引用格式：樊宇，王淼，宋罗娜，等. 中国数字经济投入产出网络韧性测度与形成机制研究[J]. 技术经济，2026，45(7)：100-114.
Fan Yu，Wang Miao，Song Luona，et al. Resilience measurement and formation mechanism of China's digital economy input-output network [J]. Journal of Technology Economics，2026，45(7)：100-114.

中国数字经济投入产出网络韧性测度与形成机制研究

樊 宇[1,2]，王 淼[1]，宋罗娜[1]，齐 林[1]
（1.北京信息科技大学管理科学与工程学院，北京 102206；2.绿色发展大数据决策北京重点实验室，北京 102206）

摘 要：在数字经济与实体经济深度融合的背景下，基于2005—2023年中国投入产出表，构建包含数字经济部门的产业网络，引入生态网络分析的效率-冗余框架测度产业网络韧性，并将韧性指标嵌入时间指数随机图模型，系统考察中国数字经济投入产出网络韧性演化与形成机制。研究发现：第一，中国产业网络始终处于过度冗余状态，韧性呈波动上升态势，节点间流量集中程度是韧性波动的核心驱动力，韧性主导因素在2020年前后从效率变化转为冗余变化。第二，网络演化具有显著的路径依赖特征与结构刚性，传递闭合性促进间接关联转化，冗余流入贡献显著为正，表明上游供应多元化行业更易建立关联，而效率相关变量均不显著。第三，数字经济部门呈现双重角色。在韧性维度上，影响力从数字产业化主导（2005—2012年）向产业数字化主导（2012—2020年）演进；在演化机制上，两者对关联形成具有非对称性，主要表现为对存量关联的优化与替代。研究结论为理解数字经济时代产业网络韧性特征与演化逻辑提供了新的分析框架与经验证据，也为新发展格局下统筹效率与安全、推动数字经济与实体经济深度融合提供了理论依据与决策参考。

关键词：数字产业化；产业数字化；网络韧性；TERGM；投入产出；演化机制
中图分类号：F49 **文献标志码**：A **文章编号**：1002-980X(2026)07-0100-15
DOI：10.12404/j.issn.1002-980X.J26031212

一、引言

在数字经济深度融入实体经济的新时代，数字产业化与产业数字化协同推进，已成为驱动中国经济高质量发展的核心引擎。国家统计局数据显示，中国数字经济增加值占GDP比重持续攀升，“十五五”时期相关国家战略更明确将数字经济作为培育新质生产力、构筑国际竞争新优势、推动高质量发展的核心抓手[1]。与此同时，全球经济格局深度调整，供应链产业链波动、技术变革迭代加速等内外部冲击频发，经济系统的韧性水平已成为衡量其抵御冲击、快速恢复并实现动态适配能力的核心维度[2]。数字经济部门凭借其高关联性、强渗透性特征，与传统产业部门形成复杂的联动网络，其自身及关联网络的韧性表现，直接影响整体经济系统的稳定运行效率[3]。在此背景下，如何精准刻画数字经济部门在产业网络中的韧性特征，厘清其韧性形成与演化的内在机制，为优化数字经济布局、增强宏观经济抗风险能力提供实证支撑，已成为当前学术研究与政策实践亟待回应的重要议题。

聚焦数字经济部门，学术界已围绕其规模测度与产业关联效应展开大量探讨。王亚菲和李明娜[4]提出数字经济投入产出表的通用编制框架并完成中国实践核算，为数字经济部门的规模精准测度与跨产业关联效应分析提供了标准化方法与数据基础。任雪等[5]构建数字经济全口径增加值核算方法体系，基于投入产出技术实现数字核心产业与融合产业的规模测度，同时刻画数字部门与传统产业间的关联效应。Zhou等[6]

收稿日期：2026-03-12
基金项目：国家自然科学基金青年科学基金项目“降碳减排协同推进下产业结构优化决策与路径研究”(72204027)；国家社会科学基金项目“极端天气冲击下数智应急驱动城市复杂巨系统安全韧性治理创新研究”(25BGL295)；北京市社会科学基金重点项目“人工智能时代北京市公共数据建设提质增效研究”(25JCB051)
作者简介：（通信作者）樊宇(1989—)，博士，北京信息科技大学管理科学与工程学院教授，研究方向：环境管理与智能决策；王淼(2002—)，北京信息科技大学管理科学与工程学院硕士研究生，研究方向：信息管理与智能决策；宋罗娜(1992—)，博士，北京信息科技大学管理科学与工程学院副教授，研究方向：大数据、知识管理与智能决策；齐林(1987—)，博士，北京信息科技大学管理科学与工程学院副教授，研究方向：复杂网络建模与分析。

采用投入产出分析测度中国信息与通信技术（ICT）核心部门的隐含碳排放，揭示了数字部门通过产业前后向关联与其他部门形成的碳关联传导效应。Zhou 等[7]构建分阶段投入产出框架，从供需双向量化中国数字经济的碳排放规模，解析了数字核心部门对上下游产业的关联驱动机制。上述研究从规模核算、产业关联与传导效应等维度为理解数字经济部门的投入产出特征提供了重要实证基础。

