

引用格式:郭沛,王光远.数字经济的减污降碳协同作用及机制:基于地级市数据的实证检验[J].资源科学,2023,45(11):2117-2129. [Guo P, Wang G Y. The synergistic effect of digital economy on pollution and carbon reduction and the influence mechanism: An empirical test based on prefecture-level city data[J]. Resources Science, 2023, 45(11): 2117-2129.] DOI: 10.18402/resci.2023.11.02

数字经济的减污降碳协同作用及机制 ——基于地级市数据的实证检验

郭沛,王光远

(山西大学经济与管理学院,太原 030006)

摘要:【目的】数字经济是实现中国新旧动能转换的重要着力点,与经济社会各领域广泛融合和不断发展,赋予中国减污降碳协同效应新的动力机制,在推进“美丽中国”建设“双碳”气候承诺的关键窗口期,研究数字经济发展的减污降碳协同作用是实现绿色和高质量发展背景下的重要命题。【方法】本文基于277个地级及以上城市的面板数据,运用固定效应、中介效应等方法,从多维度检验数字经济的减污降碳协同作用及其中介机制。【结果】研究发现:①数字经济发展显著促进了减污降碳协同效应,采用工具变量法、剔除直辖市等方法进行内生性和稳健性检验后结论仍成立。②选取“宽带中国”战略作为外生政策冲击,以多期DID模型评估数字经济对减污降碳协同效应的影响,回归结果表明“宽带中国”战略对减污降碳协同效应具有显著正向影响。③机制分析发现,提高技术水平、优化产业结构、增强公众环境监督可以促进数字经济的减污降碳协同效应。④区域异质性分析表明,东部地区和非资源型城市数字经济对减污降碳协同效应的影响更显著,而在中西部地区和资源型城市中影响不显著,这主要与区域之间的数字经济发展水平不平衡有关。【结论】应大力发展数字经济,加快新型基础设施建设,从政府、企业和公众多维度加强环保意识和行动,依托各地区资源比较优势,充分释放数字经济的潜能,实现减污降碳协同增效。

关键词:数字经济;减污降碳;协同效应;宽带中国;双重差分模型;异质性

DOI: 10.18402/resci.2023.11.02

1 引言

党的二十大报告指出,“要协同推进降碳、减污、扩绿、增长,推动绿色发展”。与传统发展模式相比,绿色发展更注重环境效益,将环境保护作为可持续发展的重要支柱。当前中国绿色转型的基础相对薄弱,高碳的能源结构和产业结构没有发生根本改变,推进“美丽中国”建设与实现“双碳”气候承诺处于重要的窗口机遇期,面对环境质量改善与温室气体减排的双重压力与迫切需求,协同推进减污降碳是中国推动绿色发展的关键举措。与此同时,中国数字经济呈现出蓬勃发展的态势,《数字中国发展报告(2022)》指出,中国2022年数字经济规

模达到50.2万亿元,在GDP中的占比提升至41.5%。数字经济具有环境友好型的特殊性质,随着数字技术对各领域的不断渗透,其已成为稳增长促转型的重要引擎。数字技术作为一种全新的生产要素,不断与传统产业融合发展^[1,2],改变了传统的生产模式、发展模式和经济增长模式,打造出新产业、新业态。从长远看,将对推动产业结构升级、改变企业生产方式起到至关重要的作用,也为“双碳”目标下实现减污降碳目标迎来新的契机。基于此,数字经济对减污降碳的作用机制如何?不同地区之间是否存在差异性?这些问题的回答对于丰富数字经济理论、为决策者制定政策提供依据具有

收稿日期:2023-06-24 修订日期:2023-10-05

基金项目:教育部人文社会科学研究青年基金项目(20YJC790053);山西省高等学校哲学社会科学研究项目(2021W010)。

作者简介:郭沛,女,山西运城人,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为低碳经济、国际贸易。E-mail: guopei1986@sxu.edu.cn

通讯作者:王光远,男,山西长治人,硕士研究生,研究方向为低碳经济。E-mail: 202121608006@email.sxu.edu.cn

十分重要的意义。

目前对于减污降碳的效果评价,其相关研究可以追溯到 Ayres^[3]提出的伴生效应,即减碳政策同时可以降低其他空气污染物的排放水平。之后学者对美国、英国等国家的二氧化碳与大气污染物协同减排展开研究,得出了较为一致的具有协同作用的结论^[4-6]。从研究领域来看,主要集中在电力、交通、钢铁等行业,通过建立模型定量分析降低二氧化碳与大气污染物排放的协同效益^[7]。从研究方法上来看,学者采用协同控制效应坐标系、污染物减排量交叉弹性分析法、耦合协调度模型等方法来量化减污降碳协同效应^[8-10]。数字经济是以数据资源为关键要素的新经济形态,作为中国新旧动能转换的着力点,其研究成果已较为丰富,与本文相关的研究集中在数字经济的测度方法和环境效应两方面。在测度方法方面,一是采用计算机应用、互联网安装等 ICT 产业的相关数据作为数字化发展的代理指标,但这一方法只能体现数字化发展的部分进程与特征;二是通过构建指标体系测算数字经济水平,该方法从多维度更为全面地测度了数字化技术发展及其应用程度^[11-13]。在环境效应方面,主要集中在对数字行业本身的环境效应分析,更多关注数字化的单一碳排放绩效或者污染排放绩效,未将二氧化碳与其他污染物排放同时纳入分析框架,研究结论也是莫衷一是。一些研究人员认为数字技术的发展可能会增加碳排放,因为它可能需要更多的能源消耗^[14,15];但更多的学者认为,数字技术的发展可以创造新的碳减排途径和改进传统的污染物减排措施^[16-19]。

通过对现有文献的梳理可知,当前有关数字经济的环境效应和减污降碳协同效应的研究已有了较为丰富的成果,但仍存在如下不足:①由于数字行业分类、数据可获得性以及测算原理的不同,对数字化的测算结果存在差异性,影响研究结论的科学性;②现有文献大多仅关注数字经济对减污或降碳的单一影响机制,较少系统地探讨数字经济对减污降碳协同效应的影响。而大气污染物与温室气体具有高度同根、同源、同过程的特性,化石燃料的燃烧、交通货运、居民生活等是大气污染物与温室气体的主要来源,因此减污和降碳这两项工作可以协同推进。本文在对 2011—2019 年中国 277 个地

级及以上城市的数字经济和减污降碳协同程度测度的基础上,实证检验数字经济的减污降碳协同作用,在分析其影响及作用机制的基础上,进一步根据不同地区的要素禀赋展开区域之间的异质性分析。基于已有文献的不足,本文的贡献如下:①目前研究成果多从数字经济对减污或降碳的单一影响进行分析,本文将数字经济与减污降碳协同效应纳入同一框架;②参考“十四五”数字经济发展规划,构建了包含数字产业化、产业数字化以及数字服务与治理 3 个维度的指标体系,较为科学地对地级市的数字经济水平进行了测度;③从技术进步、产业升级、公众环境监督 3 个视角探索了数字经济对减污降碳协同效应的影响机制,为数字经济充分发挥作用提供了理论依据。

