数实技术融合与供应链韧性提升
——基于专利引用的分析

杜运苏，范文辉

（南京林业大学 经济管理学院，江苏 南京 210037）

[摘　要]在全球格局深刻变革的背景下，通过数实技术融合增强供应链韧性已成为保障我国经济安全、提升国家竞争力的重要举措。基于2009—2022年中国A股上市公司样本，利用企业专利信息，从微观视角测度企业的数实技术融合行为，系统考察了其对供应链韧性的影响效应、作用机制及异质性表现。研究发现：数实技术融合能够显著增强企业供应链韧性。经过内生性检验、替换解释变量、排除其他政策的影响等一系列稳健性检验之后，该结果仍然成立。机制分析表明，提升创新能力和优化供需匹配是其增强企业供应链韧性的两个主要渠道。异质性分析发现，上游企业数实技术融合对供应链韧性的影响更为显著，地区知识产权保护体系的完善和数字基础设施的健全能够强化数实技术融合对企业供应链韧性的正向影响。研究结论为我国通过加快推进数实技术融合，进而增强供应链韧性提供了事实支撑与政策参考。

[关键词]数实技术融合；供应链韧性；创新能力；供需匹配；专利引用；知识产权保护；数字基础设施

[中图分类号]F274　　[文献标志码]A　　[文章编号]2096－3114(2026)06－0088－11

一、引言

当前，在美国“对等关税”以及地缘政治冲突等多重外部事件的影响下，中国经济循环稳定性遭受冲击，尤其是供应链的脆弱性愈发凸显。这种脆弱性不仅给企业的生产运营带来了巨大的冲击和风险，还可能导致局部风险迅速扩散至全链条，引发连锁反应。在此背景下，如何增强供应链韧性已成为理论与实践领域广泛关注的焦点。随着数字时代的到来，现有文献主要从“技术改造”和“组织管理”角度探讨了数字化转型对供应链韧性的提升作用[1-3]，而鲜有文献关注到数实技术融合对供应链韧性的影响。《“十四五”数字经济发展规划》提出要以数实深度融合为发展主线，推进数字产业化与产业数字化的协同发展。这一阐述不仅指明了数实融合的发展方向，也为探索如何增强供应链韧性提供了新视角。

数实技术融合是指实体产业在技术创新中引入数字技术知识，并通过知识重组与再创新形成新的技术组合，进而实现数字产业技术与实体产业技术的深度融合的过程[4-5]。而数字化转型则强调企业将数字技术应用于生产经营、组织管理、经营决策和商业模式等方面，并由此推动传统生产经营方式和管理模式的转变[1]。目前，学术界围绕数实技术融合的经济效应从宏观与微观双重视角展开了大量研究。在微观层面，部分学者指出数实技术融合能够提高企业全要素生产率[4]、增强企业出口韧性[5]、促进企业创新[6]和跨国并购[7]。在宏观层面，有学者指出数实技术融合能够促进城乡共同富裕[8]，助力构建现代化产业体系[9]。近年来，部分研究还从多角度分析了数实技术融合对新质生产力提升的积极作用[10-11]。值得一提的是，有研究从数实融合角度研究数据要素对供应链韧性与安全的影响[12]，这间

[收稿日期]2025－12－22

[基金项目]国家社会科学基金重大项目(24&ZD054)；江苏省社会科学基金重点项目(24EYA002)；江苏高校哲学社会科学重大项目(2024SJZD026)

[作者简介]杜运苏(1977—)，男，江苏连云港人，南京林业大学经济管理学院教授，主要研究方向为区域经济一体化、产业链供应链等，邮箱：duyunsu@126.com；范文辉(2002—)，男，河南信阳人，南京林业大学经济管理学院博士生，主要研究方向为产业链供应链、数字化等。

接表明企业开展数实技术融合在提升供应链韧性方面能够发挥作用。但已有研究侧重探讨企业数据要素对供应链的影响,对于数实技术融合是否能够提升供应链韧性缺乏深入研究。

与本文相关的另一支重要文献是数字化对供应链韧性的影响。一方面,企业自身数字化转型能够降低供应商集中度[13],提高客户关系稳定度[14],促进供应链多元化配置[2]。另一方面,企业供应链韧性也受到上下游企业数字化转型的影响,例如陶锋等认为下游企业数字化转型对供应链的影响具有后向溢出效应[1]。冯国强和王锦强调下游企业数字化转型有助于构建互利共存的供应链生态系统[15]。而杨汝岱等则指出上游企业的数字化会对下游企业存货管理与资源配置效率产生正向影响[16]。通过上述文献可知,大部分学者认为数字化对供应链有着正向影响,但研究主要聚焦于数字化转型的"技术改造"和"组织管理"能力,未能体现企业的数实技术融合行为对供应链韧性的影响。

基于此,本文参考黄先海和高亚兴的研究方法[4],用企业专利引用数据来衡量数实技术融合水平,深入探究数实技术融合如何影响企业供应链韧性,从以下三个方面对现有研究进行拓展:(1)现有文献主要关注数字化转型对供应链韧性的提升作用,本文则首次将数实技术融合作为分析核心,探讨其对供应链韧性的影响效应,丰富了现有数实技术融合与供应链韧性的相关研究。(2)本文从提升创新能力和优化供需匹配两条渠道,深入研究了数实技术融合提升供应链韧性的内在机理,有助于拓展并深化对两者之间关系的认识。(3)在异质性方面,本文基于产业链位置、知识产权保护水平和数字基础设施建设水平的差异,探究了数实技术融合对企业供应链韧性的异质性影响,研究结论有助于形成具体的政策靶向,增强企业应对外部冲击能力。