在产业网络韧性测度方面，常见的方法有四类。第一类是网络拓扑结构分析法[8-10]，通过分析网络的静态拓扑属性，识别其固有的结构脆弱点和鲁棒性，主要包括中心性指标、网络整体指标和关键路径分析。第二类是基于模拟冲击的动力学分析法[11-13]，通过构建模型模拟冲击在网络中的传播过程，是一种动态韧性评估的方法。第三类是量化韧性指标法[14-16]，在模拟冲击后，需要具体的指标来量化韧性，如通过功能曲线度量和基于结果进行指标对比。第四类是一些前沿与拓展方法，有多层网络分析[17]、回归分析[18]等。研究有时会结合以上几种方法，形成从结构特征分析到动态模拟冲击，再到韧性指标量化的综合分析框架。此外，从复杂系统理论视角出发，使用基于 Ulanowicz[19]发展理论的效率-冗余韧性指标，将网络视为一个代谢系统，通过其结构配置来评估其固有韧性，已在多个领域展现出适用性与解释力。Kharrazi 等[20]研究了冗余、多样性、模块性等韧性指标对于国际贸易网络的影响。Chatterjee 和 Layton[21]将效率-冗余指标应用于资源与基础设施网络设计分析。Kiss 等[22]将生态网络分析框架引入多国投入产出数据，分析多国生产网络在冗余和效率之间的平衡，从而衡量其结构韧性。该方法与传统侧重静态结构或外部冲击模拟的方法相比，其核心优势在于能够从系统的内在运行逻辑出发，量化效率与冗余的动态平衡关系。在此基础上，本文将生态网络分析中的效率-冗余框架应用于投入产出网络，以结构性的内在视角对其韧性进行测度与探讨。

同为依赖流量交换维持稳态的耗散结构，经济系统中的中间投入关系在功能上等价于生态系统中的能量传递路径，都面临系统稳定性与资源利用效率的权衡，因此 Ulanowicz 的框架具有可迁移性。依据该理论，系统的可持续韧性并非单一追求最大效率或最大冗余，而是源于效率与冗余的结构性平衡。中国正全力推进数字化进程，因此，基于该理论框架进行数字经济产业网络韧性效率与冗余量化测度，有助于把握网络演化的特征，并为理解网络形成机制的驱动作用提供理论预期。基于上述方法论基础，首先，对数字经济投入产出网络的边界进行界定。本文所指的数字经济投入产出网络是以国家统计局发布的《数字经济及其核心产业统计分类》为基准，在投入产出表中剥离出的数字经济核心产业部门与各传统行业部门因中间产品使用而产生的有向加权网络。其次，对韧性的核心构成维度，即效率与冗余进行界定。在数字经济投入产出网络中，效率表现为特定产业关联路径上流量的集中度与专一化程度，反映资源配置的集约性；冗余则表征为产业消耗结构的多元化与供应渠道的备选丰富度，体现系统在面对特定链路断裂时的替代可能性。若投入产出网络过度偏向效率，虽短期增长强劲，但在外部冲击下将暴露结构脆弱性；若过度偏向冗余，则系统将陷入低水平均衡。这一理论视角为理解数字经济的双重角色提供了关键切入点。一方面，数字经济的高渗透性使其成为提升实体经济运行效率的加速器；另一方面，其网络枢纽地位又要求其必须具备适度的冗余配置以应对系统性风险。正是这种效率与冗余的动态平衡，构成了数字经济投入产出网络韧性的内在逻辑。

研究网络动态演化的模型主要有随机行动者导向模型（SAOM）[23-24]、动态网络嵌入模型（DNE）[25]、可分离的时序指数随机图（STERGM）模型[26-27]和时间指数随机图（TERGM）模型[28-29]。本文选择 TERGM 模型来研究投入产出表的动态演变，因为它能将产业关联视为一个整体网络，直接分析其内在结构规律与外部经济因素如何共同驱动网络结构的演化[30-31]。李清如和王冰雪[32]基于 TERGM 模型对全球数字产品贸易依赖网络演化的内部和外部机制进行动态分析。王一新和沈丽珍[33]运用 TERGM 模型刻画长三角数字技术应用业产业网络的时空演化特征，识别内生结构动力与外生要素共同驱动数字产业网络关联形成与路径依赖。马述忠和杜特[34]通过社会网络分析、TERGM 模型等估计方法，探讨了数字服务贸易壁垒对数字服务贸易网络结构演化的影响。基于这一模型优势，本文在整体网络框架下，系统考察包含韧性指标在内的多维驱动因素，如何共同作用于数字经济投入产出关联结构的动态演化过程。

当前研究多聚焦于外部冲击模拟或静态拓扑指标分析，对数字经济投入产出网络的内在结构韧性特征（即效率与冗余的动态平衡）及其驱动网络演化的深层机制尚缺乏系统性的考察。边际贡献如下：一是在方法层面，将生态网络分析中的效率-冗余框架引入数字经济投入产出网络研究，从结构内在属性出发，对数字经济投

入产出网络韧性进行测度,为理解其抵御冲击的潜在能力提供一种补充性视角。二是在分析维度上,不仅关注数字经济投入产出网络韧性的静态表现,更借助TERGM模型,初步考察其韧性特征如何随时间推移与网络结构的演化相互影响,从而在一定程度上揭示韧性形成与网络动态之间的关联机制。三是在实证层面,基于中国多年份投入产出表构建包含数字经济部门的产业网络,对中国数字经济投入产出网络进行韧性测度与形成机制分析,所得结果将有助于理解中国数字经济部门的结构特性及其演变规律,研究结论可为产业链供应链韧性评估、数字经济分类实施策略及关键行业上游冗余储备策略等政策实践提供参考依据。基于此,本文以国家统计局发布的多年份投入产出表为基础,构建包含数字经济部门的产业网络,系统测度中国数字经济投入产出网络的韧性指标,并将韧性指标嵌入TERGM模型,揭示韧性特征对数字经济部门网络关联的影响机制,以期为新发展格局下统筹效率与安全、优化数字经济空间布局提供理论依据与决策参考。