2 理论假设

2.1 数字经济影响减污降碳协同效应的原理

数字技术以其高成长性成为推动经济发展的重要动力,通过与传统产业深度融合,推动经济高质量发展,对减污降碳协同效应有显著的促进作用^[20]。①从政府角度来看,数字经济有助于提高政府治理效率,加强政府监测的准确性和时效性^[21,22],消除中央政府与地方政府之间的信息差,抑制地方政府与企业合谋^[23]。②从企业角度来看,数字技术在企业研发、生产、销售等环节的广泛应用,提高了生产与管理效率^[24],同时数字经济的便捷性、高渗透性,可以打破市场边界,提高信息交互的效率,促进新技术的开发与利用,加快能源转型^[25]。③从居民角度来看,互联网购物、线上会议等数字平台的诞生,在提升居民生活质量的同时减少居民在生产生活中资源消耗量,同时以微信、支付宝为代表的移动支付引领了消费形态的转变,促使居民绿色低碳消费^[26,27]。综上,本文提出以下假设:

假设 1:数字经济能够促进减污降碳协同效应。

2.2 “宽带中国”战略影响减污降碳协同效应的原理

宽带网络是中国经济社会发展的战略性基础设施,是经济社会信息传播的载体。近年来中国网络基础设施建设取得巨大突破,但仍存在区域间发展不平衡、发展环境不完善等问题。“宽带中国”战略提高了网络基础设施水平,为数字经济的发展提供了良好的外部条件。首先,“宽带中国”战略提高了城市信息化水平,借助数字平台加强信息

2023年11月

交流与成果分享,赋能实体经济数字化转型;其次,“宽带中国”战略打破了信息传播的时空界限,便于创新主体在不同区域、不同时间进行信息技术交流,为技术水平提升奠定基础^[28];最后,“宽带中国”战略有利于提高政府管理水平,降低公众监督门槛,拓宽公众监督渠道,提高减污降碳协同效应。

假设2:“宽带中国”战略可以促进减污降碳协同效应。

2.3 数字经济影响减污降碳协同效应的机制

(1) 技术进步

技术进步是降低环境污染的重要途径。首先,知识积累是技术创新的核心因素,数字技术的发展加速信息流动,促使企业更为迅速的掌握新兴知识与技能,使技术创新呈现出频率快、影响大和覆盖范围广的特点,降低创新成本。其次,企业依托大数据以市场需求为导向,可以有效避免因信息不对称所导致的部分新技术、产品难以满足市场需求而搁置的问题,促进资源的合理配置,提高创新效率。最后,企业的创新绩效受制于融资约束状况^[29],信息不对称使金融机构持稳健的投资态度,而数字普惠金融可以减少信息的不确定性,降低融资门槛。同时数字经济发展加大企业对高端人才的用工需求,吸引高质量人才涌入,优化人力资本结构^[30],促进技术创新水平的提升。综上,本文提出以下假设:

假设3:数字经济通过降低技术进步成本、提升技术创新效率和充分利用人力资本要素来促进技术进步,进而发挥技术进步在碳污同源治理上的作用,实现减污降碳协同效应。

(2) 产业结构

数字经济可以驱动产业结构向中高端迈进^[31],产业结构升级可以有效减少企业对化石能源的需求,从而引导能源消费向清洁能源转变,降低能源消耗强度和污染排放,提高减污降碳协同效应。一方面,数字产业化通过互联网、云计算等技术的开发与利用形成新产业、新模式,企业可以通过互联网直接获取消费者的诉求,满足消费者的个性化、多样化需求,优化资源配置,增效提能,引领产业变革。另一方面,产业数字化通过数字技术从生产端到消费端、行业内到行业间对传统产业进行全方位的提升,打破市场边界,提高各要素部门之间的协同性,解决企业内部公平与效率无法兼顾的难题,推动传统制造业向知识密集型产业转变,提高传统

产业的市场竞争力,促进产业结构升级^[32]。综上,本文提出以下假设:

假设4:数字经济通过数字产业化和产业数字化优化产业结构,进而促进产业低碳化和清洁化,实现减污降碳协同效应。

(3) 公众环境监督

公众是环境治理体系中的关键一环。首先,数字技术的发展促进了社会信息流动,有利于公众环境关注度的提高,加速社会环保意识的形成,倒逼政府加大环境规制力度、企业加大绿色技术投资。其次,在投资过程中,为迎合公众环境偏好,投资者更倾向于加大对环境友好型企业的投资力度,缓解绿色企业融资困难,促进企业创新,提高减污降碳协同效应。公众对减污降碳协同的直接推动作用有限,但随着政府大力引导公众积极参与环境治理,以及以“蚂蚁森林”为代表的数字金融产品拓宽了公众参与环境治理的渠道,公众环境关注度开始转变为实际的环保行动^[23]。数字技术的开放、便捷及共享性,能够加速信息流动,降低公众参与环境治理的门槛和成本,提高公众参与环境治理的热情。综上,本文提出以下假设:

假设5:数字经济可以通过降低监督门槛和成本来促进公众环境监督,进而提升减污降碳协同效应。

3 模型设定、变量说明和数据来源

3.1 模型设定

3.1.1 基准计量模型

为检验数字经济发展是否促进了减污降碳协同效应,本文采用双向固定效应模型。实证模型设立如下:

$$Se_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 Dige_{it} + \alpha_2 Controls_{it} + \mu_i + \nu_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

式中: Se_{it} 表示城市 i 在 t 时期的减污降碳协同效率; $Dige_{it}$ 表示城市 i 在 t 时期的数字经济发展水平; $Controls_{it}$ 表示一系列控制变量,包括经济发展水平($\ln pgdp$)、环境规制强度($Envir$)、人口密度($\ln pd$)、外商投资水平(Fdi)以及人力资本($Hucap$); α_0 、 α_1 、 α_2 表示待估计参数; μ_i 表示模型中的城市固定效应; ν_t 表示模型中的时间固定效应; ε_{it} 表示随机扰动项。

3.1.2 中介模型

基于理论分析,本文从技术进步、产业结构、公

众环境监督3个方面,借鉴温忠麟等^[33]对于中介效应检验方法的研究,对于数字经济影响减污降碳协同效应的机制进行实证检验。构建如下中介模型:

$$M_{it} = \beta_0 + \beta_1 Dige_{it} + \beta_2 Controls_{it} + \mu_i + v_t + \varepsilon_{it} \quad (2)$$
$$Se_{it} = \alpha_3 + \alpha_4 Dige_{it} + \alpha_5 M_{it} + \alpha_6 Controls_{it} + \mu_i + v_t + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

式(2)为数字经济对中介变量的影响,式(3)为数字经济和中介变量对减污降碳协同效应的共同影响。 M 表示中介变量,即技术进步(Inn)、产业结构(Ind)、公众环境监督($Bdidx$); β_0 、 β_1 、 β_2 、 α_3 、 α_4 、 α_5 、 α_6 表示待估计参数。如果 β_1 、 α_4 、 α_5 显著,则表示数字经济通过中介变量对减污降碳协同效应产生影响。

3.1.3 多期双重差分模型

数字经济的发展水平会受到基础设施完善程度、市场成熟程度等的影响,这些因素也深刻地影响减污降碳的协同效应。“宽带中国”战略作为提升网络基础设施的支撑,为研究数字经济的减污降碳协同效应提供了一项良好的准自然实验。由于本文研究对象所限,共选取其中105个“宽带中国”城市试点进行检验。为检验“宽带中国”战略对减污降碳协同效应的影响,构建如下多期双重差分模型:

$$Se_{it} = \alpha_7 + \alpha_8 Bic_{it} + \alpha_9 Controls_{it} + \mu_i + v_t + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

