

数实融合促进绿色全要素生产率提升研究

张自然,海梅红

(中国社会科学院经济研究所,北京 100836)

(中国社会科学院大学经济学院,北京 102488)

摘要:数字经济与实体经济深度融合是我国建设现代化经济体系的重要着力点和推动绿色发展的新动能。在构建数实融合影响绿色发展的数理模型基础上,利用2012—2022年全国281个城市的相关数据,系统评估数实融合对绿色全要素生产率的影响及其作用机制。研究发现:数实融合显著促进了绿色全要素生产率提升,并通过激励技术创新、提升人力资本水平和改善产业结构助力绿色全要素生产率提升;数实融合对绿色全要素的促进作用在东部地区、南部地区、中心城市、省会城市、政府数字化关注度高的城市和知识产权发展指数高的城市更为突出。因此,应进一步优化数实融合环境,完善绿色技术创新发展机制,提供高质量的人力资本支持,以有力推动数实融合发展和绿色发展。

关键词:数实融合;绿色发展;绿色全要素生产率;数字技术

中图分类号:F49

文献标识码:A

文章编号:1007-7685(2025)03-0054-12

DOI:10.16528/j.cnki.22-1054/f.202503054

随着迈入高质量发展阶段,我国经济社会面临新的问题和挑战,如资源短缺、生产效率偏低等。依赖传统生产力和常规资源要素投入已经不能满足日益增长的市场需求和生产需求。由技术革命性突破、生产要素创新性配置、产业深度转型升级而催生的新质生产力,为新时代新征程上我国经济高质量发展注入新动力。数字经济不仅是新质生产力发展的动力,也是其发展的必然产物。^[1]实体经济是现代化产业体系的重要组成部分,是建设社会主义现代化国家的根基。数字经济通过与实体经济深度融合,赋能传统产业转型升级,催生新产业、新业态、新模式。党的二十大报告提出,“加快发展数字经济,促进数字经济和实体经济深度融合”^[2]。党的二十届三中全会通过的《中共中央关于进一步全面深化改革 推进中国式现代化的决定》提出,“健全促进实体经济和数字经济深度融合制度。”^[3]数字经济逐渐成为创新和增长的新引擎,为实体经济带来发展机遇,实体经济也为数字经济提供了数据和技术创新支持^[4]。在新一轮科技革命和产业变革的背景下,数字经济与实体经济深度融合对于经济绿色发展起到积极作用。基于此,如何通过数字经济和实体经济融合促进绿色发展,是当前我国学术界和实务部门重点关注的问题之一。

一、文献综述

(一)数实融合的内涵界定及测度

数字经济概念被提出以来,受到理论界和实践界的广泛关注,内涵界定日益完善。数字经济不仅

作者简介:张自然,中国社会科学院经济研究所研究员;海梅红,中国社会科学院大学经济学院博士研究生。

包含数字部门,还涵盖所有以数字为基础的经济活动,^[5]即数字经济与实体经济融合部分,着重强调数字技术向其他产业的渗透和应用^[6]。已有文献大多围绕数字技术来界定数实融合的内涵,即数实融合是将数字技术应用在实体经济中,形成数字经济和实体经济之间相互作用和良性循环的过程。如,郭晗等^[7]认为,数实融合是一种新兴业态,它依托于先进的数字化基础设施,以大数据为核心资源,以颠覆性创新为核心特征,并覆盖整个产业链。陈雨露^[8]认为,数字经济以数据作为核心生产资源,以数字技术为动力源泉,以现代通信网络为关键平台,通过将数字技术与实体经济紧密结合,持续提升社会经济的数字化、网络化和智能化程度,形成一种新型经济模式,从而加快推动经济发展和治理结构转型。数实融合的主要表现形式包括:一是数字经济自身的发展,即数字产业化,为推进产业数字化转型提供了关键的技术支撑和基础整合环境^[9];二是数字经济通过增强、优化和转型传统实体经济,实现了产业的数字化进程,即产业数字化,产业数字化不仅是推动数实融合的“主战场”,还是数实融合在产业层面上的具体体现^[10]。

在数实融合水平测度方面,多数研究基于熵权—耦合评价模型来测度。如,郭晗等^[7]利用熵权—耦合评价模型,从数字经济角度选取数字化、网络化、智能化、平台化四个指标,从实体经济角度选取发展规模、市场环境、经济效益、发展潜力四个指标,构建了数实融合水平的评价体系。张帅等^[11]采用熵值法,从数字经济基础、数字化应用、数字产业发展和实体经济发展规模、结构、潜力维度度量了数实融合水平。

(二)数实融合与绿色发展

数字经济具有高技术含量、低环境成本等特点,其与实体经济深度融合,在极大提高资源配置效率的同时还能改善环境。数实融合可推动企业实施绿色供应链管理,促使供应商和产业链合作伙伴转变运营模式,提高工作效率和企业决策效率,减少资源消耗,提升资源使用效率。现有研究主要从宏观和微观两个层面对数实融合与绿色发展的关系进行研究。在宏观层面,史丹等^[12]基于我国2011—2020年省际面板数据实证检验数实融合对绿色创新的影响和作用机制,结果表明,我国数实融合仍然处于低度融合阶段,但其对绿色创新具有显著正向影响,并可通过扩大研发投入规模和技术市场交易规模促进绿色创新。崔琳昊等^[13]利用2011—2019年我国270个城市数据,分析了数实融合与城市绿色发展间的关系,结果表明,数实融合通过推动产业结构升级和技术进步,促进城市产出增长、资源投入优化和治理效能提升,从而有助于城市绿色发展。在微观层面,宋德勇等^[14]考察了重污染行业企业数字化对绿色技术创新的影响,并运用上市公司专利申请明细数据对微观作用机制进行探讨与检验,结果表明,高污染行业的企业通过数字化转型能显著推动绿色技术革新,企业数字化主要通过增强信息交流和知识整合能力,进而促进绿色技术创新。郭丰等^[15]的研究表明,企业数字化转型提升了绿色技术创新数量和质量,并通过优化人力资本结构、提升产学研合作水平促进了企业绿色技术创新数量和质量提升。