二、研究方法与数据来源

(一)数据来源与处理

研究区间为2005—2023年,数据基础来源于《中国统计年鉴》发布的2005年、2007年、2010年、2012年、2015年、2017年、2018年、2020年及2023年共9个年份的投入产出表。为消除价格变动的影响并确保跨期可比性,以2012年为基期,对各年份投入产出表的价值量数据进行了价格平减处理。具体做法为:利用各行业对应的价格指数将历年现价投入产出表中的中间使用、最终使用及总产出等价值量指标,统一平减为2012年不变价,即不变价价值为现价价值/(价格指数/100)。在此基础上,为构建统一口径的面板数据,将各表统一合并为39个部门,并依据数字经济的产业分类框架,将各部门与数字产业进行匹配与对应,最终识别出2个数字产业化部门、8个产业数字化部门及29个传统产业部门。其中,数字产业化部门主要包括通信设备、计算机和其他电子设备制造业及信息传输、软件和信息技术服务业;产业数字化部门包括造纸印刷和文教用品制造业、化学工业、通用专用设备制造业、电气机械及器材制造业、仪器仪表及文化办公用机械制造业、批发和零售贸易业、金融保险业,以及文化、体育和娱乐业中因数字技术应用而产生附加值的数字化部分。需要说明的是,匹配后的产业数字化部门同时包含了传统产业部分与数字技术带来的增值部分,为精确测度数字经济的贡献,参照相关文献对该部分进行了数字化与非数字化的分离。产业数字化部门的分离系数为产业数字化增加值与国内生产总值扣除数字产业化增加值之差的比率,其中产业数字化增加值指的是数字经济总量扣除数字产业化增加值后的差值。对于某一部门,其数字化增加值可通过该部门的分离系数与该部门总增加值相乘得出,而该部门的非数字化增加值则是该部门总增加值与其数字化增加值的差值。最终编制得到包含数字产业化与产业数字化部门在内的39部门数字经济投入产出表(表1),为后续研究提供了数据基础[35]。

表1 产业部门代码

编号	部门名称	编号	部门名称	编号	部门名称
01	农林牧渔业	14	非金属矿物制品业	27	交通运输及仓储、邮政
02	煤炭开采和洗选业	15	金属冶炼及压延加工业	28	批发和零售贸易业
03	石油和天然气开采业	16	金属制品业	29	住宿和餐饮业
04	金属矿采选业	17	通用专用设备制造业	30	金融保险业
05	非金属矿采选业	18	交通运输设备制造业	31	房地产业
06	食品制造及烟草加工业	19	电气机械及器材制造业	32	租赁和商务服务业
07	纺织业	20	数字产业化	33	科学研究和技术服务
08	服装皮革羽绒及其制品业	21	仪器仪表及文化办公用机械制造业	34	水利、环境和公共设施管理业
09	木材加工及家具制造业	22	其他制造业(含废品废料)	35	居民服务和其他服务业
10	产业数字化	23	电力、热力的生产和供应业	36	教育
11	造纸印刷及文教用品制造业	24	燃气生产和供应业	37	卫生、社会保障和社会福利事业
12	石油加工、炼焦及核燃料加工业	25	水的生产和供应业	38	文化、体育和娱乐业
13	化学工业	26	建筑业	39	公共管理和社会组织

基于中国数字经济投入产出表构建网络,该网络为加权有向网络,节点为各产业部门,边表示产业部门间的投入产出关系,权重为某部门对另一部门的中间使用值占该部门中间使用总值的比重。为满足TERGM模型对二值网络的要求,以各年度部门间投入产出流量的平均值为阈值,将加权网络转化为二值有向网络[36]。

（二）数字经济投入产出网络韧性测度模型

借鉴生态系统物质流网络的韧性分析思路，将其拓展至经济系统的结构稳定性评价中[37]。基于中国投入产出表，将各产业部门视为网络节点，部门间的中间投入产出流量视为有向边，构建加权有向网络模型。通过计算网络的效率与冗余，进一步评估其韧性变化，并识别关键部门与结构变动的影响路径。

网络效率反映部门间经济资源配置的集中程度与传导有效性，高效率通常代表资源流动路径短、依赖关系明确，但也可能意味着系统脆弱性较高。网络冗余则反映部门间联系的备选路径与多样性，高冗余能增强系统应对冲击的能力，但可能伴随资源配置效率的降低。网络效率 E 与网络冗余 R 的计算公式如下：

$$E = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\frac{x_{ij}}{X_t}\times \ln\frac{x_{ij}X_t}{X_j^{\text{in}}X_i^{\text{out}}} \tag{1}$$

$$R = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\frac{x_{ij}}{X_t}\times \ln\frac{X_j^{\text{in}}\times X_i^{\text{out}}}{x_{ij}^2} \tag{2}$$

其中：x_{ij} 为部门 i 到部门 j 的中间投入流量；X_i^{out} 为部门总产出；X_j^{in} 为部门总投入；X_t 为网络总流量；n 为网络的节点数。在此基础上，用 θ 来测度效率与冗余之间的平衡，在 θ 的基础上定义弹性 Y：

$$\theta = \frac{E}{E+R} \tag{3}$$

$$Y = -\theta\ln\theta \tag{4}$$

其中：$\theta\in[0,1]$ 为效率占比系数，当 $\theta=1/e$ 时，弹性 Y 达到最大值，此时效率与冗余处于最优平衡状态。弹性变化 $\Delta Y = Y_t - Y_0$ 可进一步分解为效率贡献 ΔY_E 与冗余贡献 ΔY_R。

$$k = \frac{(E_t+E_0)(R_t-R_0)}{(R_t+R_0)(E_t-E_0)} \tag{5}$$

$$\Delta Y_R = \Delta Y\frac{k}{1+k} \tag{6}$$

$$\Delta Y_E = \Delta Y\frac{1}{1+k} \tag{7}$$

其中：k 为比例系数，该分解用于判断弹性变化主要由效率驱动还是冗余驱动，从而揭示系统结构变动的主导逻辑。

为深入探究效率与冗余变化的内在结构来源，进一步将 ΔE 与 ΔR 分解为三个维度的影响：流量集中度变化 c_{ij}、部门间依赖度变化 d_{ij} 与部门自由度变化 s_{ij}。

