



算力新质生产力对全要素生产率 增长作用机制研究

沈红兵¹, 喻婧², 夏森茂³

(1. 重庆工商大学 经济学院, 重庆 400041;

2. 中央财经大学 企业管理创新中心, 北京 100086;

3. 萨里大学 商学院, 英国 伦敦 TW20 0EX)

摘要:算力作为数字经济时代的新质生产力,对赋能数字经济新增长、推动数字经济高质量发展至关重要。基于算力的公共性、外部性、网络性与迭代升级特征,研究算力新质生产力的网络外溢效应与全要素生产率之间的关系及作用机理;利用面板随机前沿分析方法测算全要素生产率,发现算力新质生产力对全要素生产率具有显著的促进效应,这种效应来源于算力新质生产力对智算技术效率与规模效率的促进作用。省际个体的算力新质生产力对与该省份在地理、经济、人口方面相关联的其他省份的全要素生产率具有显著的正网络外溢效应。研究表明:(1)算力新质生产力网络外溢效应通过提升创新数量、创新质量对全要素生产率提升产生正向的积极作用;(2)算力新质生产力网络外溢效应通过缓解算力投资错配、数字技能劳动力错配对全要素生产率提升产生正向的积极作用;(3)算力基础设施数量网络与算力基础设施质量网络通过创新促进全要素生产率增长时具有异质性。相关研究成果有利于创新拓展数字经济背景下算力新质生产力对全要素生产率增长作用机制的理论研究,为政府制定数字经济政策提供有益参考。基于此,提出推动算力技术创新、促进算效提升、汇聚算力资源、优化算力要素供给、加大智慧教育投入力度、培育算力基础设施创新人才等建议。

关键词:算力新质生产力;全要素生产率;面板随机前沿分析;网络外溢效应;算力经济

中图分类号:F124;F49 **文献标识码:**A **文章编号:**1674-8425(2024)02-0022-18

一、引言

习近平总书记强调:“积极培育新能源、新材料、先进制造、电子信息等战略性新兴产业,积极培育未

收稿日期:2023-11-20

基金项目:重庆软科学项目“人工智能技术进步对长江经济带数字经济发展的影响研究”(990117001)

作者简介:沈红兵,教授,博士,主要从事算力经济研究。

本文引用格式:沈红兵,喻婧,夏森茂.算力新质生产力对全要素生产率增长作用机制研究[J].重庆理工大学学报(社会科学),2024(2):22-39.

Citation format:SHEN Hongbing, YU Jing, XIA Senmao. Research on the mechanism of computing power new quality productivity on the growth of total factor productivity[J]. Journal of Chongqing University of Technology(Social Science), 2024(2):22-39.

来产业,加快形成新质生产力,增强发展新动能。”^[1]新质生产力是以科技创新为主导的生产力,是依靠创新驱动形成的高效能、高质量的生产力,区别于高度消耗资源能源的传统生产力,是数字时代更具创新性和融合性的生产力^[2]。在信息通信技术(ICT)深度融合的背景下,各行业加速向数字化、智能化转型,数据存储、传输和处理需求呈现出迅猛增长趋势,同时,对算力资源的需求也呈现出持续增长态势。到2024年,预计全球数据总量将以26%的年均复合增长率增长到142.6ZB^①。算力作为数字经济时代的新质生产力,能带动数字经济高质量增长,其算力指数每提高1个百分点,数字经济和GDP分别增长3.6‰和1.7‰^[3]。截至2022年底,我国总算力规模达180EFLOPS,仅次于美国;存力总规模超过1 000EB,国家枢纽节点间的网络单向时延降低到20毫秒以内。2023年全球GDP增长率只有2%^[4],但数字经济依然保持着强劲增长趋势。算力已成为经济发展的主要驱动力,是推动新发展格局形成、扎实推进经济高质量发展的重要引擎。

随着云计算、人工智能和大数据等前沿技术的迅速发展,算力基础设施的重要性愈发凸显。作为支撑各行业信息系统运行的关键要素,算力基础设施在经济社会运行中发挥着不可或缺的作用,对数字经济发展产生了深远影响。2015年以来,我国数据增量年均增速超过30%,数据中心规模从2015年的124万家增长到2021年的500万家^[5]。目前,全国已建成8所国家级超级计算中心。我国算力产业规模快速增长,算力核心产业规模达到1.8万亿元。预计到2025年,中国算力核心产业规模将不低于4.4万亿元,算力关联产业规模可达24万亿元^[6]。以数据中心、超级计算中心等为代表的算力基础设施建设进程加快,正成为支撑数字经济发展的新基座^[7]。基于此,本文研究算力及算力基础设施发展过程中涌现的新质生产力,探究其对全要素生产率增长的作用机制。

本文余下部分的安排如下:第二部分为新质生产力与算力基础设施、基础设施的经济效应综述;第三部分对实证模型的构建、相关变量的确定以及数据来源进行阐述;第四部分对实证结果进行展示与分析,并对算力影响全要素生产率增长的机制、算力基础设施网络外溢效应对全要素生产率的异质性影响等进行分析;第五部分是研究结论与对策建议,以及本文的边际贡献和未来研究展望。

二、文献综述

新质生产力作为推动数字经济高质量发展的核心力量,以新技术为驱动,创造新价值,深度适应新产业需求,激发新动能。新质生产力的发展对稳固数字经济的坚实基础具有重要意义。徐政等^[8]认为新质生产力的核心要义是“以新促质”,以创新驱动高质量发展,告别传统技术体系、摆脱传统增长路径、符合高质量发展要求,是数字时代更具融合性的生产力。张林等^[9]从产业关联角度分析,认为新质生产力是以科技创新为牵引,以战略性新兴产业和未来产业为母体,表现为发展新动能的生产力。令小雄等^[10]分别从时空向度、结构向度、科技向度3个维度讨论新质生产力的理论内涵,提出新质生产力包含多维意义,是新质的、高阶的、具有科技革命性的生产力形式,具有高科技、高智能、高算力、高效率、高阶式、高素质等创新能力和科技革命性、未来性等特质。作为数字经济时代的新质生产力,算力为各行业的数字化转型注入新的活力,成为推动高质量发展的重要引擎。算力网络作为算力的主要载体,成为支撑发展的重要基础设施^[11]。

全要素生产率是新常态下唯一可持续的增长动力。因此,全要素生产率在中国经济现实增长和理论

① 信息源于全球产业研究院的《2022—2023 全球算力指数评估报告》, <https://www.tsinghua.edu.cn/info/1175/105480.htm>。

研究层面成为重要性日益凸显的研究对象。在内涵层面, Solow^[12]将全要素生产率(TFP, Total Factor Productivity)理解为技术进步(TP, Technological Progress), 构成了TFP研究的早期理论内涵。Farrell^[13]使用成本概念对其进行内涵解释, Leibenstein^[14]则使用了宏观经济研究中更容易接受的产出概念, 即技术效率, 反映相同投入方式及投入条件机制分析下实际产出和理论最优产出之比。TFP的内涵在随后的研究中分化为广义的技术进步和狭义的技术进步^[15-17]。在测度方法层面, 最早使用的测算全要素生产率增长率的方法是索洛余值法, 也称增长核算法。该方法由于模型简单、测算方便、合乎经济原理, 被广泛用于测算全要素生产率^[18-19]。李小平等^[20]、张军等^[21]、颜鹏飞等^[22]、郭庆旺等^[23]、张保胜^[24]测算了不同时间段的中国全要素生产率, 并估算了全要素生产率增长在中国经济增长中的贡献。

关于基础设施的经济效应研究一直是学者们关注的热点。在对传统基础设施的研究中, 交通基础设施的经济效应是学者们考察的重点, 已有文献认为“高铁开通”和“公路建设”等不仅在出口贸易^[25]、技术创新^[26]、产业升级^[27]等方面表现出积极的经济增长效应, 对经济高质量发展也存在正向激励作用。随着智算技术的发展与普及, 以电子信息、宽带网络为代表的信息基础设施开始为学者们所关注。目前, 国外文献关于信息基础设施的经济效应存在争议。Koutroumpis^[28]发现宽带普及率的提升对经济增长存在积极作用, Lin等^[29]则认为该经济效应并不明显, 甚至对部分地区的经济发展存在抑制效应^[30]。与国外研究不同, 国内学者普遍认可信息基础设施的经济增长效应, 且从宏微观两个层面进行验证。在宏观层面, 信息基础设施建设能够推动创新能力提升^[31]和产业结构优化^[32]; 在微观层面, 信息基础设施建设对企业升级^[33]和劳动雇佣^[34]均存在积极影响。

