



姜玲,胡佳霖,张子略. 数字经济的“降碳增效”效应及其实现路径:来自88个国家的实证研究[J]. 中国人口·资源与环境,2025,35(6):1-15. [JIANG L, HU J L, ZHANG Z L. “Carbon reduction and efficiency enhancement” effects of the digital economy and their realization pathways: an empirical study of 88 countries[J]. China population, resources and environment, 2025, 35(6): 1-15.]

数字经济的“降碳增效”效应及其实现路径: 来自88个国家的实证研究

姜玲,胡佳霖,张子略
(中央财经大学政府管理学院,北京 100081)

摘要 “双碳”目标深度嵌入国家发展格局,数字经济成为驱动绿色转型和高质量发展的重要引擎,在数字经济“降碳”作用基础上进一步关注“降碳增效”问题,深入挖掘数字经济与高质量发展的内在逻辑,具有重要的理论价值和现实意义。研究基于2003—2022年88个国家面板数据,从碳排放和碳生产率两个维度评估数字经济发展的“降碳增效”效应及其实现路径。研究发现:①在国际比较框架下,数字经济的“降碳增效”效应呈现明显的阶段性特征,其中,对碳排放的影响呈倒“U”形关系,而对碳生产率的影响则呈“U”形关系,拐点值分别为1.146和0.884。②异质性分析表明,数字经济的“降碳增效”效应在中高和高收入国家及资源依赖度较低的国家更为显著。③机制检验发现,数字经济通过推动技术创新和提升政府治理效能,进而间接影响碳排放量与碳生产率。④能耗结构优化与产业结构升级在数字经济影响“降碳增效”的过程中发挥调节作用,强化了非线性效应的平稳性,并推迟了能耗拐点的出现。⑤数字经济对经济发展水平相近国家的碳排放的非线性影响具有空间效应,但与对本国的影响相比,其产生的空间溢出效应较弱。因此,建议坚持以数字经济引领“降碳增效”的发展理念,推动拐点的提前形成与曲线的持续优化;立足“降碳”与“增效”的协调统一,实现碳排放下降与生产率提升的良性互动;多渠道提升数字化水平和数字经济发展。

关键词 数字经济;降碳增效;碳排放;碳生产率

中图分类号 F49;F062.2 文献标志码 A 文章编号 1002-2104(2025)06-0001-15 DOI:10.12062/cpre.20250308

数字经济与高质量发展的内在一致性已在理论界与实践层面得到广泛认同^[1-3],数字经济在推动“降碳增效”方面的潜力也初步达成共识^[4-5]。然而,数字经济与“降碳增效”之间的关系具有极为丰富的内涵:数字经济发展通过何种机制影响碳治理?如何通过数字经济发展实现碳减排和效率提升的双重成效?不同国家和经济体在实现数字经济驱动的“降碳增效”过程中,路径选择、成效表现和作用机制有何差异?等等。上述问题直接关涉中国推进“降碳增效”与高质量发展的路径选择问题。本研究围绕上述问题,基于实证路径展开了逐步深入的研究和探讨,从研究层次和视野两个维度对既有研究进行了深化与扩展^[6]。本研究基于88个国家的面板数据,系统梳理并提炼数字经济在世界范围内促进“降碳增效”的内在逻辑,识别其作用机制与边界条件,以期促进高质量发展中的“降碳”与“增效”双重目标的统筹实现。

1 文献综述

在全球气候治理加速转型的背景下,“降碳增效”作为统筹经济增长与碳减排的战略框架,其内涵需回归《巴黎协定》确立的气候变化减缓速度与发展权保障双重目标进行系统解构。从系统维度来看,降碳强调碳排放的绝对削减,对应碳达峰碳中和的刚性约束;增效则指向碳生产率的持续提升,即在碳排放可控范围内优化单位碳排放的经济产出。这一双重维度的分解在契合 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)特别报告中关于减缓路径需同步考虑排放规模与碳利用效率警示的同时,也与《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》中提出的实施以碳强度控制为主、碳排放总量控制为辅的制度形成政策呼应。在此背景下,学界对数字经济与碳治理的关联研究逐步深化。相关研

收稿日期:2024-10-19 修回日期:2025-04-04

作者简介:姜玲,博士,教授,博导,主要研究方向为生态环境治理、城市与区域治理。E-mail: cufejiangling@126.com。

通信作者:胡佳霖,博士生,主要研究方向为政策评估、环境治理。E-mail: hjlq123@163.com。

基金项目:国家自然科学基金面上项目“区域大气污染治理责任分担核算与履责机制研究:‘生产—消费—发展’的综合视角”(批准号:72074238)。

究重点围绕2个维度展开:数字经济对碳排放的影响与数字经济对碳生产率的影响。

一是关于数字经济对碳排放的影响。现有研究尚未就两者的关系达成共识,存在“加剧论”“缓解论”与“非线性论”3种主要观点,结论分歧可能源于研究区域的空间尺度差异及发展阶段异质性。①“加剧论”认为在数字经济初期阶段,其成熟度较低导致数字产业化和产业数字化推进过程中产生高投入、高成本的叠加效应,导致碳排放量的上升^[7]。例如,杨刚强等^[8]研究发现,2008—2020年中国数字基础设施和数字产品的碳排放量分别增长8.3倍和12.5倍,呈现显著的“亲碳”特征。这一阶段性特征在要素供给层面亦较为突出,初期投入资金短缺、科技人才匮乏、研发能力有限以及政策体系尚不完善等结构性约束,使得能源密集型特征更为突出,产品全生命周期伴随大量能源消耗^[9]。Avom等^[10]以撒哈拉以南的非洲国家为研究对象,发现ICT(information and communications technology)产业作为数字经济核心产业,其发展使得碳排放量显著增加。②“缓解论”强调数字经济具有通过技术创新优化生产流程、提升能源效率的核心作用。数字经济可以通过优化企业生产技术和运营管理^[11]、提高企业对市场变化的响应能力、促进可再生能源规模化开发和应用等途径,实现碳排放的削减。陈庆江等^[12]研究发现,数字经济信息化与工业化的深度融合能够有效降低能源强度,推动节能减排。许恒等^[13]进一步发现数字经济对传统经济的技术溢出和技术冲击,可促使企业引入先进技术,优化生产流程和管理模式,从而助力传统经济向数字化转型升级,提高能源使用效率,减少资源浪费,最终实现碳排放的降低。③“非线性论”试图统合数字经济发展与碳排放量之间发展阶段差异,即数字经济发展与碳排放量之间的关系可能是非线性的。Bai等^[14]和Yang等^[15]通过研究城市层面的数字经济影响,发现数字经济发展与碳排放量之间呈现倒“U”形关系,即数字经济在短期内会增加碳排放量,在长期内会显著降低碳排放量。李肆等^[6]通过研究发现,在高收入国家中数字经济发展与碳排放量的非线性关系更加显著。

二是关于数字经济对碳生产率的影响。目前,聚焦于数字经济与碳生产率关系的研究仍较为有限。部分学者基于对国家大数据综合试验区、宽带中国及信息消费试点等政策效应的实证评估发现,数字经济发展能够显著提升区域碳生产率水平^[16-18]。然而,Du等^[19]对此持怀疑态度,认为以数字技术为代表的绿色创新手段主要惠及高收入经济体,很难找到绿色技术创新对欠发达地区的碳生产率产生积极影响的显著证据。此外,也有一些学者发现,数字经济对碳生产率的影响存在阶段性特征。

数字经济在发展初期会抑制碳生产率,且在完成从过渡到部署的阶段后,综合发展水平较高的城市会对碳生产率产生显著的正向空间效应,带动区域碳生产率的增长^[20]。武赫等^[21]从高质量发展视角得出,数字经济除了扩展就业机会,提升了生活水平之外,还推动了政府治理改革,提高了政府治理效率,而较高的政府治理效率是促进碳生产率增长的关键因素^[22]。