二、理论分析与假设提出

数实技术融合不仅是推动企业转型升级和我国经济高质量发展的重要举措,也是在外部冲击加剧背景下提升供应链韧性的关键途径。鉴于此,本文从提升创新能力和优化供需匹配两方面探究数实技术融合增强供应链韧性的内在机制。

(一)数实技术融合对企业供应链韧性的影响

从吸收能力理论的视角来看,企业竞争优势不仅取决于既有知识存量,还取决于其识别、吸收、转化和利用外部知识的能力[17]。在数实技术融合过程中,数字技术专利构成实体企业获取外部异质性知识的重要载体,企业通过吸收数字技术专利所承载的知识,并将其与原有实体技术知识进行转化和重组,形成新的技术组合。数字技术知识的引入不仅能够突破企业原有知识结构和技术路径的限制,丰富企业的技术储备与创新方案,进而增强企业创新能力[6],还可以将数据感知、分析与预测方法转化为适用于实体生产场景的技术方案,提高企业对供需变化的识别能力,增强采购、生产、库存和销售等环节之间的衔接[18]。因此,数实技术融合可以通过增强创新能力和优化供需匹配两条路径提升供应链韧性。一方面,数实技术融合能够拓展创新边界并提高创新效率,使企业在遭受外部冲击时更快形成替代材料、替代工艺和产品调整方案,减少供应波动造成的生产停滞。另一方面,数实技术融合能够弱化长鞭效应、提升柔性生产水平,使企业根据需求和供应变化及时调整采购规模、生产节奏和库存安排,减少库存积压、供应不足和交付延迟,维持供应链稳定运行。据此,本文提出以下研究假说:

H1:数实技术融合能够显著增强企业供应链韧性。

(二)数实技术融合对企业供应链韧性的作用机制

数实技术融合对供应链韧性的影响同时体现在长期适应和短期协调两个层面。首先,数实技术融合通过促进跨领域知识重组、拓展创新边界和提高创新效率,增强企业创新能力,扩展其应对供应链冲击的技术方案集合,使企业能够适应供应环境、市场需求和技术条件的长期变化。其次,数实技术融合通过缓解长鞭效应和推动柔性生产,使企业能够根据短期供需变化及时调整生产经营策略。因此,创新能力为供应链长期适应提供技术基础,供需匹配为企业应对短期扰动提供运行保障,二者相互衔接,共

同增强供应链韧性。

1. 增强创新能力的传导机制

数实技术融合有助于扩展企业创新边界。企业在创新过程中引入数字技术领域的知识与既有生产条件进行交叉整合,为创新边界的拓展提供了实际动力[19]。一方面,企业可以借助数字技术的结构化分析能力,将实体技术中的隐性知识转化为可计算、可分析的数字形态,促进内部知识的传递与共享,推动企业拓展创新边界。因隐性知识具有高度个体化与模糊性的特点[20],传播共享难度较大,企业依托数字技术可将模糊隐性知识拆解为标准化知识模块,实现知识显性化,从而便于其存储、共享与优化应用。这种经由数字技术处理的知识能够实现跨领域知识的高效匹配与重组,降低知识碎片化带来的协调成本和探索新领域的边际成本,推动企业在已知领域的拓展创新[21]。另一方面,数实技术融合通过引入数字技术知识能够优化新知识与现有知识的耦合路径,进而拓展企业创新边界。在全新技术领域探索时,企业往往面临高度不确定性,如知识搜索能力不足或范围过宽,容易导致决策失误,需要找到新知识与现有知识的耦合路径。如果企业能够基于现有知识基础,引入数字技术知识开展新领域搜索,通过智能算法和实体数据反馈优化知识耦合,降低组合不确定性,突破原有知识基础的创新局限,扩大企业创新半径[22]。创新边界的拓展为企业在产品设计、工艺路线和生产方案等方面提供更多的选择空间,让其在面临原材料短缺、零部件断供或客户需求变化时,能够通过技术替代与生产重构维持供应链运行[6],进而增强供应链的抗冲击能力和长期适应能力。据此,本文提出研究假说 H2a。

H2a:数实技术融合能够通过扩展企业创新边界来增强供应链韧性。

数实技术融合能够提高企业创新效率。创新效率本质上是一个投入产出比的优化问题[23],其核心在于通过最小化资源投入实现最大化的创新产出。数实技术融合提高创新效率的渠道主要表现在两个方面:一是企业借助数字技术的虚拟仿真验证并进行风险预测分析,增强创新活动的目标针对性和成功概率,从而有效提高整体创新产出[24]。比如,企业可以利用数字孪生与仿真技术,构建产品、产线及工艺的高精度数字孪生体,在虚拟环境中进行设计验证、性能测试与流程优化[25],并结合实体场景实时数据反馈以匹配实际需求。这种数实技术融合模式能帮助企业快速锁定创新机会,减少无效探索,规避研发偏差,进而提升创新的精准性与效率。二是数实技术融合可以通过搭建数字平台,促进企业间协作共享,降低创新投入。企业借助数字技术能够构建共享平台,打破企业间信息壁垒,实现数据、资源和信息的无缝交流[26],减少创新的信息搜索与处理成本。创新效率的提升能够缩短技术验证和方案落地周期[24],并降低研发试错成本,使企业在供应端或需求端发生变化时,更快完成产品适配、工艺转换和生产调整,减少技术方案转化迟缓造成的供应链中断风险,提升供应链的恢复能力。由此,本文进一步提出假说 H2b。

