

引用格式:金海燕,李佩.数字基础设施驱动技术创新的传导机制与效应:经验证据与数理模拟[J].技术经济,2025,44(2):67-84.

Jin Haiyan, Li Pei. Mechanisms and effects of digital infrastructure on technological innovation: Empirical evidence and mathematical simulation[J]. Journal of Technology Economics, 2025, 44(2): 67-84.

数字基础设施驱动技术创新的传导机制与效应: 经验证据与数理模拟

金海燕^{1,2}, 李佩³

(1. 重庆大学管理科学与房地产学院, 重庆 400045; 2. 重庆大学建设经济与管理中心, 重庆 400045;
3. 复旦大学国际关系与公共事务学院, 上海 200433)

摘要:立足于我国实施创新驱动发展战略。推动数字基础设施体系建设的现实背景,首先从创新投入-产出视角系统分析数字基础设施驱动技术创新的理论机制;其次结合文本信息挖掘和2011—2021年省级面板数据,采用面板向量自回归(PVAR)模型考察数字基础设施与技术创新的经验事实关系;最后构建包含技术创新部门的动态随机一般均衡(DSGE)模型,通过数值模拟揭示数字基础设施驱动技术创新的传导路径与效应。实证结果显示,数字基础设施投资和当期数字基建水平对技术创新均存在长期的正向影响。模拟结果进一步表明:数字基础设施投资通过研发劳动、资源配置等正向影响自主创新和短期的模仿创新;当期数字基建水平通过研发资金、创新补贴、数字技术环境质量等正向影响中长期的自主创新和短期的模仿创新;两类冲击的影响效应分别呈现出“厚积薄发”型和“立竿见影”型特征。本文为政府引导、充分释放其技术创新效应和经济效益提供理论支撑与决策参考。

关键词:数字基础设施;技术创新;传导机制;DSGE模型

中图分类号:F062.4;F22 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-980X(2025)02-0067-18

DOI:10.12404/j.issn.1002-980X.J24062605

一、引言

党的二十大报告强调我国深入实施创新驱动发展战略。《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议》提出我国进入创新型国家前列的总体目标。数字基础设施作为促进使能技术融合、构建创新生态系统的关键支撑,是推动创新驱动发展的网络传输纽带和信息物质载体^[1],是助力经济发展动能转换的重要战略资源,受到国家层面高度重视。2023年2月发布的《数字中国建设整体布局规划》进一步明确了“夯实数字基础设施”和“强化数字技术创新”两大目标。数字基础设施驱动技术创新的战略意义日益显现,解析驱动作用的传导机制与效应至关重要。

数字基础设施是以新一代信息技术和信息网络为核心,以支撑数字经济发展为最终目的的数字技术、相关服务和设施,具有共享、无界、开放等特点^[2,3],兼具基础设施的公共品属性、初始投资大、建设和回报周期长等特征,其投资、建设需要适度超前部署,先于生产性活动开展^[4]。作为数据、信息、知识等要素的流动载体,其对创新活动的资源配置、效率提升、环境改善、主体协作等产生重大影响^[5-7]。具体地,数字基础设施通过高效的信息传递突破时空限制^[8],增强区际经济活动关联的广度和深度,形成创新活动物质流、信息流、能量流的高效协同网络,降低交易费用^[9],拓展创新资源的联通范围和配置效率提升^[10]。数字基础设施引起人们思维方式和行为特征的变革,影响创新活动的效率^[11],加强各创新主体之间、主体与环境间的联系,实现企业与政府、社会、市场等多维主体协同创新^[12],形成较强的规模经济和范围经济效应^[5],推动经济发展。

收稿日期:2024-06-26

基金项目:国家自然科学基金“人口结构对区域房价的影响效应及差异性:基于多区域OLG-CGE模型研究”(71740027);中央高校基本科研项目“新时代背景下建设经济与管理中心高质量发展提升路径研究”(2022CDJSKPT25)

作者简介:金海燕(1976—),博士,重庆大学管理科学与房地产学院副教授,研究方向:房地产经济、技术创新;(通信作者)李佩(1999—),复旦大学国际关系与公共事务学院博士研究生,研究方向:房地产税、技术创新。

既有研究从企业、产业、区域等视角,就数字技术、数字化、信息化等影响技术创新的具体效应和传导机制进行了卓有价值的探索,如韩先锋等^[13]、Paunov 和 Rollo^[14]、Liu 等^[15]、张杰和付奎^[16]、孟庆伟和徐思婕^[17]等。作为数字技术、信息化、数字化的支撑和载体,数字基础设施对技术创新的直接驱动作用,近两年才得到较多关注。在企业层面,数字基础设施通过降低研发成本、加强研发合作、提升冗余资源利用水平、激励研发投入、缓解融资约束、强化市场竞争、减轻税负压力等路径提升企业技术创新水平^[18-20]。在区域层面,数字基础设施通过打造创新生态系统、降低交易成本、优化资源配置、扩大技术溢出、推动人才和产业集聚、促进数字金融发展等路径提升区域技术创新水平^[21-23]。在此基础上,部分研究揭示了数字基础设施驱动技术创新的异质性,驱动效应在非国有企业较国有企业更为显著,在成长期和成熟期企业较衰退期企业更为显著^[19],在数字政策支持力度大、人力资本水平高、交通发达的地区更为显著^[24]。

上述研究主要通过计量模型,实证检验数字基础设施驱动技术创新的影响效应及各传导路径的显著性。考虑数字基础设施的公共品属性和战略属性,仅在单个市场开展的局部均衡分析稍显片面。基于我国经济系统实际运转所处的市场、技术、制度等情境,在一般均衡框架下探讨其与技术创新的关系的研究较为匮乏。部分学者在一般均衡框架下构建理论模型开展相关研究,例如,将新型基础设施建设投资云计算服务、电网基础设施、政府基础设施投资等引入动态一般均衡模型中^[25-27],考察经济发展所受影响,基础设施均以政府投资的形式纳入生产函数,技术创新被视作外生变量。亦有部分学者考虑技术内生性,基于内生DSGE模型,探讨技术研发与扩散、R&D投入、货币政策、技术应用与转换、财政研发资助和专利保护政策等对经济发展的影响^[28-32],探讨金融发展以创新为中介影响产业结构,探讨创新效率差异化影响创新型企业 and 模仿型企业^[33-34]。可见研发效率、研发投入、货币政策等是技术内生的关键变量,但数字基础设施赋能技术创新的内生机制被普遍忽略。

尽管学者们对数字基础设施赋能技术创新进行了诸多有益探索,但仍存在深化空间。研究内容方面,一是影响路径和传导机制的理论探讨较为局部和分散,尚未形成系统的分析框架,可能存在关键路径的遗漏,二是理论机制在实证模型构建中考虑不充分,将完整路径纳入统一框架和检验的研究仍处于空白。研究尺度方面,多从单一的企业或区域视角开展二者关系的研究,忽略了微观特征与宏观效应的关联作用。研究方法方面,多在局部均衡框架下实证检验各影响路径的显著性,无法系统解释数字基础设施条件下多要素、多路径协同作用对技术创新的影响。

为弥补上述不足,本文在既有研究基础上开展了以下工作:从创新投入-产出视角系统分析数字基础设施驱动技术创新的理论机制;在此基础上结合文本信息挖掘和省级数据,采用PVAR模型实证考察数字基础设施对技术创新的影响效应;基于理论与实证分析,将理论机制纳入统一分析框架,构建包含技术创新部门的DSGE模型,通过数值模拟和脉冲响应分析识别驱动作用的效应与传导机制。本文的研究贡献在于:第一,系统性地揭示数字基础设施通过投入和产出端影响技术创新的理论机制与内在逻辑,深化了二者关系的理论基础;第二,创新性地将数字基础设施相关变量、自主创新和模仿创新两类部门引入DSGE模型,拓宽了该模型的应用领域;第三,从一般均衡视角识别了数字基础设施影响技术创新的关键路径,揭示了经济系统内各主体行为特征和变量变动规律,为政府合理引导、充分释放数字基础设施的创新效应和经济效益提供了重要参考。

二、理论机制

创新是由生产要素和方式的重组引起经济发展质变的过程^[35],本质是对创新要素进行安排和使用的经济行为,以获取经济效益为目的。技术创新是从创新投入到产出的生产过程,投入即创新要素,产出包括创新活动的技术产出和最终经济产出。接下来从创新投入-产出视角对数字基础设施驱动技术创新的理论机制进行系统分析,分析框架如图1所示。

(一) 数字基础设施对创新投入的影响

创新投入主要指创新要素,学界对创新要素尚无统一界定。本文将数据、信息和知识、技术、实物资本和人力资本等视作创新要素投入,并分析数字基础设施对其产生的影响。

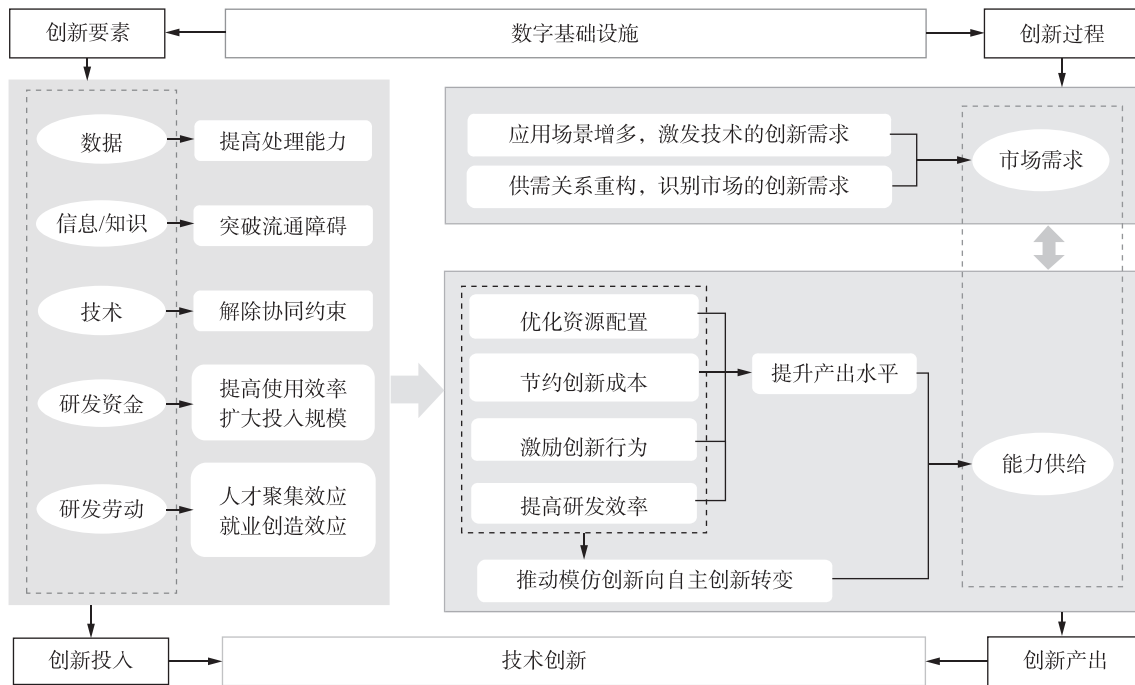


图1 创新投入-产出视角下数字基础设施驱动技术创新的内在机制分析

首先,数据、信息和知识方面。数据是数字时代的新型生产要素和重要创新资源,为其流动修建“高速公路”正是数字基础设施的建设目标之一。作为生产、储存和传输载体,数字基础设施提升数据要素的流动性,降低其使用门槛^[36-37],技术部门得以实现对数据的最大化处理利用,拓展创新思路^[7]。数据是信息、知识的重要来源和载体,依托数字基础设施的发展,外部信息和前沿知识能破除地理距离和运输成本的限制^[9],实现便捷交互,信息的不对称性、不完全性及知识的传递障碍等问题得到缓解。对于随人力资本流动的隐性知识,通过数字基础设施与交通设施的合作互补强化其外溢性^[22],加速传递与共享、积累与吸收。