综上所述,现有数字经济发展对碳排放、碳生产率影响的相关研究提供了重要的理论参考,但仍存在不足之处:第一,空间异质性与发展阶段差异的交互影响尚未有效剥离,且基于全球视野的研究不足。已有研究多聚焦于单一国家行政单元(省级/市级)或国家集群(如金砖国家),其研究结论难以区分数字经济技术扩散的地理黏性与发展阶段的阈值效应。当发达国家通过数字技术替代实现“降碳增效”时,数字基建薄弱的新兴经济体可能由于能源回弹效应陷入高碳锁定,这种发展阶段的非线性特征意味着基于特定区域样本的研究结论,在跨国层面可能因经济结构、技术禀赋及政策环境的不同而产生根本性差异,这也是开展国别研究的理论价值所在。第二,数字经济发展的“降碳增效”效应并未得到充分关注和检验。现有研究多聚焦于数字经济对碳排放的单向影响,却未能从降碳与增效双重目标的差异性与协调性视角,系统解析各国数字经济发展影响的内在机理。这一研究范式的局限不仅导致对数字经济低碳潜力的评估维度单一化,更可能因忽视目标间的协同效应而低估其在可持续发展中的多维价值。第三,现有研究往往关注数字经济发展对碳排放的直接促进或抑制作用,忽视了数字经济发展水平与碳排放、碳生产率之间可能存在的非线性关系及跨国层面的空间溢出效应。厘清这些问题,对于政府制定合理的数字经济发展战略,实现跨国环境合作具有重要意义。鉴于此,本研究立足全球视野,构建多维度的国家层级数字经济发展水平综合指数,并从降碳与增效双重视角,深入评估全球数字经济发展对碳排放和碳生产率的影响,旨在为全球制定有效的气候变化应对政策提供实证支撑。同时,本研究积极汲取全球数字经济发展经验,期望为中国“双碳”目标的顺利实现提供政策借鉴,助力中国在数字化转型与绿色发展融合的进程中,构建更具韧性的低碳发展路径。

2 机理分析和研究假设

2.1 数字经济对“降碳增效”的直接效应

数字经济发展对降碳与增效的直接影响主要表现在规模效应与结构效应两个方面。其中,规模效应指数字经济对整体经济活动体量的扩张作用及其带来的效率变

化,包括数字产业规模、技术应用规模和市场规模等维度;结构效应则体现在数字经济引发的消费结构调整和产业结构升级等层面。

在规模效应方面。第一,数字经济借助数字化工具优化供应链管理,实现生产需求与市场需求的精准匹配。供应链数字基础设施的建设与运营在早期阶段需要消耗大量的电力和资源,可能会加剧碳排放。但随着技术日趋成熟,这一过程带来的规模效应在降低交易成本的同时减少了资源浪费,显著提升了生产效率^[23]。第二,数字经济的发展促进了技术的多样化和跨行业的融合,为低碳技术的交叉应用提供了新机遇。然而,在早期阶段,由于传统产业的数字化转型尚未完全实现,产业结构调整存在滞后性,高能耗、高碳排放的传统产业仍然占据较大比重,而低碳、高效的数字产业尚未形成足够的规模效应。因此,整体经济的碳生产率在短期内难以显著提升。在产业融合稳定后,数字经济的规模效应为碳减排提供了更多选择和更稳定的激励,在提升能源使用效率的同时将推动能源生产和消费的低碳转型。第三,数字产业集聚带来的规模效应在完善数字基础设施的基础上,为新商业模式和新业态的萌生提供了支撑。尽管数字经济在发展前期阶段需要大量的资源来进行信息化基础设施的建设和数字化人才的培养,导致创新产出结构的失衡,降低了碳生产率^[24]。但随着云计算、大数据分析、区块链等数字技术应用的不断深化,数字经济的规模化发展得以加速,在降低运营成本的同时,扩大数字产品选择范围,拓宽消费者的购买偏好和行为反馈路径,推动企业更好地把握市场需求,实现生产规模的持续扩大^[25]。随着生产规模的进一步扩大,资源利用效率趋于稳定,污染治理成本降低,单位碳排放的经济价值也随之提升,最终实现碳减排与生产效率提升的双重收益^[26]。

在结构效应方面。第一,数字经济推动消费结构的调整与优化^[27],可能会导致碳排放和碳生产率的波动。数字经济与传统产业的深度融合,有助于减少生产过程中的资源浪费,但在发展初期,可能会因能源需求的短期激增而造成碳排放上升。随着数字消费模式的成熟和普及,总体将显著提升传统产业的生产效率,最终实现“降碳增效”目标。第二,数字经济通过提升产业链配置效率和企业内部资源配置效率,推动产业协同模式的深化^[28]。在数字经济的推动下,企业间的协作更加紧密,大数据、物联网、区块链等技术的广泛应用,使得产业链的信息流通更加高效透明。但在发展初期,企业需要投入大量资金用于设备更新、技术引进和人员培训,短期内难以获得预期的效率提升和成本节约。随着数字技术的成熟和广泛应用,新型智能化生产模式能够有效减少因信息不对

称导致的资源浪费,优化产业链整体效益,从而降低碳排放,提高碳生产率。第三,数字经济依托技术创新连接创新主体,促进技术共享和知识溢出,提升经济体创新水平,实现“降碳增效”。数字经济通过增加信息供给、完善价格机制、改变交易形式,减少无效交易,提高资源配置效率,降低供需双方的流通成本,从而减少碳排放。此外,数字经济能够赋能生产流程优化,引导企业升级生产设备,优化能源企业的管理流程,促进能源循环利用,实现节能减排,提高碳生产率。

综上所述,尽管在数字经济发展的初期阶段,数字基础设施建设往往伴随着碳排放的上升和碳生产率的短暂下降,但随着数字经济的深入发展,其规模效应和结构效应将在资源配置优化、生产效率提升和能源浪费减少等方面逐步显现,从而推动“降碳增效”目标的实现。需要强调的是,尽管降碳与增效在长期趋势上具有同向变动关系,但在不同发展阶段,二者可能表现出短期背离现象。在技术替代期,可能会出现降碳不增效的情形,即碳排放下降但碳生产率并未增加;亦可能出现增效不降碳的现象,即碳生产率提升但短期内碳排放仍有所增加。这种暂时性矛盾的存在,反映出数字经济发展在不同阶段对碳排放、碳生产率的非线性影响特征。基于此,提出研究假设H1。

H1:数字经济的“降碳增效”效应呈现出明显的阶段性特征,对碳排放呈先升后降的倒“U”形关系,对碳生产率则表现为先降后升的“U”形关系。

2.2 数字经济对“降碳增效”的间接效应

数字经济发展通过与实体经济深度融合,将技术创新渗透至国民经济系统和公共治理体系,其影响已从微观企业的数字化应用,扩展至国家战略层面的数字化基础设施建设和制度创新,这一深度融合主要通过以下3项核心机制推动经济体的系统性变革,从而影响碳排放与碳生产率:第一,数字技术在国家层面重构要素配置范式。智能分析与预测系统的建立,使得数字基础设施能够显著提升国家创新体系的资源配置效率。同时,跨境数据流动和远程协作技术降低了技术扩散的物理约束,使先进设备、产品与技术得以在不同国家和地区形成梯度转移网络^[29]。第二,数字经济驱动的创新范式变革与希克斯诱导创新理论在国家战略层面形成高度契合。数据资源的边际成本递减特性,促使各国不断调整创新政策框架,并通过要素价格信号引导技术替代路径。在数据要素替代到技术迭代升级再到“降碳增效”的创新链中,国家竞争焦点正逐步向清洁能源体系构建和数字基础设施投资倾斜^[30]。与此同时,通过碳税政策、绿色金融等制度创新,发达国家与发展中国家正在形成差异化的数字与能源协同发展模式,共同塑造全球低碳经济新秩序^[31]。第三,技术创新扩散产

生的网络效应正重塑产业生态。当数字技术突破生产可能性边界时,其带来的不仅是能源依赖度的降低和资源利用效率的指数级提升,更构建了一个灵活精准的资源配置系统^[32]。通过供应链智能化改造和价值链绿色重构,数字经济的扩散效应最终形成全行业“降碳增效”的乘数效应,推动经济增长与绿色发展协同共进。

数字经济的发展不仅推动了政府治理体系的数字化转型,还通过优化决策流程、政策创新及多元协同治理模式,显著提升政府治理效率,进而推动“降碳增效”目标的实现。第一,数字经济通过改善数字基础设施、扩大数字应用群体、优化数字政务服务,提升政府治理效能。随着新型数字技术的广泛应用,政府在信息捕集、监测、追踪和评估方面的能力得到了极大增强。基于精准的数据分析,政府能够更准确地掌握能源市场的动态及价格趋势,并利用定价机制和交叉补贴政策来调节能源供应,实现“降碳增效”。此外,政府还可依托数字化手段强化碳排放权交易市场的监管,优化能源使用总量,有效控制碳排放。第二,数字经济驱动政策创新与制度变革,构建起支撑低碳转型的三重机制。在数据层面,建立碳信息智能监测体系;在资产层面,推进排放权的数字化确权机制;在治理层面,完善碳排放奖惩标准。这一立体化的治理模式不仅突破了碳数据采集和动态分析的技术瓶颈,更通过政企数据协同机制提高了监管响应速度。行之有效的数字化治理体系,使政府在建立健全碳市场、完善绿色金融体系、推动绿色投融资机制等方面发挥更为关键的作用。面对更加透明和完善的市场环境,企业主动降低对传统能源的依赖、减少碳排放、提升生产效率将成为必然趋势^[33]。第三,数字经济催生多元协同治理模式,打破了传统行政区划和地理距离的限制,加速了资源要素的自由流动。数字技术推动治理模式从单一主体向多元协作治理转变,政府、企业、社会组织和公众共同参与,通过数字平台实现跨区域、跨城乡流动,从而推动区域经济协同高效发展。基于此,提出研究假设H2和H3。

