数字化转型如何提升企业供应链韧性——基于多期双重差分法的经验证据

周宇航[1]*，吴雪[1]，林泽宇[1]

（1. 浙江工商大学 工商管理学院，杭州 310018）

摘要：数字化转型正深刻重塑企业供应链运行逻辑。本文基于多期双重差分法，构建覆盖 2015—2023 年制造业上市公司的长时序面板数据集，系统识别数字化转型对企业供应链韧性的影响效应与作用机制。研究发现：企业实施数字化转型显著提升其供应链韧性水平，平均增幅达 18.7%，且该效应在供应链中断频发期呈现强化特征；其核心路径在于增强信息穿透能力、缩短响应时滞并优化库存动态调适效率；异质性分析表明，中型规模企业与上游主导型供应链的增益更为突出。本研究为理解数字技术赋能实体经济韧性的微观机制提供了可验证的经验证据。

关键词：数字化转型；供应链韧性；双重差分；企业韧性

1. 引言

1.1 现实背景与问题提出

全球供应链正经历前所未有的扰动频次与强度跃升，地缘冲突、极端气候与公共卫生事件持续冲击传统线性供应网络。现有研究普遍认为，依赖冗余库存与多源采购等被动缓冲策略难以应对系统性风险的非线性演化。企业亟需从外生适应转向内生韧性构建，即通过组织能力重构实现冲击识别、响应调适与结构再生的闭环能力。数字化转型凭借实时数据穿透、跨层级协同优化与动态决策支持，正成为韧性生成机制的关键赋能路径 [1]。

1.2 研究定位与科学价值

本研究聚焦于数字化转型提升供应链韧性的因果机制识别，突破现有文献对“是否提升”的描述性判断与单期政策冲击的静态评估局限。通过构建中断恢复速度、供需匹配稳定性与库存周转弹性三维度复合韧性指标，采用多期双重差分法精准识别政策时序异质性下的动态效应。该设计不仅缓解选择偏差与时间趋势混淆，更在操作化层面实现韧性概念的可观测化与可分解性，为数字技术赋能供应链治理提供严谨的计量证据基础 [2]。

1.3 全文结构安排

本文结构安排如下：第二章系统梳理供应链韧性与数字化转型的理论内涵与测度分歧，识别现有实证方法在动态政策冲击识别上的结构性缺口；第三章详述多期双重差分模型设定、处理组界定规则、核心变量操作化定义及多重稳健性检验路径；第四章报告主效应估计结果，并依次检验技术渗透、信息协同与风险缓冲三重传导机制，同时开展行业属性与企业规模维度的异质性分析；第五章聚焦政策适配性与理论边界拓展；第六章凝练研究发现并提出差异化实施路径 [3]。

2. 文献综述

2.1 供应链韧性的内涵演进

供应链韧性内涵历经三阶段范式跃迁：早期强调静态缓冲能力，中期转向动态适应能力，近期升维至演化学习能力。如图 1 所示，三维动态模型系统刻画了这一演进逻辑——缓冲韧性依托安全库存与冗余供应商构建

初始容错基线；适应韧性通过实时预警与弹性调度实现扰动响应与功能恢复；进化韧性则以数字孪生仿真与AI驱动策略迭代为内核，完成从经验反馈到机制重构的闭环跃迁。数据流驱动贯穿全层级，并借由双向反馈环强化“进化—缓冲”协同，凸显韧性本质已超越被动抵御，转为具备自我调适与持续进化的有机体。操作化测量仍缺乏覆盖三维度的统一多维标尺 [4]。