目前,关于数字经济与实体经济融合的研究大多聚焦于规范性分析,少数文献探讨量化评估和实证因果分析;关于数实融合对绿色发展的影响,较少有从城市视角出发进行研究,对这一融合过程背后深层次机制的探讨也相对缺乏。基于此,本文通过构建数实融合影响经济增长和绿色发展的数理模型,利用2012—2022年全国281个城市的相关数据,测度数实融合对绿色全要素生产率(TFP)的影响,进而为城市实现绿色和高质量发展提供支撑。

二、理论分析与研究假设

(一)数实融合对绿色全要素生产率的影响

数实融合不仅提升了传统生产要素的使用效率,还创造了新的生产要素——数据,数据作为新型

生产要素,具有非竞争性、外部性和乘数作用。实体经济通过数据驱动智能化生产管理,重塑了生产力的内在结构。

为了探究数实融合对绿色发展的影响及其作用机制,将数据要素引入局部均衡模型进行分析。假设企业生产只需劳动(L)、资本(K)和数据(D)三种生产要素,企业在生产过程中将排放二氧化碳(E)造成社会环境损失(S)。如果企业利用数据进行生产,那么数字技术和数据要素渗透实体经济的生产过程,可以代表数实融合,企业的生产函数设定为:

$$Y = L^\alpha K^\beta D^{1-\alpha-\beta} \quad (1)$$

其中, α 和 β 分别表示劳动要素和资本要素的弹性系数,取值范围为 $(0,1)$,且 $0 < \alpha + \beta \leq 1$ 。在数字经济与实体经济深度融合过程中,实体企业可以利用数字技术和数据要素变革高污染、高能耗的粗放式生产模式,提高能源利用效率,降低污染排放量。假设碳排放量与总产出之间的关系为:

$$E = \pi(\theta, A, I, H)Y \quad (2)$$

其中, E 为碳排放总量, $\pi(\theta, A, I, H)$ 为碳排放系数,是治理支出(θ)、技术水平(A)、产业结构(I)和人力资本(H)的函数。 $\frac{\partial \pi}{\partial A} < 0$,意味着企业技术水平越高,碳排放系数越小; $\frac{\partial \pi}{\partial I} < 0$,在企业层面意味着企业生产结构越合理,碳排放系数越小,在宏观层面意味着城市产业结构越合理,碳排放系数越小; $\frac{\partial \pi}{\partial H} < 0$,意味着企业的人力资本水平越高,越有可能精细化生产,碳排放系数越小。实体经济的碳排放对环境造成一定损害,损害函数 $S(E)$ 取决于碳排放量。将绿色产出 Y^G 定义为:

$$Y^G = (1 - S)Y \quad (3)$$

数据要素对绿色产出的影响可由以下偏导数得出:

$$\frac{\partial Y^G}{\partial D} = \frac{\partial(1 - S)}{\partial D}Y + (1 - S)\frac{\partial Y}{\partial D} \quad (4)$$

当数据要素外生于技术创新、生产结构和人力资本时,即 $\frac{\partial(1 - S)}{\partial D} = 0$ 时,数据是总产出的重要投入要素之一, $\frac{\partial Y}{\partial D} = (1 - \alpha - \beta)L^\alpha K^\beta D^{-\alpha-\beta} > 0$,则有:

$$\frac{\partial Y^G}{\partial D} = (1 - S)\frac{\partial Y}{\partial D} > 0 \quad (5)$$

式(5)表明,数据要素的投入可以促进绿色产出。可见,数据资源融入实体经济,生成所需的信息与知识,实现资源配置的优化和重组,有助于提升实体经济的绿色生产,进而促进绿色全要素生产率(以下简称“绿色TFP”)的提升。基于此,提出如下假说:

H1:数实融合能够促进绿色TFP提升。

(二)数实融合影响绿色全要素生产率的路径

数实融合不仅有助于提升企业竞争力,也促进了整个产业的创新发展。首先,数字经济与实体经济的融合促进了产业的数字化升级,这种“同群效应”激发了行业内的竞争,激励企业采取差异化产品策略,增加研发投入,并在更广泛的层面提升产业创新能力。数实融合为企业提供了更广阔的技术创新空间和更多的创新资源,^[16]为了在市场中保持竞争力,企业会加大对绿色技术的研发投入,积极寻求节能减排、资源循环利用等方面的技术突破。此外,数字技术的应用还能够加速绿色技术的成果转化和推广应用。^[17]其次,数实融合促进产业协同创新与升级进而促进绿色发展。数实融合为不同主体如企业、高校和研究机构之间的合作提供了便利,强化了技术溢出效应,提升了产业创新效率。同时,数实融合打破了产业之间的信息壁垒,^[18]不仅促进了产业链上下游企业之间的协同创新,还推动了不同

产业之间的融合创新,催生了新的绿色产业形态和商业模式。最后,企业利用数字化转型的机会,实现成本的精准管理,使更多资金能够投入研发和创新活动中,进而形成可持续的生产方式,推动企业绿色发展,进而促进绿色 TFP 的提升。总体而言,数实融合通过促进技术创新,进而提高资源利用率,减少无谓损耗,建立起绿色企业管理机制。当企业的单位生产成本下降、单位产值提升、利润提升后,将有更大的动力进行创新,进而形成一个良性循环,提高企业的绿色 TFP。基于此,提出以下假说:

H2a:数实融合通过促进技术创新推动绿色 TFP 提升。

数实融合对于知识型劳动者的需求较大,尤其需要拥有丰富知识、精湛技能和创新能力的人才。首先,数实融合推动了劳动力技能变革,催生了更加符合社会发展需求的新型就业岗位。^[19]新的就业岗位、新的价值创造需求对员工提出了更高要求,要求他们具备跨学科技能和核心技术开发能力。数实融合促使人力资本在“干中学”中成长,企业为适应数字化转型的需求,会加大对员工的培训投入,提升员工的数字技能和创新能力,从而提高人力资本质量,为绿色发展奠定人才基础。其次,数实融合推动企业加大研发力度,激发了对高质量人才的需求。这不仅吸引了更多人才投身于相关领域,也促使现有人才不断提升自己的能力和素质,以满足企业的需求。而绿色发展需要特定的技能和知识,通过培训和教育,劳动者不断更新知识库以适应新工艺和新设备,实现人力资本结构的升级,^[20]进而为绿色发展提供有力支撑。最后,在数实融合过程中,人力资本的提升不仅体现在技能和知识的增长上,还体现在对绿色发展理念的认同和践行上。^[21]随着教育水平的提高和信息传播速度的加快,人们越来越关注环境保护和可持续发展,这种环保意识会逐渐渗透到企业的生产经营活动中。高素质的人力资本会积极推动企业采用绿色生产技术、开展节能减排活动,促进企业的绿色发展,从而提高绿色 TFP。总而言之,人力资本已成为推动经济持续发展不可或缺的要素,高素质人才的培育及其在特定区域或产业的大量汇聚,对于绿色发展具有至关重要的作用。基于此,提出如下假说:

H2b:数实融合通过改善人力资本水平助力绿色 TFP 提升。

数字经济与实体经济的融合不仅催生了新产业新业态,还为传统行业的现代化改造提供了有力支撑。首先,数实融合通过推动新兴产业崛起促进绿色发展。数实融合催生了云计算、互联网、人工智能等新兴产业,尤其是推动绿色、低碳、环保等新兴产业的兴起和发展。这些产业具有高附加值、低能耗、低污染的特点,其发展不仅为经济增长注入新动力,提高经济产出规模和质量,同时还减少了对传统高耗能、高污染产业的依赖,优化产业结构,进而提升了绿色 TFP。其次,数实融合通过推动传统产业数字化转型助力绿色发展。数字技术的应用能够降本增效,使传统产业在减少资源消耗和污染物排放的情况下,生产出更环保、更绿色的产品;数字化转型促使传统产业向高端化、精细化方向发展,促进了产业结构优化升级,提高了绿色 TFP;数字化生产管理系统的建设和应用,使生产过程更加智能化和精细化,企业能够根据市场需求和生产计划,精准调配资源,优化生产流程,同时减少因生产过程中的不合理操作导致的资源浪费和环境污染,进而促进绿色发展。最后,数实融合通过优化资源配置与提升利用效率促进绿色发展。随着数实融合推动产业结构升级,生产模式逐渐向资源节约型和循环利用型转变。在这一过程中,企业更加注重资源的高效利用和循环再生,通过采用先进的数字技术,对生产过程中的资源消耗进行实时监测和精准控制,减少了资源浪费,提高资源利用效率,为绿色 TFP 的提升奠定了基础。基于此,提出如下假说:

H2c:数实融合通过优化产业结构助力绿色 TFP 提升。

三、研究设计

(一)模型设定

为了探究数实融合对绿色 TFP 的影响,剔除数据缺失严重和时间跨度不匹配的城市样本,最终以

2012—2022 年我国 281 个城市为研究样本,并借鉴光辉^[22]的研究,构建如下计量模型:

$$GTFP_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 DR_{it} + \beta_i control_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \quad (6)$$

其中, i 表示城市、 t 表示年份,被解释变量 $GTFP_{it}$ 表示绿色 TFP,核心解释变量 DR_{it} 表示数实融合,控制变量 $control_{it}$ 包括城镇化水平、金融发展程度、对外开放程度、政府干预程度和市场规模, μ_i 表示城市固定效应, λ_t 表示时间固定效应, ε_{it} 表示随机误差项。本文重点关注待估参数 α_1 ,体现数实融合对绿色 TFP 的影响大小及方向。

(二) 变量选取

1. 绿色全要素生产率。借鉴吕祥伟等^[23]、彭小辉等^[24]的研究,绿色全要素生产率指标体系包括投入和产出两类指标。投入指标包括资本、劳动力和能源三种投入要素;产出指标包括期望产出实际 GDP (亿元)和非期望产出工业废水排放量、烟尘排放量、二氧化硫排放量(万吨),采用 DEA-Malmquist 方法测算。数据来源于历年《中国城市统计年鉴》和《中国能源统计年鉴》。

2. 数实融合。结合理论分析以及彭小辉等^[24]、赵涛等^[25]的研究,从数字经济与实体经济两个维度构建数实融合评价指标体系。数字经济发展水平从互联网普及率、互联网相关产出、移动互联网用户数、互联网相关从业人员数和数字普惠金融五个方面切入,实体经济发展水平从实体经济发展规模、实体经济发展结构和实体经济发展潜力三个方面切入,采用熵权—耦合协同模型对城市数实融合程度进行测度。数字普惠金融数据来源于北京大学数字金融研究中心和蚂蚁集团共同编制的“中国数字普惠金融指数”,其他变量均来自历年《中国城市统计年鉴》及统计局官方网站。具体指标选取见表 1。