式中: Bic 表示多期双重差分模型中的核心解释变量,指代城市当年是否入选“宽带中国”试点; α_7 、 α_8 、 α_9 表示待估计参数。

3.2 变量说明

3.2.1 被解释变量

减污降碳协同效率衡量了二氧化碳排放降低和大气污染物减少的协同水平(表1)。本文选取数据包络法(DEA)对减污降碳协同效率进行测算,参照Tone^[34]的研究,选择纳入非期望产出的Super-SBM模型。借鉴Yang等^[35]的做法来构建碳排放协同效率的投入产出评价体系,选择资本、劳动力和能源作为投入指标,分别用资本存量、城镇就业人数和能源消费量来表示;GDP选为期望产出指标;二氧化碳排放量、PM2.5的浓度选为非期望产出的指标。PM2.5浓度是影响中国空气质量最重要的因素,也是“十四五”时期大气污染防治的首要指标,因此选取PM2.5的浓度作为非期望产出指标。各变量具体见表2。

3.2.2 核心解释变量

对数字经济发展水平进行测度(表3),有助于客观、多维度挖掘数字经济发展过程的不足。现有文献主要通过两种方法衡量城市数字经济发展水平^[37-39]:一是直接采用由腾讯研究院等发布的数字经济指数,但此类指数时间跨度相对较短,且不同智库发布指数的衡量标准不同,无法进行比较,不满足本文研究需要;二是通过构建指标体系来测算数字经济发展水平。考虑到研究数据的可获得性,本文参考“十四五”数字经济发展规划,同时借鉴黄群慧等^[40]的做法,构建了包含数字产业化、产业数字化以及数字服务与治理3个维度的指标体系,通过熵权法计算数字经济水平得分。其中,由于缺乏地

表1 变量的描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of variables

变量名称	变量符号	样本量	均值	标准差	最小值	最大值
减污降碳协同效率	<i>Se</i>	2493	0.352	0.160	0.101	1.089
数字经济水平	<i>Dige</i>	2493	0.225	0.065	0.071	0.684
公众环境监督	<i>Bdidx</i>	2493	24.042	26.151	0.959	124.759
技术进步	<i>Inn</i>	2493	11.091	25.927	0.008	308.136
产业结构	<i>Ind</i>	2493	0.450	0.142	0.045	0.994
地区经济发展水平	<i>lnpgdp</i>	2493	10.708	0.570	8.842	13.056
环境规制	<i>Envir</i>	2493	0.797	0.224	0.116	1.000
外商投资水平	<i>Fdi</i>	2493	0.170	0.017	0.000	0.200
人口密度	<i>lnpd</i>	2493	6.591	0.968	0.693	7.622
人力资本	<i>Hucap</i>	2493	0.019	0.025	0.000	0.172

2023年11月

表2 城市碳污排放协同效率测度指标体系

Table 2 Indicator system for measuring synergistic efficiency of urban pollution reduction and carbon reduction

一级指标	二级指标	具体变量说明
投入	资本	资本投入用资本存量表示,采用永续盘存法计算得到,公式为: $K_{it} = K_{it-1}(1 - \delta_{it}) + I_{it}$,式中: K_{it} 表示城市 i 在 t 年的资本存量,单位为万元; δ_{it} 表示城市 i 在 t 年的资本折旧率; I_{it} 表示城市 i 在 t 年的新增资本投入,单位为万元
	劳动力	劳动力投入用城镇就业人数表示,单位为万人
	能源	能源投入用城市能源消耗量表示,为统一能源单位,将各种能源(包括天然气、液化石油气等)的消耗量折算为标准煤,加总得到各个城市的能源消耗量,单位为万 t 标准煤
产出	期望产出	期望产出用地区生产总值表示,单位为万元
	非期望产出	非期望产出包括二氧化碳排放和其他大气污染物排放,其中二氧化碳排放量参照吴建新等 ^[36] 的研究,通过各种能源(天然气、液化石油气等)消耗量及其碳排放系数折算出各能源的碳排放量,加总得到各个城市的二氧化碳排放总量,单位为百万 t;其他大气污染物排放用 PM2.5 浓度表示,单位为 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

表3 数字经济发展水平评价指标体系

Table 3 Evaluation indicator system of digital economy development level

一级指标	二级指标	三级指标	指标属性
数字经济发展水平	数字产业化	电信业务收入/万元,取对数	+
		计算机服务业和软件业人员占城镇单位从业人员的比重/%	+
		每百人互联网宽带接入用户数/(户/百人)	+
		每百人互联网用户数/(户/百人)	+
		5G 专利授权数/件	+
		每百人移动电话用户数/(户/百人)	+
	产业数字化	工业互联网专利授权数/件	+
		电子商务交易额/万元,取对数	+
		电子商务专利授权数/件	+
	数字服务与治理	数字金融普惠指数	+
		科技支出占政府财政支出的比重/%	+
		政策文件中数字经济政策相关词语出现频数	+

级市电子商务交易额的相关数据,借鉴黄贇琳等^[41]的做法,利用各城市快递业务量乘以相应权重来表征,权重为全国电子商务交易额/全国快递业务量,由此得到各城市的电子商务交易额。

3.2.3 其他变量

本文参考吴力波^[23]、李青原等^[42]、邵帅等^[43]的做法,引入如下机制变量:技术进步(*Inn*)选用每万人城市专利授权数量作为代理变量;产业结构(*Ind*)选用第二产业增加值占地区生产总值的比重作为代理变量;公众环境监督(*Bdidx*)以“环境污染”为关键词,网民使用百度引擎搜索“环境污染”指数作为代理变量。

影响二氧化碳与大气污染物排放的因素较多,

为了减少遗漏变量导致的估计偏差,更准确地评估数字经济对减污降碳协同效应的影响,本文借鉴已有研究引入相关变量^[44-46],选取如下指标作为控制变量:经济发展水平(*lnpgdp*)为人均地区生产总值的对数;环境规制强度(*Envir*)选取各城市一般工业固体废物综合利用率来度量;人口密度(*lnpd*)为单位面积人口数的对数;外商投资水平(*Fdi*)用各地级市按各年人民币汇率折算的实际利用外商投资额与 GDP 的比值表示;人力资本(*Hucap*)以城市普通高等学校人数占总人口的比重来刻画。

3.3 数据来源和描述性统计

本文选取中国 277 个地级市的面板数据作为研究对象,部分城市由于数据缺失严重而剔除。在时间跨度的选择上,由于数字经济水平测度的相关指标更新至 2019 年,考虑到整体数据的完整性和充分性,本文最终选取 2011—2019 年的面板数据进行研究。PM2.5 的数据来自达尔豪斯大学大气成分分析组;数字经济水平指标中的数字普惠金融指数来自《北京大学数字普惠金融指数》,5G 专利授权数、工业互联网专利授权数、电子商务专利授权数来自企研数据库,数字经济政策词频来自中国研究数据服务平台 CNRDS 数据库;其余数据均来自《中国城市统计年鉴》,部分缺失值采用插值法补齐。

4 结果与分析

4.1 基准回归结果

表 4 报告了数字经济对减污降碳协同效应的估计结果。列(1)、(2)的核心解释变量系数均显著为正,这表明数字经济的发展促进了减污降碳协同效率的提高,该实证结果初步验证了假设 1。