H2b:数实技术融合能够通过提高企业创新效率来增强供应链韧性。

2. 优化供需匹配的传导机制

数实技术融合能够通过缓解信息不对称,实现柔性生产,从而增强供应链韧性。具体来说,数实技术融合主要通过弱化长鞭效应和响应客户多元化需求来优化供需匹配。

首先,数实技术融合能够缓解信息不对称,弱化“长鞭效应”。长鞭效应是指在传统供应链模式中,企业依赖市场需求预测组织生产,但因信息不对称供应商倾向于通过高产量和高库存应对市场需求波动。在这种情况下,下游企业需求的微小变化可能引发上游企业生产量的显著波动,导致供需偏差在供应链中逐级放大,使得企业面临库存积压和产能过剩等一系列问题[27]。为应对这一挑战,企业可以在引入数字技术的基础上融合创新,推动传统供应链向数字化、网络化、智能化、可视化的数字供应链转型,以提升信息透明度和协同效率[28]。具体而言,企业能够在吸收大数据分析、物联网感知与通信等数字技术专利知识的基础上,结合自身业务场景对算法模型、数据接口和信息处理规则进行适应性改造与重组,形成适用于供应链运行的信息处理技术方案。该做法能够促进数据在上下游企业间高效流动,打

破数据孤岛[29],构建透明高效的供应链信息网络,从而有效缓解信息不对称并降低长鞭效应。供需信息传递的及时性和准确性提高后,企业能够更加合理地安排采购、生产和库存,减少信息偏差造成的库存积压、产能闲置和供应不足。在外部冲击发生时,企业也能及时识别真实需求变化,避免供需偏差沿供应链逐级放大,从而增强供应链运行的稳定性。

其次,数实技术融合有助于实现柔性生产,响应客户多元化需求。柔性生产是指企业通过采用先进的生产技术、设备和管理系统,能够快速适应市场需求变化、产品多样化以及订单个性化的一种生产方式。当前国内市场由卖方市场转变为买方市场,消费者需求日益呈现个性化、多样化和多层次的变化趋势,并逐级向上游供应链传导,传统的刚性生产系统难以有效应对大规模个性化定制的新模式[30]。为了适应这种供需结构变化,企业可以将大数据分析、物联网感知和人工智能预测等数字技术知识嵌入产品设计与生产工艺创新之中,根据客户需求变化重新组合产品功能模块、工艺参数和生产流程。由此,企业能够将下游需求信息及时转化为产品设计和生产调整方案,在消费者偏好发生变化时快速完成产品改型、工艺切换和产能配置,更好地满足个性化需求。柔性生产使企业在供需结构发生变化时,能够及时调整产品设计、生产节奏和产能配置,减少产品滞销、库存积压与交付延迟,从而提升供应链的短期协调与快速响应能力。综合以上分析,本文提出研究假说 H3。

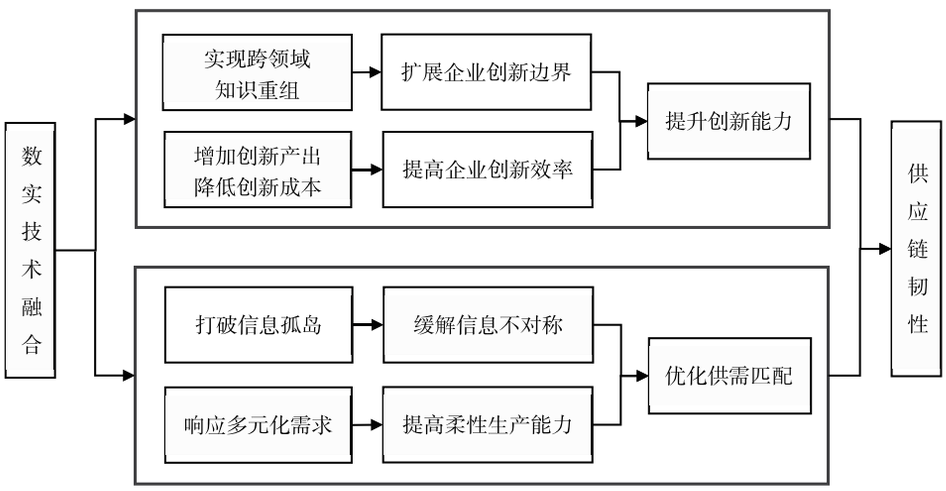


图1　作用机制

H3:数实技术融合能够通过优化企业供需匹配来增强供应链韧性。

三、研究设计

(一) 样本选择与数据来源

本文以2009—2022年间的A股上市公司为研究对象,为保证研究样本的可靠性,本文剔除ST、*ST公司以及控制变量缺失的样本,并对连续变量进行1%和99%的缩尾处理。样本主要来源于专利数据库和国泰安(CSMAR)数据库,最终共获得2220家上市企业,12465个变量信息完整的企业—年度观测值。

(二) 变量说明

1. 供应链韧性(*Res*)

参考张树山和谷城的方法[31],本文从供应链多元化、供应链稳定性与供应链效率三个维度出发,选取相应指标,并采用综合指数法对其进行量化,从而衡量整体供应链韧性。(1)供应链多元化:本文借鉴了巫强和姚雨秀的研究[2],采用企业当年前五大供应商采购比例和前五大客户销售比例的均值度量。集中度越低表明企业更均衡地从多个供应商采购投入品,因而其供应商配置被视为更具多元化。(2)供应链稳定性:本文参考蒋殿春和鲁大宇的研究[32],通过计算企业年末前五大供应商和客户中非

新增供应商及客户的占比作为衡量供应链稳定性的指标。二者数值处于0～1，数值越大表明企业与供应商和客户多年持续合作，供应商和客户黏性越大，供应链关系越稳定。（3）供应链效率：本文采用存货周转率表示供应链效率，即企业当年营业成本与存货期末余额之间的比例。最后，通过熵权法对供应链韧性水平进行测算。