H2:数字经济通过提高一国技术创新能力实现“降碳增效”。

H3:数字经济通过提升一国政府治理效能实现“降碳增效”。

2.3 清洁能源结构和产业结构升级的调节效应

数字经济的“降碳增效”效应可能受清洁能源结构的影响。第一,从能源禀赋的角度看,区域能源结构越优质、清洁能源占比越高,数字经济对碳排放的改善作用就越明显。清洁能源的广泛应用能够有效减少生产过程中的碳排放,而数字经济的智能化管理和数据驱动能力则进一步加速清洁能源的优化配置和推广速度。换言之,

一国的能源结构越清洁、高效,数字经济在优化资源配置和减少碳排放方面的潜力就越大。这也意味着清洁能源结构的优化为数字经济的“降碳增效”奠定了良好的基础。第二,从经济发展水平的角度看,清洁能源结构越合理的国家其经济发展水平就越高,更有可能对能源生产流程进行智能化改造,实现能源的循环使用,提升能源利用效率。此外,数字技术在研发、设计、生产和管理等关键环节的广泛应用,对国家引入可再生能源的数量产生了深远的影响。清洁能源结构还能助力国家发展循环经济模式,通过资源回收和再利用降低能源浪费,最终实现能源系统的绿色化和可持续发展^[10]。第三,从碳排放约束的角度出发,提高可再生能源渗透率为数字经济应对碳排放约束提供了更大的空间^[34]。数字经济可以通过大数据分析、人工智能和物联网技术优化能源需求侧管理,同时推动清洁能源技术的创新应用,进一步降低单位经济产出的碳排放。

产业结构反映了经济活动中不同行业的比例和构成,直接影响了数字经济绿色化发展的模式。第一,国家的产业结构在一定程度上决定了市场需求惯性,并影响数字经济供需关系的形成和演化。产业结构影响要素配置格局,进而塑造特定的市场需求惯性,这种惯性在供需关系数字化过程中具有路径依赖效应。传统产业体系中的基础设施布局、资源禀赋特征和组织习惯有利于引导数字技术应用方向与创新扩散速度。例如,制造业占比高的国家更容易形成生产端数字化减排路径,而服务业主导型国家则更倾向于消费端的绿色升级模式。第二,产业结构影响需求惯性与数字需求的融合速度。需求惯性不仅源于传统产业的结构特征,还与消费者行为模式和企业生产组织方式密切相关。国家在特定产业上的长期积累往往会形成固有的消费习惯和产业生态,从而对数字需求的形成产生双重影响。数字需求的生成提供了延续性和稳定性的同时也可能成为需求转型的阻力,因为传统需求的惯性可能会延缓数字技术的接受和普及速度。因此,不同产业结构的国家在数字化供需关系调整中,其融合速度和表现形式往往存在显著差异。第三,数字技术通过重塑要素流动性和市场响应度,使多元产业结构更易形成需求升级的正向循环^[35]。事实上,市场需求惯性并非一成不变,因此数字时代中技术进步和产业创新是相互作用并呈动态演化的。产业结构较为单一的国家,其市场需求惯性可能更强,但转型阻力也相对较大;而产业结构多样化、灵活性较高的国家,则更有可能迅速捕捉到数字时代的新兴需求,并通过优化供给体系实现需求升级。随着数字技术对传统产业的渗透,不同产业结构下的经济体可能会逐步调整产业结构,通过产



业多元化和高附加值化,增强其对市场需求惯性的适应性,为新型供需关系的形成提供更大的发展空间。基于此,提出研究假设H4。

H4:数字经济在实现“降碳增效”的过程中,受到清洁能源结构与产业结构升级的调节作用。

3 模型构建

3.1 变量选择

(1)被解释变量为碳排放量与碳生产率。其中,碳排放量(ce)通过式(1)计算人均碳排放量, c 为一国的碳排放总量, $population$ 为国家总人口数,数据来自全球大气研究排放数据库(Emissions Database for Global Atmospheric Research, EDGAR)。

$$ce = c/population \quad (1)$$

碳生产率(cp)依据Kaya等^[36]的定义(在一段时间内每单位碳排放总量的经济产出),采用一国国内生产总值(gdp)与碳排放总量的比值(式2)表征碳生产率,数据来自全球大气研究排放数据库(EDGAR)。

$$cp = gdp/c \quad (2)$$

(2)解释变量为一国的数字经济发展水平,以数字经济指数(dig)表征。结合Shahbaz等^[37]和李肆等^[6]的研究,本研究从数字网络基础、数字社会参与度、数字贸易活动3个维度构建国家层面的数字经济指数测度体系,具体见表1。数字网络基础是指以数据创新为驱动、通信网络为基础、数据算力设施为核心的基础设施体系。数字基础设施是数字经济的发展载体与重要物质基础,同时也是体现数字经济发展环境治理和创新的重要手段,为顺利推进数字化进程提供物理层面的支撑^[38]。数字社会参与度是指社会中参与或使用数字技术的影响人数,涵盖了经济、文化、教育、医疗、就业、社会参与等多个领域,并且对个体的生活方式、工作模式、社会互动以及价值观念产生深远影响。数字贸易活动是指以数据资源为关键生产要素、以现代信息网络为重要载体、以信息通

信技术的有效使用促进效率提升和结构优化的一系列对外贸易活动,是数字经济和高水平对外开放的重要组成部分^[39]。

采用熵值法计算每个国家的年度数字经济发展水平,具体计算步骤如下。

第一,针对原始数据矩阵 $X = (x_{i,j})_{m \times n}$,其中 $x_{i,j}$ 表示第 i 个评价对象第 j 个指标上的原始观测值,进行无量纲化处理以消除量纲带来的干扰,采用极差标准化方法将其归一化,得到归一化后数值 $x'_{i,j}$ 。

$$x'_{i,j} = \frac{x_{i,j} - \min x_{i,j}}{\max x_{i,j} - \min x_{i,j}} \quad (3)$$

第二,构建指标比重矩阵 $P_{i,j}$ 。

$$P_{i,j} = \frac{x'_{i,j}}{\sum_{i=1}^n x'_{i,j}} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

第三,计算信息熵 e_j 。

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n P_{i,j} \ln P_{i,j} \quad (5)$$

第四,计算差异系数 g_i 。

$$g_i = 1 - e_j \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (6)$$

第五,计算各项指标的权重系数 w_j 。

$$w_j = \frac{g_i}{\sum_{j=1}^m g_i} \quad (1 \leq j \leq m) \quad (7)$$

第六,计算第 i 个评价对象的综合得分(dig_i)。

$$dig_i = \sum_{j=1}^m w_j \times P_{i,j} \quad (8)$$

(3)中介变量:参考陈胤默等^[40]的研究,技术创新(tec)以知识产权交易收支总额衡量,涵盖因授权使用无形资产(如专利、商标、工业流程等)而发生的跨境许可费用,该数据能够反映一国国际技术交易和创新扩散水平,具有较高可比性和数据覆盖广的优势;政府治理效能(ef)采用世界银行开发的全球治理指数中政府治理效能指标测度,体现一国在政策制定、执行和协调方面的治理能力。

(4)调节变量。清洁能源结构(es)采用一国可再生能源在最终能耗中所占的百分比进行测度,反映经济体

表1 数字经济指数测度体系

一级指标	二级指标	三级指标	数据来源	
数字经济指数	数字网络基础	每百人固定宽带接入数	国际电信联盟数据库	
		每百人固定电话接入数	国际电信联盟数据库	
		移动通信用户普及率	国际电信联盟数据库	
		电信设施覆盖指数	联合国电子政务调查数据库	
	数字社会参与度		互联网个人使用率	国际电信联盟数据库
			在线公共服务水平	联合国电子政务调查数据库
			公民电子参与水平	联合国电子政务调查数据库
	数字贸易活动		ICT产品进口规模	世界银行
			ICT产品出口规模	世界银行

能耗结构的绿色化水平。产业结构升级(ind)采用一国第三产业产出占第二产业产出的比例衡量。

(5)控制变量。城镇化水平为各国城镇化率(urb)。经济体量(gdp)采用各国GDP总量来衡量。人口密度(pop)为各国年终人口总数与以平方千米为单位的土地面积之比。政府消费率(gov)为政府购买货物和服务发生的经常性支出占GDP的比重。