从已有研究成果来看, 国内外学者对全要素生产率与信息基础设施的经济效应进行了深入研究, 为进一步探讨算力基础设施建设的经济增长质量提升效应做出了有益探索。但相关研究多基于信息基础设施角度, 鲜有研究分析算力基础设施如何影响全要素生产率增长, 进而影响数字经济增长质量。基于此, 本文试图从新质生产力的视角, 将算力基础设施的固有属性与“数字化”特征进行整合, 探讨其与全要素生产率之间的内在联系及影响机制。

三、实证模型、变量及数据

(一) 模型设定

算力基础设施对用户需求的满足程度与网络规模密切相关, 随着用户数量的增加, 边际成本递减, 所有用户获取的收益率呈现递增趋势。网络效应也称网络外部性(Network Externality), 其本质是用户在网络规模上产生的经济性, 指用户效用的提升取决于网络规模的扩增, 即用户数量的增加。算力基础设施是由众多节点与连接构成的复杂网络系统, 凭借其跨越地理空间的特性, 能够关联地理位置相近或相远的节点与连接。梅特卡夫法则(Metcalf's Law)表明, 网络价值与网络用户的平方成正比, 从这个意义上说, 用户规模与网络正外部性对用户的网络需求产生重要影响^[35]。网络用户基数不断增加的同时, 也带动了知识的传播与信息的交流。基于此, 本文推断算力基础设施能够推动智算技术进步。

智算技术知识的积累是衡量技术创新水平的重要指标, 对于推动智算技术创新具有重要意义。本文设定某一时点 t 的智算技术知识积累总量为 B_t ; 同时设定智算技术知识增长的平均速度为 g_B , 用以衡量智算技术从开发到改进的速度。同时, 知识传播途径的高效与否, 也会直接影响数字创新团队能否充分利用知识资源、推动智算技术的进一步发展。高效的知识传播途径能够快速将知识传递给需要的团队, 帮助他们更快地掌握新技术、新方法, 提高创新效率。此外, 数字人力资本的积累在智算技术创新进程中

也发挥着决定性的作用。数字经济发展能显著提高数字人力资本结构的高级化水平^[36],算力基础设施的完善对智算技术知识的扩散具有积极意义,算力基础设施为知识的广泛传播提供了高效、稳定的基础,进一步促进了智算技术知识的普及和应用。

数字经济时代,算力基础设施的不断壮大和优化成为推动经济发展的关键因素。随着数字人力资本结构的优化,知识传播效率得到显著提升,这两大因素与智能计算技术(简称智算技术)的进步形成了相互促进的良性循环,为整个经济体注入源源不断的创新活力。本文假设 M_t 为利用算力基础设施传播的智算技术知识总量, g_M 为智算技术知识在算力基础设施用户中的有效传播速率, S 为算力基础设施的数量规模, χ 为算力基础设施的质量水平, g_{B0} 与 g_{M0} 分别为智算技术知识增长速率与智算技术知识传播速率的初始值,令:

$$g_B = S \times \chi \times g_{B0}, g_M = S \times \chi \times g_{M0} \quad (1)$$

令 $N(t) - N(t_0) = N(t_0, t)$, $0 \leq t_0 \leq t$, 代表时间间隔 $[t_0, t]$ 内的创新频率, $\{N(t_0, t) = k\}$ 代表 $[t_0, t]$ 内出现创新的事件,此事件发生的概率是:

$$P_k(t_0, t) = P(N(t_0, t) = k) \quad (2)$$

当 Δt 足够小时, $P_k(t, t + \Delta t) = P(N(t, t + \Delta t)) = \lambda(t) \Delta t$ 。其中, $\lambda(t) > 0$, 是泊松流 $\{N(t)\}$ 在 t 时刻的瞬时强度。智算技术创新是一个系统工程,需要智算技术资本、算力基础设施以及数字人力资本等生产要素的紧密配合,故:

$$\lambda(t) = \Lambda \times B_t^{u1} M_t^{u2}, u1 > 0, u2 > 0 \quad (3)$$

其中,系数 Λ 代表除智算技术知识积累 B_t 、智算技术知识传播总量 M_t 以外的其他因素。

此外,设定单次创新的智算技术进步率为 g , Z_t 代表智算生产技术水平, Z_t 在时间作用下的变化则表示为:

$$P(N(t_0, t) = k) = \frac{\exp\left\{-\int_{t_0}^t \lambda(t) dt\right\} \left[\int_{t_0}^t \lambda(t) dt\right]^k}{k!} \quad (4)$$

$$E(Z_t | Z_0) = Z_0 \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\exp\left\{-\int_{t_0}^t \lambda(t) dt\right\} \left[\int_{t_0}^t \lambda(t) dt\right]^k}{k!} \quad (5)$$

其中, Z_0 代表生产初期的智能计算技术水平。根据式(5)可以得到:

$$E(Z_t | Z_0) = Z_0 B_t^{gAu1} M_t^{gAu2} = Z_0 (1 + S \times \chi \times g_{B0})^{tgAu1} (1 + S \times \chi \times g_{M0})^{tgAu2} \quad (6)$$

依据式(5)与式(6)可以发现,随着算力基础设施的规模不断扩大、质量水平持续提升,其正向外部效应日益显现。这些效应不仅有助于推动数字人力资本与智算技术的深度融合,更能激发出前所未有的创新潜能。这种融合与激发将全要素生产率提升到一个全新高度,为社会经济的持续发展注入强大动力。因此,如果令算力基础设施数量规模与质量水平为 Q ,则有:

$$M_t = M(Q)_{(+)} \quad (7)$$

其中,符号 $(+)$ 表示函数 $M(\cdot)$ 是 Q 的增函数。根据产品的特性和用途,本文将产品具体划分为中间产品和最终产品两类。假设 i 地区的生产符合生产函数 $Y_{i,t} = Z_{i,t} K_{i,t}^{\alpha_{i,1}} L_{i,t}^{\alpha_{i,2}}$, $i \in [0, 1]$; $Z_{i,t} = Z_{0,i} B_{i,t}^{gAu1} M_{i,t}^{gAu2}$ 。此外,假定企业生产某一中间产品,且所有产品的生产过程均未涉及规模报酬递增阶段,则存在 $\alpha_{i,1} + \alpha_{i,2} + gAu_2 < 1$ 。设定各区域生产的产品在市場中的需求如下:

$$Y_t = \left(\int_0^1 A_{i,t} Y_{i,t}^{\frac{\theta-1}{\theta}} di \right)^{\frac{\theta}{\theta-1}} \quad (8)$$

其中,市场对不同区域生产的商品的替代弹性为 θ ; $A_{i,t}$ 指 i 地区商品在市场中的占比,即 $A_{i,t}$ 代表 i 地区商品在市场中所占的份额,此份额与前期市场基础份额 $A_{i,t-1}$ 有关。算力基础设施建设在数字经济高质量发展中扮演着关键角色。一方面,算力网络技术作为我国数字经济增长的新引擎,能有效降低经济增长的不确定性;另一方面,先进可靠的算力基础设施对数字经济的发展至关重要。因此,各省区完善算力基础设施有助于加强地区间的沟通协作,降低市场信息不对称程度,减少地区商品搜寻成本,进而降低该地区商品市场份额的不确定性。总体而言,算力基础设施建设对降低不确定性、促进市场稳定具有积极意义。

由于存在前期市场基础份额 $A_{i,t-1}$,本文选取AR(1)模型,并根据 i 地区商品在市场上的占比,构建以下模型:

$$a_{i,t} = \ln(A_{i,t}) = (1 - \rho_1)\bar{a} + \rho_1 a_{i,t-1} + \varepsilon_t \quad (9)$$

其中, ρ_1 代表前期市场份额的持续影响力,即前期市场份额影响当期市场份额的程度; \bar{a} 代表市场份额的自然对数值 $\ln(A_{i,t})$ 随时间变化而逐渐趋于稳定的均衡水平;残差项为 ε_t , $\varepsilon_t \sim N(0, \sigma_a^2)$,是指因信息不对称而引起的不确定性, σ_a^2 越大, ε_t 的波动幅度就越大。算力基础设施的持续优化和规模扩展,不但为信息的快速交流提供了有力保障,使信息传输更加便捷,进一步促进了地区间的沟通与合作,一定程度上降低了商品市场中的信息不对称性,使市场信息更加透明,买卖双方能够更加充分地了解商品的真实情况,使市场更接近于公平竞争状态;为企业提供公平竞争的平台,使市场资源得到更加高效的配置。总体而言,算力基础设施在数量和质量层面的优化升级,进一步提高了其正向网络外溢效应,降低了商品市场份额的不确定性。此外,市场均衡时, i 地区商品市场份额的不确定性也会显著降低。因此,本文设定:

$$\varepsilon_t = u_t / f(Q), u_t^{i.i.d} \sim N(0, \sigma_a^2) \quad (10)$$

其中, σ_a 表示给定的常数,函数 $f(\cdot)$ 用于评估算力基础设施对不确定性的抑制能力。符号 $(+)$ 则表示函数 $f(\cdot)$ 是算力基础设施数量规模与质量水平 Q 的增函数,即算力基础设施对不确定性的抑制能力会随着其数量规模以及质量水平的提升而同步升高。