其次,技术方面。数字基础设施具有公共品属性,所涉及技术多为通用技术^[28],技术模块集成应用能解除行业、区域间技术扩散交互的约束,有利于改进效率和转化效率提升,亦为其他领域创新及多领域协同创新提供思路,推动技术环境质量改善和整体创新水平提升。创新主体亦能借助数字基础设施实现技术积累,为后续创新夯实基础,形成良性循环。

最后,实物资本和人力资本方面。实物资本主要指研发资金,即技术部门用以开展基础研究、技术改进与转化等创新活动的资金支持。数字基础设施为资金在金融机构与创新主体间的使用与交易提供便捷平台,缓解信息不对称性,提高配置效率。与数字基础设施配套出台的税收优惠政策亦能缓解融资约束与税负压力^[20,39],一定程度提升创新主体的研发投资意愿和投资强度、扩大资金投入规模。人力资本主要指研发劳动,是提供智力支撑、能动性最强的创新要素^[40]。根据技能偏向型技术进步假说^[41]和就业创造效应^[42],数字基础设施的普及应用将增加市场对高技能人力资本的刚性需求和就业岗位多元程度。此外,数字基础设施有助于区域数字化平台的搭建和人才知识网络的完善,推动地区公共服务效率的提升和生活质量的改善,形成人才聚集效应^[23]。亦需考虑由于物化劳动时间和人力劳动时间变化而导致低水平人力资本替代、就业岗位减少等消极影响。

(二) 数字基础设施对创新产出过程的影响

创新产出包括技术产出和经济产出,由要素投入和生产过程共同决定,基于“市场需求-能力供给”的逻辑分析数字基础设施对创新产出的影响。

市场需求方面,考虑技术需求和市场需求本身的影响。一方面,数字基础设施赋能交通、教育、医疗等传统领域转型^[43],提供大量应用场景,形成技术需求(如移动支付、人脸识别、远程办公、线上医疗等)。另一方面,

数字基础设施的普及使消费者参与创新成为可能,形成以消费者需求为核心的交互创新,供需关系的重构亦能帮助生产者迅速、准确识别市场创新需求,突破市场反馈机制的滞后性,降低技术研发的市场风险。

能力供给方面。数字基础设施助力创新要素的集聚、流动,提高冗余资源利用率和生产要素协同度,实现资源配置的优化;通过提供便捷平台降低信息搜集和知识交易成本、改造升级运输方式降低物流成本、利用数据的“同质性”和“可重新编程性”降低研发成本和时间沉没成本^[23],实现创新成本的节约;通过打破资源交互的时空障碍,增强研发合作频次和沟通强度,降低创新活动的不确定性,提升研发效率;通过其所覆盖的云平台强化技术溢出,产生技术奖励的增量效应^[44],从源头激励创新行为,提升创新主体研发积极性。此外,数字基础设施具备公共品属性,为基础科学和核心技术研发提供有效保障,规避创新活动风险性引致的负面影响,助力自主创新能力和原始研发动力的培养,推动我国技术创新实现由“技术模仿、集成创新”向“基础研究、自主创新”的演变^[45]。前述各路径综合作用下,数字基础设施的技术创新效应和经济效益得到充分释放。

三、经验事实

在理论机制分析基础上,采用 PVAR 模型实证检验数字基础设施与技术创新的关系,进一步构建 DSGE 模型,评估数字基础设施对技术创新的影响效应,并检验其传导机制。经验事实分析与数理模型模拟相互作用、共同论证的逻辑关系如图 2 所示。

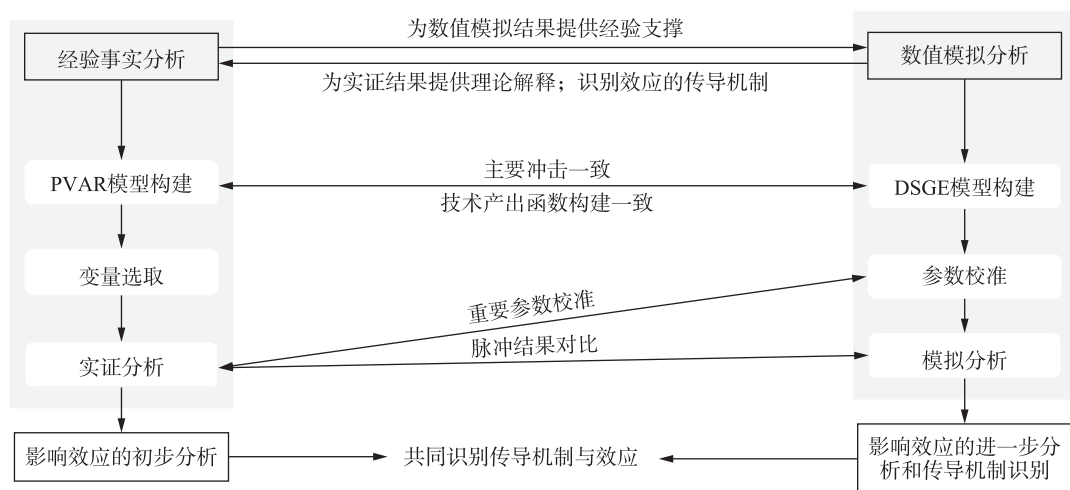


图2 经验事实分析与数值模拟分析间的逻辑关系

接下来,结合文本信息挖掘和 2011—2021 年省级面板数据,采用 PVAR 模型,从经验事实的角度探讨数字基础设施与技术创新的关系,为后续数理模型构建和数值模拟分析提供支撑。

(一) 模型构建

将技术创新视作新技术产出过程,参考知识生产函数,将研发劳动和研发资金引入技术产出函数。数字基础设施本身无法决定技术创新能力,其投资和建设水平是技术创新的关键影响因素,故考虑数字基础设施投资、当期数字基建水平作为技术创新的解释变量。技术产出函数设定如式(1)所示。

$$V_t = \lambda_{1,t} (H_t)^{\alpha_H} (S_t)^{\alpha_S} (G_t)^{\alpha_{Gv}} (Z_t)^{\alpha_Z} \quad (1)$$

其中: V 为当期技术产出; λ_1 为技术研发效率; H 、 S 分别为研发劳动、研发资金; G 为数字基础设施投资; α_H 、 α_S 、 α_{Gv} 分别为各要素产出弹性; Z 为当期数字基建水平; α_Z 为其溢出效应。对技术产出函数取对数:

$$\ln V_t = \ln \gamma + \alpha_H \ln H_t + \alpha_S \ln S_t + \alpha_{Gv} \ln G_t + \alpha_Z \ln Z_t \quad (2)$$

数字基础设施与技术创新间关系复杂,变量间可能存在内生性、自相关、滞后效应等问题,PVAR 模型能有效规避上述问题,将各变量及其滞后项均纳入内生系统。接下来通过分析 PVAR 模型的脉冲响应和方差分解

结果,揭示数字基础设施投资、当期数字基建水平与技术创新投入、产出之间的动态关系。模型设定如下:

$$M_{i,t} = \sum_{j=1}^p R_j M_{t-j} + \pi_i + \vartheta_t + Q_{it} \tag{3}$$

$$M_{i,t} = [\ln V_{i,t}, \ln H_{i,t}, \ln S_{i,t}, \ln G_{i,t}, \ln Z_{i,t}] \tag{4}$$

其中: $M_{i,t}$ 为各省第 t 年由内生变量组成的 1×5 阶向量; R_j 为各项内生变量系数构成的 5×1 阶向量; π_i 、 ϑ_t 、 Q_{it} 分别为个体效应、时间效应、随机误差项。 $i \in [1, 31]$ 为省级截面单位, j 为向量滞后阶数。

(二) 变量选取与数据来源

技术创新的相关变量选取。选用每万人实用新型专利申请授权数表征创新产出,选用我国规模以上工业企业 R&D 费用内部支出、R&D 人员数分别表征研发资金、研发人员投入。

数字基础设施投资方面,参考钞小静等^[5],以政府工作报告中数字基础设施相关词汇的词频表征,合理性在于:政府是现阶段提供资金支持、鼓励技术创新、推动数字基础设施建设的主要力量,各省政府工作报告反映了政府数字基础设施投资现状的追踪和未来趋势的预判,相关词汇的频率一定程度上能体现政府对数字基础设施的重视程度和投资力度。具体测算过程如下:收集 31 省(市、自治区,因数据缺失,未含港澳台地区)2011—2021 年的政府年度工作报告,并确定相关词汇,采用 Python 软件进行文本挖掘并统计相关词汇数和报告总词数,计算得到相关词汇在总词汇中占比,比值即为表征数字基础设施投资的指标。

当期数字基础设施建设水平(以下简称“当期数字基建水平”)方面,现阶段统计年鉴和各大数据库中直接表征数字基础设施的指标较少,既有研究多采用单个互联网相关指标或构建指标体系表征其建设情况。本文结合《中国互联网络发展状况统计报告》并参考范合军和吴婷^[46]的做法,构建了一个包含 2 个一级指标和 8 个二级指标的指标体系,由熵值法处理最终得到一个综合指标,用以表征当期数字基建水平,指标体系如表 1 所示。