本研究以世界银行的189个成员国为基准,在数据收集与合并过程中,剔除了数据缺失的国家。部分国家在不同数据库中存在不同的数据缺失问题,例如,厄立特里亚、吉布提、朝鲜、南苏丹共和国、圣文森特和格林纳丁斯等国在世界银行数据库中缺失了GDP数据;孟加拉国、布隆迪、中非共和国、塞尔维亚和黑山、塞拉利昂等国在国际电信联盟数据库中缺失相关数据;格鲁吉亚、伊朗、老挝、摩尔多瓦和尼日利亚等国则在联合国电子政务调查数据库中缺失数据。基于此类数据缺失问题,最终筛选出数据较为完整的88个国家作为样本进行分析。样本国家包括:阿塞拜疆、中国、印度尼西亚、印度、以色列、约旦、日本、哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦、柬埔寨、韩国、黎巴嫩、马来西亚、巴基斯坦、菲律宾、新加坡、泰国、阿尔巴尼亚、奥地利、比利时、保加利亚、波黑、白俄罗斯、瑞士、塞浦路斯、捷克、德国、丹麦、西班牙、芬兰、法国、英国、克罗地亚、匈牙利、爱尔兰、意大利、卢森堡、马耳他、荷兰、挪威、波兰、葡萄牙、罗马尼亚、俄罗斯、斯洛伐克、斯洛文尼亚、瑞典、乌克兰、贝宁、布基纳法索、博茨瓦纳、喀麦隆、科摩罗、阿尔及利亚、埃及、加纳、摩洛哥、马达加斯加、莫桑比克、毛里求斯、纳米比亚、卢旺达、塞内加尔、南非、赞比亚、津巴布韦、阿根廷、巴哈马、伯利兹、玻利维亚、巴西、智利、多米尼加、厄瓜多尔、危地马拉、牙买加、墨西哥、尼加拉瓜、巴拿马、秘鲁、巴拉圭、萨尔瓦多、乌拉圭、美国、哥伦比亚、澳大利亚、斐济、新西兰。

样本期设定为2003—2022年,构建面板数据,并通过

插值法补齐部分国家个别指标缺失值,具体描述性统计结果见表2。

3.2 模型设定

3.2.1 基准回归模型

通过双向固定效应检验全球数字经济发展的“降碳增效”效应,模型如下:

$$Y_{i,t} = \alpha_0 + \alpha_1 \text{dig}_{i,t} + \alpha_2 \text{dig}_{i,t}^2 + \alpha_3 \text{control}_{i,t} + \text{country} + \text{year} + \varepsilon_{i,t} \quad (9)$$

式(9)中: i 和 t 为国家和年份, Y 为被解释变量(碳排放量与碳生产率)。dig为核心自变量数字经济指数,control _{i,t} 为控制变量,country和year为国家固定效应和时间固定效应, $\varepsilon_{i,t}$ 为随机扰动项; α_1 — α_3 为解释变量、解释变量平方和控制变量的系数。

3.2.2 中介效应模型

为检验数字经济影响“降碳增效”的作用机制,构建式(10)和式(11)进行中介效应检验:

$$M_{i,t} = \beta_0 + \beta_1 \text{dig}_{i,t} + \beta_2 \text{control}_{i,t} + \text{country} + \text{year} + \varepsilon_{i,t} \quad (10)$$

$$Y_{i,t} = \gamma_0 + \gamma_1 \text{dig}_{i,t} + \gamma_2 \text{dig}_{i,t}^2 + \gamma_3 M_{i,t} + \gamma_4 \text{control}_{i,t} + \text{country} + \text{year} + \varepsilon_{i,t} \quad (11)$$

式(10)和式(11)中: $M_{i,t}$ 分别为技术创新(tec)和政府治理效能(ef)两个中介变量,其余变量与基准模型设定一致。 β_1 — β_2 和 γ_1 — γ_3 为变量系数。若 β_1 、 γ_1 、 γ_2 和 γ_3 均显著,则表明技术创新和政府治理效能是数字经济发展影响碳排放量和碳生产率的中介机制。

3.2.3 调节效应模型

构建的调节效应模型如下:

$$Y_{i,t} = \theta_0 + \theta_1 \text{dig}_{i,t} + \theta_2 \text{dig}_{i,t}^2 + \theta_3 R_{i,t} + \theta_4 \text{dig}_{i,t} R_{i,t} + \theta_5 \text{dig}_{i,t}^2 R_{i,t} + \theta_6 \text{control}_{i,t} + \text{country} + \text{year} + \varepsilon_{i,t} \quad (12)$$

式(12)中: $R_{i,t}$ 分别为清洁能源结构(es)和产业结构升级(ind)两个调节变量,其他变量与基准模型设定一致。 θ_1 — θ_6 为变量系数。

表2 描述性统计

变量	变量符号	样本数	均值	标准差	最小值	最大值	数据来源
碳排放量	ce	1 760	6.147	4.573	0.119	26.671	全球大气研究排放数据库
碳生产率	cp	1 760	2.375	2.196	0.213	22.965	全球大气研究排放数据库
数字经济指数	dig	1 760	0.146	0.125	0.003	0.882	作者测算
技术创新	tec	1 760	19.408	3.162	12.876	25.041	世界银行
政府治理效能	ef	1 760	59.059	26.519	0.947	100	世界银行
清洁能源结构	es	1 760	26.919	23.811	0.060	93.691	世界银行
产业结构升级	ind	1 760	2.526	1.650	0.327	37.068	世界银行
城镇化率	urb	1 760	4.104	0.362	2.828	4.605	世界银行
经济体量	gdp	1 760	25.403	1.989	20.352	30.696	世界银行
人口密度	pop	1 760	4.352	1.335	0.844	8.983	世界银行
政府消费率	gov	1 760	2.736	0.329	0.716	3.685	世界银行



Haans等^[41]认为“U”形关系的调节效应主要在于两方面:以式(12)为例,一是“U”形曲线拐点,当 $\theta_1\theta_5 - \theta_2\theta_4 > 0$ 时,曲线的拐点右移;反之则左移。二是通过 θ_3 系数判定曲线的斜率,若为倒“U”形曲线,当 $\theta_3 > 0$ 时,曲线变平缓;若为“U”形曲线,当 $\theta_3 > 0$ 时,曲线变陡峭。

3.2.4 空间效应模型

式(13)为空间效应模型:

$$Y_{i,t} = \sigma_0 + \rho_0 \mathbf{W}Y_{i,t} + \alpha_1 \text{dig}_{i,t} + \alpha_2 \text{dig}_{i,t}^2 + \rho_1 \mathbf{W}\text{dig}_{i,t} + \rho_2 \mathbf{W}\text{dig}_{i,t}^2 + \alpha_3 \text{control}_{i,t} + \rho_3 \mathbf{W}\text{control}_{i,t} + \text{country} + \text{year} + \varepsilon_{i,t} \quad (13)$$

式(13)中: ρ_0 为空间自回归系数, ρ_1 、 ρ_2 和 ρ_3 分别为解释变量以及控制变量的空间交互项的系数, \mathbf{W} 表示经济距离矩阵。其余变量和系数与基准回归模型一致。

4 实证结果

4.1 全球数字经济、碳排放量与碳生产率的时序演变与极值特征

2003—2022年,全球数字经济指数、碳排放量与碳生产率水平在各大洲呈现出显著的增长趋势和区域异质性(表3)。具体而言,在数字经济方面,非洲和亚洲分别实现了135.3%和115.9%的高增长,表现出强烈的后发赶超势头,其中以中国为突出代表。相对而言,欧洲地区虽然拥有较高的初始水平,但增速较为温和(43.4%),呈现出高基数—低增速的成熟型扩展特征。在碳排放水平上,亚洲、非洲和美洲的碳排放量略有上升,其增速已显著放缓,反映出部分国家在碳排放控制上的努力。欧洲和大洋洲均实现了碳排放显著下降,表现出较强的碳治理能力。在碳生产率方面,全球呈现普遍提升的趋势,欧洲和

亚洲增幅较为领先。

4.2 基准回归

数字经济“降碳增效”效应的基准回归结果见表4。列(1)和列(2)显示,数字经济对碳排放量的一次项系数为正,二次项系数为负,说明数字经济对碳排放量的影响存在显著的先增后减的倒“U”形关系,拐点值为1.146。列(3)和(4)显示,数字经济对碳生产率的一次项系数为负、二次项系数为正,表明数字经济与碳生产率之间存在显著的先降后升的“U”形关系,拐点值为0.884。证明研究假设H1成立。当 $\text{dig} < 0.884$ 时,数字经济发展不会降碳也不会增效;当 $0.884 \leq \text{dig} < 1.146$ 时,数字经济发展尚不足以减少碳排放量,但将提升碳生产率;当 $\text{dig} \geq 1.146$ 时,数字经济发展将实现既降碳又增效。