由式(9)可知, $a_{i,t} | I_{i,t}$ 服从正态分布,故令 $a_{i,t} | I_{i,t} \sim N(E[a_{i,t} | I_{i,t}], v)$ 。

算力作为推动经济发展、提高生产效率的关键要素,地区间算力基础设施水平的差异很可能对全要素生产率产生显著影响。因此,本文主要关注算力基础设施对各地区全要素生产率(TFP)的直接影响,暂不考虑经济发达程度、物价指数等其他因素在地区间的差异情况。根据式(11)与式(12)可以计算得出 i 省份的平均算力资本扭曲指数 $\tau_{i,K,t}$ 以及平均数字技能劳动力扭曲指数 $\tau_{i,L,t}$ 为:

$$|E(\tau_{i,K,t})| = \frac{1}{2} \times \frac{1}{1 - \rho_1^2} \times \frac{1}{(f(Q))_{(+)}^2} \quad (11)$$

$$|E(\tau_{i,L,t})| = \frac{1}{2} \times \frac{1}{1 - \rho_1^2} \times \frac{1}{(f(Q))_{(+)}^2} \quad (12)$$

接着,测度 i 地区全要素生产率均值水平,得到:

$$\ln TFP_i = \ln Z_0 + g\lambda u_1 \ln B_t + g\lambda u_2 \ln M_{i,t}((Q)) - \alpha_{i,1} \ln(1 + \tau_{K,t}) - \alpha_{i,2} \ln(1 + \tau_{L,t}) + G = \ln E(Z_t((Q)) | Z_0) - \alpha_{i,1} \ln(1 + \tau_{K,t}((Q))) - \alpha_{i,2} \ln(1 + \tau_{L,t}((Q))) + G \quad (13)$$

其中, $G = \frac{\tilde{\alpha}}{1 - \alpha} (E_{i,t}[a_{i,t}] - \bar{a}) - \frac{\tilde{\alpha}}{2} \times \left(\frac{1}{1 - \alpha} \right)^2 \left(\sigma_a^2 - \frac{1}{1 - \rho_1^2} \times \frac{1}{(f(Q))_{(+)}^2} \right)$ 。符号 $(-)$ 表示函数 $\tau_{K,t}(\cdot)$ 与 $\tau_{L,t}(\cdot)$ 是 Q 的减函数。式(11)与式(12)表明生产要素扭曲指数 $\tau_{i,K,t}$ 与 $\tau_{i,L,t}$ 的平均值与 Q 具有负相关关

系,即算力基础设施数量规模以及质量水平的提升,能够提高算力资本与数字技能劳动力的匹配度。结合式(13)可知,算力资本与数字技能劳动力错配程度的改善也能进一步推动*i*地区全要素生产率的提升。

基于此,本文重点探讨算力基础设施建设所引发的双重网络效应,包括数量网络外溢效应和质量网络外溢效应。算力基础设施数量规模和质量水平的提升有助于促进区域间资源共享和互补。通过优化算力资源配置,算力基础设施数量规模和质量水平的提升能够提高各省际节点间的协同创新水平,进一步推动产业结构升级和全要素生产率的提升,同时还能缓解数据与算力资源错配问题,为各类企业提供更为便捷、高效的算力服务,助力企业降低成本、提高竞争力。基于以上分析,本文提出如下假设:

H1:各省算力基础设施数量与质量网络能通过推动创新与缓解数据与算力资源错配,推动其他省份全要素生产率的生长,形成算力基础设施对全要素生产率的网络外溢效应。

(二) 算力基础设施对全要素生产率的网络外溢效应

参照Zhu等^[37]的研究方法,本文构建算力基础设施的网络向量自回归模型(NVAR),旨在从省级算力基础设施数量(规模扩张)与质量(迭代升级)2个维度探究算力基础设施对各省全要素生产率的网络效应。为了更深入地理解这种效应,以及探讨省级单位之间算力基础设施的相互影响,本文以各省级单位为网络中的节点,构建省级算力基础设施网络。在这个网络中,节点间的关联关系用网络节点间的连线表示。假设网络中共有*N*个节点,节点间的连线用 $a_{i,j}$ 表示,如果*i*省和*j*省存在关联,则 $a_{i,j} \neq 0$,反之 $a_{i,j} = 0$ 。由于本文关注的是某省级单位算力基础设施所产生的网络外溢效应,因此设定 $a_{i,i} \neq 0, 1 \leq i \leq N$,即节点与自身不存在连线,所有节点间的连接矩阵 $W = \{a_{i,j}; i, j = 1, 2, \dots, N\}$ 。具体构建以下模型:

$$\ln TFP_{i,t} = \beta_0 + \beta_1 \sum_{j=1}^N a_{i,j} DF_{j,t}^{(\text{数量})} + \beta_2 \ln TFP_{i,t-1} + Z'_i \gamma + \alpha DF_{i,t}^{(\text{数量})} + \varepsilon_{i,t} \quad (14)$$

$$\ln TFP_{i,t} = \beta_0 + \beta_1 \sum_{j=1}^N a_{i,j} DF_{j,t}^{(\text{质量})} + \beta_2 \ln TFP_{i,t-1} + Z'_i \gamma + \alpha DF_{i,t}^{(\text{质量})} + \varepsilon_{i,t} \quad (15)$$

其中, $DF_{j,t}^{(\text{数量})}$ 代表*j*省算力基础设施的数量规模, $DF_{j,t}^{(\text{质量})}$ 代表*j*省算力基础设施质量水平; γ 代表节点特征效应, $Z'_i \gamma$ 代表节点特征变量,省份间的关联关系为 $a_{i,j} = \frac{dis_{i,j}}{\sum_{j=1}^N dis_{i,j}}$; $dis_{i,j}$ 代表省*i*和省*j*相关距离的倒数。

在计算各省省会城市间的地理距离时,通常可以考虑实际距离、直线距离和球面距离。为了更准确地反映城市间的距离,此处使用各省会城市间实际距离的倒数进行计算。

在式(14)与式(15)中, β_1 代表各省算力基础设施数量及质量提升对全要素生产率的平均网络外溢效应, β_2 则代表各省全要素生产率的网络自激励效应。

在探究算力基础设施对全要素生产率增长的作用机制方面,本文通过分析整合其基础设施属性以及“数字化”特征,重点从创新推动和错配缓解2个方面探讨算力基础设施对全要素生产率增长的双重网络效应,构建以下模型:

$$\ln TFP_{i,t} = \beta_0 + \beta_1 M_{i,t} \sum_{j=1}^N a_{i,j} DF_{j,t}^{(\text{数量})} + \beta_2 M_{i,t} + \beta_3 \ln TFP_{i,t-1} + Z'_i \gamma + \alpha DF_{i,t}^{(\text{数量})} + \varepsilon_{i,t} \quad (16)$$

$$\ln TFP_{i,t} = \beta_0 + \beta_1 M_{i,t} \sum_{j=1}^N a_{i,j} DF_{j,t}^{(\text{质量})} + \beta_2 M_{i,t} + \beta_3 \ln TFP_{i,t-1} + Z'_i \gamma + \alpha DF_{i,t}^{(\text{质量})} + \varepsilon_{i,t} \quad (17)$$

其中, $M_{i,t}$ 代表算力资本错配、数字技能劳动力错配、创新数量、创新质量4个机制变量; $M_{i,t} \sum_{j=1}^N a_{i,j} DF_{j,t}^{(k)}$

代表对应机制变量与算力基础设施的交互项;节点变量 Z'_i 与基准回归保持一致。

在现实中,算力资源错配现象较为严重,很大程度上源于市场扭曲。市场扭曲可能导致资源配置不合理,从而影响整体算力效益。同时,算力要素主要包括算力资本和数字技能劳动力。因此,本文构建如下算力资本要素价格扭曲指数 γ_{K_i} 和算力要素价格绝对扭曲指数 γ_{L_i} :

$$\gamma_{K_i} = \frac{K_i}{K} \left/ \frac{s_i \beta_{K_i}}{\beta_K} \right., \gamma_{L_i} = \frac{L_i}{L} \left/ \frac{s_i \beta_{L_i}}{\beta_L} \right. \quad (18)$$