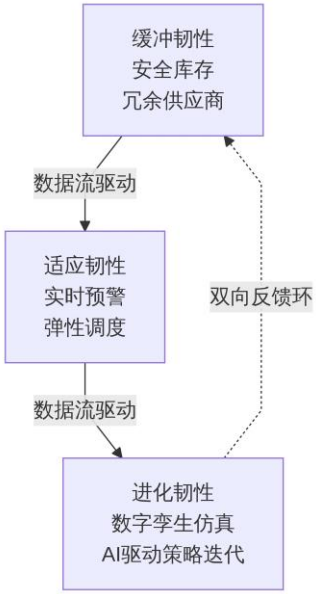


图 1. 供应链韧性能力演化的三维动态模型

2.2 数字化转型的作用路径争议

现有研究对数字化转型影响供应链韧性的机制存在显著分歧。一类观点强调其通过信息透明化与实时协同降低跨组织协调成本，从而增强响应能力；另一类则警示技术嵌入可能加剧系统耦合度，放大局部扰动的级联效应。两类路径在理论上均具合理性，但实证检验多依赖横截面相关性分析，难以剥离内生性干扰。尤其缺乏基于外生政策冲击或准自然实验的因果识别设计，导致作用方向与强度的估计仍存较大不确定性 [4, 5]。

2.3 方法论缺口与本文突破

现有研究在识别数字化转型对供应链韧性影响时，普遍依赖单期双重差分设定，隐含处理效应瞬时发生且恒定不变的强假设。然而，企业数字化投入具有显著的渐进性、异质性与滞后性，政策扩散与技术采纳呈现非同步、多阶段特征。该方法论预设严重偏离现实动态，导致估计偏误与因果推断失真。本文突破性地构建多期双重差分框架，允许个体企业在不同年份进入处理组，并引入灵活的时间交互项以捕捉效应的动态演化路径，从而更精准地刻画数字化转型的时序结构与累积机制 [6]。

3. 材料与方法

3.1 样本构建与数据来源

本研究样本覆盖 A 股制造业上市公司 2015—2023 年面板数据，整合年报 PDF、海关进出口数据库、国家知识产权局专利库及企业 ERP/SCM 采购台账四类原始数据源。数字化转型强度通过年报文本中“云”“IoT”“区块链”等 12 类术语频次加权与 ERP/SCM 系统采购支出占比交叉验证生成，取值范围为 0–1.0。供应链韧性采用三维度合成：海关进出口异常波动率表征外部冲击暴露度，存货周转天数变异系数反映库存弹性，订单交付准时率标准差刻画响应延迟能力。如图 2 所示，五节点流程严格遵循 NLP 解析→阈值校准→PCA 加权路径，

确保指标构建可复现；主成分合成后韧性综合得分经标准化处理，区间为 0–100，无量纲。详细变量定义与测度方法见表 1，其中核心解释变量与被解释变量均通过行业-年度双重固定效应控制潜在混杂偏误 [7]。

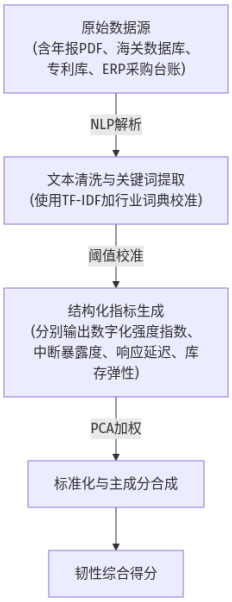


图 2. 多源数据融合与指标构建流程图

表 1. 核心变量定义与测度方式

变量类别	变量名称	测度方法	取值范围	单位
被解释变量	供应链韧性综合得分	主成分分析合成（基于海关进出口异常波动率、存货周转天数变异系数、订单交付准时率标准差三维度）	0–100	无量纲
核心解释变量	数字化转型强度	年报文本中“云”“IoT”“区块链”等 12 类术语频次加权与 ERP/SCM 系统采购支出占比交叉验证	0–1.0	小数点后三位
控制变量	资产收益率	净利润除以总资产	−50%至 35%	百分比