$$c_{ij} = \frac{x_{ij}}{X_t} \tag{8}$$

$$d_{ij} = \ln\frac{x_{ij}X_t}{X_j^{\text{in}}X_i^{\text{out}}} \tag{9}$$

$$s_{ij} = \ln\frac{X_j^{\text{in}}X_i^{\text{out}}}{x_{ij}^2} \tag{10}$$

则：

$$\Delta E_{ij} = \Delta E_C + \Delta E_D \tag{11}$$

$$\Delta R_{ij} = \Delta R_C + \Delta R_S \tag{12}$$

其中：

$$\Delta E_C = \sum_{i,j}\Delta c_{ij}\times\frac{d_{ij}^0+d_{ij}^t}{2} \tag{13}$$

$$\Delta E_D = \sum_{i,j}\frac{c_{ij}^0+c_{ij}^t}{2}\times\Delta d_{ij} \tag{14}$$

$$\Delta R_C = \sum_{i,j} \Delta c_{ij} \times \frac{s_{ij}^0 + s_{ij}^t}{2} \tag{15}$$

$$\Delta R_S = \sum_{i,j} \frac{c_{ij}^0 + c_{ij}^t}{2} \times \Delta s_{ij} \tag{16}$$

其中：ΔE_C 为流量集中度对效率的贡献；ΔE_D 为部门依赖度对效率的贡献；ΔR_C 为流量集中度对冗余的贡献；ΔR_S 为部门自由度对冗余的贡献。

为进一步识别影响系统弹性的关键部门与路径，构建部门间弹性贡献矩阵 ΔY_{ij}，并在此基础上汇总得到各部门的流入贡献与流出贡献：

$$\Delta Y_j^{\text{in}} = \sum_i \Delta Y_{ij} \tag{17}$$

$$\Delta Y_j^{\text{out}} = \sum_j \Delta Y_{ij} \tag{18}$$

同理，定义部门 j 的效率流入贡献为所有其他部门 i 流入该部门的效率贡献之和：

$$\Delta E_j^{\text{in}} = \sum_{i=1}^{n} \Delta E_{ij} \tag{19}$$

该指标反映了部门接收的中间投入结构变化对整体网络效率的影响，若 $\Delta E_j^{\text{in}} > 0$，表示该部门流入结构的变动促进了网络效率提升，反之则降低了效率。定义部门 j 的冗余流入贡献 ΔR_j^{in} 为所有其他部门 i 流入该部门的冗余贡献之和：

$$\Delta R_j^{\text{in}} = \sum_{i=1}^{n} \Delta R_{ij} \tag{20}$$

该指标反映了部门 j 的流入结构变化对网络冗余度的影响，若 $\Delta R_j^{\text{in}} > 0$，表示该部门的流入多样化程度提高，增强了网络的抗冲击能力，反之则表示其流入结构趋于集中，可能降低系统的稳定性。

（三）数字经济投入产出网络演化机制模型

1. 模型构建

选择 TERGM 模型来研究数字经济投入产出网络演化机制，引入网络内生结构变量、时间效应变量、个体属性变量和网络外生协变量（表 2）来构建模型如式（21）所示。

$$P(Y_t = y_t \mid Y_{t-1} = y_{t-1}, Y_{t-2} = y_{t-2}, \cdots, Y_1 = y_1; \theta) = \frac{\exp[\theta^{\mathrm{T}} g(y_t, y_{t-1}, X_t)]}{k(\theta, y_{t-1}, X_t)} \tag{21}$$

其中：Y_t 为第 t 期的产业关联网络；θ 为待估参数向量；$g(\cdot)$ 为网络统计量向量；X_t 为外生协变量矩阵；$k(\cdot)$ 为标准化常数。

2. 变量测度

（1）被解释变量。基于全国投入产出表，构建行业间投入产出网络作为被解释变量，以刻画产业关联的整体拓扑结构与演化特征。

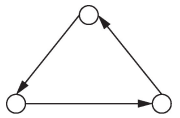
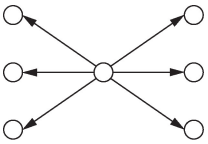
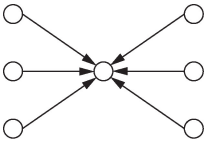
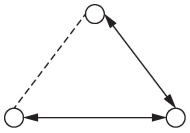
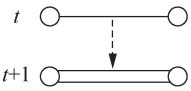
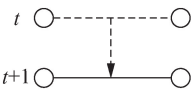
（2）网络内生结构变量。网络内生结构变量用于刻画投入产出网络的固有拓扑特征，包括反映网络密度的边数、双向关联的互惠性、局部三角关联的传递闭合性、核心-边缘结构的几何加权出度、入度，以及间接关联的几何加权边共享伙伴共 6 个变量，用于捕捉网络拓扑对产业关联形成与演化的内生驱动作用。

（3）时间效应变量。考虑到投入产出表的时间趋势特征，选取时间趋势和滞后效应两个指标来研究产业网络的时间依赖性。

（4）个体属性变量。产业网络中，节点的属性对网络形成与演化有重要影响。选取稳定性、变异性、数字技术水平和产业数字化水平 4 个变量来研究其对产业网络的影响。

（5）网络外生协变量。在前述研究中，测度了产业网络的韧性，节点在效率-冗余维度上的结构性特征，也是影响其在网络中连接行为与演化潜力的重要属性。因此，将效率流入贡献、效率流出贡献、冗余流入贡献、冗余流出贡献作为网络外生协变量来考察其对产业关联形成的外生调节作用。