2. 数实技术融合（*TechConv*）

本文参考黄先海和高亚兴的研究方法[4]，通过专利引用信息来衡量企业的数实技术融合程度。具体而言，本文依据《数字经济核心产业分类与国际专利分类参照关系表（2023）》在企业专利数据库中识别出数字产业技术领域专利。若企业某项专利IPC主分类未归入数字产业技术，但其所引用的专利中至少包含一项属于数字产业技术领域，则将其视为一次数实技术融合。最后，将企业每年的数实技术融合次数汇总，并通过加1取自然对数作为解释变量（*TechConv*）。

3. 控制变量

在模型设定中，本文纳入若干企业层面的控制变量，以尽量削弱其他因素对结果的干扰。主要包括：（1）企业年龄（*LnAge*），通过会计年度减去企业成立年份并取自然对数度量；（2）企业规模（*LnSize*），以当期期末总资产的对数衡量；（3）董事会规模（*LnBoardsize*），以董事人数的对数度量；（4）资本结构（*Lev*），采用资产负债率指标；（5）增长速率（*RevGrow*），以年度营业收入增长率反映；（6）现金流状况（*Cash*），以经营活动现金流净额与总资产之比来衡量；（7）产权性质（*Property*），其中国有企业赋值为1，非国有企业赋值为0；（8）供应链资金占用（*SCFO*），以当期应收账款和预付款项与主营业务收入的比值衡量；（9）供应链持股（*SCS*），前十大股东中是否包含前五大供应商或客户，包含赋值为1，否则为0。

（三）模型设定

本文通过构建以下计量模型来考察企业数实技术融合对供应链韧性的影响：

$$Res_{it} = \beta_0 + \beta_1 TechConv_{it} + \sum \beta_n Controls_{it} + \mu_i + \gamma_t + \varepsilon_{it}$$

其中，Res_{it} 为企业 i 在第 t 年的供应链韧性综合指标（即供应链多元化、稳定性及效率）；$TechConv_{it}$ 表示企业 i 在第 t 年的数实技术融合水平；$Controls_{it}$ 为一系列控制变量；μ_i 和 γ_t 分别表示企业和年份固定效应；β_1 是基准回归重点关注系数，反映了企业开展数实技术融合对供应链韧性的影响程度。

四、实证结果分析

（一）描述性统计分析

表1报告了主要变量的描述性统计结果，样本涵盖2009—2022年，共包含12465个企业－年度观测值。企业供应链韧性（*Res*）的均值为0.191，标准差为0.078，最小值和最大值分别为0.015和0.421，表明不同企业之间的供应链韧性存在较为明显的差异。在核心解释变量方面，数实技术融合（*TechConv*）的均值为0.490，标准差为0.776，最小值为0，最大值为3.761。其标准差高于均值，且取值区间较宽，说明样本企业的数实技术融合水平存在较大差异，部分企业尚未开展明显的融合技术创新，而部分企业已具备较高的融合水平，为后续实证检验提供了较为充分的样本变异。其余控制变量的统计分布均处于合理区间，能够为后续回归分析提供较好的数据基础。

表1　描述性统计

变量	观测值	均值	标准差	最小值	最大值
Res	12465	0.191	0.078	0.015	0.421
TechConv	12465	0.490	0.776	0.000	3.761
LnAge	12465	2.951	0.303	1.386	4.159
LnSize	12465	22.156	1.140	19.525	26.452
LnBoardsize	12465	2.102	0.189	1.609	2.708
Lev	12465	0.411	0.191	0.032	0.908
RevGrow	12465	0.177	0.400	−0.673	5.076
Cash	12465	0.046	0.065	−0.202	0.267
Property	12465	0.250	0.433	0.000	1.000
SCFO	12465	0.471	0.285	0.000	3.995
SCS	12465	0.019	0.137	0.000	1.000

(二) 基准回归

表2呈现了数实技术融合对供应链韧性的影响分析结果。其中,列(1)只包含核心解释变量,列(2)加入相关控制变量,列(3)和列(4)依次加入年份和企业固定效应。回归分析表明,企业数实技术融合对供应链韧性的回归系数均显著为正,即企业开展数实技术融合能够提升其供应链韧性。列(4)结果显示,数实技术融合(*TechConv*)的回归系数为0.0032,在5%水平上显著为正。这一发现意味着数实技术融合有助于企业优化供应链结构、增强风险应对能力并提升整体运行效率,从而提升供应链韧性。基于此,假说H1成立。

表2 基准回归

	Res (1)	*Res* (2)	*Res* (3)	*Res* (4)
TechConv	0.0079*** (8.8229)	0.0063*** (6.6387)	0.0082*** (7.2948)	0.0032** (2.2939)
常数项	0.1874*** (227.3609)	0.0202 (1.1220)	0.1356*** (4.5449)	0.0863 (1.0503)
控制变量	否	是	是	是
年份固定效应	否	否	是	是
企业固定效应	否	否	否	是
观测值	12465	12465	12465	12401
R^2	0.0061	0.0409	0.0827	0.3553

注:***、**、*分别表示在1%、5%、10%的水平上显著,括号内为基于企业层面聚类标准误计算的t值。下同。

(三) 内生性检验

数实技术融合能够增强企业供应链韧性,但供应链韧性强的企业通常意味着更稳定的运营能力、风险抵御水平和市场适应力,其在整个供应链网络中的协作主导性较强,资源整合话语权更大,从而会影响上游供应商或下游客户的数实技术融合参与程度。数实技术融合与企业供应链韧性间存在一定的反向因果干扰,会导致内生性问题。为此,本文选取两类工具变量,并采用两阶段最小二乘法进行估计。

第一,本文参考黄先海和高亚兴[4]与谢谦等[5]的做法,基于同群效应和历史通信基础构造工具变量(*IV*1)。具体而言,首先根据企业总资产规模进行十分位分组,并在每个年份内计算剔除企业自身后的同规模企业平均数实技术融合水平,随后将该指标与1984年各城市每万人固定电话数量相乘,以此作为工具变量。