表 1 数实融合评价指标体系

一级指标	二级指标	三级指标
数字经济发展水平	互联网普及率	每百人中互联网宽带接入用户数(户)
	互联网相关产出	人均电信业务总量(亿元/人)
	移动互联网用户数	每百人中移动电话用户数(户)
	互联网相关从业人员数	计算机服务和软件业从业人员占比(%)
	数字普惠金融	中国数字普惠金融指数
实体经济发展水平	实体经济发展规模	第二产业占 GDP 比重(%)
		规模以上工业企业利润总额(亿元)
		规模以上工业企业数量(个)
	人均社会消费品零售额(万元/人)	
	实体经济发展结构	实体经济从业人员占比(%)
实体经济发展潜力	规模以上工业 R&D 经费支出(万元)	

3. 控制变量。参考代新玲等^[26]的研究,选取城镇化率、金融发展、对外开放、政府干预、市场规模等作为控制变量。数据来源于 EPS 数据平台及历年《中国城市统计年鉴》,个别数据使用插值法计算。各控制变量的具体衡量方式及描述性统计见表 2。

四、实证结果分析

(一) 基准回归分析

数实融合对绿色 TFP 影响的结果如表 3 所示。(1)~(6)列是逐步加入控制变量的个体、时间双固定模型回归结果,结果表明数实融合对绿色 TFP 在 1% 的显著性水平上有明显的促进作用。实体经济与数字经济的深度融合是促进经济增长的核心力量,它不仅能够促进劳动者、劳动资料和劳动对象向更加环保的方向进行调整和提升,还有助于推动绿色技术的持续革新及其在各领域的广泛应用,进而促

进绿色TFP增长。以上结果验证了假说1,即数实融合促进了绿色TFP增长。

表2 变量定义及描述性统计

变量名称	变量说明	均值	标准差	最小值	最大值
绿色TFP	通过投入—产出法获得	0.316	0.170	0.000	1.912
数实融合	构建数实融合程度指标体系获得	0.004	0.009	0.000	0.161
城镇化率	城镇常住人口/总常住人口	0.576	0.149	0.181	1.178
金融发展	年末金融机构贷款余额/gdp	1.098	0.624	0.168	7.450
对外开放	进出口总额/gdp	0.172	0.276	0.000	2.491
政府干预	政府财政一般支出/gdp	0.202	0.102	0.044	0.916
市场规模	社会消费品零售总额/gdp	0.388	0.110	0.000	1.013

此外,城镇化率对绿色TFP有显著的抑制作用,可能的原因在于:随着城镇化的不断推进,导致人均消费水平、能源消费强度和交通运输能耗等急剧上升,城镇基础设施建设、生产、生活等领域也会需要大量能源,而这些能源主要是化石能源,^[27]这可能阻碍城市的绿色发展,更不利于绿色TFP的提升。政府干预对绿色TFP有负向作用,可能的原因在于:政府一般财政支出中经济性支出较多,而社会性支出和生态性支出相对较少,^[28]影响了绿色TFP增长。对外开放程度对绿色TFP具有明显的促进作用,加大对外开放可以推动本国企业与外来企业进行友好交流、技术合作,为企业绿色创新提供保障进而促进绿色TFP增长。市场规模对绿色TFP具有明显的促进作用,消费是经济增长的第一动力,扩大内需、扩大消费市场规模为绿色TFP增长提供重要支撑。

表3 基准回归结果

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
数实融合	4.027***(1.510)	4.025***(1.510)	4.020***(1.511)	4.009***(1.511)	3.979***(1.512)	3.955***(1.514)
城镇化率		-0.052***(0.002)	-0.051***(0.003)	-0.056***(0.003)	-0.058***(0.003)	-0.055***(0.003)
金融发展			-0.001(0.008)	0.000(0.008)	0.002(0.009)	0.002(0.009)
对外开放				0.031***(0.014)	0.033***(0.014)	0.032***(0.014)
政府干预					-0.068***(0.006)	-0.068***(0.006)
市场规模						0.011***(0.005)
个体固定	YES	YES	YES	YES	YES	YES
时间固定	YES	YES	YES	YES	YES	YES
_cons	0.362***(0.027)	0.360***(0.028)	0.361***(0.029)	0.357***(0.029)	0.368***(0.031)	0.363***(0.034)
N	3048	3048	3048	3048	3048	3048
R ²	0.4642	0.4642	0.4642	0.4645	0.4647	0.4647

注:***、**、*分别表示在1%、5%、10%的水平下显著,括号内为稳健的标准误。下同。

(二)稳健性与内生性检验

考虑到数实融合与城市绿色TFP可能存在双向因果关系,即并非数字经济与实体经济的融合带来绿色TFP的增长,而是绿色TFP高的城市更能吸引数字经济与实体经济相融合,为此,采用下一年度的数实融合水平作为核心解释变量进行稳健性检验,控制变量与基准回归完全一致,其回归结果见表4(1)列。为了进一步验证基准回归的稳健性,采用更换控制变量法进行回归。具体来说,用年末金融机构贷款余额与GDP的比值衡量金融发展,用社会消费品零售总额的对数衡量市场规模,其回归结果如表4(2)列所示。表4的前两列均显示数实融合对绿色TFP有促进作用,与基准回归结果一致。

考虑到可能存在的内生性问题,使用1984年城市每百万人邮局数和1984年城市每百人固定电话

数^[29]作为数实融合的工具变量。工具变量与数实融合的相关性在于,历史上的电信基础设施能够影响后续互联网技术的发展,从而影响当今数实融合程度;工具变量与绿色 TFP 的外生性在于,1984 年的邮局数和固定电话数量不会直接影响 2012—2022 年的城市绿色 TFP。考虑到 1984 年的邮局与固定电话数为截面数据,将其与时间趋势交互生成数实融合的工具变量。表 4(4)列是两阶段最小二乘法(2SLS)的第二阶段,结果仍显示数实融合对绿色 TFP 有正向作用,且第一阶段 F 统计量大于经验值 10,过度识别检验的 Sargan 检验在 5% 的显著性水平上拒绝了原假设。表 4(5)(6)列是对弱工具变量更不敏感的优先信息最大似然估计法(LIML)估计,其结果与 2SLS 回归结果大致一致,说明数实融合对绿色 TFP 存在正向影响这一结论较为稳健,假设 H1 进一步得到支持。