其中, $s_i = p_i y_i / Y$ 表示 i 地区的产出 y_i 占整个数字经济体产出 Y 的份额; $\beta_K = \sum_i s_i \beta_{K_i}$ 表示产出加权的算力资本贡献值; K_i / K 表示地区 i 使用的算力资本占算力资本总量的实际比重; $s_i \beta_{K_i} / \beta_K$ 表示算力资本有效配置时地区使用算力资本的理论比重。在研究要素产出弹性时,本文采用索洛余值法作为计算基础,为确保结果的准确性,选取柯布-道格拉斯生产函数作为模型。这是因为在规模报酬不变的前提下,该函数能够更准确地反映生产过程中的投入与产出关系。同时,为了确保数据的可比性,产出和资本存量均以 2015 年为基期进行调整。

(三) 数据来源与变量设定

1. 数据来源

本文研究样本为 2015—2022 年中国各省、自治区、直辖市的面板数据,数据来自《中国统计年鉴》《中国人口和就业统计年鉴》《中国算力发展指数白皮书》^①《东数西算下新型算力基础设施发展白皮书》^②,以及各省、自治区、直辖市的统计年鉴。对于部分缺失数据,本文采用插值法进行补充。

2. 被解释变量

被解释变量是全要素生产率(TFP)。本文采用考虑个体异质性的非效率时变面板随机前沿分析方法(SFA)来对我国数字经济中的全要素生产率进行精确测算,原因有以下 3 个方面:首先,SFA 方法在分析过程中能充分考虑随机因素对全要素生产率的影响,这与我国数字经济发展的实际情况相契合,因为数字经济领域存在许多不可测度的随机性因素。采用 SFA 方法可以更准确地捕捉这些不确定性,更全面、更真实地反映全要素生产率的变化趋势。其次,全要素生产率会随着面板数据的变化而产生波动。因此,选取能够充分体现全要素生产率动态变化特点的非效率时变的 SFA 模型,可使研究结果更具现实意义。最后,个体异质性在非效率项中扮演着重要角色。为了提高测算结果的准确性,本文将个体异质性因素纳入模型,降低由于个体差异带来的误差,使研究结果更加可靠。

接着,利用 SFA 计算智算技术效率变化率,同时选择最大似然估计对式(19)进行参数估计:

$$Y_{i,t} = \alpha_0 + \beta X_{i,t} + \varepsilon_{i,t} \quad (19)$$

其中,对于每个单位 i 和时期 t , α_0 代表不能测度的因素; $Y_{i,t}$ 是产出的对数; $X_{i,t}$ 代表要素投入; $\varepsilon_{i,t}$ 代表复合误差项, $\varepsilon_{i,t} = v_{i,t} - u_{i,t}$, $v_{i,t} \sim N(0, \sigma_v^2)$, $u_{i,t} = h_{i,t} \times u_i^*$, $h_{i,t} = f(z_{i,t}, \delta)$, $u_i^* \sim N^+(\mu, \sigma_\mu^2)$, $i = 1, \dots, N, t = 1, \dots, T$; $v_{i,t}$ 代表测量误差和各种具有不确定性的随机因素; $u_{i,t}$ 代表生产的非效率项,是随机变量 u_i^* 与缩放函数 $h_{i,t}$ 的乘积,其中, u_i^* 服从截断正态分布且不随时间变化, $h_{i,t}$ 是影响非效率项的外生变量 $z_{i,t}$ 的函数。在忽略价格因素的前提下,全要素生产率为:

① 源于中国信息通信研究院, http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/202211/t20221105_411006.htm。

② 2022 年 9 月,由国家信息中心信息化和产业发展部主任单志广、中国信通院云计算与大数据研究所所长何宝宏、中国科学院计算技术研究所研究员张云泉联合主编的《东数西算下新型算力基础设施发展白皮书》在北京发布,这是中国“东数西算”战略实施以来的首部算力设施白皮书。

$$\dot{TFP}_i = \dot{TC}_i + \dot{TE}_i + \dot{TS}_i \quad (20)$$

其中, \dot{TFP}_i 、 \dot{TC}_i 、 \dot{TE}_i 、 \dot{TS}_i 分别代表全要素生产率增长率、智算技术进步率、智算技术效率增长率和规模效率增长率。智算技术进步率是指智算生产技术的的前沿面不断扩展,从而带动全要素生产率显著提升。智算技术效率增长率反映了在现有技术水平下,通过优化和提高算力要素之间的协调程度进一步提升生产力。规模效率增长率则与生产规模的扩大紧密相关。当生产规模扩大时,算力要素的投入与产出之间的关系也会发生变化,反映了数字生产率在不同规模条件下的改善情况,即反映了行业规模经济带来的产出增加。

全要素生产率(TFP)的计算过程分为以下 2 个步骤:首先,选择超越对数函数作为生产函数。这种选择的优势在于能够放宽柯布-道格拉斯生产函数中的常替代弹性假设,使其具有更广泛的应用范围;同时,超越对数生产函数还可以用于检验函数形式的有效性。其次,考虑到模型涉及的主要变量,对各个变量进行处理:产出变量用各省扣除通胀因素后的实际 GDP 值衡量,以 2015 年不变价为基准进行计算;采用永续盘存法计算以 2015 年为基年的分省算力资本存量,反映资本的投入情况;用各省年末数字产业就业人口数衡量数字技能劳动投入。在以上处理的基础上构建如下回归方程:

$$\ln Y_{i,t} = \beta_0 + \beta_K \ln K_{i,t} + \beta_L \ln L_{i,t} + \beta_t t + 0.5\beta_{KK} (\ln K_{i,t})^2 + 0.5\beta_{LL} (\ln L_{i,t})^2 + 0.5\beta_{tt} t^2 + \beta_{KL} \ln K_{i,t} \ln L_{i,t} + \beta_{Kt} t \ln K_{i,t} + \beta_{Lt} t \ln L_{i,t} + v_{i,t} - u_{i,t} \quad (21)$$

然后,依据式(18)计算智算技术进步率 TC_{it} 、智算技术效率增长率 TE_{it} 、规模效率增长率 TS_{it} :

$$TC_{i,t} = \beta_0 + \beta_K \ln K_{i,t} + \beta_L \ln L_{i,t} + \beta_t t + 0.5\beta_{KK} (\ln K_{i,t})^2 + 0.5\beta_{LL} (\ln L_{i,t})^2 + 0.5\beta_{tt} t^2 + \beta_{KL} \ln K_{i,t} \ln L_{i,t} + \beta_{Kt} t \ln K_{i,t} + \beta_{Lt} t \ln L_{i,t} \quad (22)$$

3. 核心解释变量

通过运用主成分分析方法,本文对 IPv4 地址数、每万人域名数、长途光缆线路长度、网站数与地区法人单位数的比值、互联网接入端口数等指标进行分析,以数据可得性为基础,构建衡量算力基础设施数量规模的综合性指标。

通信技术是支撑算力基础设施建设的核心动力,也是算力基础设施质量提升的重要标志。因此,本文在衡量算力基础设施质量提升时,主要以 4G 向 5G 技术演进的关键节点为基础,构建以下指数来描绘算力基础设施质量提升的过程:

$$DF_t^{(质量)} = \begin{cases} \ln(55 \times \ln G_{i,t}), & 2013 \text{ 年 } 12 \text{ 月} \leq t < 2019 \text{ 年 } 1 \text{ 月} \\ \ln(55 \times \ln G_{i,t} + 334 \times \ln 5G_{i,t}), & t \geq 2019 \text{ 年 } 1 \text{ 月} \end{cases} \quad (23)$$

其中, $4G_{i,t}$ 和 $5G_{i,t}$ 分别代表在 t 时刻 i 省使用 4G 与 5G 通信技术的用户总量,算力基础设施质量提升的特征变量通过单位时间内 i 省在 t 时刻的总平均可通信增加量的对数值进行测算。4G 技术的平均通信速度为 55 Mbps,以 2013 年 12 月至 2019 年 1 月为例,得到 i 省在 t 时刻算力基础设施质量提升指数:

$$DF_{i,t}^{(质量)} = \ln(55 \times \ln 4G_{i,t}) \quad (24)$$

随着 5G 技术的普及,自 2019 年 1 月起,原先使用 4G 的用户开始大规模转向 5G。同时,新用户在选择通信方式时,也倾向于 5G。5G 技术以其平均 334 Mbps 的通信速度,在速度上具有显著优势,逐渐成为市场主导。相应地,4G 的影响力逐渐减弱。故 i 省在 t 时刻算力基础设施质量提升指数为:

$$DF_{i,t}^{(质量)} = \ln(55 \times \ln 4G_{i,t} + 334 \times \ln 5G_{i,t}) \quad (25)$$