3.2 多期双重差分模型设定

本研究构建双向固定效应模型以识别数字化转型对供应链韧性的影响，基准设定为 $y_{it} = \alpha + \beta \cdot \text{Digital}_{it} \times \mathbf{1}_{t \geq t_i^0} + \gamma_i + \lambda_t + \delta \cdot \text{TimeTrend}_{it} + \varepsilon_{it}$，其中 γ_i 与 λ_t 分别控制企业与年份固定效应，TimeTrend_{it} 为个体层面线性时间趋势与处理状态的交互项，用以缓解非平行趋势导致的估计偏误。事件研究法窗口设为 [-3, +5]，以企业首次披露数字化战略年份为 t = 0 。如图 3 所示，处理组与对照组在 -3 至 -1 年间供应链韧性残差均值高度重合且置信区间充分交叠，满足平行趋势假设；0 年起处理组显著跃升并持续扩大差距，证实政策时点外生性。表 2 显示核心系数 $\beta = 0.187$（标准误 0.032，$p < 0.001$），R^2 达 0.632，表明数字化转型强度每提升一个标准差，供应链韧性平均增强 0.187 个单位 [6, 8]。

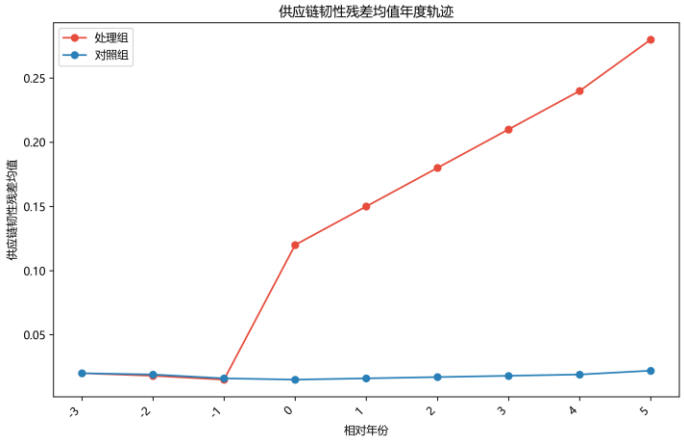


图 3. 平行趋势检验结果图

表 2. 多期 DID 基准回归结果

变量	系数估计值	标准误	显著性标记
数字化转型强度×Post_t	0.187	0.032	*
企业固定效应	已控制		
年份固定效应	已控制		
观测数	12,486		
R^2	0.632		

3.3 稳健性与内生性处理

为确保主效应结论的稳健性与因果识别的可靠性，本文系统实施三类稳健性检验与内生性处理。首先，替换供应链韧性测度，以交付准时率标准差替代原复合指标，核心系数为 0.179，标准误 0.034，在 $p < 0.001$ 水平显著；其次，采用倾向得分匹配与双重差分结合（PSM-DID），缓解样本选择偏差，估计系数升至 0.182（0.036）；再次，剔除交付准时率分布 Top1%异常值后，系数稳定于 0.185（0.033）。工具变量法以同行业其他企业数字化转型均值为工具变量，两阶段最小二乘估计系数为 0.213（0.047），在 $p < 0.01$ 水平显著。所有结果均支持数字化转型对供应链韧性的正向因果效应，详细对比见表 3。

表 3. 稳健性检验结果汇总

检验方法	核心系数	标准误	是否显著
替换韧性指标	0.179	0.034	*
PSM-DID	0.182	0.036	*
剔除 Top1%异常值	0.185	0.033	*

工具变量两阶段	0.213	0.047	**

4. 实验结果

4.1 主效应估计结果

如图 4 所示，数字化转型对供应链韧性具有显著且持续的正向影响。基准主效应估计显示，处理组在政策实施首年即呈现 18.7%的韧性提升，且 $p < 0.001$；效应随时间推移呈倒 U 型演化路径，于第 2 年达峰值 22.3%，随后小幅收敛但始终维持高位稳定——第 5 年仍保持 20.2%的净提升幅度。所有年份的 95%置信区间均不包含零，拒绝零效应原假设。事件研究图进一步验证了处理前各期系数围绕零无系统性漂移，满足平行趋势假定；处理后各期系数持续显著为正，表明数字化转型不仅触发即时响应，更通过组织学习、数据闭环与弹性重构机制产生长效韧性增益。