表 2　变量及含义

变量类型	变量名称	变量示意图	变量说明
网络内生结构变量	边数		网络中存在的关系总数，反映网络整体密度
	互惠性		双向投入产出关系的形成倾向，体现行业间相互依赖程度
	传递闭合性		三元闭合结构的形成倾向，反映间接联系转化为直接联系的可能性
	几何加权出度		行业作为供给方的影响力分布，反映供给集中程度
	几何加权入度		行业作为需求方的依赖程度分布，反映需求集中程度
	几何加权边共享伙伴		衡量两个行业通过共享的中间行业形成连接的倾向
时间效应变量	时间趋势		反映投入产出网络中行业关联密度随时间的系统性变化趋势，用于捕捉长期因素对行业间投入产出连接概率的持续影响
	滞后效应		反映投入产出关系的路径依赖特征，即前期存在的行业间投入产出连接在当期更易延续的黏性效应，用于刻画行业关联的稳定性与惯性
个体属性变量	稳定性		衡量单个行业投入结构的固定程度
	变异性		衡量单个行业产业关联的集中程度
	数字产业化供给水平		行业作为数字技术供给方对其他行业的供给能力
	产业数字化供给水平		行业向其他行业提供产业数字化服务的能力
	数字产业化接收水平		行业接收数字技术的程度
	产业数字化接收水平		行业接受产业数字化改造的程度
网络外生协变量	效率流入贡献		节点因其效率流入特征而倾向于形成入边的概率
	效率流出贡献		节点因其效率流出特征而倾向于形成出边的概率
	冗余流入贡献		节点因其冗余流入特征而倾向于形成入边的概率
	冗余流出贡献		节点因其冗余流出特征而倾向于形成入边的概率

注：单期网络内，实线为观测到的行业投入产出实际有向连接，虚线为受网络结构效应驱动、具有形成概率的潜在连接；跨期动态部分，横向实线为对应时期已连接，横向虚线为前期留存历史连接，纵向虚线为跨期的趋势或滞后传导作用。

三、研究结果

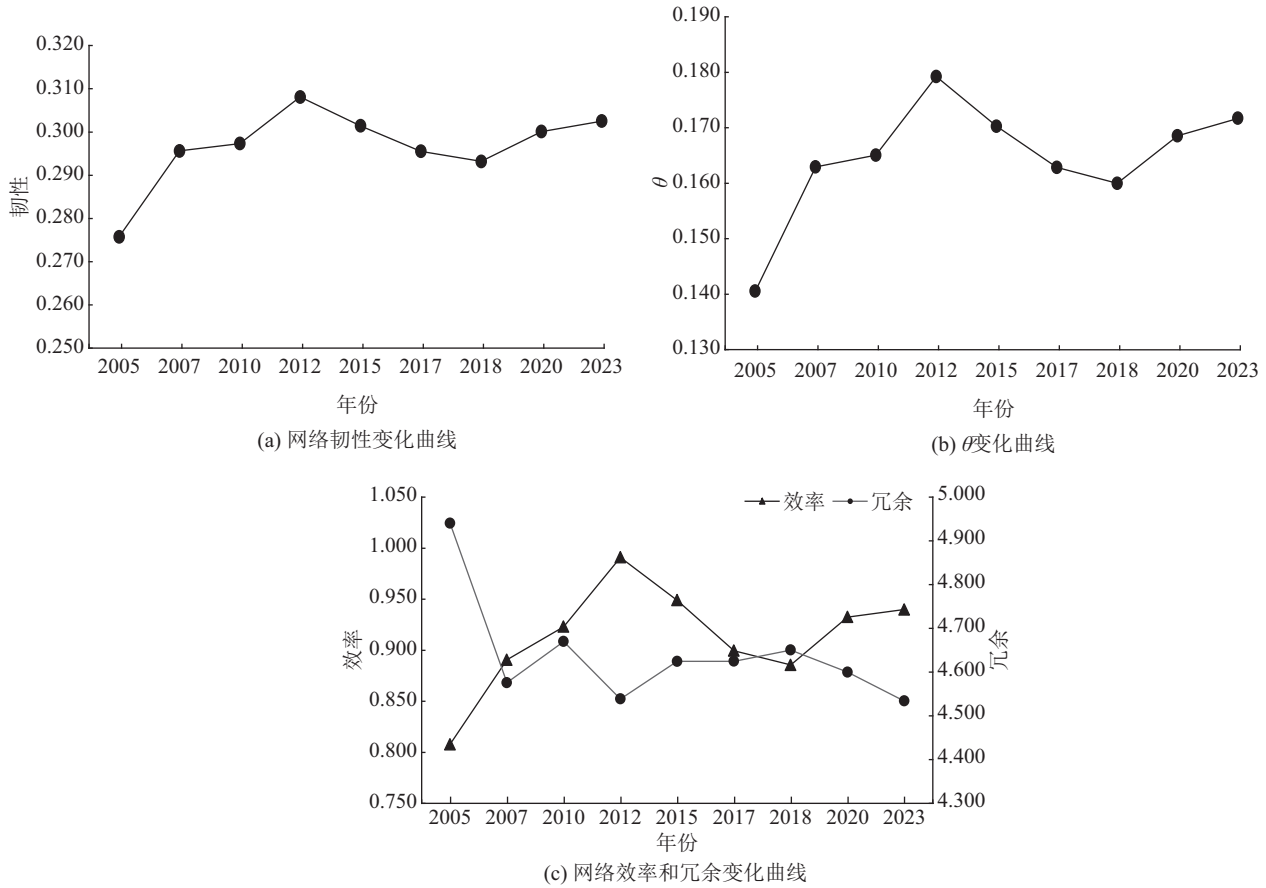
（一）韧性测度与贡献因素分析

1. 网络韧性的变化

基于效率-冗余框架测度 2005—2023 年中国产业网络韧性，发现研究期内中国产业网络始终处于过度冗余状态（$\theta<1/e$）。这意味着系统整体具备较强的抗干扰基础，与中国产业体系完整、产能备份能力较强的特征一致，但亦存在效率提升空间。从图 1（a）可以看出，在 2005—2012 年网络韧性提升，在 2012—2018 年网络韧性下降，在 2020—2023 年网络韧性提升，整体趋势呈现波动上升的趋势，网络系统整体的抗干扰与恢复能力在研究期内得到了增强。