该工具变量的构造逻辑如下:一方面,企业数实技术融合行为具有一定的同群效应。同规模企业通常面临相似的资源条件、技术环境和竞争压力,其融合经验和发展路径具有较强的参考价值,企业会通过信息学习和竞争模仿调整自身数实技术融合决策,因此同规模企业平均融合水平与企业自身融合水平具有较强相关性。另一方面,1984年固定电话普及程度反映地区早期通信基础设施条件。由于通信基础设施建设具有较强的路径依赖特征,早期通信条件较好的地区更容易形成良好的信息技术发展基础,从而促进后续数字技术扩散和企业数实技术融合,因此满足相关性要求。由于同规模企业平均融合水平已剔除企业自身影响,且1984年固定电话普及程度形成于样本期之前,不会受到企业当前供应链韧性的反向影响,因此该工具变量满足相关性和外生性要求。

第二,借鉴谢谦等的做法[5],本文采用移动份额法构造另一工具变量(*IV*2)。具体而言,首先按照企业所在省份将样本划分为东部、中部和西部地区,并计算各年份同一地区内除本企业以外其他企业的平均数实技术融合水平。随后,以2009年为基期,计算同一地区其他企业数实技术融合水平相对于基期的增长幅度。最后,将企业基期数实技术融合水平与所在地区其他企业数实技术融合水平的增长幅度相结合,构造企业各年份数实技术融合水平的估计值。企业基期数实技术融合水平反映了其原有技术基础,而同一地区其他企业数实技术融合水平的变化反映了区域内技术扩散和融合发展的总体趋势,二者共同决定企业后续数实技术融合水平,因此满足相关性要求。同时,区域增长幅度在计算过程中剔除了企业自身,降低了企业当期经营状况对工具变量的机械影响,企业基期数实技术融合水平也具有较强的前定性,因而该工具变量具有一定的外生性。

表3报告了内生性检验结果。第一阶段回归显示,工具变量*IV*1和*IV*2的系数均在1%水平上显著为正,表明工具变量与数实技术融合具有较强相关性。不可识别检验的LM统计量分别为26.36和

35.20，均拒绝工具变量不可识别的原假设；KP-F 统计量分别为 26.90 和 34.49，均高于常用临界值，说明不存在明显弱工具变量问题。第二阶段结果显示，数实技术融合的系数分别为 0.0636 和 0.0284，分别在 1% 和 10% 水平上显著为正，说明在控制内生性后，数实技术融合仍能够显著提升企业供应链韧性，本文结论保持稳健。

表 3　内生性检验

	TechConv （1） 第一阶段	*Res* （2） 第二阶段	*TechConv* （3） 第一阶段	*Res* （4） 第二阶段
*IV*1	0.3562 *** （5.1866）			
*IV*2			0.0002 *** （5.8729）	
TechConv		0.0636 *** （2.6361）		0.0284 * （1.6676）
控制变量	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是
企业固定效应	是	是	是	是
观测值	12366	12366	12358	12358
LM 统计量		26.36		35.20
KP-F 统计量		26.90		34.49
CD-F 统计量		52.71		78.48

（四）稳健性检验①

为检验基准回归结果的可靠性，本文开展以下稳健性检验：（1）替换解释变量，分别采用基于专利 IPC 分类识别的数实技术融合专利数量[1]、数实技术融合专利占比，以及仅保留数字产业发明专利与实体产业发明专利之间的引用关系[33]并剔除自引用后重新测算数实技术融合水平；（2）替换被解释变量，采用主成分分析法重新构造供应链韧性指标，并在剔除供应链稳定性维度后，基于供应链多元化和运行效率重新测算供应链韧性；（3）剔除通信设备、计算机及其他电子设备相关行业样本；（4）将专利引用统计窗口统一调整为专利申请日起三年[34]；（5）进一步控制供应链创新与应用、现代物流创新发展、智能制造和“宽带中国”等同期试点政策的影响。在上述不同检验方式下，数实技术融合的估计系数均显著为正，与基准回归结果基本一致，说明本文研究结论具有较强的稳健性。

五、进一步研究

（一）机制检验

为进一步揭示数实技术融合影响供应链韧性的作用机制，本文从提升企业创新能力和优化供需匹配两方面展开讨论，并参考江艇[35]提出的因果推断框架，通过检验数实技术融合对中介变量的传导效应来开展机制验证。

1. 创新能力机制

（1）创新边界（*TechBound*）。上述理论分析表明，企业数实技术融合可以促进跨领域知识重组，拓展企业创新边界，从而增强企业供应链韧性。本文参照张杰和郑文平[33]提出的知识宽度的计算方法，基于发明专利的 IPC 主分类号，使用 1 减去赫芬达尔－赫希曼指数来衡量企业创新边界。具体定义如下式：

$$TechBound_{it} = 1 - \sum_{j} \alpha_{ijt}^{2}$$

其中，α_{ijt} 表示企业 i 在年份 t 归属于 IPC 大组 j 的发明专利数量占该企业当年发明专利总量的比重，用于刻画企业在不同技术领域的专利分布。创新边界（*TechBound*）值越大，企业技术涉及的专利范围越广，表明企业创新边界更宽。回归结果见表 4 列（1）。数实技术融合对创新边界的回归系数为 0.0438，在 1% 水平上显著为正，为研究假说 H2a 提供了支持。

（2）创新效率。本文参考胡元木和纪端的研究[36]，采用 DEA 方法测算企业创新效率。其中，将研发费用的自然对数作为创新投入变量，专利数的自然对数作为创新产出变量。回归结果见表 4 列（2），