数据来源于 2011—2021 年的《中国宏观经济统计年鉴》、EPS 数据库和国泰安数据库。主要变量的描述性统计如表 2 所示。

表 1 当期数字基建水平的指标体系

一级指标	二级指标	变量符号	指标定义	单位
X_1 数字基础设施建设情况	X_{11} 人均互联网宽带端口接入数量	<i>webpot</i>	互联网宽带接入端口数/总人口数	个
	X_{12} 每百人拥有域名数	<i>domain</i>	域名数/总人口数	个/百人
	X_{13} 光缆密度	<i>cable</i>	光缆线路长度/省域面积	千米/平方千米
	X_{14} 移动基站密度	<i>base</i>	移动基站数量/省域面积	个/平方千米
X_2 数字基础设施应用情况	X_{21} 互联网普及率	<i>prweb</i>	互联网宽带接入用户/常住人口数	%
	X_{22} 电信业务发展水平	<i>teleser</i>	人均电信业务总量	万元/人
	X_{23} 计算机普及程度	<i>com</i>	每百人使用计算机数	台
	X_{24} 移动电话普及率	<i>prphone</i>	移动电话普及率	部/百人

表 2 主要变量的描述性统计

变量	观测数量	平均值	标准差	最小值	最大值
当期技术产出(V)	341	7.98619	9.666493	0.06472	61.96358
研发劳动(H)	341	91111.1	129572.8	43	709119
研发资金(S)	341	3650350	4905378	2602.1	29000000
数字基础设施投资(G)	341	3.210289	1.99945	0.1586	10.8659
当期数字基建水平(Z)	341	0.1820058	0.1674895	0.03317	0.95135

(三) 实证结果分析

脉冲响应函数描述经济系统受到某一变量一个标准差的正向冲击后各变量的响应情况,反映各变量间的动态关系。技术创新变量对数字基础投资、当期数字基建水平两类冲击的响应情况如图 3 所示。其中,中间实线部分为变量对冲击的响应情况,两侧灰色部分为 95%置信区间的范围,横轴为滞后期数,纵轴是变量

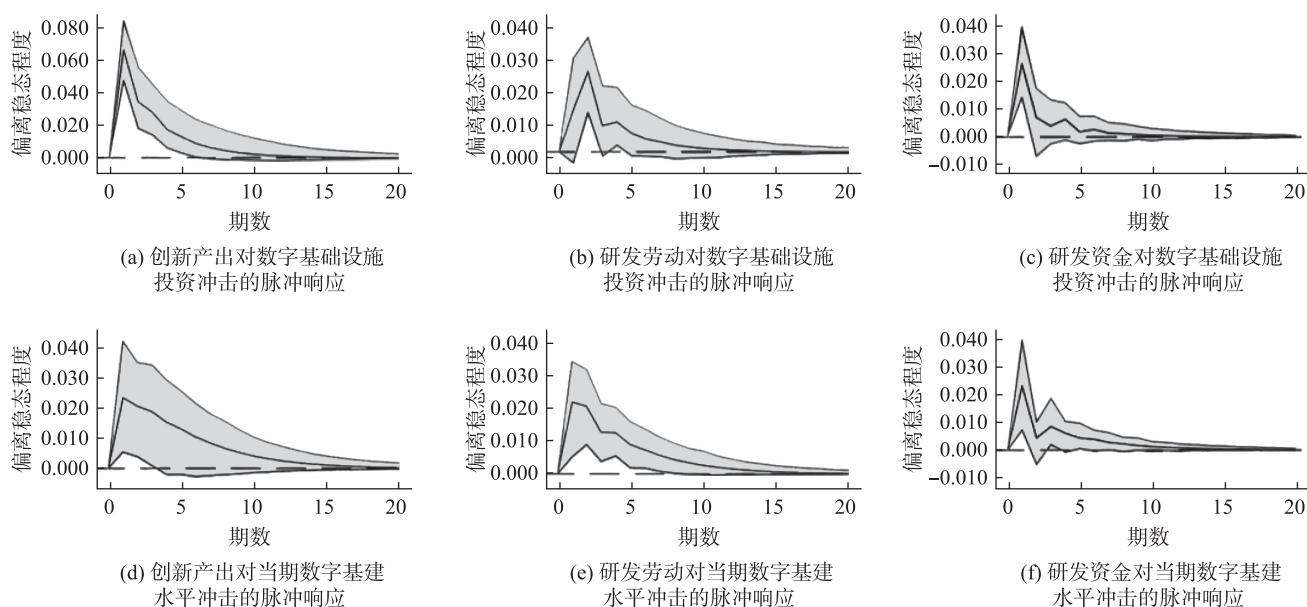


图3 技术创新变量对数字基础设施相关冲击的脉冲响应分析

偏离稳态的程度。总体而言,数字基础设施投资和当期数字基建水平对技术创新投入、产出均存在长期、显著的正向影响。

根据脉冲响应结果,可以发现:第一,创新产出、研发资金、研发劳动对数字基础设施投资冲击均表现为正效应。一单位数字基础设施投资冲击下,创新产出在第1期达峰(约6%),接着迅速收敛,持续约10期;研发劳动在第1期达峰(约2.5%),接着迅速收敛,持续约10期;研发资金在第1期达峰(约2.5%),接着迅速收敛,持续约5期。第二,创新产出、研发资金、研发劳动对当期数字基建水平冲击均表现为正效应。一单位当期数字基建水平冲击下,创新产出在第1期达峰(约2%),接着缓慢收敛,持续约15期;研发劳动在第1期达峰(约2%),接着缓慢收敛,持续约15期;研发资金在第一期达峰(约2%),接着迅速收敛,持续约10期。

接着对PVAR模型进行20期方差分解分析,评估各要素的贡献程度。结果显示:第一,技术创新自身具有较强的循环累积效应,数字基础设施投资、当期数字基建水平、研发劳动、研发资本等在长期仅能解释技术创新波动的27%;第二,数字基础设施投资和当期数字基建水平对技术创新的作用越来越明显,第20期当期数字基建水平和数字基础设施投资对技术创新的解释占比达6%和20%,是技术创新最重要的两个因素。

四、数理模型

前述部分基于理论机制分析和经验事实论证揭示了数字基础设施对技术创新的驱动作用。接下来在一般均衡框架下通过数理模型构建和数值模拟进一步识别驱动效应、剖析传导机制。基于熊彼特创新理论和内生增长理论,结合Comin和Gertler^[28],以及Moran和Queralto^[30]的研究框架,构建包含技术创新部门的DSGE模型,主要包括家庭、政府、一般生产和技术创新等四个部门。参考贾宗穆等^[34]将技术创新部门划分为自主创新和模仿创新,引入数字基础设施投资和当期数字基建水平两项外生冲击(与前文PVAR模型设定保持一致)。各部门间的行为特征与关系网络如图4所示。

(一) 家庭部门

经济系统中存在一个代表性家庭,通过劳动、投资获得收入,并将之用于消费、储蓄,以期实现预期效用最大化,效用函数表示为

$$U_t = \max_{C_t, I_t, L_t, H_t, K_t} E_t \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t \left[\frac{(EC_t)^{1-\theta_c} - 1}{1-\theta_c} - \frac{(\varphi_L L_t)^{1+\zeta} + (\varphi_H H_t)^{1+\zeta}}{1+\zeta} \right] \quad (5)$$

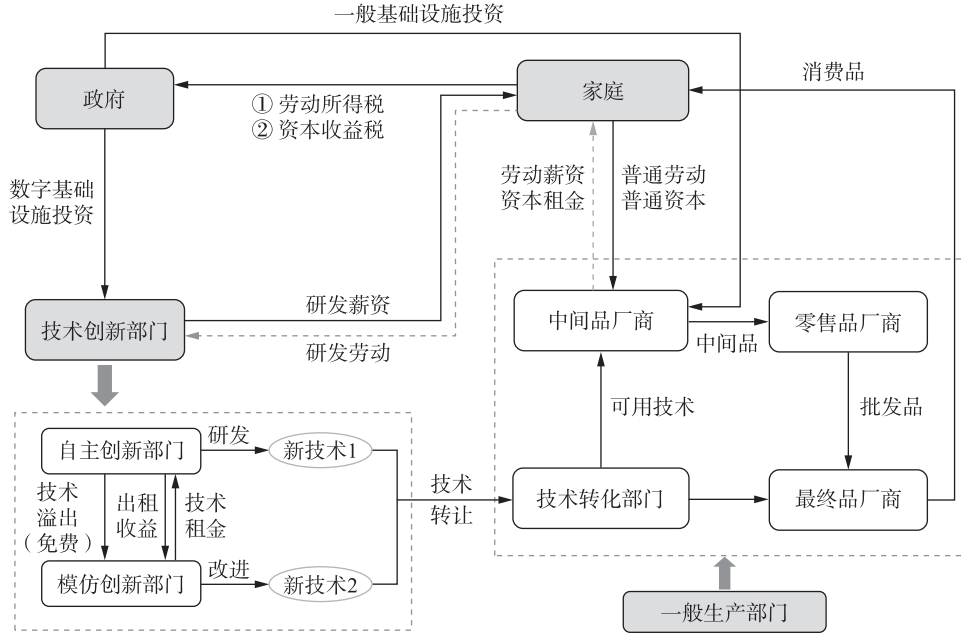


图4 数字基础设施影响技术创新的DSGE模型框架

其中： E_t 为期望算子； β 为贴现因子，效用 U_t 取决于有效消费 EC_t 、普通劳动 L_t 和研发劳动 H_t ； θ_c 为消费替代弹性系数； ζ 为 Frisch 劳动供给弹性的倒数； φ_L 和 φ_H 分别为两类劳动相较消费对效用的相对权重。考虑数字经济时代数字技术环境对居民消费的重要影响，借鉴生态环境质量函数设定^[47]，设置数字技术环境质量 IQ_t ，主要受当期数字基建水平 Z_t 的影响，与自主技术存量 $N_{1,t}$ 成正相关，表示为

$$IQ_t = \eta N_{1,t} Z_t \quad (6)$$

其中： η 为数字基础设施普及率；假设 Z_t 是平稳的外生冲击，服从参数为 ρ_z 和 ε_{Z_t} 的 $AR(1)$ 过程。居民的有效消费 EC_t 表示为

$$EC_t = C_t IQ_t^\varphi \quad (7)$$

其中： C_t 为消费； φ 为消费与数字技术环境的相关系数。资本累积的运动方程表示为

$$K_{t+1} = (1 - \delta_k) K_t + I_t \quad (8)$$

假设家庭支出用于消费、投资且按比例缴税；收入源自劳动薪资、资本租金和企业利润，家庭的预算约束表示为

$$C_t + I_t \leq (1 - \tau_l)(W_{H,t}H_t + W_{L,t}L_t) + (1 - \tau_k)R_{k,t}K_t + \Sigma_t \quad (9)$$