2012—2018 年网络韧性大幅下降，从其节点间变化对于网络韧性的影响中发现，网络韧性下降主要是由于产业数字化、化学工业、建筑业、租赁和商务服务业，以及纺织业等关键行业的影响，对网络的效率和冗

余平衡造成了冲击。其中,产业数字化行业对网络韧性产生了最大的负向净贡献,在此期间该行业的投入产出结构或其与其他行业的关联模式发生了剧烈调整,通过资源再配置或供应链重构,显著降低了整个产业网络的稳健性与抗干扰能力。这表明,产业数字化在提升长期效率的同时,短期内可能因标准不兼容、供应链替代摩擦等产生阶段性不稳定,需要把渐进式替代和保留关键冗余作为关键举措,避免因过快解构传统网络而引致系统性风险。



(a) 网络韧性变化曲线

(b) θ变化曲线

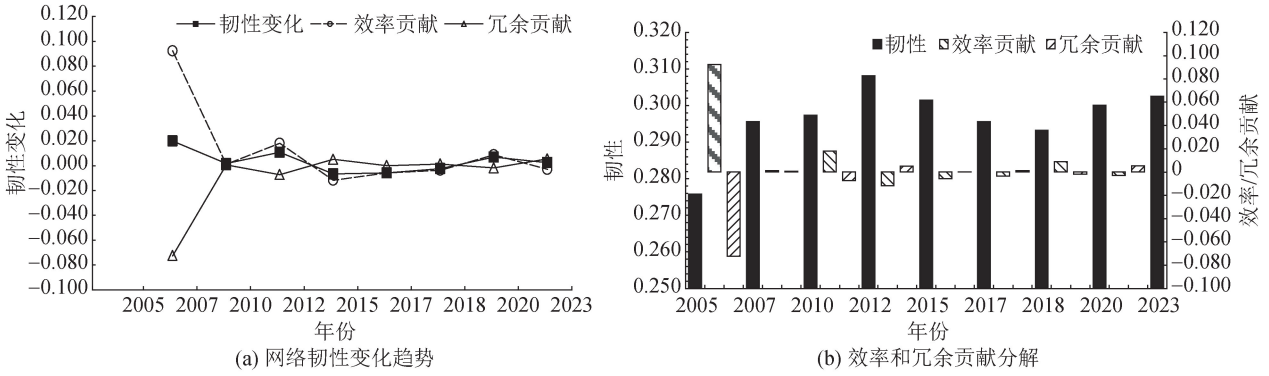
(c) 网络效率和冗余变化曲线

图 1 产业网络韧性、效率、冗余和 θ 变化曲线

2. 效率和冗余度变化对网络韧性的影响

进一步分析效率与冗余变化对网络韧性的贡献,发现二者主导角色在研究期内发生了显著转换。从图 2 可以看出,在 2005—2012 年,效率变化是驱动网络韧性提升的主导力量,其对韧性正向变化的贡献率占据绝对优势;在 2012—2018 年,效率贡献持续为负,成为韧性下降的主要原因;在 2020—2023 年,冗余变化由负转正,成为韧性回升的主导动力。这一转换与前文中识别的韧性演化阶段高度对应,即在韧性持续提升的 2005—2012 年,效率贡献累计达 0.111,而冗余贡献累计为-0.078,表明该时期资源配置效率的优化有效增强了系统稳健性;在韧性大幅下降的 2012—2018 年,效率贡献持续为负(累计-0.022),成为韧性下降的关键因素;在韧性回升的 2020—2023 年,冗余贡献由 2018—2020 年的-0.002 转为 0.005,主导韧性提升。

效率与冗余主导角色的阶段转换,揭示了不同宏观环境下韧性来源的差异。繁荣扩张期,效率改善是韧性提升的主要动力,但这一过程持续消耗冗余空间,使安全边际收窄。进入增长转型与下行期后,效率贡献由正转负,而此前被压缩的冗余未能及时恢复,系统容易同时面临效率下滑与冗余不足的双重压力。2020—2023 年,冗余贡献转正并主导了韧性回升,表明在遭遇重大外部冲击后,适度接受效率损失、主动构筑冗余,能够实质性增强系统的恢复能力。由此可见,韧性治理不宜线性追求效率最优,而应为冗余设定底线,并根据周期变化在效率与安全之间进行逆向动态调整。