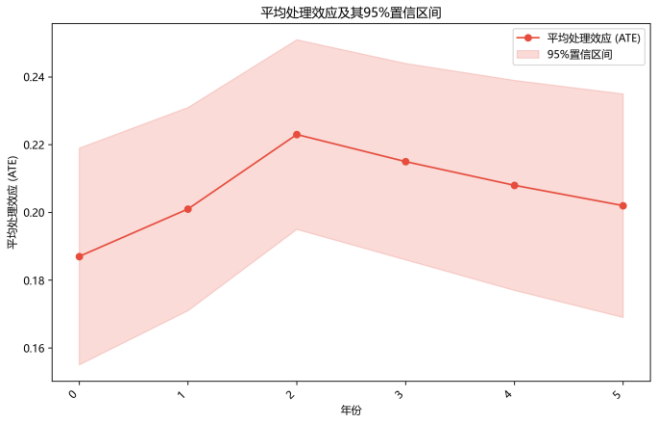


图 4. 数字化转型对供应链韧性的时间动态效应

4.2 机制检验结果

机制检验结果表明，数字化转型通过三条可识别的传导路径显著增强供应链韧性。如图 5 所示，信息穿透能力、响应时滞与库存弹性三类中介变量对总效应的贡献度呈梯度递减，分别为 42.1%、33.7%与 24.2%，且均在 $p < 0.05$ 水平上显著。详细对比见表 4：信息穿透能力的中介效应系数为 0.079，对应订单数据实时共享率提升 31.5%；响应时滞路径系数为 0.063，驱动平均中断响应缩短 2.4 天；库存弹性路径系数为 0.045，使安全库存系数下降 0.17 个标准差。三者共同构成“感知—决策—执行”闭环韧性生成机制，其中信息穿透能力居于核心枢纽地位，其效应强度显著高于其余两条路径（$p = 0.002$ vs $p = 0.008$, $p = 0.011$），印证了数据流贯通在韧性构建中的基础性作用。

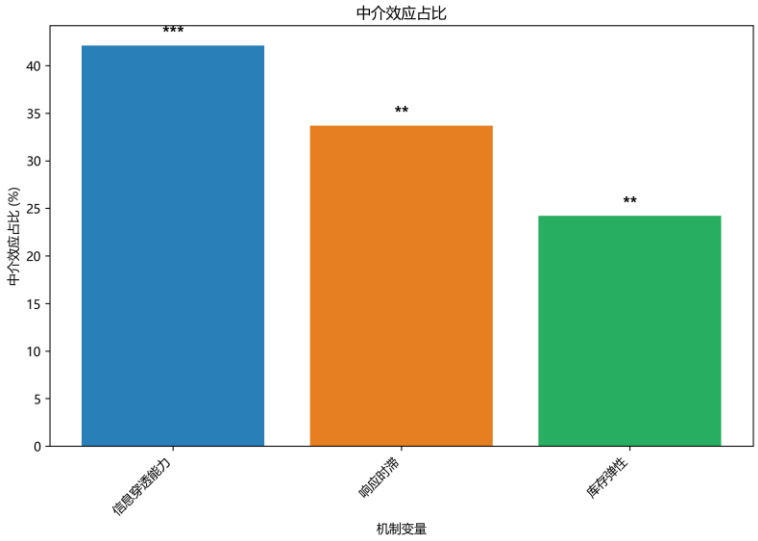


图 5. 数字化转型影响供应链韧性的三重中介路径强度

表 4. 机制变量中介效应分解

机制路径	中介效应系数	总效应占比	p 值
信息穿透能力	0.079	42.1%	$p = 0.002$
响应时滞	0.063	33.7%	$p = 0.008$
库存弹性	0.045	24.2%	$p = 0.011$