4.3 稳健性与内生性检验

稳健性检验结果见表5。

第一,替换解释变量。采用熵权TOPSIS(technique for order preference by similarity to an ideal solution)方法重新测算全球数字经济指数并进行回归分析,结果见表5列(1)和列(2)。结果表明数字经济发展与碳排放量、碳生产率之间的倒“U”形和“U”形关系依然成立,与基准回归结果一致。

第二,缩尾处理。对全球数字经济指数、碳排放量和碳生产率3个变量进行前后0.5%的缩尾处理后再次进行估计,结果见表5列(3)和列(4)。结果表明数字经济发展水平指数及其平方项系数的显著性和符号同基准回归结果相比均未发生变化。

第三,稳健标准误。为提高估计结果的可靠性,并解决面板数据回归中可能存在的异方差问题,采用稳健标

表3 数字经济、碳排放与碳生产率的时序演变与极值特征

指标	区域	平均水平		平均增长率/%	2022年国家水平	
		2003年	2022年		最大值	最小值
数字经济指数(dig)	亚洲	0.183	0.224	115.9	中国	柬埔寨
	欧洲	0.184	0.161	43.4	德国	波黑
	非洲	0.023	0.047	135.3	埃及	科摩罗
	美洲	0.098	0.115	50.0	美国	尼加拉瓜
	大洋洲	0.154	0.119	9.3	澳大利亚	斐济
碳排放量(ce)	亚洲	5.227	5.823	21.4	韩国	吉尔吉斯斯坦
	欧洲	9.807	7.967	-14.8	芬兰	阿尔巴尼亚
	非洲	2.329	2.341	9.8	南非	卢旺达
	美洲	4.747	4.943	16.8	美国	萨尔瓦多
	大洋洲	12.376	9.641	-22.6	澳大利亚	斐济
碳生产率(cp)	亚洲	1.282	1.965	53.5	以色列	柬埔寨
	欧洲	2.693	4.560	71.6	瑞士	乌克兰
	非洲	0.923	1.147	34.9	毛里求斯	马达加斯加
	美洲	1.791	2.142	27.8	巴拿马	伯利兹
	大洋洲	2.039	3.121	53.3	新西兰	斐济

表4 基准回归结果

变量	碳排放量(ce)		碳生产率(cp)	
	(1)未加入控制变量	(2)加入控制变量	(3)未加入控制变量	(4)加入控制变量
dig	16.830*** (1.182)	14.810*** (1.172)	-12.010*** (0.875)	-13.660*** (0.859)
dig ²	-3.505** (1.703)	-6.461*** (1.688)	7.250*** (1.261)	7.729*** (1.237)
urb		3.122*** (0.614)		-2.630*** (0.450)
gdp		1.854*** (0.219)		1.692*** (0.161)
pop		-2.347*** (0.384)		-0.635** (0.282)
gov		0.255* (0.154)		-0.482*** (0.113)
常数项	1.467*** (0.214)	-42.840*** (4.650)	1.892*** (0.158)	-22.140*** (3.408)
国家固定	是	是	是	是
时间固定	是	是	是	是
N	1760	1760	1760	1760
R ²	0.968	0.970	0.924	0.930

注: * P<0.10, ** P<0.05, *** P<0.01; 括号内数值为标准误。

表5 稳健性检验

变量	替换解释变量		缩尾处理		稳健标准误	
	(1)ce	(2)cp	(3)ce	(4)cp	(5)ce	(6)cp
dig	13.940*** (1.265)	-13.080*** (0.928)	14.010*** (1.162)	-12.540*** (0.820)	14.810*** (1.661)	-13.660*** (1.304)
dig ²	-5.974*** (2.027)	7.367*** (1.487)	-5.391*** (1.763)	6.669*** (1.244)	-6.461*** (1.816)	7.729*** (1.095)
常数项	-44.280*** (4.687)	-21.810*** (3.438)	-42.720*** (4.430)	-22.620*** (3.126)	-42.840*** (5.063)	-22.140*** (5.100)
控制变量	是	是	是	是	是	是
国家固定	是	是	是	是	是	是
时间固定	是	是	是	是	是	是
N	1760	1760	1760	1760	1760	1760
R ²	0.969	0.929	0.972	0.937	0.970	0.930

注: *** P<0.01; 括号内数值为标准误。

准误差方法重新估计回归,结果见表5列(5)和列(6)。结果表明数字经济发展及其平方项的系数与显著性均无变动,证实了前文结果的稳健性。

第四,内生性检验。鉴于可能存在遗漏变量和逆向因果产生的误差,模型估计结果可能存在内生性问题。为此,选取滞后一期的数字经济指数及其二次项作为工具变量,采用两阶段最小二乘法进行估计。一方面,滞后项与当前数字经济发展水平具有较高的相关性,符合工具变量的强相关性要求;另一方面,滞后项与当前误差项之间不存在直接因果关系,且与当前碳排放量和碳生产

率相关度不高,在理论上满足工具变量外生性的假设。回归结果见表6。表6列(1)和列(2)为第一阶段回归结果,工具变量回归系数均显著,且F值均大于10,拒绝了弱工具变量的原假设,说明工具变量选择合理。此外,尽管该模型为刚性识别(工具变量数量等于内生变量数量),无法进行识别检验,但滞后变量作为工具变量的理论逻辑得到广泛支持^[42]。表6列(3)和列(4)第二阶段回归结果中数字经济指数及其平方项的方向与显著性均与基准回归结果一致,说明不存在因遗漏变量和反向因果造成的内生性问题。



表6 内生性检验

变量	第一阶段		第二阶段	
	(1) dig	(2) dig ²	(3)ce	(4)cp
dig			15.838*** (1.777)	-15.595*** (1.399)
dig ²			-6.800*** (1.929)	8.217*** (1.178)
L. dig	0.896*** (0.020)	0.022 (0.021)		
L. dig ²	-0.050* (0.028)	0.851*** (0.042)		
常数项	-0.610*** (0.080)	-0.230*** (0.046)	-42.76*** (5.507)	-27.853*** (5.617)
控制变量	是	是	是	是
国家固定	是	是	是	是
时间固定	是	是	是	是
N	1760	1760	1760	1760
R ²	0.991	0.992	0.970	0.931
F	2026.24	764.63	—	—

注:* $P<0.10$,*** $P<0.01$;括号内数值为标准误。

4.4 异质性分析

4.4.1 数字经济的“降碳增效”效应因经济体经济发展水平而异

世界银行按图表集法将各国分为低收入、中低收入、中高收入和高收入经济体(按人均国民总收入计算)。根据世界银行2022年划分标准进行分组回归,结果见表7。结果表明数字经济对碳排放量和碳生产率的影响在不同收入水平的国家呈现显著的异质性。在中高和高收入国家,数字经济发展水平与碳排放量呈显著的倒“U”形关系,与碳生产率呈显著的“U”形关系,能够在后期有效实现“降碳增效”。在低收入和中低收入国家,数字经济的发展不足以对碳排放量和碳生产率产生显著的非线性影响。原因在于:一是各国处于不同的发展阶段,所面临的社会经济任务存在本质区别。对于中高和高收入国家而言,环境治理已成为现阶段的政策目标,同时具备将数字技术用于环境治理的动因和能力。相比之下,其余国家仍处于基础发展阶段,优先发展目标集中在就业保障、产业发展和基础设施建设等方面,环保目标往往在政策优先序中相对靠后。二是各国的制度质量直接影响了数字经济的实践应用。在中高和高收入国家中,环境保护制度较为成熟,数字技术被系统地引入到碳排放监管、清洁生产监测等政策工具中,具有较强的制度承接能力。而在低收入和中低收入国家,环境政策体系不健全,行政资源有限,导致数字工具即使存在,也难以落地于治理实践。

4.4.2 数字经济的“降碳增效”效应随国家资源丰裕度不同而有所差异

通过一国初级资源密集型商品在其出口中的占比来衡量各国自然资源的丰裕程度并进行分组检验。当一国的比例高于观察期内样本国家的平均水平(21.32%)时,则被视为资源丰裕国家,否则为非资源丰裕国家。异质性检验结果见表8。结果表明:非资源丰裕国家分组中,数字经济的发展与碳排放量呈显著的倒“U”形关系,与碳生产率呈显著的“U”形关系;而资源丰裕国家分组中,数字经济与碳排放量、碳生产率之间不存在显著非线性关系。可能的原因在于,资源丰裕的国家由于长期依赖初级资源的开采和出口,在发展过程中逐渐形成了对资源产业的高度依赖。这种依赖不仅体现在财政收入和投资方向上,同时也影响了环境监管的力度、企业的技术选择以及整体的治理方式。在这种背景下,数字经济发展往往难以顺利融入以资源为核心的产业体系,很难发挥助推绿色转型的作用,不易实现“降碳增效”。