其中： δ_k 为资本折旧率； I_t 为投资； K_t 为普通资本； $W_{H,t}$ 、 $W_{L,t}$ 分别为两类劳动薪资； $R_{k,t}$ 为资本租金； τ_l 、 τ_k 分别为劳动所得税率、资本收益税率； Σ_t 为企业利润。

(二) 技术创新部门

1. 自主创新部门

自主创新部门自身积累技术存量，每期技术存量由前一期未过时技术 $(1 - \delta_N)N_{1,t}$ 和当期技术产出 V_t 组成，技术累积函数表示为

$$N_{1,t+1} = (1 - \delta_N)N_{1,t} + V_t \quad (10)$$

其中： δ_N 为技术折旧率，参考第三节技术产出函数的设定，自主创新部门利用研发劳动、研发资金、政府数字基础设施投资等从事创新活动，当期技术产出函数表示为

$$V_t = \lambda_{1,t} (H_{1,t})^{\alpha_H} (S_t)^{\alpha_s} (G_{1,t})^{\alpha_{gv}} \quad (11)$$

其中： $H_{1,t}$ 为研发劳动； S_t 为研发资本； $G_{1,t}$ 为数字基础设施投资； α_H 、 α_s 、 α_{gv} 分别为各要素产出弹性； $\lambda_{1,t}$ 为技术研发效率。技术研发效率表示为

$$\lambda_{1,t} = \gamma_1 \frac{N_{1,t}^{\gamma_3}}{S_t^{1-\gamma_4}} \quad (12)$$

其中: γ_1 为技术研发因子, 保证模型驱动的 TFP 在平衡增长路径上; γ_3 、 γ_4 分别为技术存量的溢出效应和研发资金的挤出效应。数字基础设施的投资存量表示为

$$G_{1,t} = (1 - \delta_{g1}) G_{1,t-1} + GI_{1,t} \quad (13)$$

其中: δ_{g1} 为数字基础设施折旧率自主创新部门将当期技术产出 V_t 以价格 TP_t 出售给技术转化部门, 将一部分技术 $N_{R,t}$ (占当期技术存量的比值为 θ_2) 以价格 $TP_{R,t}$ 租赁给模仿创新部门, 同时获得来自政府的技术创新补贴 $G_{2,t}$, 自主创新部门的预算约束表示为

$$S_t + W_{H,t} H_{1,t} \leq V_t TP_t + N_{R,t} TP_{R,t} + G_{2,t} \quad (14)$$

2. 模仿创新部门

模仿创新部门自身无技术累积, 主要通过两种方式获得原始技术并加以改进: 一是免费获得溢出技术, 二是向自主创新部门购买技术。模仿创新部门的每期技术产出表示为

$$N_{2,t} = \lambda_{2,t} (\theta_1 N_{1,t} + N_{R,t}) \quad (15)$$

其中: θ_1 为技术溢出水平; $\lambda_{2,t}$ 为技术改进率, 表示为

$$\lambda_{2,t} = \gamma_2 I Q_t H_{2,t}^{\gamma_H} \quad (16)$$

其中: γ_2 为技术改进因子; $H_{2,t}$ 为研发劳动; γ_H 刻画研发劳动的拥挤效应, 技术改进效率还受数字技术环境质量的影响。模仿创新部门通过购买基础技术、雇用研发劳动进行技术改进, 其预算约束表示为

$$W_{H,t} H_{2,t} + N_{R,t} TP_{R,t} \leq N_{2,t} TP_t \quad (17)$$

(三) 一般生产部门

1. 技术转化部门

技术研发完成后, 需经由技术转化方可投入生产, 技术转化部门的总技术存量 N_t 表示为

$$N_t = \left[\frac{1}{\theta_N^{\varepsilon_N} N_{1,t}^{\varepsilon_N}} + (1 - \theta_N) \frac{1}{N_{2,t}^{\varepsilon_N}} \right] \frac{\varepsilon_N}{\varepsilon_N - 1} \quad (18)$$

其中: θ_N 为自主创新技术和模仿创新技术的相对占比; ε_N 为两类技术创新部门的替代弹性。当期未成功转化的技术将在后续与新技术共同转化。可用技术 A_t 决定一般生产部门的全要素生产率 (TFP), 表示为

$$A_{t+1} = (1 - \delta_N) [\xi_t (N_t - A_t) + A_t] \quad (19)$$

$$\xi_t = \kappa_1 I Q_t^{\zeta} \quad (20)$$

其中: ξ_t 为技术转化率; κ_1 为转化因子; ζ 刻画数字技术环境质量对转化的溢出效应。

2. 生产厂商

考虑真实经济运转机制中的名义黏性, 引入中间品厂商、零售品厂商和最终品厂商。可用技术 A_t 作为非资本投入应用到中间品的生产中, 中间品厂商利用普通劳动、普通资本、一般基础设施投资及可用技术进行生产, 生产函数表示为

$$y_{i,t} = K_{i,t}^{\alpha_K} (A_t^v L_{i,t}^{1-v})^{1-\alpha_K} (G_{3,t})^{\alpha_{gy}} \quad (21)$$

其中: α_K 和 α_{gy} 分别为普通资本和一般基础设施投资的产出弹性; v 为非资本投入中技术要素的占比。

中间品厂商追求利润最大化, 表示为

$$\text{Max} \Pi_{B,t} = m c_t y_t - A_t P_{T,t} - L_{i,t} W_{B,t} - R_{i,t} K_{i,t} \quad (22)$$

3. 零售品厂商

假设一单位的中间产品 $y_{i,t}$ 转化为一单位零售品 $y_{f,t}$, 即 $y_{i,t} = y_{f,t}$ 。考虑真实经济运转机制中的名义粘性, 引入零售品厂商。设定每一期能够调整零售品价格 $P_{T,t}$ 的厂商占比为 $1 - \psi$ (设定最优价格为 $P_{f,t}^*$), 以期实现未来收益折现总和的预期值的最大化。对于不能调整零售品价格的零售厂商, 其最大预期值表示为

$$\max_{P_{f,t}} E_t \sum_{s=0}^{\infty} (\beta \psi)^s \frac{P_{T,t}}{P_{T,t+s}} (P_{f,t} - P_{f,t}^*) y_{f,t+s} \quad (23)$$

其中： E_t 为期望算子能调整零售品价格的零售品厂商在 t 期的零售品价格 $P_{f,t}$ 表示为

$$\frac{P_{f,t}}{P_{T,t}} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \frac{E_t \sum_{s=0}^{\infty} (\beta\psi)^s P_{T,t+s}^{\varepsilon} P_{T,t}^{\varepsilon} mc_{t+s} Y_{t+s}}{E_t \sum_{s=0}^{\infty} (\beta\psi)^s P_{T,t+s}^{\varepsilon-1} P_{T,t}^{1-\varepsilon}} \quad (24)$$

此即新凯恩斯菲利普斯曲线(NKPC)的最终形式。其中， $mc_t = \frac{P_{f,t}^*}{P_{T,t}}$ ，表示相对价格。

4. 最终品厂商

最终品厂商从零售品厂商处购买中间产品，其生产函数为常替代弹性函数，表示为

$$Y_t = \left[\int_0^1 y_{f,t}^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}} di \right]^{\frac{\varepsilon}{\varepsilon-1}} \quad (25)$$

其中： Y_t 为最终品； $y_{i,t}$ 为中间产品； ε 为中间产品间的需求替代弹性。最终品厂商的利润最大化表示为：

$$\text{Max} \Pi_{C,t} = P_t Y_t - \int_0^1 P_{i,t} y_{f,t} di \quad (26)$$

其中： $\Pi_{C,t}$ 为最终品厂商的最大利润； $P_{i,t}$ 为中间产品垄断价格； P_t 为最终产品价格。

求解得到最终品厂商和中间品厂商的产出水平表示为

$$y_t = \left(\frac{P_{i,t}}{P_t} \right)^{-\varepsilon} Y_t \quad (27)$$

在完全竞争的最终产品市场上，最终产品利润为 0，价格表示为

$$P_t = \left[\int_0^1 P_{i,t}^{\varepsilon} di \right]^{\frac{1}{1-\varepsilon}} \quad (28)$$

(四) 政府部门

简化政府收支，设定收入为资本收益、劳动收入的比例税，支出为数字基础设施投资、创新补贴、一般基础设施投资。假设政府的当期数字基础设施投资 $GI_{1,t}$ 和一般基础设施投资 $GI_{3,t}$ 为外生冲击，其中 $GI_{1,t}$ 遵循如式(29)所示规则($GI_{3,t}$ 同理)。

$$\frac{GI_{1,t}}{\bar{GI}_1} = \left(\frac{GI_{1,t-1}}{\bar{GI}_1} \right)^{\rho_{g1}} \left[\left(\frac{Y_{t-1}}{\bar{Y}} \right)^{\kappa_{gy}} \right]^{1-\rho_{g1}} e^{\varepsilon_{g1,t}} \quad (29)$$

其中： ρ_{g1} 为冲击的持续性参数； $\varepsilon_{g1,t}$ 为标准差参数。

创新补贴是我国政府对技术研发支持的重要形式，可表示为

$$G_{2,t} = \omega S_t \quad (30)$$

其中： ω 为政府补贴按照研发资金的一定比例发放。

政府预算约束表示为

$$GI_{1,t} + G_{2,t} + GI_{3,t} = \tau_L (W_{L,t} L_t + W_{H,t} H_t) + \tau_K R_{k,t} K_t \quad (31)$$