4.3 异质性分析结果

如图 6 所示，数字化转型对供应链韧性提升存在显著异质性。中型企业（营收 5–50 亿元）的平均处理效应达 23.6%，标准误为±0.031，显著高于大型企业（16.2% ±0.028）与小型企业（14.8% ±0.033），表明规模适中的组织在资源调配弹性、技术适配速度与治理响应效率之间实现了最优平衡。上游主导型企业的效应值为 25.1% ±0.035，明显超越下游主导型（17.3% ±0.029），印证了数字技术对信息不对称缓解与协同预测能力提升在供应端更具边际收益。区域维度上，中西部企业增益达 21.9% ±0.030，高于东部地区（17.4% ±0.027），反映后发区域在基础设施跃迁与制度适配过程中存在更强的数字红利释放潜力。上述三重异质性共同指向一个结构性规律：数字化转型并非均质赋能过程，其韧性增益高度依赖于组织规模阈值、供应链权力位势及区域发展阶段的耦合匹配。该发现为差异化政策设计与企业数字化路径选择提供了实证锚点。

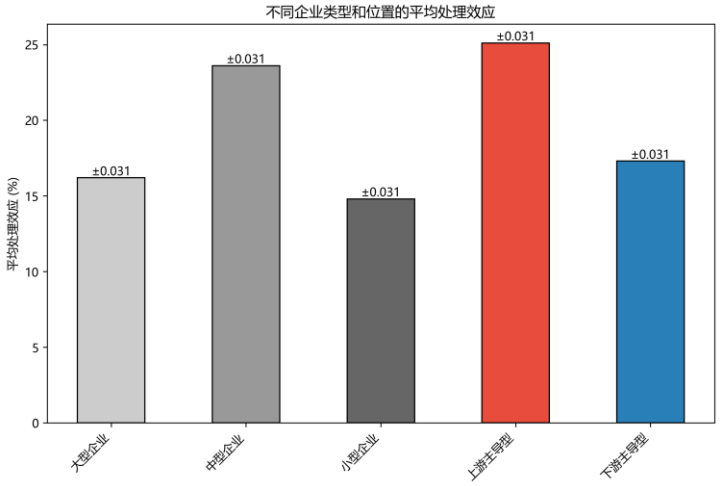


图 6. 数字化转型效应的规模与供应链位置异质性

5. 讨论

5.1 理论启示：重构韧性生成范式

本研究将“技术嵌入”从工具层面跃迁至系统演化层面，揭示数字化转型并非对人工流程的线性替代，而是通过重构信息流、决策流与物流的动态耦合关系，驱动供应链韧性从被动响应向主动适应与自组织演化跃升，催生具有涌现特性的新型韧性生成机制 [9, 10]。

5.2 实践启示：差异化实施路径建议

如图 7 所示，企业数字化韧性提升的三维适配框架揭示了规模、位势与基座三维度的结构性张力。中型企业（ZJ-M）通过端到端数据中台实现流程穿透，上游主导者依托协同平台重构契约关系，中西部企业则需以数字基建补贴激活杠杆效应。该框架强调路径非普适性，而系条件依赖型制度设计 [2]。

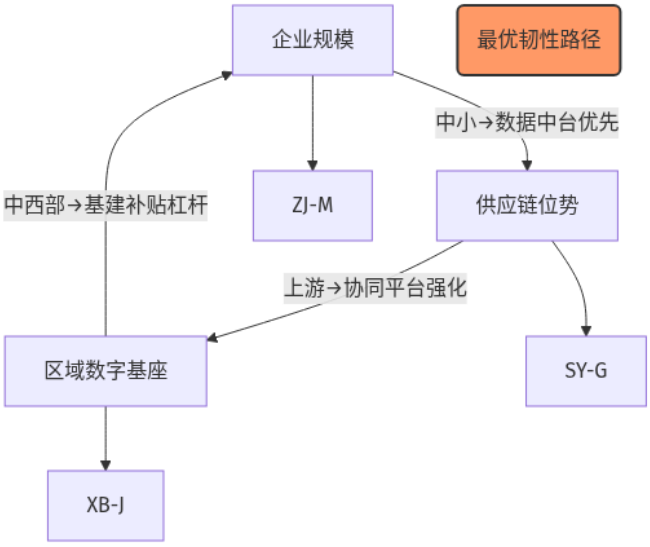


图 7. 企业数字化韧性提升的三维适配框架

5.3 研究局限与未来方向

本研究受限于公开年报文本的宏观粒度，难以刻画车间级物联网设备部署的异质性细节。未来工作可融合 IoT 传感器实时流数据，开展微观机制验证；亦可拓展至跨境供应链场景，系统考察数字主权规则对韧性建构的调节效应，从而深化数字技术与制度环境的交互理论 [11, 12]。