①限于篇幅，稳健性检验结果未列示，留存备索。

数实技术融合对创新效率的回归系数为0.0128,在1%水平上显著为正,为研究假说H2b提供了支持。

2. 优化供需匹配机制

(1)长鞭效应(*Bullwhip*)。参考杨志强的研究[27],以"长鞭效应"作为供需匹配水平的衡量指标,其数值越小表明生产对需求的偏离越弱,供应链上下游的供需匹配程度越高,并参照王海等的研究[37]对其进行行业调整。具体定义如下式:

$$Bullwhip_{it} = \frac{\sigma(Production_{it})}{\sigma(Demand_{it})} - 1$$

其中,企业生产量(*Production*)为销售成本与存货净额之和;企业需求量(*Demand*)以销售成本衡量。同时,为了消除时间趋势,对 $Production_{it}$ 和 $Demand_{it}$ 进行对数转换和一阶差分处理。

从表4列(3)可知,数实技术融合对长鞭效应(*Bullwhip*)的回归系数为-0.0058,在10%水平上显著为负,表明数实技术融合能够降低供应链上的"长鞭效应",即企业进行数实技术融合能够优化供需匹配,从而增强企业供应链韧性。

表4 机制检验

	创新边界 (1)	创新效率 (2)	长鞭效应 (3)	柔性生产能力 (4)
TechConv	0.0438***	0.0128***	-0.0058*	0.0067*
	(5.6955)	(11.2407)	(-1.8998)	(1.7821)
常数项	0.6266	-0.2936***	0.7658***	0.0508
	(1.1195)	(-4.1393)	(4.3237)	(0.4469)
控制变量	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是
企业固定效应	是	是	是	是
观测值	11994	11916	12026	12005
R^2	0.4270	0.6405	0.2631	0.6705

(2)柔性生产能力。本文参考孙兰兰等的研究[18],采用轻资产运营指数衡量企业柔性生产能力,具体以无形资产净额占长期资产的比重表示。该指标越大,表明企业对专用性资产的依赖程度越低,生产调整能力越强。表4列(4)显示,数实技术融合对柔性生产能力的回归系数为0.0067,在10%水平上显著为正,说明数实技术融合能够提升企业柔性生产能力,优化供需匹配,进而增强供应链韧性。

(二)异质性分析

1. 产业链位置

由于产业链上游企业主要提供基础资源、核心零部件和关键原材料,作为供应链的"起点",其投入往往具有不可替代、供给周期长且易受外部环境影响等特征,一旦供应中断可能引发整个产业链停滞[38]。上游企业开展数实技术融合可以通过人工智能和实时数据反馈等技术预测原材料价格波动与需求周期,从而提升"源头稳定性",而下游的数实技术融合主要聚焦于"流程优化",如提升企业生产效率和加速库存周转,难以替代上游资源供给的核心作用。同时,需求信息从下游向上游传递时会逐级放大,产生"长鞭效应",导致上游企业通常面临更剧烈的需求波动与库存压力[1]。因此,为了缓解信息不对称带来的冲击,上游企业通过数实技术融合来提升供应链韧性的意愿更强烈。本文参考Antràs的方法[39],并基于2020年中国投入产出数据库计算各行业的上游度指标,随后以该指标的中位数区分上游与下游的企业。回归结果见表5列(1)和列(2),上游企业组的估计系数为0.0052,在5%水平上显著为正;下游企业组的估计系数为0.0006,未通过显著性检验。进一步采用SUEST检验进行组间系数差异检验,结果显示,上游企业组与下游企业组的回归系数差异在5%水平上显著($\chi^2 = 4.05$, $P = 0.044$)。

表5 异质性分析

	产业链上游 (1)	产业链下游 (2)
TechConv	0.0052**	0.0006
	(2.4762)	(0.6667)
常数项	0.3021***	0.0284
	(2.7749)	(0.2430)
控制变量	是	是
企业/年份固定效应	是	是
观测值	6636	5650
R^2	0.3276	0.3999

2. 知识产权保护水平

知识产权保护有助于鼓励企业开展创新活动,维护企业创新成果。在知识产权保护水平较高的地区,完善的制度环境降低了企业开展数实技术融合的风险与顾虑,使数实技术融合更易转化为提升供应

链自主性和协同效能的实际成果，因此对供应链韧性的促进作用更为显著。本文以省级知识产权发展指数作为当年地区知识产权保护水平的衡量标准[30,40]，数据来源于各年度《全国知识产权发展状况报告》，本文根据年度指数的中位数将样本划分为强知识产权保护与弱知识产权保护两组，在此基础上进行回归分析。结果见表6列(1)和列(2)，知识产权保护较强组的估计系数为0.0044，在5%水平上显著为正；保护较弱组的估计系数为0.0005，未通过显著性检验。SUEST检验结果显示，强知识产权保护组与弱知识产权保护组的系数差异在10%水平上显著($\chi^2=3.04$，$P=0.081$)，表明良好的知识产权保护环境能够强化数实技术融合的作用。

3. 数字基础设施建设水平

数字基础设施建设是数据生成、收集、存储与使用的关键[41]，高效完备的基础设施能加速供应链上知识与技术的传递和溢出，推动企业技术创新与产品升级。同时，良好的数字基础设施通过数字技术赋能企业精准捕捉市场需求并快速响应，优化供需匹配，减少库存积压，从而显著增强供应链韧性[42]。本文利用各城市互联网宽带接入用户数与年末户籍人口数之比衡量数字基础设施水平，并根据其年度中位数将样本划分为高水平与低水平两组。回归结果见表6列(3)和列(4)，数字基础设施水平较高组的估计系数为0.0048，在5%水平上显著为正；水平较低组的估计系数为0.0003，未通过显著性检验。组间系数差异的SUEST检验在5%水平上显著($\chi^2=4.01$，$P=0.045$)，说明数字基础设施能够为数实技术融合发挥供应链韧性效应提供重要支撑。