表 4 稳健性检验与内生性检验

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	绿色 TFP	绿色 TFP	数实融合	绿色 TFP	数实融合	绿色 TFP
	滞后一期	更换控制变量	IV-2SLS-1	IV-2SLS-2	IV-LIML-1	IV-LIML-2
数实融合	5.712*** (1.561)	3.940** (1.512)		7.290* (4.422)		7.812** (3.742)
1984 年邮局数			0.003*** (0.000)		0.003*** (0.001)	
1984 年电话数			0.000** (0.000)		0.000*** (0.000)	
控制变量	YES	YES	YES	YES	YES	YES
固定效应	YES	YES	YES	YES	YES	YES
_cons	0.338** (0.038)	0.188 (0.184)	-0.006*** (0.002)	0.302*** (0.025)	-0.006*** (0.002)	0.300*** (0.026)
N	2771	3048	2398	2398	2398	2398
R ²	0.4862	0.4652	0.0797	0.0797	0.0797	0.0797

(三) 中介效应检验

为了考察数实融合对绿色 TFP 的作用路径,采用中介效应三步法检验技术创新、人力资本和产业结构的中介效应。构建如下三阶段中介效应模型:

$$GTFP_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 DR_{it} + \beta_i control_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \tag{7}$$

$$M_{it} = \gamma_0 + \gamma_1 DR_{it} + \theta_i control_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \tag{8}$$

$$GTFP_{it} = \rho_0 + \rho_1 DR_{it} + \rho_2 M_{it} + \tau_i control_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \tag{9}$$

模型(7)为中介效应模型的第一步,即绿色 TFP 对数实融合做回归;模型(8)为中介效应模型的第二步,即中介变量 M 对数实融合做回归,考察数实融合对中介变量的影响,本文的中介变量分别是技术创新、人力资本与产业结构;模型(9)为中介效应模型的第三步,即绿色 TFP 对中介变量和数实融合做回归,考察中介变量对绿色 TFP 的影响。其他变量选取与基准模型一致。

1. 技术创新。发明专利具有较强的创新性,由于从专利申请到授予有一定时滞,且认为授权的专利更能体现专利的质量,故本文将发明专利授权数作为技术创新的度量指标,并根据研究内容,将技术创新进一步划分为数字发明专利授权数^①和绿色发明专利授权数^②。

表 5 为技术创新对于数实融合助力绿色 TFP 的中介效应。从(1)~(3)列可看出,不论是以授权发明专利衡量技术创新,还是以细分的授权数字发明专利和授权绿色发明专利衡量技术创新,数实融合对技术创新均有显著的正向作用,说明数实融合推动产业数字化转型,借助数字化转型的契机,企业实现

① 参考李俊杰等^[30]的研究,基于《数字经济核心产业分类与国际专利分类参照关系表(2023)》,通过数字核心产业分类和国际专利分类相匹配,获得数字发明专利授权数。

② 参考庄芹芹等^[31]的研究,以国家知识产权局发布的《中国绿色专利统计报告》和世界知识产权组织推出的《国际专利分类绿色清单》等官方文件,使用与绿色技术相关的关键词进一步补充识别,获得绿色发明专利授权数。

了对各项成本的精确控制,使更多资金流向研发创新活动,进一步推动了产业创新。从(4)~(6)列可看出,通过提升上述3类专利衡量的技术创新水平均对绿色 TFP 产生显著的积极影响,且模型同时包含数实融合和中介变量技术创新时,数实融合的回归系数仍显著为正,说明技术创新在数实融合促进绿色 TFP 增长中起到部分中介作用。基于此,假说 H2a 得以验证,即数实融合通过促进技术创新助力绿色 TFP 提升。

表 5 技术创新中介效应检验

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	授权发明专利	授权数字发明专利	授权绿色发明专利	绿色 TFP	绿色 TFP	绿色 TFP
数实融合	2.730*** (0.129)	3.453*** (0.186)	3.000*** (0.197)	0.104** (0.043)	0.156*** (0.043)	0.079* (0.041)
授权发明专利				0.012* (0.006)		
授权数字发明专利					0.011*** (0.004)	
授权绿色发明专利						0.019*** (0.004)
控制变量	YES	YES	YES	YES	YES	YES
固定效应	YES	YES	YES	YES	YES	YES
_cons	17.908*** (0.778)	18.202*** (1.122)	16.815*** (1.187)	0.860*** (0.265)	1.173*** (0.257)	0.751*** (0.249)
N	3048	3026	3048	3048	3026	3048
R ²	0.4846	0.4938	0.2973	0.0138	0.0130	0.0208

2.人力资本。本文采用专本在校生/总人口衡量人力资本水平,数实融合对人力资本水平的影响结果如表6(1)列所示,数实融合对人力资本水平具有显著正向作用,表明随着数实融合程度的加深,高学历人员占比也随之增加,以适应更高要求的岗位。数实融合推动了工业流程和商业模型的革新,创造了新的价值,对员工提出了更高的技能要求,特别是需要具备跨领域技能和核心技术开发能力的人才。进一步检验数实融合对就业结构的影响,用第三产业就业人员占比衡量就业结构,从表6(2)列可以看出,数实融合将促进就业结构升级,数实融合水平越高,从事第三产业的劳动力将越多。数实融合提升了对智能劳动力和复杂任务的需求,导致低技能工人更易被 AI 取代,同时许多重复性劳动岗位面临消失的风险。从表6(3)(4)列可知,人力资本水平的提升和就业结构的升级有利于绿色 TFP 提升,且都起到部分中介作用。基于此,假说 H2b 得以验证,即数实融合通过提高人力资本水平助力绿色 TFP。