此外,表 4 列(2)中经济发展水平(*lnpgdp*)的

表4 基准回归结果

Table 4 Benchmark regression results

变量	(1)	(2)
<i>Dige</i>	0.697***(0.228)	0.592***(0.226)
<i>lnpgdp</i>		0.112***(0.223)
<i>Envir</i>		0.047**(0.023)
<i>Fdi</i>		-0.381*** (0.199)
<i>lnpd</i>		-0.002(0.004)
<i>Hucap</i>		-1.558(1.061)
<i>_cons</i>	0.258*** (0.040)	-0.883*** (0.232)
<i>N</i>	2493	2493
<i>R²</i>	0.070	0.111
<i>City</i>	是	是
<i>Year</i>	是	是

注:表中括号内为稳健标准误,*、**、***分别表示回归结果在10%、5%、1%的水平下显著。下同。

系数在1%的水平上显著为正,表明各地区注重经济高质量发展,较高的经济发展水平为城市低碳升级提供了良好的外部条件;环境规制强度(*Envir*)的系数在5%的水平上显著为正,地区环境规制强度较高时,企业的污染成本增加,倒逼企业转型升级,推动地区协调绿色发展,促进减污降碳协同效率的提高;外商投资水平(*Fdi*)的系数在10%的水平上显著为负,引进外商投资的同时国外“高污染、高耗能、高排放”产业向投资所在地转移,导致当地污染水平上升,即符合“污染天堂”假说。

4.2 稳健性检验

4.2.1 剔除直辖市、剔除极端值的影响、对解释变量滞后一期处理

为了确保基准回归结果的稳健性和有效性,本

文分别采用剔除直辖市、剔除极端值等方法进行稳健性检验。①考虑到直辖市在经济规模、行政级别等方面与其他地级市存在较大的差异,因此将直辖市剔除之后重新估计式(1),检验结论是否依然成立,回归结果见表5列(1)。②考虑到极端值和异常值可能会对回归结果产生影响,剔除数字经济和减污降碳协同效率上下1%的数据进行回归,回归结果见表5列(2)。③考虑到数字经济的发展对地区减污降碳效应的影响需要一定的时间,因此对解释变量进行滞后一期处理,回归结果见表5列(3)。上述结果表明,数字经济的系数分别在5%及1%的水平上显著,数字经济的发展可以促进减污降碳协同效应,验证了基准回归的可靠性。

4.2.2 工具变量

为了进一步检验结果的稳健性,使用工具变量法来解决内生性问题。本文借鉴黄群慧等^[47]的做法,选取1984年地级市层面每百人电话数量作为工具变量。由于所选取的工具变量为截面数据,因此参考赵涛等^[11]的处理办法,将工具变量与前一年全国信息技术服务收入做交互项,构建面板数据工具变量。表5列(4)汇报了基于工具变量的稳健性检验结果,核心解释变量数字经济的系数在1%的水平下显著为正。2SLS第一阶段中*F*值为27.754,大于Stock-Yogo检验10%水平上的临界值,排除弱工具变量问题,在排除可能存在的内生性问题后,结果仍然支持数字经济对减污降碳协同有显著促进作用的结论。

表5 稳健性检验结果

Table 5 Robustness test results

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	剔除直辖市	剔除极端值	解释变量滞后一期	2SLS
<i>Dige</i>	0.462**(0.226)	0.516**(0.221)	0.647*** (0.211)	1.964*** (0.589)
<i>lnpgdp</i>	0.114*** (0.023)	0.112*** (0.023)	0.112*** (0.022)	0.098*** (0.015)
<i>Envir</i>	0.048** (0.228)	0.047** (0.223)	0.039* (0.203)	-0.004 (0.013)
<i>Fdi</i>	-0.370* (0.206)	-0.371* (0.195)	-0.408** (0.204)	-0.342** (0.154)
<i>lnpd</i>	-0.001 (0.004)	-0.002 (0.004)	-0.001 (0.004)	-0.002 (0.003)
<i>Hucap</i>	-1.481 (1.072)	-1.558 (1.055)	-1.620 (1.211)	-2.281*** (0.577)
<i>_cons</i>	-0.884*** (0.236)	-0.663*** (0.232)	-0.895*** (0.232)	-1.414*** (0.226)
<i>N</i>	2457	2493	2493	2493
<i>R²</i>	0.112	0.107	0.115	0.798
<i>City</i>	是	是	是	是
<i>Year</i>	是	是	是	是

2023年11月

4.3 外生政策冲击

4.3.1 政策背景

为推动中国网络基础设施发展,国务院于2013年印发《“宽带中国”战略及实施方案》(以下简称《实施方案》),将“宽带中国”正式上升为国家战略。为落实《实施方案》,加快提升城市宽带发展水平,工业和信息化部、发改委联合印发《创建“宽带中国”示范城市(城市群)工作管理办法》,采取自下而上的“申报+遴选”模式,于2014年、2015年、2016年分3批确定120个示范城市(群)。示范城市(群)要求具有良好的宽带发展基础,结合本地实际情况编制“宽带中国”示范城市(群)创建方案。具体的措施有:加强组织领导,务实推进战略贯彻实施;完善相关法律法规,健全监管体系,营造安全可靠的网络环境;加大财政资金支持、税收优惠扶持,支持宽带网络建设;加大高层次人才引进和培养,在实践中聚集和培养人才。

4.3.2 平行趋势检验

使用DID的前提条件是通过平行趋势检验,即评估两变量数据之间是否会存在某种同幅度增减情况的相关关系检验方法。为满足这一条件,本文取第1期为基期,对试点前4期和后5期进行双重差分估计,图1绘制了95%置信区间下虚拟变量(*Bic*)的估计结果。从图中可以看出,在政策实施前,试点城市和非试点城市的95%的置信区间包含0,即不显著,满足平行趋势假定。政策实施当年以及政策实施后系数显著为正,这表明政策实施后政策效应显著提高了减污降碳协同水平,充分证明了“宽带中国”试点政策的有效性。

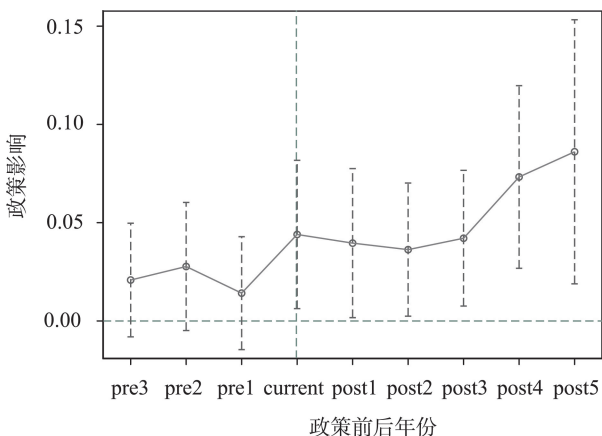


图1 平行趋势检验结果

Figure 1 Parallel trend test results

4.3.3 基准回归结果

表6列出了“宽带中国”试点政策对减污降碳协同效应的回归结果。表6列(1)、(2)核心解释变量的系数显著为正,试点政策的实施促进了减污降碳协同效应的提高,说明前文的实证结果保持稳健性,结果验证了假设2。