表6　异质性分析

	知识产权保护较强 (1)	知识产权保护较弱 (2)	数字基础设施建设强 (3)	数字基础设施建设弱 (4)
TechConv	0.0044**	0.0005	0.0048**	0.0003
	(2.2101)	(0.5031)	(2.2826)	(0.3751)
常数项	0.0873	0.1569	0.0679	0.1718
	(0.8022)	(1.3246)	(0.6584)	(1.2162)
控制变量	是	是	是	是
企业/年份固定	是	是	是	是
观测值	6161	6094	6848	4691
R^2	0.3486	0.3620	0.3482	0.3664

六、结论性评述

供应链韧性的提升是推动经济高质量发展的关键环节，而数实技术融合对增强供应链韧性具有重要影响。本文以2009—2022年A股上市公司为研究对象，利用专利引用数据衡量企业数实技术融合水平，并探讨其对供应链韧性及其作用机制的影响，得到如下结论：(1)数实技术融合能够显著增强供应链韧性，并且这一结论得到一系列稳健性检验的支持。(2)企业数实技术融合通过提升创新能力和优化供需匹配两个层面来增强供应链韧性。一方面，企业借助数实技术融合能够拓展创新边界和提高创新效率，提升企业创新能力，从而增强企业供应链韧性。另一方面，企业通过数实技术融合有助于缓解信息不对称和实现柔性生产，优化企业供需匹配，从而增强企业供应链韧性。(3)异质性分析表明，上游企业在数实技术融合中能够获得更强的供应链韧性增益；知识产权保护体系的完善和数字基础设施的健全能够强化数实技术融合对企业供应链韧性的正向影响。

基于以上结论，本文的政策启示在于：(1)从政府和企业两个层面分别着力，充分发挥数实技术融合对供应链韧性的提升作用。在政府层面，政府应结合不同行业的技术基础、供应链特征与数实技术融合条件，分类制定推进方案，围绕关键技术和供应链薄弱环节有序推动企业开展数实技术融合，避免采用脱离行业基础的统一推进模式。在企业层面，企业应结合自身业务特点和发展战略，积极主动制定数实技术融合战略发展规划，不断探索数实技术融合在生产、销售过程中的各种应用场景。同时，充分利用政府支持和数实技术融合优惠政策，优化生产流程，实现更高效的供应链管理。(2)政府应加快创新体制机制改革，为充分发挥数实技术融合通过“创新促进效应”增强供应链韧性创造条件。具体而言：一是建立健全创新激励机制，通过政策扶持、税收优惠和成果奖励等措施，降低企业研发成本和技术融合门槛，激发技术融合创新意愿；二是完善创新资源配置制度，促进资金、人才与平台在跨区域、跨行业

间的高效流动,推动供应链上下游企业协同创新;三是健全成果转化和应用推广机制,推动新技术在生产、物流、库存管理等环节的应用,增强企业开展数实技术融合对供应链韧性的提升效益。(3)采取差异化的数实技术融合策略,从而更有针对性地提升供应链韧性。对于产业链上游企业,应优先在关键原材料、核心零部件、生产工艺和质量检测等关键环节推进数实技术融合,增强关键投入品供给的稳定性和替代能力,降低供给波动沿产业链向下游传导的风险。在地区层面,政府应加大融合技术专利保护和侵权查处力度,健全技术成果确权制度,并明确上下游联合研发中的知识产权归属和收益分配规则,为企业开展技术融合与协同创新营造稳定的制度环境。此外,地方政府应加快工业互联网、5G 网络、云平台和供应链协同平台建设,完善公共技术服务平台和共享数字设施,降低企业开展数实技术融合的技术门槛与投入成本。

参考文献:

[1]陶锋,王欣然,徐扬,等. 数字化转型、产业链供应链韧性与企业生产率[J]. 中国工业经济,2023(5):118-136.

[2]巫强,姚雨秀. 企业数字化转型与供应链配置:集中化还是多元化[J]. 中国工业经济,2023(8):99-117.

[3]袁业虎,吴端端. 企业数字化转型与供应链韧性——基于供应链溢出的视角[J]. 系统工程理论与实践,2025(7):2309-2326.

[4]黄先海,高亚兴. 数实产业技术融合与企业全要素生产率——基于中国企业专利信息的研究[J]. 中国工业经济,2023(11):118-136.

[5]谢谦,金才淇,刘维刚. 数实技术融合与企业出口韧性[J]. 管理世界,2025(12):21-37.

[6]李莉,王高森,程露,等. 数实技术融合、创新节奏与企业突破性创新——技术群嵌入的调节效应[J]. 科技进步与对策,2025(7):115-125.

[7]张瑜桐,李宗岐,朱光."以数促并":数实产业技术融合与中国企业跨国并购行为[J]. 世界经济研究,2025(5):71-89.

[8]马珂琦. 数实产业技术融合对城乡共同富裕的影响研究——基于新质生产力的中介效应检验[J]. 云南民族大学学报(哲学社会科学版),2024(4):120-130.

[9]刘姗姗. 数实产业技术融合、新质生产力与现代化产业体系建设[J]. 统计与决策,2025(9):12-17.

[10]刘鑫,周诗丰,闫晨莹. 企业数实产业技术融合对新质生产力的影响机制研究[J]. 管理学刊,2025(4):1-15.

[11]温科,李常洪. 数实技术融合对企业新质生产力的影响研究[J/OL]. 科研管理,2025:1-12. https://link.cnki.net/urlid/11.1567.G3.20250122.1420.009.

[12]王淑瑶,刘达,汤吉军,等. 数实融合背景下数据要素何以赋能企业供应链韧性与安全?[J]. 研究与发展管理,2025(1):1-13.

[13]葛新庭,谢建国,杨洪娜. 数字化转型与企业供应链韧性——来自中国上市公司与供应商的证据[J]. 中南财经政法大学学报,2024(3):136-150.