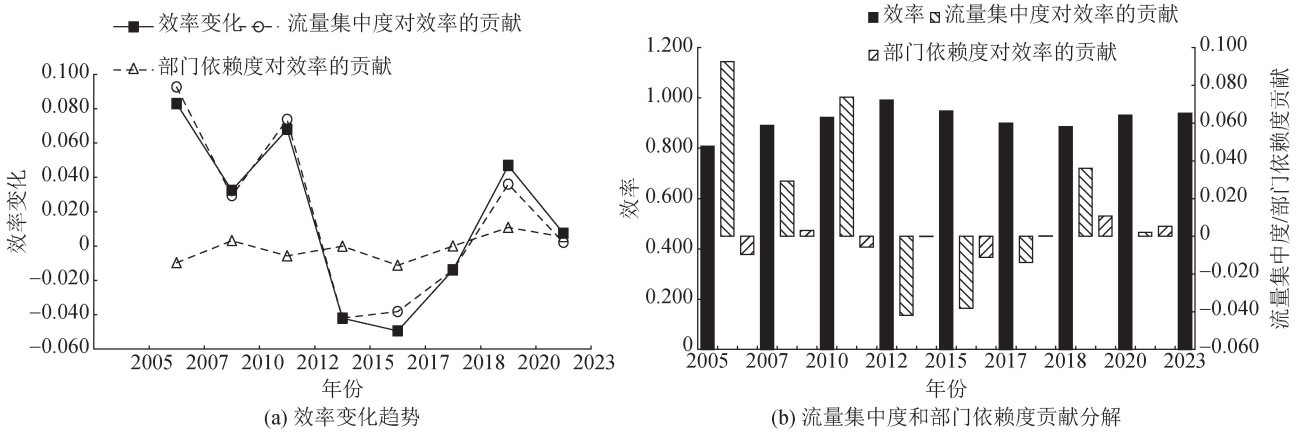


(a) 网络韧性变化趋势　(b) 效率和冗余贡献分解

图 2　效率和冗余度变化对网络韧性变化的贡献

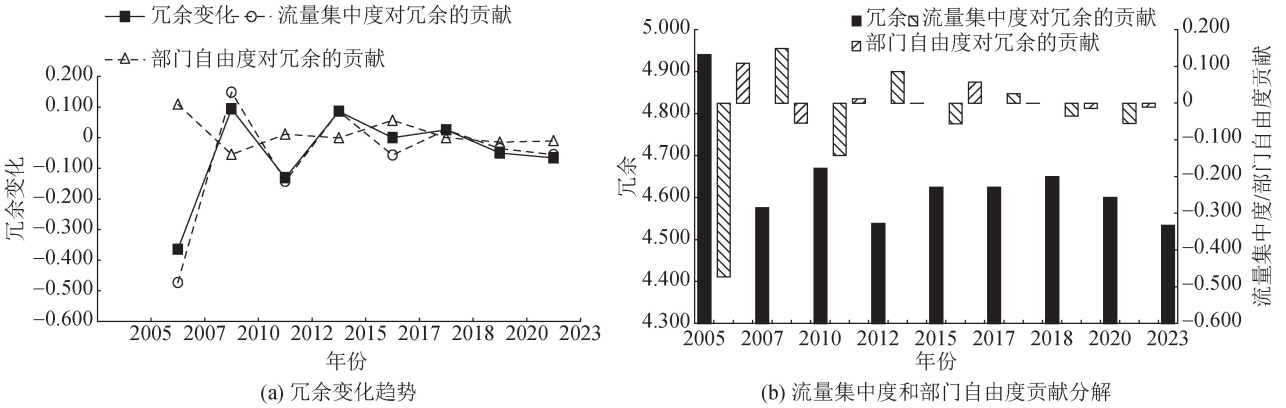
3. 节点集中程度和节点相关性对于弹性、效率、冗余相对贡献

从图 3~图 5 可以看出，2005—2023 年，节点间流量集中程度基本主导了产业网络效率、冗余度和韧性的变化。在效率变化维度（图 3），除 2020—2023 年阶段外，其余各个时间段内流量集中程度对效率变化的贡献率在 76%~110%，而部门依赖度的贡献率绝对值最大值仅为 23.1%；仅在 2020—2023 年阶段，部门依赖度对效率变化的贡献率为 72.2%，阶段性主导了该时期的效率波动。进一步观察冗余度的变化规律（图 4），节点间流量集中程度贡献率除 2015—2017 年外，其余时间段内流量集中程度对韧性变化的贡献率在 70%~158%，而部门自由度的贡献则相对微弱且波动平缓，仅在少数时段呈现小幅正向贡献。聚焦产业网络韧性的波动特征（图 5），除 2007—2010 年外，其余时间段内流量集中程度对韧性变化的贡献率在 54%~119%，是驱动韧性波动的核心因素。相比之下，节点互依性的贡献仅在 2007—2010 年贡献率为 99%，其余时段