表 6 人力资本中介效应检验

	(1)	(2)	(3)	(4)
	人力资本	就业结构	绿色 TFP	绿色 TFP
数实融合	0.175*** (0.063)	0.255*** (0.024)	0.132*** (0.038)	0.069* (0.038)
人力资本			1.129* (0.588)	
就业结构				0.193*** (0.030)
控制变量	YES	YES	YES	YES
固定效应	YES	YES	YES	YES
_cons	0.006*** (0.001)	1.679*** (0.145)	1.064*** (0.220)	0.620*** (0.226)
N	3037	3048	3058	3069
R ²	0.1595	0.3027	0.0137	0.0264

3.产业结构。采用三种不同的方式衡量产业结构,分别为用第三产业与第二产业产值之比衡量产业结构1、用三次产业间从业人员数与产值之比衡量产业结构2、用产业结构整体升级(一产占比*1+二

产占比*2+三产占比*3)衡量产业结构³。数实融合对产业结构的回归结果见表7(1)~(3)列,结果表明数实融合对产业结构具有显著的正向影响,说明数字经济和实体经济的深度融合为产业结构优化升级保驾护航。(4)~(6)列的结果显示,产业结构升级可以促进绿色TFP提升。统筹协调一二三产业发展是绿色发展的关键环节,新一轮科技革命和产业变革促进了不同产业的融合发展,为产业结构升级创造了新条件。数字技术的发展和应用为一二三产业融合发展,以及实体经济和数字经济融合发展提供了技术基础,有利于实现产业结构优化升级,进而推动经济绿色发展。总体看,数实融合通过优化产业结构助力绿色TFP提升,假说H2c得以验证。

表7 产业结构中介效应检验

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	产业结构1	产业结构2	产业结构3	绿色TFP	绿色TFP	绿色TFP
数实融合	0.183*** (0.036)	0.080*** (0.009)	0.157*** (0.013)	0.134*** (0.037)	0.126*** (0.038)	0.168*** (0.039)
产业结构1				0.051** (0.021)		
产业结构2					0.173** (0.078)	
产业结构3						0.627*** (0.161)
控制变量	YES	YES	YES	YES	YES	YES
固定效应	YES	YES	YES	YES	YES	YES
_cons	1.310*** (0.220)	0.582*** (0.057)	2.808*** (0.077)	1.060*** (0.215)	0.994*** (0.223)	1.474*** (0.288)
N	3048	3048	3048	3069	3069	3069
R ²	0.0726	0.2476	0.5010	0.0144	0.0140	0.0212

五、进一步讨论

(一)地区异质性检验

为了考察数实融合对绿色TFP的异质性影响,根据地理位置将样本分为东、中、西3组^①,南部、北部2组^②,中心城市、非中心城市2组^③,省会城市、非省会城市2组^④,并进行分组回归。表8(1)~(3)列显示,这三种分类中数实融合对绿色TFP有显著影响,^⑤相比而言,东部地区、南部地区、中心城市和省会城市的数实融合程度更能促进绿色TFP。这可能是因为中西部、北部、非中心、非省会等欠发达城市的重工业和资源型产业占比相对较高,数字经济与实体经济融合初期投入的能源更多,导致对绿色TFP没有显著的促进作用;而发达城市的数字经济与实体经济融合程度更高,更能发挥技术创新、人力资本和产业结构升级的正向作用,进而对绿色TFP有明显的促进作用。

(二)数字化关注程度与知识产权水平异质性检验

采用各地级市政府公布的政府工作报告,利用文本分析技术,创建了一个数字化关键词的索引库,通过分析这些关键词在2012—2022年政府工作报告中出现的频率和比例,评估政府对数字化议题的重视程度。关键词的频率统计主要关注两大领域:“数字技术”和“数字应用”。在“数字技术”领域,关

① 东部地区包括北京、天津、河北、辽宁、上海、江苏、浙江、福建、山东、广东、海南等省份的100个城市;中部地区包括山西、吉林、黑龙江、安徽、江西、河南、湖北、湖南等省份的94个城市;西部地区包括内蒙古、广西、重庆、四川、贵州、云南、陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆等省份的87个城市。

② 北方地区包括北京、天津、河北、山西、内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江、山东、河南、陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆等省份的130个城市;南方地区包括上海、江苏、浙江、安徽、福建、江西、湖北、湖南、广东、广西、海南、重庆、四川、贵州、云南等省份的151个城市。

③ 根据人均GDP是否达到世界银行高收入标准(历年高收入标准均在12000美元左右)以及行政级别是否是地级以上两种因素进行交叉分类识别,将281个样本城市划分为35个中心城市和246个非中心城市。

④ 省会城市在行政级别上分为副省级和地级两类,本文将所有直辖市、副省级城市和地级省会城市统称为地级以上城市。省会城市有32个,非省会城市有249个。

⑤ 由于中部地区和西部地区、北部地区、非中心城市、非省会城市的数实融合对绿色TFP的影响不显著,故没在表8中显示,没做进一步分析。

关键词包括但不限于大数据、区块链、人工智能、通信技术、物联网和云计算等;而在“数字应用”领域,则涵盖了服务业、工业、农业及数字政府等相关词汇。根据数字化关注度的均值水平,将样本分为数字化关注度高(包含207个城市)和数字化关注度低(包含74个城市)两组,回归结果如表8(5)列所示。结果显示:数字化关注度高的城市的数实融合对绿色TFP有显著促进作用,这是因为随着政府对数字化重视程度的提升,数字经济政策的实施力度得到加强,同时为企业提供包括人力、资金、物资在内的实体资源,以及行政权力和政策扶持等无形资源,支持企业的数字化创新活动,^[32]从而提升企业数字创新水平,进而促进绿色TFP增长。