[14]丁怡帆,曹慧平. 企业数字化转型对客户关系稳定度的影响研究[J]. 管理学报,2025(6):1132-1141.

[15]冯国强,王锦. 数字化转型、供应链传导与企业生命周期[J]. 南开管理评论,2026(7):65-76.

[16]杨汝岱,李艳,孟珊珊. 企业数字化发展、全要素生产率与产业链溢出效应[J]. 经济研究,2023(11):44-61.

[17]Zahra S A, George G. Absorptive capacity: A review, reconceptualization, and extension[J]. Academy of Management Review, 2002, 27(2): 185-203.

[18]孙兰兰,钟琴,祝兵,等. 数字化转型如何影响供需长鞭效应?——基于企业与供应链网络双重视角[J]. 证券市场导报,2022(10):26-37.

[19]徐承红,林敏,董紫娴. 数字技术应用能否拓展区域创新技术边界[J]. 财经科学,2025(3):86-101.

[20]杨卓尔,陈欣妍,余晨汐. 创新中的制度回声:制度环境感知对企业创新的影响研究[J]. 科学学与科学技术管理,2026(4):110-130.

[21]Christopher M, Peck H. Building the resilient supply chain[J]. International Journal of Logistics Management, 2004, 15(2): 1-13.

[22]于飞,胡泽民,董亮,等. 知识耦合对企业突破式创新的影响机制研究[J]. 科学学研究,2018(12):2292-2304.

[23]李政,杨思莹. 财政分权、政府创新偏好与区域创新效率[J]. 管理世界,2018(12):29-42.

[24]刘畅,潘慧峰,李珮,等. 数字化转型对制造业企业绿色创新效率的影响和机制研究[J]. 中国软科学,2023(4):121-129.

[25]翟云,蒋敏娟,王伟玲. 中国数字化转型的理论阐释与运行机制[J]. 电子政务,2021(6):67-84.
[26]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(7):198-217.
[27]杨志强,唐松,李增泉. 资本市场信息披露、关系型合约与供需长鞭效应——基于供应链信息外溢的经验证据[J]. 管理世界,2020(7):89-105.
[28]Buyukozkan G, Gocer F. Digital supply chain: Literature review and a proposed framework for future research[J]. Computers in Industry, 2018, 97: 157-177.
[29]苏桔芳,王婷伟,白雨露,等. 数字金融与制造业企业供应链韧性提升[J]. 经济评论,2025(1):87-101.
[30]赵宸宇,王文春,李雪松. 数字化转型如何影响企业全要素生产率[J]. 财贸经济,2021(7):114-129.
[31]张树山,谷城. 企业数字化转型与供应链韧性[J]. 南方经济,2024(8):137-158.
[32]蒋殿春,鲁大宇. 供应链关系变动、融资约束与企业创新[J]. 经济管理,2022(10):56-74.
[33]张杰,郑文平. 创新追赶战略抑制了中国专利质量么?[J]. 经济研究,2018(5):28-41.
[34]Jaffe A B. The US patent system in transition: Policy innovation and the innovation process[J]. Research Policy, 2000, 29(4-5): 531-557.
[35]江艇. 因果推断经验研究中的中介效应与调节效应[J]. 中国工业经济,2022(5):100-120.
[36]胡元木,纪端. 董事技术专长、创新效率与企业绩效[J]. 南开管理评论,2017(3):40-52.
[37]王海,叶帅,尹俊雅. 公共数据开放如何提振企业有效投资——基于产能利用视角[J]. 中国工业经济,2024(8):137-153.
[38]刘志彪,孔令池. 双循环格局下的链长制:地方主导型产业政策的新形态和功能探索[J]. 山东大学学报(哲学社会科学版),2021(1):110-118.
[39]Antràs P, Chor D, Fally T, et al. Measuring the upstreamness of production and trade flows[J]. American Economic Review, 2012,102(3): 412-416.
[40]黄勃,李海彤,刘俊岐,等. 数字技术创新与中国企业高质量发展——来自企业数字专利的证据[J]. 经济研究,2023(3):97-115.
[41]陈晓东,刘洋,周柯. 数字经济提升我国产业链韧性的路径研究[J]. 经济体制改革,2022(1):95-102.
[42]赵春明,杨宏举. 数字基础设施建设提升产业链供应链韧性了吗[J]. 当代财经,2025(9):112-125.

[责任编辑:苗竹青]

The Integration of Digital and Real Technologies and the Enhancement of Supply Chain Resilience: Evidence from Patent Citation Analysis

DU Yunsu, FAN Wenhui

(School of Economics and Management, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: Amid profound shifts in the global landscape, the integration of digital and real technologies has become an important means of strengthening supply chain resilience, safeguarding China's economic security, and enhancing national competitiveness. Using firm-level patent data of Chinese A-share listed firms over 2009—2022, this study constructs a micro-level measure of digital and real technology integration and systematically examines its effect on supply chain resilience, the underlying mechanisms, and heterogeneity across firms and regions. The results show that greater integration between digital and real technologies significantly improves firms' supply chain resilience. This conclusion remains robust to a battery of checks, including corrections for endogeneity, alternative measures of the key explanatory variable, and controls for potentially confounding policies. Mechanism tests indicate that the effect operates primarily through stronger innovation capacity and better supply-demand matching. Heterogeneity analyses further show that the effect is more pronounced among upstream firms and is reinforced by stronger regional intellectual property protection and more advanced digital infrastructure. These findings provide firm-level evidence and policy implications for strengthening supply chain resilience by promoting the deeper integration of digital and real technologies in China.

Key Words: integration of digital and real technology; supply chain resilience; innovation capacity; supply-demand matching; patent citation; intellectual property protection; digital infrastructure