(五) 市场出清与其他

为刻画模型的长期均衡状态，设定经济系统的商品市场和研发劳动力市场处于长期均衡状态。商品市场和研发劳动力市场出清时分别表示为

$$Y_t = I_t + C_t + G_t \quad (32)$$

$$H_t = H_{1,t} + H_{2,t} \quad (33)$$

其中： $H_{1,t}$ 和 $H_{2,t}$ 分别为自主创新部门和模仿创新部门的劳动； H_t 为创新部门的劳动总量。

定义社会整体的全要素生产率为

$$TFP_t = \frac{Y_t}{L_t^{(1-\alpha_K)(1-\nu)} K_t^{\alpha_K}} \quad (34)$$

综上，本模型包括家庭、技术创新部门、厂商部门的最优决策方程及政府收支平衡、市场出清、外生冲击

等条件,由 42 个方程和 42 个内生变量构成,由稳态求解可得各变量的解析解。接下来进行参数估计、数值模拟和脉冲响应分析。

五、参数估计与模拟分析

(一) 参数校准与估计

1. 参数校准

对于技术创新部门的重要参数,参考贾宗穆等^[34],基于 2011—2021 年我国规模以上工业企业数据校准得到,具体说明如下:①自主创新技术的保护程度 $1-\theta_1$,将知识产权保护水平与模仿型企业付费知识占比相对应,购买国内技术经费支出和 R&D 经费支出的比值即 θ_1 为 0.03;②租赁技术占自主产出技术的比值 θ_2 ,购买国内技术经费支出与技术成交额中技术转让部分成交额的比值即 θ_2 为 0.08;③自主创新部门数量相对模仿创新部门数量的比值 θ_N ,将有研发机构的企业视作自主创新部门,无研发机构的企业视作模仿创新部门,由科技部数据,截至 2019 年年底,有研发机构的企业在我国全部规模以上工业企业中占比为 22.5%,计算得 θ_N 为 0.29;④数字基础设施投资对技术创新的产出弹性 α_{gv} 由第三节 PVAR 模型的广义矩估计(GMM)估计结果得到。其他基础参数均由文献校准得到,具体校准结果见表 3。

表 3 参数校准情况

部门	参数	定义	取值	校准依据
家庭部门	β	家庭主观贴现率	0.985	庄子罐等 ^[48]
	θ_c	家庭消费风险厌恶系数	3	彭安兴等 ^[49]
	ζ	Frisch 劳动供给弹性系数的倒数	2	徐舒等 ^[29]
	φ	数字环境质量影响消费的相对关系系数	0.2	武晓利等 ^[50]
	δ_k	普通资本折旧率	0.025	黄麒麟和朱保华 ^[51]
技术创新部门	δ_N	技术折旧率	0.05	徐舒等 ^[29]
	δ_g	基础设施投资的折旧率	0.025	崔百胜和朱麟 ^[52]
	γ_H	模仿创新部门研发劳动的拥挤效应	0.5	综合考虑
	α_H	自主创新部门研发劳动的拥挤效应	0.4	贾宗穆和张婧屹 ^[34]
	α_S	研发资金投入对技术的产出弹性	0.35	崔百胜和朱麟 ^[52]
	γ_4	自主创新部门研发资金投入的拥挤效应	0.83	纪尧等 ^[32]
	γ_3	技术存量的溢出效应	0.3	田秀娟和李睿 ^[31]
	γ_2	模仿创新的技术研发因子	1.0394	Moran 和 Queralto ^[30]
	γ_1	自主创新的技术研发因子	0.5	朱军和李建强 ^[53]
	α_{gv}	数字基础设施投资对技术创新的产出弹性	0.29	实际数据计算
	η	数字基础设施普及率	0.4	相关报告
	θ_1	自主创新技术的溢出水平	0.97	实际数据计算
	θ_2	租赁技术占自主产出技术的比值	0.08	实际数据计算
	κ_1	技术转化因子	0.05	综合考虑
厂商部门	ε_N	自主创新和模仿创新部门产出技术的替代弹性	8	贾宗穆和张婧屹 ^[34]
	θ_N	自主创新部门数量相对模仿创新部门的比例	0.29	实际数据计算
	α_K	普通资本的产出弹性	0.45	崔百胜和朱麟 ^[52]
	α_{gy}	一般基础设施的产出弹性	0.15	武晓利和晁江锋 ^[54]
	ε_M	中间产品替代弹性	6	朱军 ^[53]
	ψ	可以自由调整价格的厂商的比例	0.75	Moran 和 Queralto ^[30]
	ν	技术要素在非资本投入中的比例	0.35	结合文献 ^[55] 计算得到
政府部门	τ_L	劳动收入的税率	0.30	刘海波等 ^[56]
	τ_K	资本收益的税率	0.15	刘海波等 ^[56]
	ω	政府技术创新补贴占研发投入资金的比例	0.15	科技部官网
	$\overline{GI_1}/\overline{Y}$	数字基础设施投资稳态占总产出稳态的比值	0.05	Wind 数据报告
	$\overline{GI_3}/\overline{Y}$	一般基础设施稳态投资占总产出稳态的比值	0.15	Wind 数据报告

注:根据 Wind 数据报告,2021 年中国基建投资约占 GDP 的 15.8%,故设定 $\overline{GI_3}/\overline{Y}$ 为 0.15;广义“新基建”投资占全部基建投资比值为 15%~20%,考虑到中国数字基础设施正处于快速建设阶段,在基建领域愈发重要,设定 $\overline{GI_1}/\overline{Y}$ 为 0.05。

2. 参数估计

冲击变量的持续性参数和标准差采用贝叶斯方法估计。参考既有研究,设定持续性参数服从 Beta 分布、标准差服从逆伽马(inv_gamma)分布,观测变量选用 2011 年第一季度—2021 年第四季度的国民生产总值、社会零售品总额、R&D 研发经费内部支出,数据来源为国家统计局官网、中经网数据库。所有数据均取自然对数并通过 HP 滤波(Hodrick Prescott Filter)去除趋势项。估计结果见表 4。

表 4 动态参数的贝叶斯估计结果

参数	先验分布(均值,方差)	后验均值	后验方差	90% 置信区间
ρ_{gi1}	Beta (0.7, 0.05)	0.7089	0.0483	(0.6296, 0.7898)
ρ_z	Beta (0.5, 0.05)	0.4872	0.0449	(0.4067, 0.5658)
ρ_{gi3}	Beta (0.7, 0.05)	0.9310	0.0017	(0.9288, 0.9328)
ε_{gi1}	inv_gamma (0.1, inf)	0.0634	0.0284	(0.0243, 0.1026)
ε_z	inv_gamma (0.1, inf)	0.0225	0.0074	(0.0117, 0.0322)
ε_{gi2}	inv_gamma (0.1, inf)	0.1237	0.0115	(0.1044, 0.1413)

注:inf 表示正无穷。

(二) 数值模拟分析

基于稳态求解与参数校准,接下来进行数值模拟。首先评价模拟效果,接着分别就数字基础设施投资和当期数字基建水平两类冲击下的脉冲响应情况进行分析,识别影响效应及传导机制,最后对比两类冲击影响效应的差异性。

1. 模型模拟效果评价

参考徐舒等^[29],选用主要经济变量的模拟值与实际值的统计量(包括自相关系数、标准差、一般产出与其他变量的相关系数、K-P 方差比)以评估模拟效果。结果显示,产出、消费、研发资金等变量的模拟序列与实际序列的各统计量均比较接近,表明模型较好捕捉了我国实际经济的关键特征,对现实数据有较强的解释力。具体结果见表 5。

表 5 模型模拟变量与实际观测变量的比较

变量	模拟数据		实际数据		模拟标准差	实际标准差	K-P 方差比
	自相关系数	与 y 的相关系数	自相关系数	与 y 的相关系数			
Y	0.8748	1	0.8181	1	0.1671	0.2864	0.58345
C	0.9879	0.8789	0.9407	0.9797	0.2272	0.3077	0.7383
S	0.7506	0.8741	0.8672	0.9924	0.2493	0.3721	0.6698

进一步地,将主要创新变量的数值模拟结果与实证分析结论对比,可以发现:在数字基础设施投资和当期数字基建水平的冲击下,尽管由于 DSGE 模型与 PVAR 模型的设定差异,相应变量的响应情况在数量效应和持续效应上存在略微差异,但所得结论大体一致,即数字基础设施对技术创新存在长期的积极影响。二者之间的较高匹配性为数理模型分析提供了经验数据的支持,亦为经验事实提供了合理的理论解释。接下来模拟两类冲击下模型主要变量的脉冲响应情况,在一般均衡框架下识别数字基础设施驱动技术创新的传导机制和效应。

2. 数字基础设施投资冲击下的脉冲响应分析

(1) 技术效率方面。技术研发效率和技术转化效率受到正向影响且变化趋势一致,表现为先增强后减弱的态势,持续时间较长,而技术改进效率所受影响先正后负。比较分析发现,数字基础设施投资冲击下,技术研发效率的响应最强烈,技术改进效率次之,技术转化效率最低。技术效率相关变量的动态响应情况如图 5 所示。

(2) 创新要素方面。研发资金在短期内受到微弱的挤出效应,与既有研究^[57]结论一致,可能的解释是投资无法立刻生效,自主创新部门先行观望,暂时小幅缩减研发资金投入;研发劳动在短期内表现为积极反馈,且冲击对研发劳动的吸引力在自主创新部门比模仿创新部门更大,优化了人力资本在两创新部门间的配置,有利于自主创新能力的提升。技术创新理论强调隐性知识的重要性,隐性知识多依托人力资本和信息实现流动,因此数字基础设施投资亦有利于隐性知识的流动、收集和应用。技术创新相关变量的动态响应情况如图 6 所示。