4.3.4 稳健性检验

(1)安慰剂检验

关于双重差分法的一个担忧是,固定效应可以控制无法观测的不随时间改变的因素,但是随时间变化的变量是否会对减污降碳协同效应的提高产生影响是无法确定的,因此我们可以通过间接的安慰剂检验来缓解这个担忧。为此,本文采用一个间接性的安慰剂检验:从所有城市中随机抽取105个城市产生一个实验组,其余城市为控制组,随机为这个实验组选取一个年份作为政策时点,从而产生一个错误的系数估计值。为避免小概率事件的发生,该过程重复1000次,以此检验减污降碳协同水平是否受到“宽带中国”试点政策以外的因素干扰。如图2所示,实验组的回归系数分布在0左右且近似于正态分布,且真实系数(0.029)距离这些系数较远,进一步验证了研究结论的稳健性,无不可观测因素的干扰。

4.4 影响机制分析

基准回归结果证实了数字经济的发展对减污降碳协同效应具有正向影响,本文基于前文理论假设,对数字经济促进减污降碳协同效应的传导机制进行拓展研究。采用逐步检验法验证中介效应是否存在,引入中介变量技术进步(*Inn*)、产业结构

表6 外生政策冲击基本回归结果

Table 6 Basic regression results of exogenous policy shocks

变量	(1)	(2)
<i>Dige</i>	0.024*(0.012)	0.029**(0.012)
<i>lnpgdp</i>		0.123*** (0.027)
<i>Envir</i>		0.049** (0.023)
<i>Fdi</i>		-0.377* (0.197)
<i>lnpd</i>		-0.001 (0.004)
<i>Hucap</i>		-1.713 (1.071)
<i>_cons</i>	0.375*** (0.006)	-0.889*** (0.236)
<i>N</i>	2493	2493
<i>R²</i>	0.058	0.106
<i>City</i>	是	是
<i>Year</i>	是	是

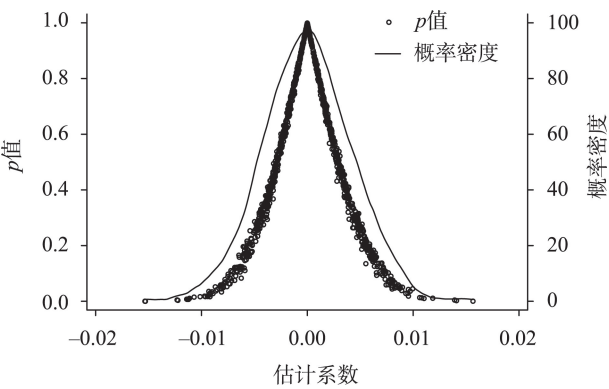


图2 安慰剂检验

Figure 2 Placebo test

(*Ind*)、公众环境监督(*Bdidx*),对作用机制进行深入的探讨。由于逐步检验法对中介效应的检验力较低,学者们为了提高中介效应的检验力,采用具有较高统计效力的Bootstrap方法直接检验系数交乘项。因此本文采用同样的方法,在表7中报告了数字经济影响减污降碳协同效应作用机制的回归结果和Bootstrap检验(500次抽样)的结果。

首先考察技术水平(*Inn*)作为机制变量对减污降碳协同效应的影响。从表7列(1)可以看出数字经济的估计系数显著为正,表明数字经济可以提高技术创新水平。数字经济的知识溢出效应,增强了企业获取信息的能力,带动企业探寻和运用新方法进行污染治理,提高了技术创新水平^[48]。将数字经济发展水平与技术进步同时纳入回归模型,表7列

(2)中二者的回归系数仍显著为正,技术水平的提升与碳污减排有着紧密的联系,数字经济本身就是一种创新,其发展有利于中国技术创新水平的提升,从而促进减污降碳协同效应提升,该实证结果验证了假设3。

然后以产业结构(*Ind*)作为机制变量对数字经济的减污降碳协同效应进行检验。结果表明,表7列(3)数字经济的估计系数在1%的水平上显著为负,一方面,随着数字技术的广泛应用,人工智能等新兴产业应运而生,有效推动了产业结构向高端攀升;另一方面,数字技术的融入还会推动产业链的前向、后向延伸,提升产业附加值。Meng等^[49]的研究发现,数字技术在工业领域的广泛应用促使工业企业运营效率显著提高,推动新产业的形成与发展,促使产业结构向智能化、绿色化方向转变,本文结果与上述研究呼应。表7列(4)中将数字经济和产业结构同时纳入回归模型中,数字经济的回归系数显著为正,说明产业结构的中介效应存在,即数字经济通过推动产业结构升级进而促进减污降碳协同效应的提高,产业结构升级提高资源利用效率,促进以高技术为核心的技术密集型产业发展,降低单位产品能耗,该实证结果验证了假设4。

再以公众环境监督(*Bdidx*)作为机制变量对数字经济的减污降碳协同效应进行检验。结果表明,表7列(5)数字经济的估计系数显著为正,数字经济的发展对公众环境监督起到了促进的作用。以数

表7 数字经济影响减污降碳协同效应作用机制的检验结果

Table 7 Test results of the mechanism of impact of the digital economy on the synergistic effect of pollution reduction and carbon reduction

变量	驱动技术升级路径		加速产业结构升级路径		促进公众环境监督路径	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
<i>Dige</i>	128.065*** (25.986)	0.417** (0.210)	-0.315*** (0.094)	0.558** (0.222)	85.096*** (22.506)	0.482** (0.215)
<i>Inn</i>		0.001** (0.001)				
<i>Ind</i>				-0.107** (0.053)		
<i>Bdidx</i>						0.001*** (0.001)
<i>_cons</i>	7.441 (23.004)	-0.893*** (0.281)	-0.515 (0.118)	-0.938*** (0.234)	-30.237* (16.108)	-0.843*** (0.226)
Bootstrap 检验	0.175*** 间接效应成立		0.034** 间接效应成立		0.110*** 间接效应成立	
置信区间	[0.061, 0.289]		[0.005, 0.062]		[0.051, 0.170]	
<i>R</i> ²	0.211	0.127	0.339	0.114	0.260	0.122
<i>controls</i>	是	是	是	是	是	是
<i>City</i>	是	是	是	是	是	是
<i>Year</i>	是	是	是	是	是	是
<i>N</i>	2493	2493	2493	2493	2493	2493
<i>R</i> ²	0.211	0.127	0.339	0.114	0.260	0.122

2023年11月

字技术为依托的互联网平台使网络信息的可获得性增强,企业污染信息透明化,高便利和高效率性使公众更大范围的参与到环境治理中^[17]。表7列(6)将数字经济和公众环境监督同时纳入回归模型,数字经济和公众环境监督的系数显著为正。随着公众环境关注度的提高,增加了市场对于环保产品的需求,企业的环保产品可以更好地赢得消费者的支持,倒逼企业绿色转型。同时,公众环保诉求不断提高,促使政府加大环保投资力度,从而促进碳污协同减排。该检验结果与吴力波等^[23]提出的公众环境关注度可以抑制地方政府与企业合谋,推动地方政府提高环保投资,提升环境质量结论一致,该实证结果验证了假设5。

4.5 区域异质性分析

数字经济作为一种以数据资源为关键要素的新经济形态,由于区位和资源禀赋的不同,在不同地区存在着一定的发展差距^[50]。因此,数字经济对减污降碳的协同效应也可能存在一定的异质性,有必要对此进行深入讨论。为此,本文参照任晓松等^[17]的做法,基于地理区位将277个城市样本划分为东部和中西部,根据《全国资源型城市可持续发展规划(2013—2020)》划分为111个资源型城市 and 166个非资源型城市,利用双向固定效应模型就数字经济对减污降碳协同效应的区域异质性进行实证分析。回归结果如表8所示。