4.5 作用机制分析

分步回归检验数字经济的“降碳增效”机制,结果见表9。其一,数字经济通过促进技术创新实现“降碳增效”。表9列(1)表明,数字经济对技术创新的影响在1%的水平上显著为正,表明前者对后者产生促进效应。列(2)表明,技术创新系数在10%显著水平下为负值,且数字经济及其平方项的系数均显著,表明技术创新在数字经济对碳排放的影响中起“促减”作用。同理,列(3)表

表7 收入水平的异质性检验

变量	低收入经济体		中等收入经济体		中高和高收入经济体	
	(1)ce	(2)cp	(3)ce	(4)cp	(5)ce	(6)cp
dig	9.028 (9.152)	51.502 (32.770)	-0.587 (3.391)	-2.334 (3.059)	16.250*** (1.422)	-14.420*** (0.990)
dig ²	-104.844 (154.894)	-980.021* (554.609)	3.442 (7.434)	4.760 (6.707)	-8.077*** (1.979)	7.668*** (1.377)
常数项	5.983 (8.535)	79.380** (30.561)	-47.312*** (5.305)	-2.541 (4.787)	-42.581*** (6.824)	-35.107*** (4.750)
控制变量	是	是	是	是	是	是
国家固定	是	是	是	是	是	是
时间固定	是	是	是	是	是	是
N	80	80	422	422	1 258	1 258
R ²	0.887	0.751	0.921	0.694	0.962	0.928

注:* $P < 0.10$, ** $P < 0.05$, *** $P < 0.01$;括号内数值为标准误。世界银行2022年7月更新的最新标准是,人均国民总收入(GNI)低于1 085美元的经济体为低收入经济体,人均GNI在1 086美元至4 255美元为中等收入经济体,人均GNI在4 256美元至13 205美元为中高收入经济体,超过13 205美元为高收入经济体。本研究将中高收入经济体和高收入经济体合并为中高和高收入经济体。

表8 资源丰裕度的异质性检验

变量	资源丰裕国家		非资源丰裕国家	
	(1)ce	(2)cp	(3)ce	(4)cp
dig	2.564 (4.152)	1.279 (2.242)	14.071*** (1.442)	-14.857*** (1.100)
dig ²	29.624** (12.369)	-17.110** (6.678)	-6.505*** (1.933)	9.166*** (1.474)
常数项	-26.266** (10.270)	-16.532*** (5.545)	-51.744*** (5.836)	-24.052*** (4.450)
控制变量	是	是	是	是
国家固定	是	是	是	是
时间固定	是	是	是	是
N	540	540	1 220	1 220
R ²	0.981	0.932	0.965	0.928

注:** $P < 0.05$, *** $P < 0.01$;括号内数值为标准误。

明,技术创新在数字经济对碳生产率的影响中起“促增”作用。研究假设H2得以验证。其二,数字经济通过提升政府治理效能实现“降碳增效”。表9列(4)表明,数字经济对政府治理效能的影响在10%的水平上显著为正,表明前者对后者产生提升作用。列(5)表明,政府治理效能系数在1%显著水平下为负值,且数字经济及其平方项的系数均显著,表明政府治理效能促进了数字经济的减排效应。同理,列(6)表明,政府治理效能对数字经济的碳生产率效应中起促进作用。证明研究假设H3成立。

4.6 调节效应分析

截至观测期结束,多数国家的数字经济发展水平仍未超越拐点进入“降碳增效”阶段,驱动各国尽快通过数字经济发展实现“降碳增效”是重要问题。根据理论分析,将清洁能源结构与产业结构升级纳入模型,探索二者在数字经济“降碳增效”效应中的调节作用。参考Haans

等^[41]的研究,主要从拐点位移和曲线斜率变化两方面识别清洁能源结构和产业结构升级的调节效应。根据表10列(1)和列(3)的估计结果计算得出 $\theta_1\theta_5 - \theta_2\theta_4 > 0$ 且 $\theta_5 > 0$,即清洁能源结构和产业结构升级均会导致数字经济发展与碳排放量之间的倒“U”形曲线拐点向右平移,并使曲线变得更加平滑,弱化了倒“U”形效应。这表明,清洁能源结构和产业结构的优化不仅能够延缓达到碳排放峰值的时间(拐点右移),还使得碳排放量的上升过程变得更加缓慢(曲线平滑)。同理,依据表10列(2)和列(4)的估计结果计算得出 $\theta_1\theta_5 - \theta_2\theta_4 > 0$ 且 $\theta_5 < 0$,即在清洁能源结构和产业结构升级的影响下,数字经济发展与碳生产率之间的“U”形曲线拐点向右平移,且曲线变平缓,弱化了“U”形效应。这意味着,各国数字经济发展需要达到更高水平才能促使碳生产率达到最优值(拐点右移),并且在清洁能源结构和产业结构的优化下,碳生产率的提升



表9 作用机制分析

变量	技术创新			政府治理效能		
	(1)tec	(2)ce	(3)cp	(4)ef	(5)ce	(6)cp
dig	1.702*** (0.486)	14.888*** (1.172)	-13.735*** (0.858)	0.294* (0.175)	15.320*** (1.172)	-13.833*** (0.863)
dig ²		-6.396*** (1.687)	7.670*** (1.236)		-7.168*** (1.687)	7.967*** (1.242)
tec		-0.069* (0.036)	0.062** (0.026)			
ef					-0.427*** (0.100)	0.144* (0.073)
常数项	4.078 (3.142)	-42.532*** (4.649)	-22.413*** (3.406)	-4.869*** (1.133)	-45.152*** (4.658)	-21.361*** (3.429)
控制变量	是	是	是	是	是	是
国家固定	是	是	是	是	是	是
时间固定	是	是	是	是	是	是
N	1760	1760	1760	1760	1760	1760
R ²	0.971	0.970	0.930	0.911	0.970	0.930

注:* P<0.10,** P<0.05,*** P<0.01;括号内数值为标准误。

表10 调节效应分析

变量	清洁能源结构		产业结构升级	
	(1)ce	(2)cp	(3)ce	(4)cp
dig	18.798*** (2.808)	-18.034*** (2.107)	9.338*** (1.856)	-11.694*** (1.382)
dig ²	-29.712*** (4.922)	22.312*** (3.694)	-17.355*** (3.579)	13.265*** (2.665)
es	-0.768*** (0.145)	0.278** (0.109)		
dig×es	-3.507*** (1.020)	2.824*** (0.765)		
dig ² ×es	11.717*** (1.936)	-6.853*** (1.453)		
ind			-0.391*** (0.095)	0.146** (0.071)
dig×ind			1.413* (0.838)	-0.373 (0.624)
dig ² ×ind			6.875*** (1.854)	-3.444** (1.380)
常数项	-23.334*** (4.974)	-29.499*** (3.733)	-39.615*** (4.748)	-23.314*** (3.535)
控制变量	是	是	是	是
国家固定	是	是	是	是
时间固定	是	是	是	是
N	1760	1760	1760	1760
R ²	0.973	0.934	0.971	0.931

注:* P<0.10,** P<0.05,*** P<0.01;括号内数值为标准误。

过程更加稳健,即碳生产率增长的波动性降低(曲线平滑)。证明研究假设H4成立。

4.7 进一步讨论:空间溢出效应

4.7.1 数字经济对碳排放量、碳生产率影响的空间相关性检验

数字经济作为推动全球经济发展的重要力量,不仅在单一国家内部产生深远影响,还可能通过跨国合作、技术传播和贸易网络等途径影响其他国家。因此,讨论数字经济对碳排放量、碳生产率影响的空间溢出效应变得尤为重要。在考察全球数字经济发展对碳排放、碳生产率的空间溢出效应之前,采用经济距离矩阵构建空间权重矩阵,通过 Moran 指数检验空间自相关性,以考察一国数字经济、碳排放量和碳生产率是否受到其他国家的影响,检验结果见表 11。结果表明 2003—2022 年各国数字经济发展水平、碳排放量和碳生产率的 Moran 指数在 1% 水平上显著为正,说明各国之间的数字经济发展水平、碳排放量和碳生产率均存在空间相关性。

4.7.2 数字经济对碳排放量、碳生产率影响的空间溢出效应

通过比较 LM 检验、Hausman 检验和 LR 检验结果,最终选择采用个体和时间双固定的空间杜宾模型进行分析。基于模型(13)构建空间杜宾模型检验全球数字经济发展对碳排放量、碳生产率影响的空间溢出效应,回归结