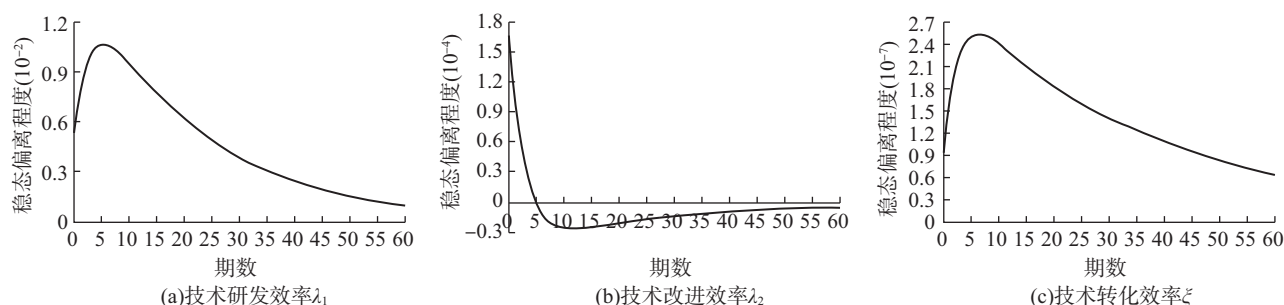


图5 技术效率相关变量对数字基础设施投资冲击的脉冲响应

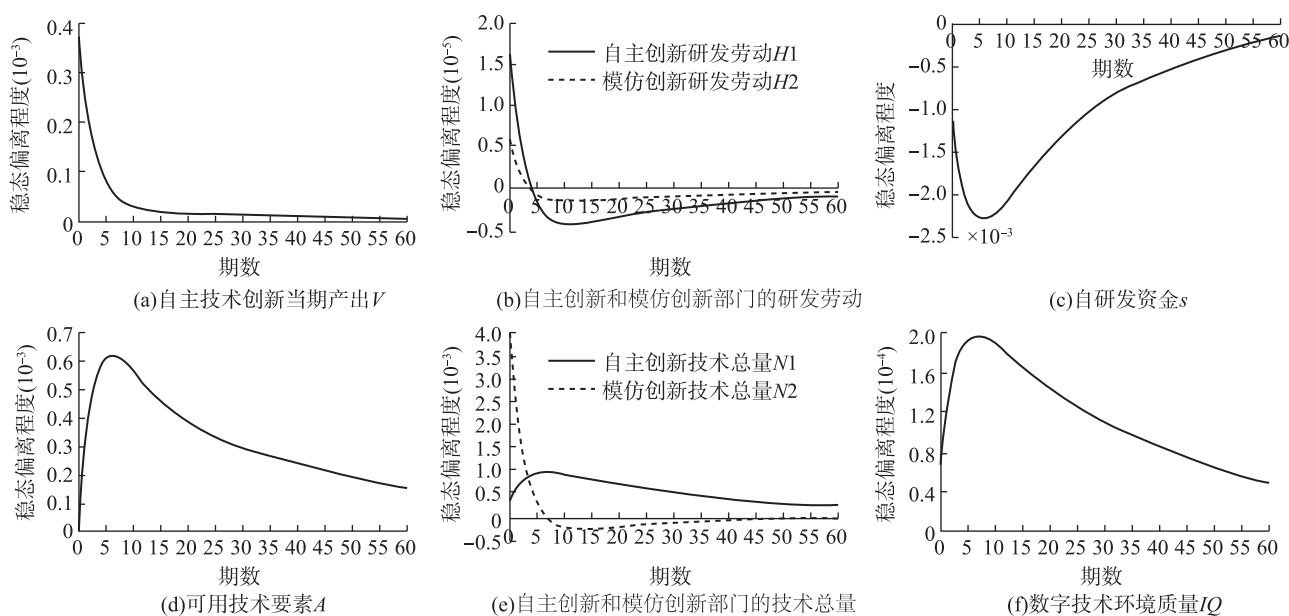


图6 技术创新相关变量对数字基础设施投资冲击的脉冲响应

进一步地,技术创新产出和宏观经济受到正向影响,主要表现在:第一,提升技术效率和技术产出水平。技术积累和研发劳动所受积极影响推动创新部门的技术效率提升、技术产出增多,特别地,对自主创新部门的积极影响尤为显著且持久,短期内亦提高了技术改进效率和模仿创新技术产出。技术效率提升还通过降低创新主体的试错成本激发其研发积极性,表现为后期自主创新部门的研发资金和研发劳动的负向偏离逐渐收敛。第二,对宏观经济的影响方面,短期内提升一般产出水平,长期拉动投资。技术转化率的提升和来自创新部门技术总量的增加使得可用技术增多,短期内总产出随之增多。私人投资在中长期表现为正向反馈,可能原因是新技术的实际应用场景增多,吸引投资,家庭作为投资者和消费者将产生对新技术的持续需求,倒逼新一轮技术创新。相关变量的动态响应情况如图7所示。

综上所述,数字基础设施投资通过吸引研发劳动、优化人力资本在两类创新部门间的配置、促进隐性知识流动并提升技术环境质量,在短期和中长期提升自主技术创新的研发效率和产出水平,短期内亦有利于模仿创新。进一步地,短期提升一般产出水平,长期拉动社会投资、推动经济发展。

3. 当期数字基建水平冲击下的脉冲响应分析

(1)技术效率方面。技术研发效率短期内下降,但从中长期看当期数字基建水平的提升对技术研发效率有正向影响;技术改进效率和技术转化短期内均有显著提升,且变化趋势一致,但技术改进效率长期表现为微弱的负向影响。比较分析发现,当期数字基建水平冲击下,技术研发效率的响应最强烈,技术改进效率其次,技术转化效率最低。技术效率相关变量的动态响应情况如图8所示。

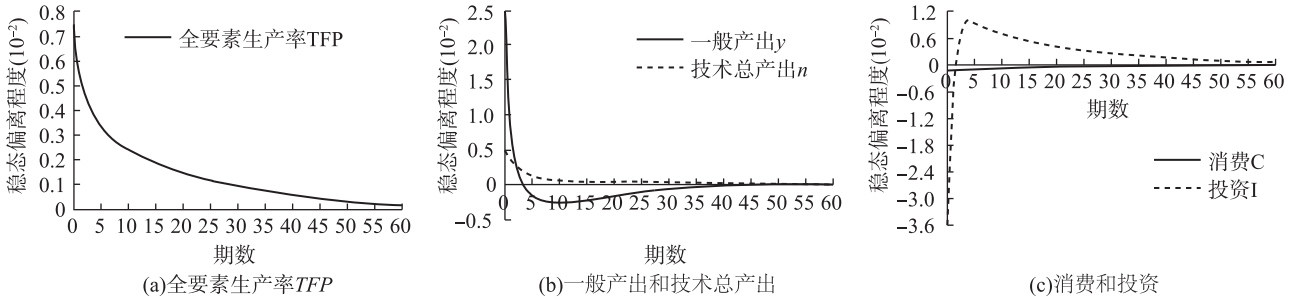


图7 宏观经济变量对数字基础设施投资冲击的脉冲响应

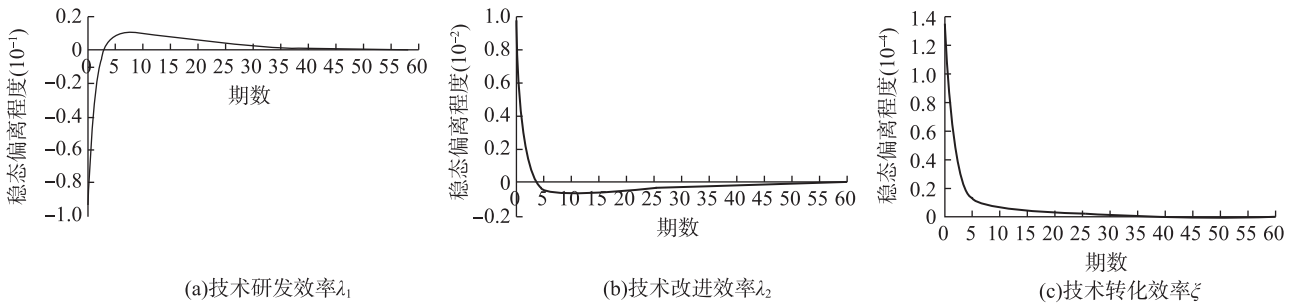


图8 技术效率相关变量对当期数字基建水平冲击的脉冲响应

(2) 创新要素方面。对自主创新部门,当期数字基建水平提升将正向影响创新主体的积极性,加大研发资金投入,创新补贴亦随之增加。技术研发效率在中长期受到正向影响,影响机制在于:当期数字基建水平提升意味着数字基础设施的普及和应用程度提高,数据、信息、知识的流动与获取叠加数字技术环境质量的改善,政府抓准时机以相应补贴、税收减免等创新利好政策,进一步降低创新活动成本、提高利润预期,内生地推动新技术的市场价值,激励研发积极性并吸引要素投入,形成正反馈机制,推动研发效率的提升。

然而,技术研发效率在短期内并未有效提升,这与既有研究所关注的研发的“创新悖论”现象一致^[57]。可能的原因包括:第一,研发资金增多对技术研发效率的提升作用不显著,尤其是政府直接参与自主研发支持的效率不高^[32]。第二,遵循本文模型设定,创新补贴激励创新主体加大研发资金投入,研发资金增多将进一步要求更多创新补贴,资金投入规模的扩大可能形成对研发劳动的拥挤效应。脉冲响应结果表明研发劳动确实受到挤出,而技术创新中研发劳动往往比研发资金更重要^[55],故技术研发效率在短期内提升不显著。对模仿创新而言,当期数字基建水平提升有利于信息、知识的获取,社会可用技术总量增加,数字技术环境质量短期内大幅度改善,尽管研发劳动表现为微弱负向反馈,但短期内技术改进效率得到提升。技术创新相关变量的动态响应情况如图9所示。

进一步地,技术创新产出和宏观经济受到正向影响,主要表现在:第一,提升技术效率和技术产出水平。技术积累、研发投入、研发补贴的正向反馈在中长期有利于提升自主创新的研发效率和产出水平,使得社会可用技术总量增加、数字技术环境质量改善;模仿创新的技术改进效率在短期提升,尽管中长期略微下降,但由于社会技术总量和可使用技术的增加,技术产出仍表现为增长,进一步带动创新发展与技术积累。第二,对宏观经济的影响方面,提升一般产出水平和全要素生产率,可用技术的增加扩大了一般生产部门的生产可能性边界,提高了厂商利润,利润进入家庭产生财富效应,正向影响私人投资和消费。相关变量的动态响应情况如图10所示。

综上所述,当期数字基建水平通过正向影响信息知识的流动、研发资金、创新补贴和数字技术环境质量,在中长期提升自主创新的技术研发效率和技术产出水平,短期内亦有利于模仿创新的发展,进一步地在中期提升全要素生产率、拉动社会消费和投资,有利于经济可持续发展。