(1)东、中西部异质性。回归结果表明,数字经济可以促进东部地区减污降碳协同效应的提高,但对中西部地区作用不明显。这一结果产生的原因在于,东部地区因其地理优势,经济较为发达,而中国城市数字经济发展水平与经济水平关联性较

强。东部地区数字技术发展较快,在各领域内广泛应用,充分释放了数字经济的红利。同时经济发展的不平衡促使东部地区不断吸引人才、资本等资源,在这种情况下东部地区更倾向于发展高附加值的第三产业,减少二氧化碳和污染物排放。中西部地区数字资源相对匮乏,同时接收大量从东部地区转移出的高污染产业,从而导致数字经济对中西部地区的影响不显著。

(2)城市类型异质性。回归结果表明数字经济发展可以促进非资源型城市减污降碳协同效应的提高,但对资源型城市影响不显著。原因是资源型城市因其资源禀赋易产生资源依赖和发展路径依赖,产业结构单一,转型较为困难。同时投资结构不合理,对于新技术的接纳性较差,导致数字经济发展水平与传统产业融合度较低,无法充分释放数字经济的红利。而非资源型城市产业结构、能源结构较为合理,为数字经济的发展提供了大量的资金、人才等要素,推动城市技术进步和产业结构升级,促进减污降碳协同效应。

5 结论与政策建议

5.1 结论

协同推进减污降碳是中国推动绿色发展的重要举措,本文基于2011—2019年的中国城市层面数据,测算了数字经济发展水平得分与减污降碳协同效率,并在此基础上运用面板固定效应模型、中介效应模型,深入考察数字经济的减污降碳协同效应及传导机制。本文主要结论如下:

(1)数字经济的发展显著促进减污降碳协同效应的提升,有力支撑了“美丽中国”建设与“双碳”行动,采用工具变量法、剔除极端值、选取“宽带中国”战略作为外生政策冲击等方法进行内生性和稳健性检验后,结论依旧成立。

(2)机制分析表明,数字经济通过优化产业结构减缓资源损耗和能源消费、提升技术创新水平改善能耗结构、提高公众环境监督加大公众对企业污染排放的规制效应这3条路径降低二氧化碳和大气污染物排放,进而促进减污降碳协同效应。

(3)从城市的地理区位、资源禀赋视角进行考察,发现数字经济对减污降碳的协同效应存在异质性。从地理区位来看,东部地区数字经济的发展显著促进减污降碳协同效应的提高,而这一作用在中

表8 区域异质性检验

Table 8 Regional heterogeneity test

变量	(1) 东部	(2) 中西部	(3) 资源型城市	(4) 非资源型城市
<i>Dige</i>	0.929*** (0.304)	0.282 (0.293)	-0.272 (0.330)	0.930*** (0.262)
<i>_cons</i>	-0.542** (0.262)	-1.172*** (0.313)	-1.589*** (0.316)	-0.237 (0.265)
<i>N</i>	900	1593	999	1494
<i>R²</i>	0.135	0.140	0.232	0.090
<i>controls</i>	是	是	是	是
<i>City</i>	是	是	是	是
<i>Year</i>	是	是	是	是

西部地区不明显。从资源禀赋视角看,数字经济显著促进了非资源型城市的减污降碳协同效应,对资源型城市不明显。

5.2 政策建议

除了丰富有关数字经济对减污降碳协同效应影响因素的研究,本文还提供如下政策建议:

(1)作为中国新旧动能转换的重要着力点,数字经济在提高城市减污降碳协同效应方面具有重要的推动作用。因此,应继续大力发展数字经济,通过加大5G网络覆盖,推进千兆光纤网络升级,建设人工智能公共算力中心等多举措推动数字经济基础设施建设。在加大数字基础设施建设过程中注重节约化、集约化发展,因地制宜,充分考虑当地发展实际和资源禀赋,避免重复建设和产能相对过剩而造成资源浪费。同时,地方政府要强化数字技术在能源、交通、生活等各个领域的广泛应用,优化产业结构,减少能源消耗与污染排放,为提高减污降碳协同效应提供新动能。

(2)考虑到数字经济可以通过产业结构、技术创新、公众环境监督等渠道对减污降碳协同效应产生影响。因此,首先要充分发挥数字技术在产业结构转型过程中的作用,运用数字技术打破时空限制,将企业生产的各环节链接起来,提高传统要素利用效率,降低生产成本和污染排放。其次,发挥数字普惠金融的优势,降低企业融资门槛,为小微企业提供个性化、多样化金融服务,以金融支持激励企业开展技术创新活动。加大对数字经济领域人才的培养力度,健全数字技能职业培训体系,推动技术创新。最后,重视公众对环境的满意度,运用大数据等智能化方式推进环境信息公开,优化公众参与环境治理的途径,将公众环境关注度的提高转变为公众环境参与度的提高,发挥其对企业和地方政府的非强制性监督、约束作用。

(3)结合区域异质性的检验结果,数字经济发展应依托各地区资源比较优势,因地制宜,充分释放数字经济潜能,实现数字经济对减污降碳协同的促进作用。首先,东部地区由于其区位优势,数字经济基础设施建设较为完善,应利用其资金优势、人才优势,培育壮大高精尖企业,重点突破5G设备新品等技术难关。支持扩展应用场景,以需求为导向优化产品与服务,促进产业智能化升级。其次,

加大对欠发达地区的基础设施建设投入力度,利用其资源禀赋、市场潜力,推动数字经济与特色产业融合。完善本地数字产业生态,消除数字鸿沟,加快东数西算工程建设,推动数据中心合理布局。最后,优化资源型城市人力资本结构,拓宽高素质人才引进渠道,加大数字经济领域人才培养力度。实行严格的环境保护政策,倒逼企业转型升级,实现减污降碳协同增效。

参考文献(References):

- [1] 李健, 张金林, 董小凡. 数字经济如何影响企业创新能力? 内在机制与经验证据[J]. 经济管理, 2022, 44(8): 5-22. [Li J, Zhang J L, Dong X F. How digital economy affects innovation ability? Internal mechanism and empirical evidence[J]. Business and Management Journal, 2022, 44(8): 5-22.]
- [2] 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.]
- [3] Ayres R U, Walter J. The greenhouse effect: Damages, costs and abatement[J]. Environmental and Resource Economics, 1991, 1(3): 237-70.
- [4] Burtraw D, Krupnick A, Palmer K, et al. Ancillary benefits of reduced air pollution in the US from moderate greenhouse gas mitigation policies in the electricity sector[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2003, 45(3): 650-673.
- [5] Williams M L. UK air quality in 2050: Synergies with climate change policies[J]. Environmental Science & Policy, 2007, 10(2): 169-175.
- [6] 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 pollution reduction and carbon emission reduction in China and influencing mechanism[J]. Resources Science, 2022, 44(12): 2387-2398.]
- [7] Jiao J D, Huang Y, Liao C P. Co-benefits of reducing CO₂ and air pollutant emissions in the urban transport sector: A case of Guangzhou[J]. Energy for Sustainable Development, 2020, 59: 131-143.
- [8] 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, 33: 425-437.
- [9] Nie C F, Lee C C. Synergy of pollution control and carbon reduction in China: Spatial-temporal characteristics, regional differences, and convergence[J]. Environmental Impact Assessment Re-