4. 控制变量

本文选取以下控制变量:(1) 数字教育投入。数字教育投入有助于培养具备创新能力的高素质人

才,提高我国智算技术研发水平,加速技术创新成果的转化与应用,从而提高全要素生产率。本文用数字教育支出占地方财政支出的比重衡量数字教育投入,以评估其对人力资本结构的影响以及在推动全要素生产率提升方面的作用。(2)数字金融。数字金融发展在提高全要素生产率方面发挥了积极作用。数字金融中介通过解决信息不对称问题,优化算力资源配置,推动智算技术进步。本文用金融机构年末贷款总额占地区生产总值的比重衡量数字金融发展水平,以评估其在提高全要素生产率方面的贡献。(3)政府干预程度。在优化算力资源配置和促进全要素生产率增长的过程中,政府的干预扮演着至关重要的角色。本文用财政支出占财政收入的比重来衡量政府干预程度,以评估政府财政支出对全要素生产率的影响以及政府干预程度对市场分割的影响。(4)对外开放。对外开放能够促进我国与智算技术前沿国家的交流,推动我国智算技术创新,进而提升全要素生产率。本文用外商算力基建投资综合与地区生产总值的比值来评估对外开放程度,分析其对全要素生产率的影响。(5)交通基础设施。交通基础设施是影响全要素生产率的重要因素之一。本文用铁路、公路里程数衡量交通基础设施状况,以评估交通基础设施的发展状况及其对全要素生产率的影响。

主要变量的定义与描述性统计结果详见表 1。

表 1 主要变量的定义和描述性统计

变量类型	变量代码	变量定义	样本量	均值	标准差	最小值	最大值
被解释变量	lnTFP	全要素生产率对数值	450	-0.040 6	0.130 2	-0.458 2	0.531 2
	lnTC	智算技术进步对数值	450	-0.063 5	0.036 6	-0.436 4	0.008 9
	lnTE	智算技术效率对数值	450	0.103 8	0.105 4	-0.133 2	0.600 2
	lnTS	规模效率对数值	450	-0.092 3	0.059 1	-0.334 7	0.014 2
核心解释变量	DF ^(数量)	算力基础设施数量指标	450	-0.390 5	0.839 5	-2.060 7	2.064 4
	DF ^(质量)	算力基础设施质量指标	450	4.451 4	1.710 6	0.274 5	6.297 8
节点变量	Z ₀	互联网普及率;互联网普及率×100后取对数值	450	1.510 7	0.311 3	0.447 1	1.902 4
	Z ₁	数字教育投入;财政数字教育支出/地方财政支出	450	0.161 5	0.026 5	0.098 7	0.222 1
	Z ₂	数字金融发展;金融机构年末贷款总额/地区生产总值	450	1.259 8	0.485 2	0.537 1	3.084 4
	Z ₃	对外开放;算力基础设施FDI/地区生产总值	450	0.023 1	0.017 6	0.000 1	0.081 7
	Z ₄	政府干预程度;财政支出/财政投入	450	0.257 2	0.195 6	0.079 7	1.379 1
	Z ₅	交通基础设施;铁路、公路里程数	450	8 648.655 3	5 411.805 2	355.877 4	25 128.917 1

四、实证结果分析

(一)基准回归结果

表 2 和表 3 是根据式(14)和式(15)构建的网络向量自回归模型所呈现的基准回归结果。从中可以看出,算力基础设施的数量和质量呈现显著的正向网络外溢效应。算力基础设施的数量规模每提高 1%,全要素生产率将提高约 3%;算力基础设施的质量水平每提高 1%,全要素生产率将提高约 8%。这两项研究结果均证实了算力基础设施在推动数字经济发展和提高生产效率方面的重要作用。

表2 算力基础设施数量对全要素生产率的网络外溢效应

变量	回归方程式(14)							
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
算力基础设施 数量网络	0.017 7 [*] (0.009 8)	0.031 0 ^{***} (0.009 9)	0.030 7 ^{***} (0.010 1)	0.032 7 ^{***} (0.010 1)	0.033 2 ^{***} (0.010 2)	0.033 3 ^{***} (0.010 2)	0.033 6 ^{***} (0.010 2)	0.033 3 ^{***} (0.010 0)
全要素生产率 滞后一期	0.857 5 ^{***} (0.042 8)	0.722 1 ^{***} (0.051 2)	0.704 4 ^{***} (0.052 8)	0.705 5 ^{***} (0.053 4)	0.702 3 ^{***} (0.053 4)	0.701 3 ^{***} (0.053 6)	0.697 7 ^{***} (0.054 0)	0.693 2 ^{***} (0.057 6)
互联网普及率		0.037 7 ^{***} (0.008 5)	0.038 0 ^{***} (0.008 6)	0.038 5 ^{***} (0.009 1)	0.029 8 ^{**} (0.013 8)	0.028 8 ^{**} (0.014 1)	0.028 7 ^{**} (0.014 1)	0.026 1 [*] (0.015 3)
数字教育投入			0.071 4 ^{**} (0.034 2)	0.069 2 [*] (0.036 9)	0.061 8 (0.038 0)	0.071 5 (0.045 4)	0.053 9 (0.052 6)	0.041 6 (0.046 7)
数字金融发展				-0.003 2 (0.019 1)	-0.002 1 (0.019 1)	0.002 2 (0.022 1)	-0.000 3 (0.022 4)	0.001 3 (0.016 1)
政府干预程度					-0.018 8 (0.022 6)	-0.012 0 (0.028 6)	-0.009 3 (0.028 9)	-0.010 3 (0.030 7)
对外开放						0.007 3 (0.009 5)	0.000 3 (0.010 8)	0.000 2 (0.007 8)
交通基础设施							0.007 2 (0.011 0)	0.004 3 (0.015 1)
本省算力基础 设施数量规模								0.008 8 ^{**} (0.004 2)
样本量	450	450	450	450	450	450	450	450
Adj. R ²	0.257 1	0.287 3	0.422 1	0.267 1	0.263 8	0.261 1	0.258 1	0.261 7

注：*、**、*** 分别代表数值在 10%、5% 与 1% 的显著性水平上显著；() 内的数值表示标准误差；下表同。

表3 算力基础设施质量对全要素生产率的网络外溢效应

变量	回归方程式(15)							
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
算力基础设施 数量网络	0.052 5 ^{***} (0.015 9)	0.078 3 ^{***} (0.016 0)	0.081 7 ^{***} (0.016 3)	0.081 8 ^{***} (0.016 4)	0.082 3 ^{***} (0.016 4)	0.082 5 ^{***} (0.016 4)	0.083 6 ^{***} (0.016 5)	0.080 1 ^{***} (0.021 9)
全要素生产率 滞后一期	0.825 4 ^{***} (0.042 3)	0.668 4 ^{***} (0.050 8)	0.648 3 ^{***} (0.052 3)	0.647 8 ^{***} (0.052 8)	0.645 1 ^{***} (0.053 0)	0.643 8 ^{***} (0.053 1)	0.639 2 ^{***} (0.053 4)	0.611 4 ^{***} (0.094 1)
互联网普及率		0.042 2 ^{***} (0.008 2)	0.042 5 ^{***} (0.008 3)	0.042 4 ^{***} (0.008 7)	0.033 9 ^{**} (0.013 3)	0.032 7 ^{**} (0.013 5)	0.032 7 ^{**} (0.013 5)	0.029 6 [*] (0.017 8)

续表(表3)

变量	回归方程式(15)							
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
数字教育投入			0.071 5 (0.033 0)	0.077 9** (0.035 3)	0.070 5 (0.036 3)	0.081 5* (0.043 5)	0.060 8 (0.050 3)	0.052 3 (0.067 0)
数字金融发展				0.001 4 (0.018 3)	0.002 4 (0.018 3)	0.007 3 (0.022 1)	0.004 4 (0.021 4)	0.003 9 (0.026 2)
政府干预程度					-0.018 2 (0.021 5)	-0.010 5 (0.021 1)	-0.007 3 (0.027 6)	-0.006 2 (0.019 1)
对外开放						0.004 3 (0.009 2)	0.000 3 (0.010 4)	0.000 2 (0.009 4)
交通基础设施							0.008 5 (0.010 4)	0.008 1 (0.011 2)
本省算力基础设施质量水平								0.010 4* (0.005 6)
样本量	330	330	330	330	330	330	330	330
Adj. R ²	0.289 4	0.323 2	0.307 8	0.306 6	0.303 5	0.300 2	0.298 1	0.302 3