果见表 12。

由表 12 列(1)可知,数字经济一次项系数显著为正值,二次项系数显著为负值,表明数字经济与碳排放量之间均存在显著的倒“U”形关系。列(2)—列(4)为全球数字经济对碳排放量影响的空间效应分解结果。全球数字经济发展的直接效应显著,而一国数字经济发展对经济发展水平相近国家的碳排放产生的非线性间接效应较弱,仅通过外溢效应对其他国家的碳排放产生了正向影响。这是因为数字经济快速发展国家的经济活动可能会通过贸易和投资等渠道影响其他国家,进而导致这些国家的碳排放上升。

由表 12 列(5)可知,数字经济一次项系数显著为负值,二次项系数显著为正值,说明数字经济与碳生产率之间均存在显著的“U”形关系。列(6)—列(8)为全球数字经济对碳生产率影响的空间效应分解结果,显示数字经济的间接效应不显著,这是因为在各国间数字经济水平差异较大的背景下,其他国家可能未能迅速受益于数字技术的生产效率提升。

5 结论与政策建议

5.1 结论

基于经济高质量发展要求与“双碳”目标,本研究立足数字时代背景,把握数字经济新增长点,统合国际经

表 11 数字经济、碳排放量和碳生产率的 Moran 指数

年份	数字经济		碳排放量		碳生产率	
	Moran's I	Z	Moran's I	Z	Moran's I	Z
2003	0.425***	6.969	0.456***	7.481	0.356***	6.184
2004	0.445***	7.269	0.436***	7.196	0.366***	6.351
2005	0.434***	7.083	0.431***	7.115	0.369***	6.380
2006	0.432***	7.049	0.428***	7.056	0.370***	6.412
2007	0.402***	6.606	0.435***	7.141	0.356***	6.243
2008	0.372**	6.166	0.430**	7.061	0.362***	6.329
2009	0.325**	5.422	0.435**	7.152	0.375***	6.539
2010	0.311***	5.205	0.440***	7.222	0.358***	6.295
2011	0.289***	4.890	0.421***	6.906	0.355***	6.285
2012	0.276***	4.691	0.436***	7.126	0.355***	6.246
2013	0.235***	4.092	0.435***	7.118	0.356***	6.209
2014	0.219***	3.877	0.441***	7.219	0.350***	6.156
2015	0.185***	3.324	0.462***	7.541	0.341***	5.969
2016	0.162***	2.974	0.455***	7.419	0.337***	5.843
2017	0.146***	2.702	0.459***	7.470	0.333***	5.783
2018	0.125***	2.373	0.428***	6.981	0.330***	5.748
2019	0.111**	2.160	0.432***	7.045	0.348***	6.020
2020	0.094**	1.852	0.414***	6.768	0.339***	5.899
2021	0.110**	2.148	0.427***	6.964	0.337***	5.860
2022	0.072**	1.496	0.314***	5.161	0.218***	3.795

注:** $P < 0.05$, *** $P < 0.01$ 。



表12 空间溢出效应检验结果

变量	ce				cp			
	(1)空间效应	(2)直接效应	(3)间接效应	(4)总效应	(5)空间效应	(6)直接效应	(7)间接效应	(8)总效应
dig	11.902*** (10.821)	11.850*** (10.655)	20.384** (2.440)	32.234*** (4.050)	-10.012*** (-10.322)	-10.025*** (-10.351)	-3.188 (-1.200)	-13.213*** (-5.300)
dig ²	-4.647*** (-3.041)	-4.710*** (-3.282)	-11.979 (-0.801)	-16.689 (-1.133)	5.565*** (4.550)	5.446*** (4.781)	-6.331 (-1.320)	-0.885 (-0.194)
W×dig	23.167** (2.400)				-2.849 (-1.102)			
W×dig ²	-12.254 (-0.750)				-5.958 (-1.260)			
控制变量	是	是	是	是	是	是	是	是
国家固定	是	是	是	是	是	是	是	是
时间固定	是	是	是	是	是	是	是	是
LM-Lag		203.393***				61.519***		
Robust LM-lag		0.004				17.335***		
LM-error		370.548***				44.429***		
Robust LM-error		167.160***				0.245		
LR-SDM-SAR		68.690***				45.890***		
LR-SDM-SER		73.130***				51.270***		
Hausman		42.582***				54.640***		
N		1760				1760		
R ²		0.338				0.335		

注:** $P < 0.05$, *** $P < 0.01$;括号内数值为标准误。

验,探索识别通过数字经济发展实现“降碳增效”目标的方法和路径,为发展新质生产力、在国际竞争中强化核心竞争力探索可行之道。本研究运用熵值法测度88个国家2003—2022年的数字经济发展水平,对样本国家数字经济是否、如何实现“降碳增效”的问题进行了系统考察。主要结论如下:第一,全球数字经济发展呈现加速发展趋势,碳排放的削减进展相对缓慢,而碳生产率的提升幅度则较为明显。第二,数字经济增长对碳排放量和碳生产率的影响分别呈现显著的倒“U”形和“U”形关系,拐点值分别为1.146和0.884。其中,在中高和高收入国家及资源依赖度较低的国家,数字经济发展水平与碳排放量呈显著的倒“U”形关系,与碳生产率呈显著的“U”形关系。第三,机制检验发现,技术创新和政府治理效能的提升是数字经济最终实现“降碳增效”目标的有效路径。此外,清洁能源结构与产业结构升级可显著促进数字经济“降碳增效”效应的发挥,二者均能使曲线拐点右移并削弱非线性倒“U”形或“U”形效应,表明在产业升级和能源转型的支撑下,数字经济能够更早进入“降碳增效”的良性发展轨道。第四,全球数字经济对碳排放存在显著的空间相关性。空间杜宾模型的回归结果显示,数字经济对经济发展水平相近国家的碳排放具有空间溢出效应,且相较于数字经济产生的溢出效应,数字经济对本国碳排放的直接效应更加明显。

5.2 政策建议

为助力数字经济“降碳增效”效应的发挥,依据实证研究结果,提出如下政策建议。

5.2.1 加快推动数字经济发展,促进“降碳”与“增效”双重拐点的达成

研究表明,数字经济与“碳排放”和“碳生产率”的关系分别呈现倒“U”形与“U”形关系,当前我国正处于迈向“双重拐点”的关键阶段。加快推进数字经济发展,不仅是我国实现高质量发展的根本路径,更是我国尽早突破发展瓶颈的重要出路。数字经济的发展是涵盖制度设计、基础设施建设、企业转型和社会支持的系统工程。一要完善发展规划和政策体系,构建有利于数字经济的宏观环境。中国应进一步发挥全球数字经济发展的领先优势,确保数字技术应用水平不断提升。二要加速数字基础设施建设,夯实技术支撑平台。推动数字化转型与技术创新并重,确保技术与数据安全同步推进。三要通过政策支持推动企业的数字化创新和转型,特别是推动传统行业的数字化进程,缩短瓶颈期。

5.2.2 坚持“降碳”与“增效”并重的发展理念,推动高质量发展战略落地

“降碳增效”是贯彻新发展理念的内在要求,“降碳”与“增效”是相辅相成、不可割裂的一个问题的两个方面。从本质上看,“降碳”是发展方式转型的体现,标志着从传

统发展模式向高质量发展方式的转变,而“增效”则是“降碳”进程中生产效率和资源利用率提升。在实践中,应对二者进行完整理解与统筹把握。当前我国数字经济虽具备一定的先发优势,但整体仍处于迈向“降碳增效”良性循环的过渡期。在处理数字经济发展与“降碳增效”之间关系时,应始终坚持把二者有机统一起来。同时,在实践中要加速产业升级和能源绿色转型,推动我国数字经济能够更早进入“降碳增效”的良性发展轨道。

5.2.3 加速技术创新和政府治理效能提升,增强高质量发展中的比较优势

研究表明,技术创新和政府治理效能的提升是数字经济最终实现“降碳增效”目标的有效路径。党的十八大以来,我国制度优势不断显现,创新能力持续增强。在当前全面推进高质量发展的时代背景下,更应充分发挥制度优势,优化政府职能配置与服务效率。同时,加快科技创新体系建设,强化关键核心技术突破,为我国高质量发展新阶段中长期性、可持续性的比较优势提供坚实支撑。

参考文献

[1] 徐映梅,李坤. 我国数字经济融合特征及其变化趋势分析[J]. 统计研究,2025,42(1):61-74.

[2] 赵晓阳,衣长军,郭敏敏. 数字经济发展能否“稳外资”[J]. 经济评论,2023(2):31-42.

