. Research on the mediating effect of information technology on the optimization and upgrading of industrial structure: An empirical study based on the provincial data[J]. *Economic Theory and Business Management*, 2018, (6): 39–50.]
- [27] Yi Y, Chen R W, Wang H Y, et al. Industrial digitization and synergy between pollution and carbon emissions control: New empirical evidence from China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, DOI: 10.1007/s11356-022-24540-1.
- [28] 薛飞, 刘家旗, 付雅梅. 人工智能技术对碳排放的影响[J]. *科技进步与对策*, 2022, 39(24): 1–9. [Xue F, Liu J Q, Fu Y M. The effect of artificial intelligence technology on carbon emissions[J]. *Science & Technology Progress and Policy*, 2022, 39(24): 1–9.]
- [29] 齐绍洲, 张倩, 王班班. 新能源企业创新的市场化激励: 基于风险投资和企业专利数据的研究[J]. *中国工业经济*, 2017, (12): 95–112. [Qi S Z, Zhang Q, Wang B B. Market-oriented incentives to the innovation of new energy companies: Evidence from venture capital and companies' patents[J]. *China Industrial Economics*, 2017, (12): 95–112.]
- [30] 董竹, 张云. 中国环境治理投资对环境质量冲击的计量分析: 基于VEC模型与脉冲响应函数[J]. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(8): 61–65. [Dong Z, Zhang Y. The quantitative analysis of the impact the investment bringing to the environmental quality: Based on the VEC model and the impulse response function[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21(8): 61–65.]
- [31] Hansen B E. Threshold effect in non-dynamic panels: Estimation, testing, and inference[J]. *Journal of Econometrics*, 1999, 93(2): 345–368.
- [32] 陈晓红, 张嘉敏, 唐湘博. 中国工业减污降碳协同效应及其影响机制[J]. *资源科学*, 2022, 44(12): 2387–2398. [Chen X H, Zhang

- J M, Tang X B. Synergistic effect of industrial air pollution and carbon emission reduction in China and influencing mechanism [J]. *Resources Science*, 2022, 44(12): 2387–2398.]
- [33] 毛显强, 邢有凯, 高玉冰, 等. 温室气体与大气污染物协同控制效应评估与规划[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(7): 3390–3398. [Mao X Q, Xing Y K, Gao Y B, et al. Study on GHGs and air pollution co-control: Assessment and planning[J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(7): 3390–3398.]
- [34] 刘竹, 耿涌, 薛冰, 等. 城市能源消费碳排放核算方法[J]. *资源科学*, 2011, 33(7): 1325–1330. [Liu Z, Geng Y, Xue B, et al. A calculation method of CO₂ emission from urban energy consumption [J]. *Resources Science*, 2011, 33(7): 1325–1330.]
- [35] 王淑孔, 孔伟, 任亮, 等. 国内耦合协调度模型的误区及修正[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(3): 793–810. [Wang S J, Kong W, Ren L, et al. Research on misuses and modification of coupling coordination degree model in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(3): 793–810.]
- [36] 刘婧玲, 陈艳莹. 数字技术发展、时空动态效应与区域碳排放[J]. *科学学研究*, 2023, 41(5): 841–853. [Liu J L, Chen Y Y. Digital technology development, temporal and spatial effects, regional carbon emissions[J]. *Studies in Science of Science*, 2023, 41(5): 841–853.]
- [37] 何维达, 温家隆, 张满银. 数字经济发展对中国绿色生态效率的影响研究: 基于双向固定效应模型[J]. *经济问题*, 2022, (1): 1–8. [He W D, Wen J L, Zhang M Y. Research on the impact of digital economy development on China's green ecological efficiency: Based on two-way fixed effects model[J]. *On Economic Problems*, 2022, (1): 1–8.]
- [38] 赵涛, 张智, 梁上坤. 数字经济、创业活跃度与高质量发展: 来自中国城市的经验证据[J]. *管理世界*, 2020, 36(10): 65–76. [Zhao T, Zhang Z, Liang S K. Digital economy, entrepreneurship, and high-quality economic development: Evidence from urban China [J]. *Journal of Management World*, 2020, 36(10): 65–76.]
- [39] 王锋正, 刘向龙, 张蕾, 等. 数字化促进了资源型企业绿色技术创新吗?[J]. *科学学研究*, 2022, 40(2): 332–344. [Wang F Z, Liu X L, Zhang L, et al. Does digitalization promote green technology innovation of resource-based enterprises?[J]. *Studies in Science of Science*, 2022, 40(2): 332–344.]
- [40] 黄群慧, 余泳泽, 张松林. 互联网发展与制造业生产率提升: 内在机制与中国经验[J]. *中国工业经济*, 2019, (8): 5–23. [Huang Q H, Yu Y Z, Zhang S L. Internet development and productivity growth in manufacturing industry: Internet mechanism and China experiences[J]. *China Industrial Economics*, 2019, (8): 5–23.]
- [41] 于斌斌. 金融集聚促进了产业结构升级吗? 空间溢出的视角: 基于中国城市动态空间面板模型的分析[J]. *国际金融研究*, 2017, (2): 12–23. [Yu B B. Can financial agglomeration promote industrial structure upgrading from perspective of spillovers effect? Based on the analysis of dynamic spatial panel model and city data in China[J]. *Studies of International Finance*, 2017, (2): 12–23.]
- [42] 孙慧, 邓又一. 环境政策“减污降碳”协同治理效果研究: 基于排污费征收视角[J]. *中国经济问题*, 2022, (3): 115–129. [Sun H, Deng Y Y. The effect of “reducing pollution and carbon emissions” in environment policy: A study based on the perspective of pollution fee collection[J]. *China Economic Studies*, 2022, (3): 115–129.]
- [43] 王锋正, 刘向龙, 张蕾, 等. 数字化促进了资源型企业绿色技术创新吗?[J]. *科学学研究*, 2022, 40(2): 332–344. [Wang F Z, Liu X L, Zhang L, et al. Does digitalization promote green technology innovation of resource-based enterprises?[J]. *Studies in Science of Science*, 2022, 40(2): 332–344.]
- [44] Fare R, Grosskopf S, Pasurka C. Technical change and pollution abatement costs[J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 248(2): 715–724.
- [45] 钱晓辉, 迟巍, 黎波. 人力资本对我国区域创新及经济增长的影响: 基于空间计量的实证研究[J]. *数量经济技术经济研究*, 2010, (4): 107–121. [Qian X Y, Chi W, Li B. The role of human capital in regional innovation activities and economic growth: Spatial econometric study[J]. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2010, (4): 107–121.]
- [46] 陆敏, 徐好, 陈福兴. “双碳”背景下碳排放交易机制的减污降碳效应[J]. *中国人口·资源与环境*, 2022, 32(11): 121–133. [Lu M, Xu H, Chen F X. Pollution and carbon reduction effects of the carbon emission trading mechanism in the context of the “dual carbon” goals[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2022, 32(11): 121–133.]
- [47] 白梓函, 吕连宏, 赵明轩, 等. 中国对外直接投资的减污降碳效应及其实现机制[J]. *环境科学*, 2022, 43(10): 4408–4418. [Bai Z H, Lv L H, Zhao M X, et al. Pollution and carbon reduction effect of OFDI in China and its mechanism[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(10): 4408–4418.]
- [48] 徐盈之, 杨英超, 郭进. 环境规制对碳减排的作用路径及效应: 基于中国省级数据的实证分析[J]. *科学学与科学技术管理*, 2015, 36(10): 135–146. [Xu Y Z, Yang Y C, Guo J. The paths and effects of environmental regulation on China's carbon emission: An empirical study based on Chinese provincial data[J]. *Science of Science and Management of S.&T.*, 2015, 36(10): 135–146.]
- [49] 齐绍洲, 李杨. 能源转型下可再生能源消费对经济增长的门槛效应[J]. *中国人口·资源与环境*, 2018, 28(2): 19–27. [Qi S Z, Li Y. Threshold effects of renewable energy consumption on economic growth under energy transformation[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2018, 28(2): 19–27.]