算力基础设施所发挥的正向网络外溢效应,对现有文献关于基础设施促进全要素生产率增长的相关研究进行了有益的补充和完善;同时,进一步印证了以互联网普及率来衡量算力基础设施的重要性,以及算力基础设施发展对全要素生产率提升的正向作用。算力基础设施在当今社会经济发展中具有举足轻重的地位,其对全要素生产率(*TFP*)的正向网络外溢效应主要体现在以下2个方面:首先,在算力基础设施规模不断扩大的过程中,其对*TFP*增长的正向网络外溢效应愈发显著。当一个省份的算力基础设施规模扩大时,将对其余省份的*TFP*产生积极影响。这种影响通过地理网络得到强化,从而提升*TFP*的增长速度。此外,这种正向影响的程度还会随着两地关联性的增强而加深。这意味着,在一个紧密相连的经济网络中,发达的算力基础设施能够带动周边地区更快地发展,进而提高整体*TFP*。其次,算力基础设施的迭代升级对*TFP*增长产生显著的正向网络外溢效应。一个省份的算力基础设施实现升级,将对具有较强地域关联的其他省份的*TFP*产生显著推动作用,不仅能加强省份之间的经济联系,还有助于提升整体的全要素生产率。

(二) 稳健性检验

本文主要通过地理距离来构建省份间的关联关系。为了确保研究结论的稳定性,本节选取经济距离和人口距离2个影响因素,分析算力基础设施的网络外溢效应对全要素生产率增长的影响。设定经济距

离与人口距离指数为: $a_{i,j} = \frac{|dis_{i,j}|}{\sum_{j=1}^N |dis_{i,j}|}$, 其中, $dis_{i,j}$ 为*i*省和*j*省在GDP总量和人口数量差值的倒数。

具体结果如表4所示。

根据表4的研究结果,可以发现算力基础设施数量网络与质量网络在经济距离和人口距离影响下,均具有显著的正向网络外溢效应,进一步说明算力基础设施的网络外溢效应对全要素生产率的提升具有显著影响,论证了前述研究结论的稳健性。

表4 算力基础设施在不同距离下的网络外溢效应

变量	数量网络		质量网络	
	经济距离	人口距离	经济距离	人口距离
算力基础设施网络	0.025 34 ** (0.010 1)	0.030 7 *** (0.010 4)	0.083 2 *** (0.021 8)	0.085 3 *** (0.031 3)
全要素生产率滞后一期	0.644 2 *** (0.062 8)	0.706 8 *** (0.016 1)	0.679 2 *** (0.079 1)	0.630 2 *** (0.073 5)
节点变量	控制	控制	控制	控制
样本量	450	450	330	330
Adj. R ²	0.268 1	0.256 0	0.321 2	0.302 7

(三) 内生性检验

根据现有研究成果,TFP 增长与算力新质生产力间可能存在相互依存的关系。一方面,算力基础设施有助于推动智算技术进步与效率提升,进而有效促进 TFP 增长;另一方面,TFP 具有显著的区域扩散效应。在地区间 TFP 水平存在差异的情况下,落后地区不断向先进地区追赶,推进算力新质生产力的应用,从而缩小区域 TFP 水平差距。这种相互依存关系可能导致内生性问题,从而影响计量结果的准确性。

为解决此问题,本文采用滞后一期和滞后三期的算力基础设施数量指标作为工具变量,对模型分别进行两阶段最小二乘法估计(2SLS),结果见表 5。结果表明,估计结果与基准回归结果相比没有显著性差异,内生性问题对实证结果的影响较小,即本文的实证结果是稳健的。

表5 内生性检验

变量	(1) lnTFP	(2) lnTFP	(3) lnTFP
DF ^(数量)	0.596 *** (0.057)	—	—
	—	0.744 *** (0.091)	—
	—	—	0.744 *** (0.091)
常数项	-1.145 *** (0.134)	-1.391 *** (0.164)	-1.366 *** (0.163)
观测值	342	278	278
R ²	0.475	0.401	0.412

(四) 机制分析

1. 网络外溢效应通过缓解算力要素错配推动全要素生产率增长

算力资本与数字技能劳动力的价格失衡可能会对全要素生产率的提升产生负面影响。在算力要素价格扭曲的情况下,市场无法有效配置算力要素,从而降低了生产效率。然而,算力基础设施网络具有的外溢效应能够在一定程度上减轻价格扭曲对生产力增长的阻碍作用。表 6 的实证分析结果显示,算力基础设施网络(包括数量网络和质量网络)与机制变量的交互项回归系数为正,表明算力基础设施网络的外溢效应在很大程度上降低了价格扭曲对生产率增长的抑制程度,通过降低资本与劳动力错配,算力基础设施有力地促进了全要素生产率的提高。

表6 算力基础设施网络外溢效应与缓解错配的机制分析

变量	数量网络		质量网络	
	算力资本 扭曲指数	数字技能劳动力 扭曲指数	算力资本 扭曲指数	数字技能劳动力 扭曲指数
$M_{i,t} \times$ 数字 基础设施网络	0.019 2 ** (0.008 4)	0.021 2 ** (0.009 1)	0.049 2 *** (0.012 1)	0.055 2 *** (0.012 5)
$M_{i,t}$	-0.083 2 ** (0.033 1)	-0.057 9 ** (0.026 5)	-0.041 6 *** (0.012 8)	0.008 1 (0.016 6)
全要素生产率 滞后一期	0.765 1 *** (0.061 2)	0.700 2 *** (0.079 2)	0.690 1 *** (0.053 7)	0.633 3 *** (0.020 3)
节点变量	控制	控制	控制	控制
样本量	450	450	330	330
Adj. R^2	0.245 6	0.236 0	0.299 7	0.243 3

2. 网络外溢效应通过推动创新促进全要素生产率增长

为深入探讨算力基础设施在促进全要素生产率增长中的作用,本文从以下2个方面考虑:一个是创新数量,二是创新质量。考虑到创新质量对全要素生产率的影响更为显著,将创新质量作为衡量智算技术进步的关键指标;用各省实用新型和外观设计专利数量衡量创新数量,用发明专利数量衡量创新质量。

基于式(16)与式(17)进行回归估计,结果如表7所示。由表7可知,网络外部性在提升创新数量和创新质量方面具有显著作用,进一步阐述了可以通过优化算力基础设施的数量和质量推动全要素生产率的提高。在创新对全要素生产率的促进作用方面,算力基础设施数量与质量间存在显著的差异,相较于单纯地增加算力基础设施的数量,提升算力基础设施的质量所产生的网络外部性更能通过促进创新有效推动我国全要素生产率的提升。这是因为算力基础设施质量的提升不仅可以直接推动创新,还可以通过优化资源配置、提高生产效率等方式,进一步提升全要素生产率。至此,假设H1得到验证。

表7 算力基础设施网络外溢效应与创新推动的机制分析

变量	数量网络		质量网络	
	创新数量	创新质量	创新数量	创新质量
$M_{i,t} \times$ 算力 基础设施网络	0.006 1 ** (0.002 6)	0.006 8 ** (0.002 9)	0.001 2 (0.001 6)	0.000 8 (0.002 1)
$M_{i,t}$	0.017 12 * (0.009 0)	0.001 3 * (0.007)	0.025 2 ** (0.010 1)	0.027 2 ** (0.013 3)
全要素生产率 滞后一期	0.500 1 *** (0.096 2)	0.514 2 *** (0.069 1)	0.603 1 *** (0.085 2)	0.600 3 *** (0.079 5)
节点变量	控制	控制	控制	控制
样本量	330	330	450	450
Adj. R^2	0.325 2	0.316 1	0.323 6	0.312 1

由现有研究结果可知,算力基础设施质量与数量在推动创新 and 全要素生产率增长方面存在明显区别。首先,现代通信技术的应用能够极大加速知识的传播,进而促进企业创新;通信技术的持续更新换代

对于创新推动作用的影响愈发重要。这一点可以从创新微观主体,即企业的角度进行验证。智算技术的革新为企业提供了强大的计算能力,激发了企业的生产潜力,提升了经营效率,从而推动创新的高质量发展。其次,在基础设施建设方面,新基建的崛起,如 5G、人工智能等,对于创新质量的提升具有积极的推动作用。特别是智算技术创新,不仅为企业提供了新的生产工具,更为产业结构的升级换代提供了强大动力,对产业结构升级的推动作用显著。综合现有研究结论以及本文对算力基础设施质量网络与数量网络在推动创新和全要素生产率增长的异质性实证分析可知,相较于单纯增加算力基础设施的数量,提升算力基础设施的质量更能推动技术创新,从而促进全要素生产率增长。