2023年11月

- view, 2023, DOI: 10.1016/j.eiar.2023.107110.
- [10] 刘华军, 郭立祥, 乔列成. 减污降碳协同效应的量化评估研究: 基于边际减排成本视角[J]. 统计研究, 2023, 40(4): 19-33. [Liu H J, Guo L X, Qiao L C. Quantitative evaluation of co-benefits of air pollution reduction and carbon emission reduction: Based on marginal abatement cost[J]. Statistical Research, 2023, 40(4): 19-33.]
- [11] 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: Empirical evidence from urban China[J]. Journal of Management World, 2020, 36(10): 65-76.]
- [12] 黄宗远, 王凤阳, 阳太林. 数字化赋能传统制造业发展的机制与效应分析[J]. 改革, 2023, (6): 40-53. [Huang Z Y, Wang F Y, Yang T L. Analysis of the mechanism and effect of digital empowerment on the development of traditional manufacturing industry [J]. Reform, 2023, (6): 40-53.]
- [13] 罗军, 邱海桐. 城市数字经济驱动制造业绿色发展的空间效应[J]. 经济地理, 2022, 42(12): 13-22. [Luo J, Qiu H T. The spatial effect of urban digital economy on the green development of manufacturing industry[J]. Economic Geography, 2022, 42(12): 13-22.]
- [14] Malmodin J, Moberg Å, Lundén D, et al. Greenhouse gas emissions and operational electricity use in the ICT and entertainment & media sectors[J]. Journal of Industrial Ecology, 2010, 14(5): 770-790.
- [15] Salahuddin M, Alam K. Internet usage, electricity consumption and economic growth in Australia: A time series evidence[J]. Teleomatics and Informatics, 2015, 32(4): 862-878.
- [16] 方冬莉. 数字经济对中国城市能源利用效率的影响: 基于技术赋能和技术外溢视角[J]. 资源科学, 2023, 45(2): 296-307. [Fang D L. Impact of digital economy on energy utilization efficiency of Chinese cities from the perspective of technology empowerment and spillover[J]. Resources Science, 2023, 45(2): 296-307.]
- [17] 任晓松, 孙莎. 数字经济对中国城市工业碳生产率的赋能效应[J]. 资源科学, 2022, 44(12): 2399-2414. [Ren X S, Sun S. The enabling effect of digital economy on urban industrial carbon productivity in China[J]. Resources Science, 2022, 44(12): 2399-2414.]
- [18] 苏培添, 王磊. 数字普惠金融对中国农业碳排放强度影响的空间效应与机制[J]. 资源科学, 2023, 45(3): 593-608. [Su P T, Wang L. Spatial effect of digital inclusive finance on agricultural carbon emission intensity and mechanism[J]. Resources Science, 2023, 45(3): 593-608.]
- [19] 徐维祥, 周建平, 刘程军. 数字经济发展对城市碳排放影响的空间效应[J]. 地理研究, 2022, 41(1): 111-129. [Xu W X, Zhou J P, Liu C J. The impact of digital economy on urban carbon emissions: Based on the analysis of spatial effects[J]. Geographical Research, 2022, 41(1): 111-129.]
- [20] 李晓华. 数字经济新特征与数字经济新动能的形成机制[J]. 改革, 2019, (11): 40-51. [Li X H. New features and the formation mechanism of new growth drivers of digital economy[J]. Reform, 2019, (11): 40-51.]
- [21] 陈晓红, 胡东滨, 曹文治, 等. 数字技术助推我国能源行业碳中和目标实现的路径探析[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(9): 1019-1029. [Chen X H, Hu D B, Cao W Z, et al. Path of digital technology promoting realization of carbon neutrality goal in China's energy industry[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(9): 1019-1029.]
- [22] 高维龙, 彭影, 胡续楠. “双碳”目标下数字经济对城市节能减排的影响研究[J]. 城市问题, 2023, (3): 25-37. [Gao W L, Peng Y, Hu X N. The impact of digital economy on energy saving and emission reduction in cities under the “double carbon” target[J]. Urban Problems, 2023, (3): 25-37.]
- [23] 吴力波, 杨眉敏, 孙可智. 公众环境关注度对企业和政府环境治理的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(2): 1-14. [Wu L B, Yang M M, Sun K G. Impact of public environmental attention on environmental governance of enterprises and local governments [J]. China Population, Resources and Environment, 2022, 32(2): 1-14.]
- [24] 尤碧莹, 郑明贵, 胡志亮, 等. 数字化转型对资源型企业全要素生产率的影响[J]. 资源科学, 2023, 45(3): 536-548. [You B Y, Zheng M G, Hu Z L, et al. The impact of digital transition on total factor productivity of resource-based enterprises[J]. Resources Science, 2023, 45(3): 536-548.]
- [25] 王香艳, 李金叶. 数字经济是否有效促进了节能和碳减排?[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(11): 83-95. [Wang X Y, Li J Y. Did the digital economy effectively promote energy conservation and CO₂ reduction?[J]. China Population, Resources and Environment, 2022, 32(11): 83-95.]
- [26] 张杰, 付奎, 刘炳荣. 数字经济如何赋能城市低碳转型? 基于双重目标约束视角[J]. 现代财经(天津财经大学学报), 2022, 42(8): 3-23. [Zhang J, Fu K, Liu B R. Can digital economy promote low-carbon transformation of cities from the perspective of dual objective constraint?[J]. Modern Finance and Economics-Journal of Tianjin University of Finance and Economics, 2022, 42(8): 3-23.]
- [27] 马香品. 数字经济时代的居民消费变革: 趋势、特征、机理与模式[J]. 财经科学, 2020, (1): 120-132. [Ma X P. The change of consumption in the digital economy: Trends, characteristics, mechanisms and model[J]. Finance & Economics, 2020, (1): 120-132.]
- [28] 薛成, 孟庆玺, 何贤杰. 网络基础设施建设与企业技术知识扩散: 来自“宽带中国”战略的准自然实验[J]. 财经研究, 2020, 46(4): 48-62. [Xue C, Meng Q X, He X J. Network infrastructure and the diffusion of technological knowledge: Evidence from a quasi-natural experiment[J]. Journal of Finance and Economics, 2020, 46(4): 48-62.]
- [29] 孙博, 刘善仕, 姜军辉, 等. 企业融资约束与创新绩效: 人力资本社会网络的视角[J]. 中国管理科学, 2019, 27(4): 179-189. [Sun B, Liu S S, Jiang J H, et al. The financial constraints and firm innovation: From the perspective of human capital network[J]. Chinese Journal of Management Science, 2019, 27(4): 179-189.]