Threshold effect of digital technology on the synergy of carbon reduction and pollution reduction

HAN Dongri^{1,2}, LV Xiaoli¹, DONG Huizhong¹, WANG Hongyu¹

(1. School of Management, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China; 2. Yellow River Basin Data Intelligence and Low-Carbon Governance Collaborative Innovation Center, Zibo 255000, China)

Abstract: [Objective] During the concurrent development of the “dual carbon” goals and the digital economy, relying on digital power to promote environmental governance has become an important research focus. Exploring the impact of digital technology on the synergy of carbon reduction and pollution reduction and its mechanism have great significance. [Methods] Based on provincial-level panel data from 2011 to 2020 in China, this article uses benchmark regression models to explore the direct impact of digital technology on the synergy of carbon reduction and pollution reduction. By constructing threshold regression models, the nonlinear effects of digital technology on the synergy of carbon reduction and pollution reduction across the country, as well as in the eastern, central, and western regions, with industrial structure upgrading, energy utilization efficiency, production process innovation, and environmental regulation as constraint variables, were explored. [Results] (1) In the whole country, as well as in the eastern, central, and western regions, digital technology has a positive direct impact on the synergy of carbon reduction and pollution reduction, and shows a distribution characteristic of “central>western>eastern”. (2) Digital technology has a significant threshold effect on the synergy of carbon reduction and pollution reduction at the national level. When the industrial structure upgrading is above the threshold, energy utilization efficiency is above the second threshold, production process innovation is between the first and second threshold, and environmental regulation is above the threshold, the driving effect of digital technology is stronger. (3) The threshold effect tests were conducted on the eastern, central, and western regions, and all three regions showed significant nonlinear effects. Among them, except for when the environmental regulation in the western region exceed the threshold, digital technology has a negative nonlinear impact on the synergy of carbon reduction and pollution reduction; When the threshold variables are higher than the threshold, digital technology has a stronger positive effect on the synergy of carbon reduction and pollution reduction. [Conclusion] Digital technology is conducive to promoting the synergy of carbon reduction and pollution reduction and assisting China in promoting ecological civilization construction. Therefore, all regions should incorporate the whole-process governance into the collaborative work of carbon reduction, pollution reduction, and efficiency enhancement, formulate differentiated policies, and form a joint force of “digital + green” development.

Key words: digital technology; carbon reduction and pollution reduction; synergy; industrial structure upgrading; energy utilization efficiency; environmental regulation; threshold regression