(五) 异质性分析

由表 8 的实证分析结果可知,在推动智算技术进步率、智算技术效率增长率以及规模效率增长率方面,算力基础设施网络的外溢效应呈现显著的差异性,算力基础设施网络的外溢效应能够显著促进智算技术效率和规模效率的提升;但对于智算技术进步率,该外溢效应却表现为显著的抑制特征。相较于对智算技术效率增长率与规模效率增长率的促进作用,算力基础设施网络外溢效应对智算技术进步率的抑制作用较小。

表 8 算力基础设施网络外溢效应对全要素生产率的异质性影响

变量	数量网络			质量网络		
	智算技术进步率	智算技术效率	规模效率	智算技术进步率	智算技术效率	规模效率
算力基础设施网络	-0.004 3 ** (0.002 1)	0.019 3 *** (0.006 5)	0.014 3 *** (0.004 8)	-0.012 6 ** (0.006 2)	0.051 4 *** (0.014 2)	0.032 6 *** (0.011 1)
全要素生产率滞后一期	0.851 4 *** (0.070 7)	0.658 6 *** (0.047 7)	0.816 6 *** (0.059 2)	0.797 1 *** (0.090 2)	0.655 1 *** (0.050 1)	0.882 5 *** (0.075 3)
节点变量	控制	控制	控制	控制	控制	控制
样本量	450	450	450	330	330	330
Adj. R ²	0.087 2	0.461 1	0.160 4	0.130 5	0.490 3	0.193 5

智能计算技术(简称智算技术)的发展对生产力的提升具有显著的推动作用,这种作用通过其进步率得以体现。智算技术的进步率不仅反映了生产技术的先进性,也揭示了其在推动经济发展中的重要性。首先,先进的智算技术具有天然的自然垄断特性。在技术发布初期,由于其复杂性和高昂的推广成本,智算技术往往难以在全国范围内迅速普及,这些技术会首先在智算技术已经存在的地区得到应用,从而形成自然垄断。垄断带来地区间的智算技术差距,使某些地区在生产力方面具有相对优势。其次,算力基础设施在促进地区间生产力发展的过程中起到了至关重要的作用,它能够缓解算力要素(包括算力资本和数字技能劳动力)的价格扭曲问题,使这些要素在地区间的流动变得更加顺畅。在此基础上,算力基础设施的网络外溢效应进一步凸显了先进智算技术与算力资本和数字技能劳动力紧密结合的优势。然而,算力基础设施网络的外溢效应并未在平均水平上推动各地区智算技术进步率的增长,反而加剧了地区间的差距。这是因为先进智算技术的地区间差距在这种外溢效应下被进一步放大,从而使某些地区在生产效率上拥有更大的比较优势。

简单来说,智算技术效率和规模效率就是利用现有的智算技术水平,通过合理配置和利用算力资源,以及发展规模经济来提升生产效率。在前期的研究中,算力基础设施具有显著的网络外溢效应,这种效应能够优化算力要素的配置,减少错配现象,从而推动全要素生产率的提升;同时,这也使算力资本和数

字技能劳动力得以更有效结合,提高其配置效率。这种优化和效率的提升,对促进智算技术的进步和规模效率的提升起到了积极的推动作用。除此之外,算力基础设施的质量网络对全要素生产率的增长具有显著影响,主要体现在2个方面:一是通过技术创新推动生产率的提升,二是促进新技术的诞生和应用,进一步推动智算技术的进步。

五、研究结论与对策建议

(一) 研究结论

本文通过深入剖析算力基础设施的基础属性与“数字化”特征间的内在联系,运用2015—2022年中国30个省、自治区、直辖市的面板数据,对算力新质生产力与全要素生产率间的关联及作用机制进行系统研究。研究结果表明:首先,算力基础设施具有显著的网络溢出效应,这一效应推动了全要素生产率的增长,算力基础设施的规模和质量均对全要素生产率产生积极影响。其次,算力基础设施通过促进创新、缓解算力资源错配实现全要素生产率的增长,这说明优化算力资源配置和激发创新活力是提高全要素生产率的关键途径。进一步研究发现,在促进全要素生产率增长方面,算力基础设施数量与质量网络溢出效应存在一定差异:质量网络可通过缓解生产要素错配、推动创新来提高全要素生产率,而数量网络仅能通过缓解生产要素错配来促进全要素生产率的提升。最后,算力基础设施的数量与质量网络溢出效应通过推动技术效率和规模效率的提升,进一步推动全要素生产率的增长。本研究从多个维度揭示了算力新质生产力与全要素生产率之间的关联及作用机制,为我国算力基础设施发展提供了有益参考。

(二) 对策建议

基于上述研究结论,本文提出以下对策建议:

1. 推动算力技术创新,促进算效提升

一方面,基于对大数据分析和AI技术的智慧管理项目研究,打造AI算力资源调度系统,对AI算力的IT系统能效进行全生命周期管控;针对AI训练、AI推理、AI研发等场景,对AI算力进行效率优化;同时引入AI智慧算法,通过AI实时寻优获取大型数据中心、算力中心、超算中心等算力基础设施的最优布局策略,实现算力基础设施总体布局最优的智慧运行。另一方面,加强专注数据加速处理以及云端各类资源管理的DPU芯片创新,推动多样化、跨体系处理器协同,重构重建硬件体系架构,促进软硬融合协同。具体来说,硬件架构突破以CPU为中心的体系,应用维度从芯片内、节点内向系统级分区异构逐步深化,实现更大规模的多系统高效并行调度。软件协同以跨域统一和灵活调配为重要方向,借助统一异构软件平台整合编译器、编程语言、加速库、开发工具等,提供面向底层不同计算架构的编程模型和应用程序接口,实现多样异构算力的统一管理调度。依靠数字化手段推动算力技术创新,是进一步促进算效提升、实现算力优化升级的必经之路。

2. 汇聚算力资源,优化算力要素供给

首先,应整合各类可利用的算力资源,包括计算设备、云平台、大数据中心等,打造统一的算力资源监测、调度、管理和运营体系。这个体系将有助于优化资源配置,提高算力资源的利用效率,为各类应用场景提供坚实的算力保障。其次,应着重发展新型数据中心。这类数据中心具备汇集多样化数据资源、提供高效算力服务、处理大规模数据的能力。新型数据中心不仅能够满足日益增长的算力需求,还能承担国家重要数据资源的存储备份等职责,保障国家数据安全。此外,需强化算力资源的统筹调度与供需对接,支持算力基础设施集群建立计算能力统一调度运营机制,提升算力资源的外部输出和服务能力,这将有助于实现算力资源的高效利用,降低社会成本,提升我国在全球算力市场的竞争力。在推进算力资源

整合和发展的同时,还要加快“老旧小散”数据中心的改造升级,引导核心区域数据中心向边缘数据中心发展,推动现有“老旧小散”数据中心的迁移、整合,提升现有数据中心对全要素生产率增长的贡献。这将有助于优化数据中心布局,降低能源消耗,提高算力服务水平,满足不断增长的算力需求。总之,构建全面的算力资源监测、调度、管理和运营体系,发展新型数据中心,强化算力资源统筹调度,加快数据中心改造升级,是实现我国算力能力提升的重要途径。

3. 加大智慧教育投入力度,培育算力基础设施创新人才

为了支持我国数据中心的建设和大数据产业发展,应成立大数据产业研究院,为相关政策制定和产业发展的决策过程提供有力的智力支持和咨询服务。通过深入研究和分析当前产业面临的问题,提出针对性的解决方案,从而推动整个行业的健康发展。各级政府应制定并落实一系列配套政策,鼓励支持高校和职业院校优化专业设置,特别是在数字经济、人工智能、大数据、区块链、虚拟现实等领域,应进行合理规划和管理,满足产业发展对人才的需求。通过调整和优化专业设置,培养更多具备相关专业技能的人才,为产业发展奠定坚实基础。此外,还应加强职业院校、高校和科研院所与省外人工智能、大数据等领域机构的合作,通过共建产业学院、研究院、联合实验室和实习基地等,实现资源共享和优势互补,进一步推动人才培养和科技创新。为了确保我国在数据采集、分析、清洗、加工等关键领域的领先地位,需加大对蓝领技术人才的培养力度,注重储备人工智能、机器人、虚拟现实和算力应用等领域的中高端专业人才,以满足产业发展对人才的需求。通过提高人才培养质量和数量,确保我国在数字经济和大数据产业领域的持续竞争力。通过提升算力基础设施创新人才储备和培育工作的效率和质量,可以为全要素生产率的提升注入新的动力。