根据国家知识产权局发布的《2022年中国知识产权发展状况评价报告》,以知识产权发展指数等于80为临界点,将样本分为知识产权发展指数高(包含157个城市)和知识产权发展指数低(包含124个城市)两组,回归结果见表8(6)列。结果显示,知识产权发展指数高的城市的数实融合更能促进绿色TFP,这是因为知识产权具有较强的外部性,有些企业为获取新技术红利、提高市场竞争力,会对新技术进行不断复制、模仿与应用,如果这些知识产权没有得到有效保护,将无法避免其他组织或个人的“搭便车”行为,造成知识产权侵权现象,这将进一步损害企业创新成果的价值,打压企业的创新意愿^[33];相反,如果对知识产权进行较好的保护,那么可以激励企业技术创新,进而提高绿色TFP。

表8 异质性检验结果

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	东部地区	南部地区	中心城市	省会城市	数字化关注度高	知识产权发展指数高
数实融合	3.776 ^{**} (1.721)	3.672 ^{**} (1.635)	4.541 ^{**} (1.995)	3.609 ^{**} (1.472)	3.673 ^{**} (1.456)	3.472 ^{**} (1.627)
控制变量	YES	YES	YES	YES	YES	YES
固定效应	YES	YES	YES	YES	YES	YES
_cons	0.409 ^{***} (0.064)	0.374 ^{***} (0.067)	0.435 [*] (0.226)	-0.015(0.134)	0.330 ^{***} (0.076)	0.400 ^{***} (0.062)
N	1089	1651	385	352	1450	1716
R ²	0.4143	0.4617	0.3797	0.4479	0.5787	0.4651

六、结论与启示

本文通过系统的理论模型分析和实证检验,系统评估了数字经济与实体经济深度融合对绿色TFP的影响及作用机制。研究结论如下:基准回归结果表明,数实融合显著促进了绿色TFP提升;数实融合通过激励技术创新、提升人力资本水平和改善产业结构三种渠道促进绿色TFP提升;异质性检验表明,数实融合对绿色TFP的促进作用在东部地区、南部地区、中心城市、省会城市、政府数字化关注度高的城市和知识产权发展指数高的城市中更突出。

上述研究结论对于更好地发挥数实融合积极作用和推进绿色发展具有重要的启示。基于此,提出如下对策建议:

第一,进一步优化数实融合发展环境。首先,政府及相关监管机构要不断推进数字基础设施的建设和优化,为企业数字化转型提供支撑。同时,加快构建和完善数据治理体系,确保数据的合规性、安全性和隐私保护。制定和实施数据保护法律、标准和指南,以及建立有效的数据安全监控和应急响应机制,从而为数实融合提供一个坚实的制度环境。其次,企业在各个环节积极采用前沿数字技术。这不仅能够提高运营效率、降低成本,还能促进新产品、新服务和新业务模式的创新。再次,企业应充分利用大数据和网络信息技术,建立开放的合作平台和创新生态。与其他企业、高校、研究机构及行业组织开展合作,通过信息共享、联合研发、技术交流和市场合作,共同推动数实融合的外部环境建设。这种跨界合作不仅有助于资源共享和风险分担,还能促进创新成果的快速转化和应用,共同推动行业的

绿色发展和可持续发展。

第二,完善绿色技术创新多元发展机制。首先,相关部门可通过采取税收减免、设立绿色技术创新基金等激励引导措施,鼓励企业增加对绿色技术与开发的投入,进而促进绿色技术的进步和创新。同时,可以建立绿色技术创新示范基地,搭建平台促进企业间的合作与交流,推动绿色技术创新共享与应用。其次,构建绿色技术领域的创新合作平台,加强企业、研究机构 and 高等教育机构之间的协作。这样的协作机制有助于实现产学研深度融合,通过资源和专业技能的共享,加速绿色技术的进步和创新。同时,相关部门还要加大力度引进和培养高素质的创新人才,他们将成为推动绿色技术创新的关键力量。通过不断优化绿色技术创新的发展机制,建立多元化的创新体系,可以更好地应对环境挑战,推动绿色技术的不断创新和应用。再次,企业应着力研发符合市场需求的绿色产品,紧密结合市场需求,推动绿色技术创新成果的产业化进程。同时,企业还应构建一个多元化的绿色技术创新体系,以期实现更高水平的绿色技术突破和创新。通过加快绿色技术与实体经济的融合进程,实现经济效益和社会效益的双赢。

第三,提供高质量的人力资本支持。首先,为了满足数字技术领域和产业数字化转型的需求,高等教育机构应进一步优化教学体系和方法。适当扩大数字技术相关学科的招生规模,提高这些学科在教育体系中的比重,培养更多贴合市场需求的人才;探索新兴交叉学科的教育模式,培养具有跨领域综合素质的学生。其次,构建完善的激励机制以促进数实融合人才发展,吸引社会资本投向创新和跨学科人才的培养。各地应将数实融合领域的创新人才和复合型人才纳入人才发展项目中,并提供财政和税收优惠,以增强人才引进政策的吸引力。这有助于更好地培养和吸引优秀人才,在实践中推动科技创新和跨学科人才的培养,进而推动数实融合领域的发展。

参考文献:

- [1]刘慧,王曰影.“数实融合”驱动实体经济创新发展:分析框架与推进策略[J].经济纵横,2023(5):59-67.
- [2]习近平.高举中国特色社会主义伟大旗帜 为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗——在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告[N].人民日报,2022-10-26.
- [3]中共中央关于进一步全面深化改革 推进中国式现代化的决定[N].人民日报,2024-07-22.
- [4]王喜莲,翟桢桐.数实融合与经济高质量发展耦合协调的时空演进及差异分析[J].资源开发与市场,2024(6):892-899.
- [5]Bukht R, Heeks R. Defining, Conceptualising and Measuring the Digital Economy[R]. Development Informatics Working Paper, 2017.
- [6]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.
- [7]郭哈,全勤慧.数字经济与实体经济融合发展:测度评价与实现路径[J].经济纵横,2022(11):72-82.
- [8]陈雨露.数字经济与实体经济融合发展的理论探索[J].经济研究,2023(9):22-30.
- [9]李腾,孙国强,崔格格.数字产业化与产业数字化:双向联动关系、产业网络特征与数字经济发展[J].产业经济研究,2021(5):54-68.
- [10]宋旭光,何佳佳,左马华青.数字产业化赋能实体经济发展:机制与路径[J].改革,2022(6):76-90.
- [11]张帅,吴珍玮,陆朝阳,等.中国省域数字经济与实体经济融合的演变特征及驱动因素[J].经济地理,2022(7):22-32.
- [12]史丹,孙光林.数字经济和实体经济融合对绿色创新的影响[J].改革,2023(2):1-13.
- [13]崔琳昊,冯烽.数实融合与城市绿色发展:影响与机制[J].上海财经大学学报,2024(4):49-63.
- [14]宋德勇,朱文博,丁海.企业数字化能否促进绿色技术创新?——基于重污染行业上市公司的考察[J].财经研究,2022(4):34-48.
- [15]郭丰,杨上广,柴泽阳.企业数字化转型促进了绿色技术创新的“增量提质”吗?——基于中国上市公司年报的文本分析[J].南方经济,2023(2):146-162.
- [16]程李梅,周玉莲.企业数实融合对创新产出的影响研究[J].技术与创新管理,2023(6):689-695.
- [17]韩峰,黄敏,姜竹青.企业数字化、网络地位与污染减排[J].世界经济,2024(2):204-232.
- [18]王文姬,戴小红.数实融合与数字产业集群的互促机制及推进策略研究[J].企业经济,2024(11):30-37.

- [19]Acemoglu D, Restrepo P. Robots and Jobs: Evidence from US Labor Markets[J]. Journal of Political Economy, 2020(6): 2188-2244.
- [20]徐玉德,程东,范亚辰. 筑巢引凤来: 数实融合与人力资本结构升级[J]. 财经论丛, 2024(11): 3-12.
- [21]笪远瑶,罗丹. 数字经济、结构红利与绿色全要素生产率[J]. 西南民族大学学报(人文社会科学版), 2023(3): 107-118.
- [22]光晖. 数实产业技术融合与企业共同富裕——理论分析与实证检验[J]. 技术经济与管理研究, 2024(8): 27-32.
- [23]吕祥伟,张莉娜. 财政纵向失衡对城市绿色全要素生产率的影响——双重机器学习下来自土地财政视角的理论阐释[J]. 经济与管理研究, 2024(4): 56-75.
- [24]彭小辉,王静怡. 高铁建设与绿色全要素生产率——基于要素配置扭曲视角[J]. 中国人口·资源与环境, 2019(11): 11-19.
- [25]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(10): 65-76.
- [26]代新玲,刘伟. 产业数字化、技术创新与城市经济韧性[J]. 中国流通经济, 2022(12): 81-91.
- [27]赵海华,刘祥慧. 绿色信贷与区域碳排放——兼论城镇化、信息化的调节作用[J]. 中南林业科技大学学报(社会科学版), 2024(1): 45-56.
- [28]周小亮,吴洋宏,宝哲. 调整财政支出结构能够促进包容性绿色增长吗?——基于创新路径的理论与实证分析[J]. 生态文明研究, 2024(2): 64-80.
- [29]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.
- [30]李俊杰,周民良. 中国数字创新时空格局演变及驱动力多维解析——基于数字经济专利申请视角[J]. 经济地理, 2024(7): 106-116.
- [31]庄芹芹,吴滨,洪群联. 市场导向的绿色技术创新体系: 理论内涵、实践探索与推进策略[J]. 经济学家, 2020(11): 29-38.
- [32]刘毛桃,方徐兵,李光勤. 政府数字关注与企业数字创新——来自政府工作报告文本分析的证据[J]. 中国经济学, 2023(3): 111-142+350-352.
- [33]任英华,刘宇钊,胡宗义,等. 大数据发展、知识产权保护对企业绿色技术创新的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2023(7): 157-167.

(责任编辑:张佳睿)

Integration of Digital Economy and Real Economy Improves Green Total Factor Productivity

ZHANG Ziran, HAI Meihong

(Institute of Economics, Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 100836)

(School of Economics, University of Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 102488)

Abstract: The deep integration of digital economy and real economy is an important focus of China in building a modern economic system and the new momentum for green development. On the basis of establishing a mathematical model for assessing the impact of integration of digital economy and real economy on green development, this study systematically evaluates the impact of the integration of digital economy and real economy on green total factor productivity and explores the underlying mechanism by using the data from 281 cities across China from 2012 to 2022. The results showcase that the integration of digital economy and real economy significantly improves green total factor productivity by stimulating technological innovation, elevating human capital levels, and improving the industrial structure. The improving effect is more prominent in eastern and southern China, central cities, provincial capitals, cities receiving high attention to digitalization from the government, and cities with high development indexes of intellectual property rights. Therefore, it is necessary to further optimize the environment for the integration of digital economy and real economy, improve the mechanism for innovative development of green technologies, and provide high-quality human capital support to promote the integration of digital economy and real economy and boost green development.

Keywords: Integration of Digital Economy and Real Economy; Green Development; Green Total Factor Productivity; Digital Technology