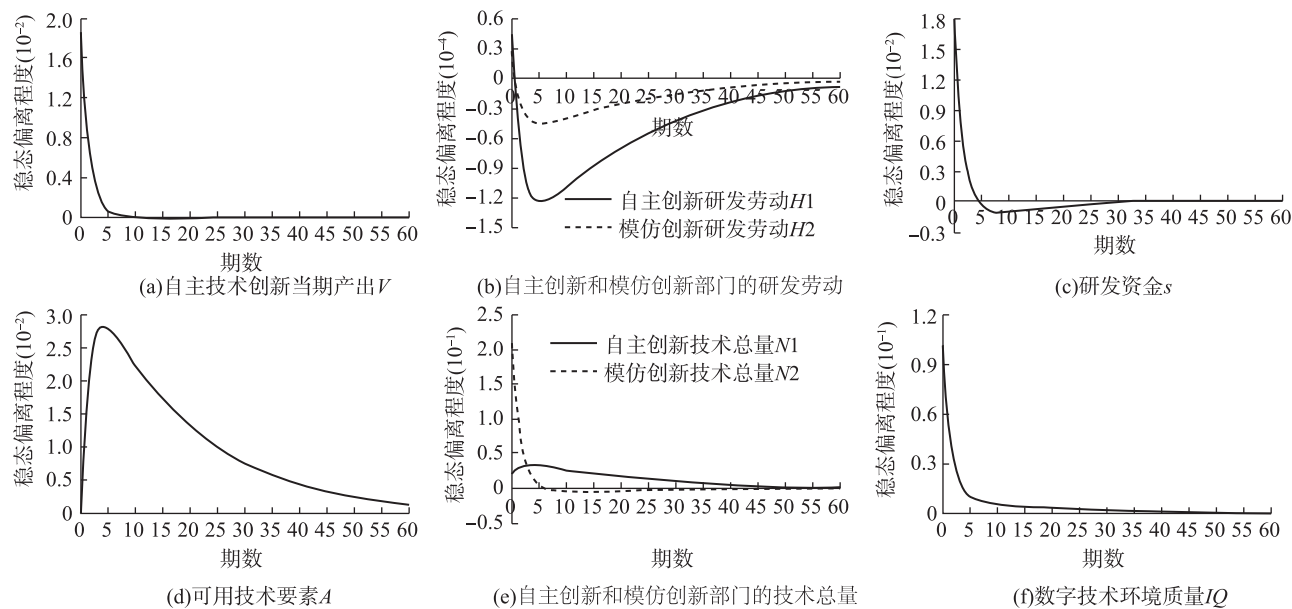


图 9 技术创新相关变量对当期数字基建水平冲击的脉冲响应

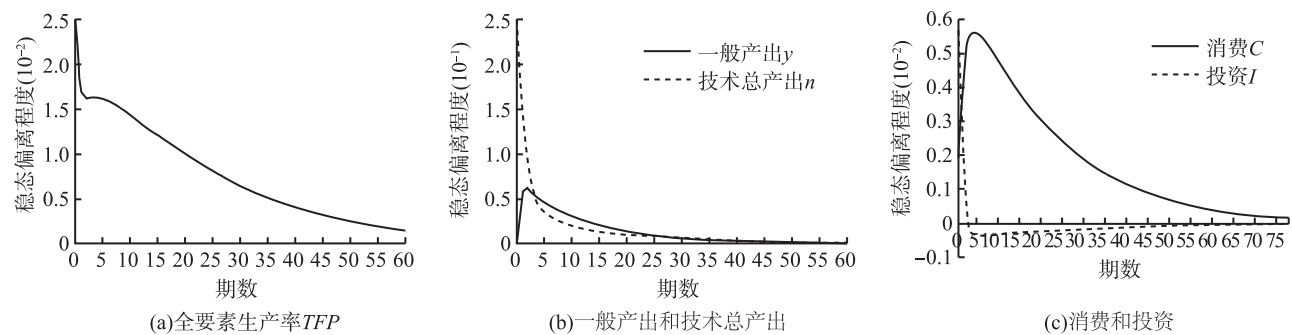


图 10 宏观经济变量对数字基础设施投资冲击的脉冲响应

4. 两类冲击响应情况的对比分析

进一步对比发现,数字基础设施投资和当期数字基建水平冲击下,经济系统内各变量的响应情况存在差异,主要表现为关键传导路径、影响时效性、响应幅度、影响的“破坏性”和主要宏观变量变化 5 个方面,如表 6 所示。

特别地,影响时效性方面,数字基础设施投资冲击下关键变量的最大稳态偏离均滞后发生,与数字基础设施从投资到建成投产使用需要一定年限的现实情况相符。影响的“破坏性”方面,根据熊彼特创新理论,创新是一种创造性的毁灭机制,可能对既有就业、产业结构产生一定的破坏性影响,以实现经济系统的内部更新和可持续发展,这亦解释了两类冲击下均有不同变量在长期表现为微弱的负向反馈。

表 6 数字基础设施冲击(两类)下影响效应的差异对比

差异表现	数字基础设施投资冲击	当期数字基建水平冲击
关键传导路径	通过吸引研发劳动、优化人力资本配置正向影响技术创新效应	通过研发资金、创新补贴、数字技术环境质量正向影响技术创新
影响时效性	许多关键变量的最大稳态偏离滞后发生	各关键变量的最大稳态偏离均为当期发生
响应幅度	关键变量响应程度相对不强,但持续期数较长	关键变量响应程度强烈,但持续期数相对较短
影响的“破坏性”	一般产出、人力资本、模仿创新技术产出等中长期负向反馈	研发资金、模仿技术产出、投资等长期表现为负向反馈
主要宏观变量变化	TFP 所受积极影响持续短,短期内利于产出水平提升,长期拉动投资,对消费无显著影响	TFP 和总产出均表现出持久显著的正向反馈,同时拉动投资和消费

总结来看,数字基础设施投资冲击的影响呈现“蓄势待发”型特征,具有一定的滞后性,效应更为持久;当期数字基建水平冲击的影响呈现“立竿见影”型特征,效应幅度更为显著。实际上,数字基础设施投资与当期数字基建水平关系密切,数字基础设施投资不断增加和积累,引致当期数字基建水平提升,技术创新和经济发展水平亦相应提升,再次引起数字基础设施投资增加,形成正向反馈系统,共同推动实现技术创新效应和经济效益。

六、结论与政策启示

(一) 主要研究结论

本文基于“机制分析-实证检验-数值模拟”的内在逻辑,以创新投入-产出为切入点分析数字基础设施驱动技术创新的理论机制,识别驱动作用的效应和传导机制,拓展了数字基础设施驱动技术创新的理论分析框架,揭示了数字基础设施驱动创新投入、创新环境以及创新产出的动态响应特征。研究结果显示:数字基础设施投资和当期数字基建水平对技术创新均存在长期的正向影响。数值模拟结果进一步表明:第一,数字基础设施投资通过吸引研发劳动、优化人力资本配置正向影响自主创新的研发效率和产出水平,短期内亦有利于模仿创新,最终短期内提升一般产出水平,在中长期拉动社会投资;第二,当期数字基建水平通过激励研发资金和创新补贴、改善数字技术环境质量在中长期内正向影响自主创新的研发效率和产出水平,短期内亦有利于模仿创新,最终在中长期提升全要素生产率、拉动社会消费和投资;第三,数字基础设施投资的影响呈现“厚积薄发”型特征,而当期数字基建水平的影响呈现“立竿见影”型特征。

(二) 政策启示

基于研究结论,本文提出政策建议如下:

第一,数字基础设施的发展前期重点出台与地区相适应的人才吸引政策,强调地区人力资本配置的优化。现阶段我国中西部地区数字基础设施多处于投资建设的起步阶段,其创新效应主要由研发劳动和人力资本配置等实现传导,要确保人才作为创新智力要素的持续供给,构建以数字基础设施为支撑力、以人才为主要动力的自主创新水平提升路径,实现数字基建“硬”建设和人才“软”设施的有效匹配。一方面,依托数字平台的升级和知识网络的搭建,健全人才培养体系,完善人才引进时可能面临的落户留居、配偶工作、子女教育等问题的相应方案,重视地区公共服务改善,形成人才吸引力。另一方面,引导企业、研发机构等创新主体重视对内部研发劳动的合理配置,鼓励高质量人力资本的自由流动,提高技术的研发、改进效率及其在部门、行业间的应用、转化效率。

第二,数字基础设施的发展中后期重点出台吸引研发资金投入和创新补贴的政策,关注地区创新环境的改善。现阶段我国东部地区数字基础设施多数已建成,处于投产应用阶段,其创新效应主要由研发资金、创新补贴和数字技术环境质量实现传导,要重视资金和环境对提升创新能力的显著作用发挥。具体而言,出台有力的投融资支持政策,依托政策和硬件支撑吸引研发资金投入,提高资金使用和交易效率;通过出台创新补贴、税收优惠等相关政策,引导资源流动的创新优先导向,鼓励部门、行业间借助数字基础设施的应用加强合作以实现技术交流与扩散,营造良好创新生态环境。特别地,对当期数字基建水平提升短期内可能引致的研发劳动挤出效应,可适当提高其待遇,以防人力资本的流失。

第三,结合数字基础设施发展的不同阶段和各地区的实际情况变动,动态调整数字基础设施的投资、布局和配套政策的顶层设计。数字基础设施投资的影响效应呈现“厚积薄发”型特征,因此在数字基础设施发展前期,政府可以引导结合当地的产业结构、人口规模,适当开展前瞻性投资,充分释放数字基础设施投资预期效用,同时注意规避传统基础设施发展过程中的“过度投资”问题。当期数字基建水平的影响效应呈现“立竿见影”型特征,因此在数字基础设施发展后期,政府应通过合理的顶层设计充分释放即期效应,政策层面积极引导自主创新,法律和市场层面推动创新成果的合理合法转化及其在一般生产中的集成应用,鼓励模仿创新部门以内部更新和经验积累完成创新能力的提升和向自主创新模式的蜕变,实现长足发展。

(三) 研究展望与不足

本文研究有助于揭示数字基础设施驱动技术创新的传导机制和效应,仍存在不足之处:第一,未将数据

要素纳入模型的生产函数中。尽管数据作为新型生产要素对创新具有重要影响,但本文研究重点在数字基础设施与技术创新之间的内在关系,增加数据要素变量将大幅提高模型求解难度,使传导机制与效应评估更为复杂,故未考虑纳入数据变量。第二,仅划分了技术创新的类型,未划分数字基础设施的类型,亦未考虑数字基建与传统基建的融合发展对技术创新的推动作用。上述不足将在后续研究中不断补充与完善。