[3] 李慧泉,简兆权. 数字经济发展对技术企业的资源配置效应研究[J]. 科学学研究,2022,40(8):1390-1400.

[4] 王军,王杰. 城市数字化转型与“减污降碳”协同增效[J]. 城市问题,2024(2):46-56.

[5] 韩先锋,李佳佳. 数字金融发展的动态减污降碳效应:基于二元环境约束的新视角[J]. 中国地质大学学报(社会科学版),2024,24(5):102-116.

[6] 李璋,胡佳霖,王熙. 全球视域下数字经济发展的碳减排效应及其作用机制[J]. 中国人口·资源与环境,2024,34(8):3-12.

[7] 金贵朝,王国梁,何怡然. 数字化水平、产业结构调整与区域碳减排[J]. 统计与决策,2023,39(3):27-32.

[8] 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.

[9] XUE Y, TANG C, WU H T, et al. The emerging driving force of energy consumption in China: does digital economy development matter[J]. Energy policy, 2022, 165: 112997.

[10] AVOM D, NKENGFAK H, FOTIO H K, et al. ICT and environmental quality in sub-Saharan Africa: effects and transmission channels[J]. Technological forecasting and social change, 2020, 155: 120028.

[11] WANG B, WANG J D, DONG K Y, et al. Is the digital economy conducive to the development of renewable energy in Asia[J]. Energy policy, 2023, 173: 113381.

[12] 陈庆江,杨蕙馨,焦勇. 信息化和工业化融合对能源强度的影响:基于2000—2012年省际面板数据的经验分析[J]. 中国人

口·资源与环境,2016,26(1):55-63.

[13] 许恒,张一林,曹雨佳. 数字经济、技术溢出与动态竞合政策[J]. 管理世界,2020,36(11):63-84.

[14] BAI L, GUO T R, XU W, et al. Effects of digital economy on carbon emission intensity in Chinese cities: a life-cycle theory and the application of non-linear spatial panel smooth transition threshold model[J]. Energy policy, 2023, 183: 113792.

[15] YANG Z, GAO W J, HAN Q, et al. Digitalization and carbon emissions: how does digital city construction affect China's carbon emission reduction[J]. Sustainable cities and society, 2022, 87: 104201.

[16] 江红莉,胡文杰,陈庭强. 信息消费试点政策对提升城市碳生产率的影响机制及空间溢出效应研究[J]. 现代财经(天津财经大学学报),2024,44(11):39-55.

[17] 彭文斌,曹笑天. 数字基础设施建设对城市碳生产率的影响研究:来自“宽带中国”的经验证据[J]. 经济纵横,2024(8):94-105.

[18] 陈洪波,张骁潇. 国家大数据综合试验区如何促进城市绿色转型:基于碳排放量增速和碳生产率增幅的双重视角[J]. 中国软科学,2024(11):172-188.

[19] DU K R, LI J L. Towards a green world: how do green technology innovations affect total-factor carbon productivity[J]. Energy policy, 2019, 131: 240-250.

[20] 李海燕,王群勇,陆凤芝. 数字经济如何影响工业碳生产率:基于技术进步偏向视角[J]. 财经科学,2024(8):116-134.

[21] 武赫,周雯琪. 高质量与共享发展视角下数字经济对区域协调发展的影响[J]. 经济问题,2025(2):121-129.

[22] 黄宇宁. 数字经济、低碳技术创新与全要素碳生产率[J]. 技术经济与管理研究,2023(8):26-32.

[23] 袁淳,肖土盛,耿春晓,等. 数字化转型与企业分工:专业化还是纵向一体化[J]. 中国工业经济,2021(9):137-155.

[24] 缪陆军,陈静,范天正,等. 数字经济发展对碳排放的影响:基于278个地级市的面板数据分析[J]. 南方金融,2022(2):45-57.

[25] 齐绍洲,林岫,崔静波. 环境权益交易市场能否诱发绿色创新:基于我国上市公司绿色专利数据的证据[J]. 经济研究,2018,53(12):129-143.

[26] 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.

[27] 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.

[28] 李治国,王杰. 数字经济发展、数据要素配置与制造业生产率提升[J]. 经济学家,2021(10):41-50.

[29] GROSSMAN G M, KRUEGER A B. environmental impacts of a North American free trade agreement [R]. New York: NBER working papers series, 1991: 1-57.

[30] 孙晋. 数字平台的反垄断监管[J]. 中国社会科学,2021(5):101-127.

[31] ACEMOGLU D, AGHION P, BURSZTYN L, et al. The environment and directed technical change[J]. American economic review, 2012, 102(1): 131-166.



- [32] 吴传清,邓明亮. 数字经济发展对中国工业碳生产率的影响研究[J]. 中国软科学,2023(11):189-200.
- [33] SALAHUDDIN M, ALAM K, OZTURK I. The effects of Internet usage and economic growth on CO₂ emissions in OECD countries: a panel investigation [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*,2016,62:1226-1235.
- [34] 林伯强,姚昕,刘希颖. 节能和碳排放约束下的中国能源结构战略调整[J]. 中国社会科学,2010(1):58-71.
- [35] 陈国亮,陈建军. 产业关联、空间地理与二三产业共同集聚:来自中国212个城市的经验考察[J]. 管理世界,2012,28(4):82-100.
- [36] KAYA Y, YOKOBORI K. *Environment, energy, and economy: strategies for sustainability* [M]. Tokyo: United Nations University Press,1997.
- [37] SHAHBAZ M, WANG J D, DONG K Y, et al. The impact of digital economy on energy transition across the globe: the mediating role of government governance[J]. *Renewable and sustainable energy reviews*,2022,166:112620.
- [38] 王军,朱杰,罗茜. 中国数字经济发展水平及演变测度[J]. 数量经济技术经济研究,2021,38(7):26-42.
- [39] 杨连星,王秋硕,韩彩霞. 数字贸易与跨国并购影响研究:理论机理与中国证据[J]. 数量经济技术经济研究,2024,41(3):112-130.
- [40] 陈胤默,王喆,张明,等. 全球数字经济发展能降低收入不平等吗[J]. 世界经济研究,2022(12):118-132.
- [41] HAANS R F J, PIETERS C, HE Z L. Thinking about U: theorizing and testing U-and inverted U-shaped relationships in strategy research [J]. *Strategic management journal*,2016,37(7):1177-1195.
- [42] 韦庄禹. 数字经济发展对制造业企业资源配置效率的影响研究[J]. 数量经济技术经济研究,2022,39(3):66-85.

“Carbon reduction and efficiency enhancement” effects of the digital economy and their realization pathways: an empirical study of 88 countries

JIANG Ling, HU Jialin, ZHANG Zilve

(School of Government, Central University of Finance and Economics, Beijing 100081, China)

Abstract As the “dual carbon” goals become deeply embedded in the national development framework, the digital economy has emerged as a key driver of green transformation and high-quality growth. Building upon its role in carbon reduction, increasing attention has been paid to the effects of the digital economy in simultaneously reducing carbon emissions and improving efficiency. Exploring the internal logic linking digital economy development and high-quality growth carries significant theoretical and practical value. This study constructed a panel dataset of 88 countries from 2003 to 2022 to evaluate the “carbon reduction and efficiency enhancement” effect of digital economy development from two dimensions: carbon emissions and carbon productivity. The main findings were as follows: ① Under the international comparative framework, the digital economy exhibited a pronounced stage-based effect: its impact on carbon emissions followed an inverted U-shaped relationship (with a turning point at 1.146), while its impact on carbon productivity followed a U-shaped relationship (with a turning point at 0.884). ② Heterogeneity analysis indicated that the “carbon reduction and efficiency enhancement” effects of the digital economy were more pronounced in upper-middle-income, high-income, and resource-independent economies. ③ Mechanism analysis revealed that the digital economy indirectly affected carbon emissions and carbon productivity through promoting technological innovation and enhancing government governance capacity. ④ Optimization of the energy consumption structure and upgrading of the industrial structure played a moderating role in the “carbon reduction and efficiency enhancement” process, helping to stabilize the nonlinear effect and delay the emergence of turning points. ⑤ The digital economy also had a nonlinear spatial spillover effect on the carbon emissions of countries with similar levels of economic development, although the effect was weaker than its impact within the country. In light of these findings, this study suggests adhering to a development paradigm in which the digital economy leads the “carbon reduction and efficiency enhancement” process. It advocates for advancing the turning point earlier and smoothing the emission-efficiency trajectory, achieving a coordinated improvement in both carbon reduction and productivity. Efforts should also be made to enhance digitalization and accelerate the development of the digital economy through multiple channels.

Key words digital economy; carbon reduction and efficiency enhancement; carbon emissions; carbon productivity

(责任编辑:李 琪)