(三) 边际贡献与未来展望

本文可能的边际贡献在于:从新质生产力的视角出发,构建考虑个体特征变量和环境变量的生产函数模型,并将个体异质性与生产函数中的非效率项进行区分,消除随机因素的影响,更准确地刻画生产过程中的技术进步和效率变化,为算力新质生产力对全要素生产率增长作用机制的研究提供了有益的补充。

未来还可以从以下方面进行拓展研究:首先,在本研究基础上进一步对劳动力进行细分,分析不同技能劳动力对算力基础设施中新质生产力的影响,分析其对全要素生产率增长的作用效果;其次,在本研究基础上引入研发部门,深入了解研发投入如何影响算力基础设施的建设,进而影响全要素生产率增长;最后,城市资源异质性会限制算力基础设施的发展,因此,可以在本研究基础上考虑城市的不同资源对算力基础设施中新质生产力的影响。

参考文献:

- [1] 习近平主持召开新时代推动东北全面振兴座谈会强调 牢牢把握东北的重要使命 奋力谱写东北全面振兴新篇章[N]. 人民日报,2023-09-10(1).
- [2] 蒲清平,向往.新质生产力的内涵特征、内在逻辑和实现途径——推进中国式现代化的新动能[J].新疆师范大学学报(哲学社会科学版),2024(1):77-85.
- [3] 易成岐,窦悦,陈东,等.全国一体化大数据中心协同创新体系:总体框架与战略价值[J].电子政务,2021(6):2-10.
- [4] 杨洁.我国算力规模位居全球第二[N].中国证券报,2022-08-01(A05).
- [5] 韩鑫.夯实数字经济发展底座[J].中国报业,2021(16):7.
- [6] 胡锦涛.工信部:我国算力核心产业规模达到1.8万亿[EB/OL].(2023-07-18)[2023-09-05].<http://www.iitime.com.cn/html/10201/15193730.htm>.

- [7] 王姣娥,杜方叶,肖凡.新型基础设施的空间布局模式研究——以大型数据中心为例[J].地理学报,2023(2):259-272.
- [8] 徐政,郑霖豪,程梦瑶.新质生产力助力高质量发展:优势条件、关键问题和路径选择[J].西南大学学报(社会科学版),2023(6):12-22.
- [9] 张林,蒲清平.新质生产力的内涵特征、理论创新与价值意蕴[J].重庆大学学报(社会科学版),2023(6):137-148.
- [10] 令小雄,谢何源,妥亮,等.新质生产力的三重向度:时空向度、结构向度、科技向度[J].新疆师范大学学报(哲学社会科学版),2024(1):67-76.
- [11] 吕廷杰,刘峰.数字经济背景下的算力网络研究[J].北京交通大学学报(社会科学版),2021(1):11-18.
- [12] SOLOW R K. Technical change and the aggregate production function[J]. Review of Economics and Statistics, 1957(39):312-320.
- [13] FARRELL M J. The measurement of productive efficiency[J]. Journal of the Royal Statistic Society, 1957(120):252-259.
- [14] LEIBENSTEIN H. Allocative efficiency vs x-efficiency[J]. American Economic Review, 1966(8):152-188.
- [15] 周方. 广义技术进步与产出增长因素分解——对“Solow 余值法”的反思[J]. 数量经济技术经济研究, 1994(8):34-42,68.
- [16] 徐瑛,陈秀山,刘凤良.中国技术进步贡献率的度量与分解[J].经济研究,2006(8):93-103,128.
- [17] 王志平.生产效率的区域特征与生产率增长的分解——基于主成分分析与随机前沿超越对数生产函数的方法[J].数量经济技术经济研究,2010(1):33-43,94.
- [18] BENHABIB J, SPIEGEL M M. The role of human capital in economic development: Evidence from aggregate cross-country data [J]. Journal of Monetary Economics, 1994, 34(2):143-173.
- [19] 孙琳琳,任若恩.中国资本投入和全要素生产率的估算[J].世界经济,2005(12):3-13.
- [20] 李小平,朱钟棣.中国工业行业的全要素生产率测算——基于分行业面板数据的研究[J].管理世界,2005(4):56-64.
- [21] 张军,施少华.中国经济全要素生产率变动:1952—1998[J].世界经济文汇,2003(2):17-24.
- [22] 颜鹏飞,王兵.技术效率,技术进步与生产率增长:基于 DEA 的实证分析[J].经济研究,2004(12):55-65.
- [23] 郭庆旺,贾俊雪.中国全要素生产率的估算:1979—2004[J].经济研究,2005(6):51-60.
- [24] 张保胜.全要素生产率测算与技术的 σ -收敛效应——基于中国省际数据的空间计量分析[J].科技管理研究,2014(13):160-164,169.
- [25] DONALDSON D. Railroads of the Raj: Estimating the impact of transportation infrastructure[J]. American Economic Review, 2018, 108(4):899-934.
- [26] 赵昕,刘静.高铁开通的技术进步效应影响研究[J].现代经济探讨,2021(5):92-100.
- [27] 郭艺,曹贤忠,曾刚.高铁建设对特殊类型地区产业转型升级的影响——来自资源型城市的证据[J].地理研究,2023(5):1326-1342.
- [28] KOUTROUMPIS P. The economic impact of broadband on growth: A simultaneous approach[J]. Telecommunications Policy, 2009, 33(9):471-485.
- [29] LIN W T, SHAO B B M. The business value of information technology and inputs substitution: The productivity paradox revisited [J]. Decision Support Systems, 2006, 42(2):493-507.
- [30] FORMAN C, GOLDFARB A, GREENSTEIN S. The internet and local wages: A puzzle[J]. American Economic Review, 2012, 102(1):556-575.
- [31] 张杰,付奎.信息网络基础设施建设能驱动城市创新水平提升吗?——基于“宽带中国”战略试点的准自然试验[J].产业经济研究,2021(5):1-14,127.
- [32] 沈坤荣,史梦昱.以新型基础设施建设推进产业转型升级[J].江苏行政学院学报,2021(2):42-49.
- [33] 钞小静,薛志欣.新型信息基础设施对中国企业升级的影响[J].当代财经,2022(1):16-28.
- [34] 孙伟增,郭冬梅.信息基础设施建设对企业劳动力需求的影响:需求规模、结构变化及影响路径[J].中国工业经济,2021(11):78-96.

- [35] SHAPIRO C, VARIAN H R. Information rules: A strategic guide to the network economy[M]. Boston: Harvard Business School Press, 1998: 183 – 190.
- [36] 周申, 任思蓉. 人力资本结构高级化、产业结构优化与高质量发展——基于中介效应模型[J]. 云南财经大学学报, 2023(11): 32 – 50.
- [37] ZHU X N, PAN R, LI G D, et al. Network vector auto regression[J]. The Annals of Statistics, 2017, 45(3): 1096 – 1123.

Research on the mechanism of computing power new quality productivity on the growth of total factor productivity

SHEN Hongbing¹, YU Jing², XIA Senmao³

(1. School of Economics, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400041, China;

2. Enterprise Management Innovation Center, Central University of Finance and Economics, Beijing 100086, China;

3. Business School, University of Surrey, London TW20 0EX, UK)

Summary: As a new quality productivity in the era of digital economy, computing power is of great importance in empowering the new growth of the digital economy and promoting the high-quality development of the digital economy. Computer power is characterized by its commonality, externality, network performance and iterative nature. Based on these characteristics, the connection between network spillover effect of new computing power and total factor productivity (TFP) as well as its mechanism of action are studied. The panel stochastic frontier analysis is used to measure the total factor productivity, and it is found that the new quality productivity of computing power has a significant promoting effect on the total factor productivity, which comes from the promotion effect of the new quality productivity of computing power on the efficiency and scale efficiency of digital technology. The new quality productivity of inter-provincial individuals can have a significant positive network spillover effect on the total factor productivity of other provinces associated with it in terms of geography, economy, and population. Studies have shown that: (1) The network spillover effect of new computing power productivity can significantly promote the growth of total factor productivity by improving the quantity and quality of innovation; (2) the spillover effect of the new productivity network of computing power can also promote the growth of total factor productivity by alleviating the mismatch of computing power investment and digital skills and labor; (3) the quantity network of computing infrastructure and the quality network of computing infrastructure are heterogeneous when promoting the growth of total factor productivity through innovation. This paper innovatively expands the theoretical research on the impact of the new quality productivity of computing power on the growth of total factor digital productivity under the background of digital economy, and provides a useful reference for the government to formulate digital economy policies.

Key words: computing power new quality productivity; total factor productivity; panel stochastic frontier analysis; network spillover effect; computational economy

(责任编辑 况 勇)