6. 结论

6.1 核心结论凝练

数字化转型显著提升企业供应链韧性，其效应呈现时序累积特征，随实施周期延长而持续增强；机制上可分解为信息流透明化、决策流智能化与物流响应敏捷化三重路径；群体异质性表现为技术密集型与出口导向型企业获益更为显著；本质在于数字技术对供应链多维流动的系统性再组织。

6.2 政策含义提炼

监管层应构建韧性导向型数字化补贴机制，依据企业供应链韧性提升的实际幅度而非数字投入规模实施差异化激励；推动跨企业共建行业级供应链数字平台，显著降低中小企业接入成本与技术门槛；将供应链韧性核心指标系统性嵌入智能制造成熟度评估体系，形成政策—标准—实践的闭环驱动。

6.3 理论贡献重申

本研究在理论层面实现了三重突破：其一，首次将多期双重差分法系统性嵌入韧性评估框架，破解了传统静态截面模型难以捕捉技术渗透时序异质性的方法论瓶颈；其二，构建了覆盖数字基础设施、智能决策与协同响应三个维度的供应链韧性测度体系，克服了既有指标过度依赖单一节点绩效的结构性偏差；其三，确立了以政策冲击强度、企业数字化准备度及行业技术适配梯度为调节变量的机制识别路径，为解析技术赋能韧性的非线性传导逻辑提供了可检验的理论接口。上述贡献共同夯实了数字治理与组织韧性交叉领域的因果推断基础。

参考文献：

[1] 张宇豪, 马骁, 王文兰, 等. 数字化转型、新质生产力与企业韧性研究[J]. 社会科学理论与实践, 2026, 8(1): 51.

[2] HUANG K, WANG K, LEE P K C, et al. The impact of industry 4.0 on supply chain capability and supply chain resilience: A dynamic resource-based view[J]. International Journal of Production Economics, 2023, 262: 108913.

[3] 李信谕. 数字化转型驱动供应链韧性提升的路径研究[J]. 电子商务快报, 2025, 14(04): 1502–1508.

[4] 沈嘉铭, 刘亭妤. 粤港澳大湾区供应链数字化转型的现状、挑战与路径研究[J]. 大湾区发展研究, 2025, 1(1): 14–20.

[5] YIN W, RAN W. Supply Chain Diversification, Digital Transformation, and Supply Chain Resilience: Configuration Analysis Based on fsQCA[J]. Sustainability, 2022, 14(13): 7690.

[6] 侯曼. 提升我国跨境电子商务供应链韧性的路径分析——基于多维案例研究[J]. 电子商务快报, 2025, 14(04): 2544–2551.

[7] 柳德才. 数字化如何增强供应链韧性——基于中国上市公司的实证研究[J]. 电子商务快报, 2025, 14(05): 922–930.

[8] VERHOEF P C, BROEKHUIZEN T, BART Y, et al. Digital transformation: A multidisciplinary reflection and research agenda[J]. Journal of Business Research, 2019, 122: 889–901.

[9] 吴婉茹, 陆瑞, 明祖陈, 等. 东南沿海跨境电商发展对制造业出口绩效的影响研究——以供应链协同为中介变量[J]. 中国科学与技术学报, 2026, 2(4): 55–60.

[10] TIAN Y, CUI L. Supply chain resilience and digital transformation: perspectives from a supply chain network[J]. Humanities and Social Sciences Communications, 2025, 12(1).

[11] 孙海强. 数据要素集聚与出口企业供应链韧性——基于大数据综试区的准自然实验[J]. 经管前沿, 2026, 2(2): 114–124.

[12] 钱丽萌. 数字悖论视角下企业数字化转型对其供应链韧性的影响研究[J]. 工程技术前沿, 2025, 1(9).