参考文献

- [1] 刘洋,董久钰,魏江. 数字创新管理:理论框架与未来研究[J]. 管理世界, 2020, 36(7): 198-217.
- [2] TILSONO D, LYYTINEN K, SORENSEN C. Digital infrastructures: The missing IS research agenda[J]. Information Systems Research, 2010, 21(4): 748-759.
- [3] MARION T J, FIXSON S K. The transformation of the innovation process: How digital tools are changing work, collaboration, and organizations in new product development[J]. Journal of Product Innovation Management, 2021, 38(1): 192-215.
- [4] 惠宁,薛瑞宏. 加快建设数字基础设施 着力提高全要素生产率[J]. 西北大学学报(哲学社会科学版), 2023, 53(1): 36-55.
- [5] 钞小静,廉园梅,罗鑫锴. 新型数字基础设施对制造业高质量发展的影响[J]. 财贸研究, 2021, 32(10): 1-13.
- [6] 王莉娜,张国平. 信息技术、人力资本和创业企业技术创新——基于中国微观企业的实证研究[J]. 科学学与科学技术管理, 2018, 39(4): 111-122.
- [7] JOHNSON J S, FRIEND S B, LEE H S. Big data facilitation, utilization, and monetization: Exploring the 3Vs in a new product development process[J]. Journal of Product Innovation Management, 2017, 34(5): 640-658.
- [8] 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.
- [9] 荆文君,孙宝文. 数字经济促进经济高质量发展:一个理论分析框架[J]. 经济学家, 2019(2): 66-73.
- [10] TEECE D J. Profiting from innovation in the digital economy: Enabling technologies, standards, and licensing models in the wireless world[J]. Research Policy, 2018, 47(8): 1367-1387.
- [11] RÖLLER L H, WAVERMAN L. Telecommunications infrastructure and economic development: A simultaneous approach[J]. American Economic Review, 2001, 91(4): 909-923.
- [12] 张文城,白凤兰. 中国数字基础设施发展对环境污染的影响研究[J]. 技术经济, 2023, 42(5): 137-148.
- [13] 韩先锋,惠宁,宋文飞. 信息化能提高中国工业部门技术创新效率吗[J]. 中国工业经济, 2014(12): 70-82.
- [14] PAUNOV C, ROLLO V. Has the internet fostered inclusive innovation in the developing world? [J]. World Development, 2016, 78: 587-609.
- [15] LIUJ, CHANG H, FORREST J Y L. Influence of artificial intelligence on technological innovation: Evidence from the panel data of China's manufacturing sectors[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2020, 158: 120142.
- [16] 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.
- [17] 孟庆伟,徐思婕. 网络基础设施建设对企业创新水平的影响——基于“宽带中国”战略的准自然实验[J]. 法制与经济, 2022, 31(5): 138-149.
- [18] 徐扬,刘育杰. 数字化基础设施建设与企业技术创新——基于“宽带中国”示范城市政策的经验证据[J]. 南京财经大学学报, 2022(4): 77-87.
- [19] 张辉,王庭锡,孙咏. 数字基础设施与制造业企业技术创新——基于企业生命周期的视角[J]. 上海经济研究, 2022(8): 79-93.
- [20] 毛丰付,郑好青,王海. 数字基础设施与企业技术创新——来自地方政府政策文本的新证据[J]. 浙江学刊, 2022(6): 104-114.
- [21] 尹西明,陈劲,林镇阳,等. 数字基础设施赋能区域创新发展的过程机制研究——基于城市数据湖的案例研究[J]. 科学学与科学技术管理, 2022, 43(9): 108-124.
- [22] 赵星. 新型数字基础设施的技术创新效应研究[J]. 统计研究, 2022, 39(4): 80-92.
- [23] 李云鹤,李杏. 数字基础设施建设与区域创新[J]. 统计与决策, 2022, 38(17): 73-77.
- [24] ZHOUX, CAI Z, TAN K H. Technological innovation and structural change for economic development in China as an emerging market[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2021, 167: 120671.
- [25] 郭凯明,潘珊,颜色. 新型基础设施投资与产业结构转型升级[J]. 中国工业经济, 2020(3): 63-80.
- [26] OZU A, KASUGA N, MORIKAWA H. Cloud computing and its impact on the Japanese macroeconomy-Its oligopolistic market characteristics and social welfare[J]. Telecommunications Policy, 2020, 44(1): 101852.
- [27] POPKOVA E G, DE BERNARDI P, TYURINA Y G. A Theory of digital technology advancement to address the grand challenges of sustainable development[J]. Technology in Society, 2022, 68: 101831.
- [28] COMIN D, GERTLER M. Medium-term business cycles[J]. American Economic Review, 2006, 96(3): 523-551.

- [29] 徐舒, 左萌, 姜凌. 技术扩散、内生技术转化与中国经济波动——一个动态随机一般均衡模型[J]. 管理世界, 2011, 27(3): 22-31.
- [30] MORAN P, QUERALTO A. Innovation, productivity, and monetary policy[J]. Journal of Monetary Economics, 2018, 93: 24-41.
- [31] 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.
- [32] 纪尧, 周圆, 樊凯欣. 中国研发创新的影响因素以及技术提升效果——基于内生增长 DSGE 模型的分析[J]. 经济问题探索, 2021(11): 1-14.
- [33] 易信, 刘凤良. 金融发展、技术创新与产业结构转型——多部门内生增长理论分析框架[J]. 管理世界, 2015, 31(10): 24-39.
- [34] 贾宗穆, 张婧屹. 研发效率、知识产权保护与经济繁荣[J]. 财经研究, 2022, 48(7): 138-153.
- [35] SCHUMPETER J A. The theory of economic development[M]. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1934.
- [36] 徐翔, 赵墨非. 数据资本与经济增长路径[J]. 经济研究, 2020, 55(10): 38-54.
- [37] 甄美荣, 刘蕊. 数字赋能制造企业技术创新的实现机制——基于数据生命周期理论的研究[J]. 技术经济, 2024, 43(3): 64-76.
- [38] KLEIS L, CHWELOS P, RAMIREZ R V. Information technology and intangible output: The impact of IT investment on innovation productivity [J]. Information Systems Research, 2012, 23(1): 42-59.
- [39] LOVER L. Financial development and financing constraints: International evidence from the structural investment model[J]. Review of Financial Studies, 2003, 16(3): 765-791.
- [40] 李培楠, 赵兰香, 万劲波. 创新要素对产业创新绩效的影响——基于中国制造业和高技术产业数据的实证分析[J]. 科学学研究, 2014, 32(4): 604-612.
- [41] CARNEIRO P, LEE S. Trends in quality-adjusted skill premia in the united states, 1960-2000[J]. American Economic Review, 2011, 101(6): 2309-2349.
- [42] MORTENSEN DT, PISSARIDES C A. Technological progress, job creation, and job destruction[J]. Review of Economic Dynamics, 1998, 1(4): 733-753.
- [43] JABBOURI N I, SIRON R, ZAHARI I. Impact of information technology infrastructure on innovation performance: An empirical study on private universities in Iraq[J]. Procedia Economics and Finance, 2016, 39: 861-869.
- [44] ALMEIDA P, KOGUT B. Localization of knowledge and the mobility of engineers in regional networks[J]. Management Science, 1999, 45(7): 905-917.
- [45] DU X, ZHANG H, HAN Y. How does new infrastructure investment affect economic growth quality? Empirical evidence from China[J]. Sustainability, 2022, 14(6): 3511.
- [46] 范合君, 吴婷. 新型数字基础设施、数字化能力与全要素生产率[J]. 经济与管理研究, 2022, 43(1): 3-22.
- [47] 郑丽琳, 朱启贵. 技术冲击、二氧化碳排放与中国经济波动——基于 DSGE 模型的数值模拟[J]. 财经研究, 2012, 38(7): 37-48.
- [48] 庄子罐, 崔小勇, 龚六堂. 预期与经济波动——预期冲击是驱动中国经济波动的主要力量吗? [J]. 经济研究, 2012, 47(6): 46-59.
- [49] 彭安兴, 胡春田, 陈晓东. 数字经济弱化了货币政策效果吗——基于价格粘性视角[J]. 财经科学, 2021(10): 15-30.
- [50] 武晓利, 王丹, 晁江锋. 能源使用效率、经济增长与生态环境质量——基于包含碳排放的 DSGE 模型数值分析[J]. 技术经济与管理研究, 2022(10): 28-33.
- [51] 黄贇琳, 朱保华. 中国的实际经济周期与税收政策效应[J]. 经济研究, 2015, 50(3): 4-17.
- [52] 崔百胜, 朱麟. 政府资助能有效激励创新吗? ——基于创新系统视角下 DSGE 模型的分析[J]. 管理评论, 2019, 31(11): 80-93.
- [53] 朱军, 李建强. 高级财政学 III: 量化税收政策评估[M]. 上海: 上海财经大学出版社, 2022.
- [54] 武晓利, 晁江锋. 政府财政支出结构调整对经济增长和就业的动态效应研究[J]. 中国经济问题, 2014(5): 39-47.
- [55] 吴延兵. 中国工业 R&D 产出弹性测算(1993—2002)[J]. 经济学(季刊), 2008(3): 869-890.
- [56] 刘海波, 邵鹏飞, 钟学超. 我国结构性减税政策及其收入分配效应——基于异质性家庭 NK-DSGE 的模拟分析[J]. 财政研究, 2019(3): 30-46.
- [57] 任仙玲, 刘天生. 中国存在研发投入高增长与 TFP 低增长的悖论吗——基于中国制造业的面板数据研究[J]. 中共青岛市委党校. 青岛行政学院学报, 2020(2): 41-46.

Mechanisms and Effects of Digital Infrastructure on Technological Innovation: Empirical Evidence and Mathematical Simulation

Jin Haiyan^{1,2}, Li Pei³

(1. School of Management Science and Real Estate, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. Construction Economics and Management Research Center, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

3. School of International Relations and Public Affairs, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: Based on the context of implementing an innovation-driven development strategy and promoting the construction of a digital infrastructure system in China, the theoretical mechanism of digital infrastructure driving technological innovation is systematically analyzed from the perspective of innovation input-output. Utilizing text information mining and provincial panel data from 2011 to 2021, a panel vector autoregression (PVAR) model was applied to examine the empirical relationship between digital infrastructure and technological innovation. Furthermore, a dynamic stochastic general equilibrium (DSGE) model, incorporating a technological innovation sector, was constructed to reveal the transmission pathways and effects of digital infrastructure on technological innovation through numerical simulation. The empirical results indicate that both digital infrastructure investment and the current level of digital infrastructure have a long-term positive impact on technological innovation. Simulation results further demonstrate that digital infrastructure investment positively influences independent innovation and short-term imitative innovation through R&D labor and resource allocation. The current level of digital infrastructure positively affects medium- and long-term independent innovation as well as short-term imitative innovation through R&D funding, innovation subsidies, and the quality of the digital technology environment. The impact effects of the two types of shocks exhibit characteristics of “gradual accumulation with delayed impact” and “immediate effect,” respectively. The findings provide theoretical support and policy reference for the government to guide and fully unleash the technological innovation effects and economic benefits of digital infrastructure.

Keywords: digital infrastructure; technological innovation; driving mechanism; the DSGE model