- [30] 孙早, 侯玉琳. 工业智能化如何重塑劳动力就业结构[J]. 中国工业经济, 2019, (5): 61–79. [Sun Z, Hou Y L. How does industrial intelligence reshape the employment structure of Chinese labor force?[J]. China Industrial Economics, 2019, (5): 61–79.]
- [31] 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. [Zhang Y Z. The development strategy and main tasks of the digital economy driving the industrial structure to the middle and high end[J]. Economic Review Journal, 2018, (9): 85–91.]
- [32] 冯素玲, 许德慧. 数字产业化对产业结构升级的影响机制分析: 基于2010–2019年中国省际面板数据的实证分析[J]. 东岳论丛, 2022, 43(1): 136–149. [Feng S L, Xu D H. Analysis of the influence mechanism of digital industrialization on industrial structure upgrading: Empirical analysis based on Chinese provincial panel data from 2010 to 2019[J]. Dongyue Tribune, 2022, 43(1): 136–149.]
- [33] 温忠麟, 叶宝娟. 中介效应分析: 方法和模型发展[J]. 心理科学进展, 2014, 22(5): 731–745. [Wen Z L, Ye B J. Analyses of mediating effects: The development of methods and models[J]. Advances in Psychological Science, 2014, 22(5): 731–745.]
- [34] Tone K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2001, 130(3): 498–509.
- [35] Yang X H, Yang X Y, Zhu J G, et al. Synergic emissions reduction effect of China's "Air Pollution Prevention and Control Action Plan": Benefits and efficiency[J]. Science of the Total Environment, 2022, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.157564.
- [36] 吴建新, 郭智勇. 基于连续性动态分布方法的中国碳排放收敛分析[J]. 统计研究, 2016, 33(1): 54–60. [Wu J X, Guo Z Y. Research on the convergence of carbon dioxide emissions in China: A continuous dynamic distribution approach[J]. Statistical Research, 2016, 33(1): 54–60.]
- [37] 张义, 黄寰. 数字经济发展对碳排放不公平的影响[J]. 资源科学, 2023, 45(6): 1223–1238. [Zhang Y, Huang H. The impact of digital economy development on inequity of carbon emissions[J]. Resources Science, 2023, 45(6): 1223–1238.]
- [38] 林峰, 林淑佳, 李宏兵. 互联网+、城市智能化与中国企业技术创新: 来自腾讯研究院大数据与专利微观数据的分析[J]. 南方经济, 2022, (9): 75–96. [Lin F, Lin S J, Li H B. Internet plus, intelligentization and firms' technological innovation: Evidence from big data of TRI and micro-data of patents[J]. South China Journal of Economics, 2022, (9): 75–96.]
- [39] 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 H Q, Wang H S, Feng H S, et al. Carbon reduction effect of digital economy: Theoretical analysis and empirical evidence[J]. China Industrial Economics, 2023, (5): 80–98.]
- [40] 焦音学, 黄群慧. 中国数字经济均衡发展与亲贫性研究[J]. 财贸经济, 2023, 44(8): 91–109. [Jiao Y X, Huang Q H. The research on balanced development and pro-pooriness of China's digital economy[J]. Finance & Trade Economics, 2023, 44(8): 91–109.]
- [41] 黄麒麟, 秦淑悦, 张雨朦. 数字经济如何驱动制造业升级[J]. 经济管理, 2022, 44(4): 80–97. [Huang Z L, Qin S Y, Zhang Y M. How does the digital economy drive the upgrading of manufacturing industry?[J]. Business and Management Journal, 2022, 44(4): 80–97.]
- [42] 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.]
- [43] 邵帅, 李欣, 曹建华, 等. 中国雾霾污染治理的经济政策选择: 基于空间溢出效应的视角[J]. 经济研究, 2016, 51(9): 73–88. [Shao S, Li X, Cao J H, et al. China's economic policy choices for governing smog pollution based on spatial spillover effects[J]. Economic Research Journal, 2016, 51(9): 73–88.]
- [44] 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]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2022, 39(8): 60–79.]
- [45] 郭丰, 杨上广, 任毅. 数字经济、绿色技术创新与碳排放: 来自中国城市层面的经验证据[J]. 陕西师范大学学报(哲学社会科学版), 2022, 51(3): 45–60. [Guo F, Yang S G, Ren Y. The digital economy, green technology innovation and carbon emissions: Empirical evidence from Chinese city-level data[J]. Journal of Shaanxi Normal University (Philosophy and Social Sciences Edition), 2022, 51(3): 45–60.]
- [46] 张华. 低碳城市试点政策能够降低碳排放吗? 来自准自然实验的证据[J]. 经济管理, 2020, 42(6): 25–41. [Zhang H. Can low-carbon city construction reduce carbon emissions? Evidence from a quasi-natural experiment[J]. Business and Management Journal, 2020, 42(6): 25–41.]
- [47] 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: Internal mechanism and China experiences[J]. China Industrial Economics, 2019, (8): 5–23.]
- [48] Wang J D, Dong K Y, Dong X C, et al. Assessing the digital economy and its carbon-mitigation effects: The case of China[J]. Energy Economics, 2022, DOI: 10.1016/j.eneco.2022.106198.
- [49] Meng Z Y, Li W Z, Chen C F, et al. Carbon emission reduction effects of the digital economy: Mechanisms and evidence from 282 cities in China[J]. Land, 2023, DOI: 10.3390/land12040773.
- [50] 杨慧梅, 江璐. 数字经济、空间效应与全要素生产率[J]. 统计研究, 2021, 38(4): 3–15. [Yang H M, Jiang L. Digital economy, spatial effects and total factor productivity[J]. Statistical Research, 2021, 38(4): 3–15.]

The synergistic effect of digital economy on pollution and carbon reduction and the influence mechanism: An empirical test based on prefecture-level city data

GUO Pei, WANG Guangyuan

(School of Economics and Management, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: [Objective] The digital economy is an important focus for realizing the transformation of China's old and new development momentums, and its extensive integration and continuous development within various economic and social fields have given China a new power dynamic for the synergistic effect of pollution reduction and carbon reduction. In the critical window of promoting the construction of "Beautiful China" and realizing the "dual-carbon" climate commitment, the study of the impact of the development of the digital economy on the synergistic effect of pollution reduction and carbon reduction is an important proposition in the context of realizing green and high-quality development in China. [Methods] Based on the panel data of 277 prefecture-level and above cities, this study examined the impact of the digital economy on the synergistic effect of pollution reduction and carbon reduction and its mediation mechanism in multiple dimensions by using fixed effect and mediation effect models. [Results] The findings are as follows: (1) The development of the digital economy significantly contributes to the synergistic effect of pollution reduction and carbon reduction, and the conclusions still hold after endogeneity and robustness tests using the instrumental variable method and excluding the four provincial-level municipalities. (2) The "broadband China" strategy was chosen as an exogenous policy shock, and the multi-period difference-in-differences (DID) model was used to evaluate the impact of the digital economy on the synergistic effect of pollution reduction and carbon reduction. The regression results show that the "broadband China" strategy had a positive and significant impact on the synergistic effect of pollution reduction and carbon reduction. (3) The test results of the mechanism analysis show that the development of the digital economy can promote the synergistic effect of pollution reduction and carbon reduction by improving technologies, promoting industrial structure upgrading, and enhancing public environmental supervision. (4) The analysis of regional heterogeneity showed that the impact of the digital economy on the synergistic effect of pollution reduction and carbon reduction is more significant in the eastern region and non-resource-based cities, while the impact is not significant in the central and western regions and resource-based cities, which is mainly related to the uncoordinated level of digital economy development among regions. [Conclusion] We should vigorously develop the digital economy, accelerate the construction of new infrastructures, strengthen environmental awareness and action of the government, enterprises and the public, and fully unleash the potential of the digital economy based on the comparative advantages of the resources in each region, so as to realize synergies in reducing pollution and carbon emissions.

Key words: digital economy; pollution reduction and carbon emission reduction; synergistic effect; broadband China; difference-in-differences model; heterogeneity