(a) 效率变化趋势　(b) 流量集中度和部门依赖度贡献分解

图 3　流量集中度和部门依赖度变化对网络效率变化贡献



(a) 冗余变化趋势　(b) 流量集中度和部门自由度贡献分解

图 4　流量集中度和部门自由度变化对网络冗余度变化贡献

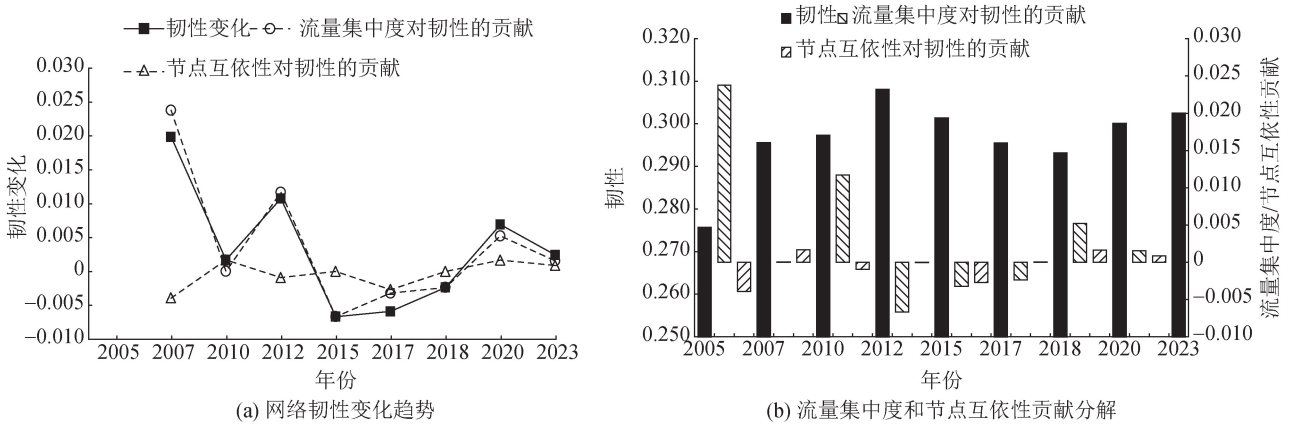


图 5　流量集中度和节点互依性对网络韧性变化贡献

则幅度较小且稳定性不足。

流量集中度在绝大多数时段主导了效率、冗余和韧性的变化,反映出中国产业网络的高度枢纽化特征。这种结构固然通过规模效应带来了效率优势,但同时也形成了风险级联的关键通道。在金融危机期间,节点互依性一度取代流量集中度,成为韧性变化的主导因素;新冠肺炎疫情期间,部门依赖度则阶段性地主导了效率变化。这一对比表明,极端冲击会改变风险在网络中的传导机制,使其从通常的流量集中路径转向相互锁定路径。基于上述差异,产业网络韧性建设可以考虑在平稳期推动多中心、分散化的产业关联以降低集中性风险,在冲击期则需快速识别并保障强依赖节点的运转,阻断级联效应的扩散的区分不同情景的针对性策略。

4. 关键节点

本文识别了 2005—2023 年 8 个连续时期内各节点对产业网络韧性变化贡献排序①。

从演化阶段来看,数字经济部门的影响力呈现出阶段性转移的特征。在 2005—2012 年,数字产业化部门表现突出,尤其在 2007—2010 年国际金融危机后的复苏期位列节点贡献榜首,反映了信息通信技术等基础数字产业作为新兴增长动力的关键作用。然而,进入 2012 年后的阶段,产业数字化部门实现了提升与主导,在 2012—2015 年、2015—2017 年及 2017—2020 年 3 个连续时期均稳居节点贡献首位。这表明传统产业通过数字化改造实现效率提升与模式创新成为驱动经济系统稳健性的核心力量。同时,产业数字化部门连续稳居首位,也是 2012—2018 年韧性下降的最大负向贡献者,证实了深度数字化存在效率与稳定性的权衡,需在推进节奏上同步加强冗余兼容设计。此外,在 2020—2023 年数字产业化部门的重要性再次凸显,位列第二,这可能与远程办公、在线服务等底层数字技术需求的爆发性增长直接相关。

与此同时,传统关键部门构成了产业网络韧性的稳定基石。电力、热力的生产和供应业作为能源保障的核心,整个研究周期均位居高位,并在 2020—2023 年新冠肺炎疫情冲击与恢复时段跃升至贡献首位,凸显了基础能源供应在极端压力下所呈现出的稳定器作用。化学工业与金属冶炼及压延加工业等重化工业部门在多个时期位列前茅,尤其在 2010—2012 年大规模投资刺激时期,后者贡献度达到顶峰,体现了其与宏观经济周期及投资拉动的紧密关联。服务业部门中,租赁和商务服务业的排名持续上升,金融保险业在新冠肺炎疫情后期出现在节点贡献前排,共同揭示了现代服务业在经济韧性网络中日益增强的节点价值。

(二)数字经济投入产出网络演化机制

1. 实证结果

对 2005—2023 年数字经济产业网络进行 TERGM 模型的拟合(表 3)。其中模型 1 为基准模型,模型 2~模型 4 则逐项增加数字技术水平、产业数字化水平、效率和冗余指标,模型 4 为包含所有变量的综合模型。

网络内生结构变量在各模型中表现稳定,充分反映投入产出网络的固有拓扑属性。边变量系数在基准模型中显著为负(−4.74),且置信区间不包含 0,表明投入产出网络整体呈稀疏性特征,多数行业间无直接投入产

① 相关数据留存备索。

表 3　数字经济产业网络的 TERGM 模型实证结果

变量	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4
边数	−4.74* [−8.54,−2.72]	−2.49 [−7.45,0.84]	0.31 [−5.54,3.37]	1.42 [−4.35,4.88]
互惠性	−1.05* [−1.40,−0.48]	−0.98* [−1.31,−0.44]	−0.82* [−1.21,−0.36]	−0.81* [−1.22,−0.39]
几何加权入度	0.22 [−0.36,0.84]	0.33 [−0.26,0.95]	0.38 [−0.20,1.01]	0.47 [−0.05,1.02]
几何加权出度	−1.64* [−2.21,−0.92]	−1.46* [−2.03,−0.83]	−1.37* [−1.97,−0.73]	−1.46* [−2.59,−0.71]
传递闭合性	0.20* [0.13,0.23]	0.21* [0.15,0.26]	0.23* [0.16,0.27]	0.23* [0.16,0.26]
几何加权边共享伙伴	0.04 [−0.27,0.34]	0.04 [−0.27,0.35]	0.04 [−0.25,0.34]	0.07 [−0.24,0.39]
时间趋势	−0.19 [−0.39,0.03]	−0.20 [−0.44,0.00]	−0.16 [−0.39,0.05]	−0.18 [−0.45,0.01]
滞后效应	5.30* [4.50,6.54]	5.31* [4.59,6.60]	5.32* [4.58,6.54]	5.58* [4.87,6.94]
稳定性	2.42* [0.71,5.39]	1.62 [−0.52,4.85]	0.80 [−0.92,4.62]	0.38 [−1.58,3.39]
变异性	0.32 [−1.87,3.29]	−0.32 [−2.79,3.15]	−0.45 [−3.49,2.76]	−0.74 [−3.74,1.62]
数字产业化供给水平		−0.02 [−0.04,0.01]	0.03 [−0.02,0.06]	0.04 [−0.02,0.07]
数字产业化接收水平		−0.11* [−0.21,−0.02]	−0.13* [−0.22,−0.03]	−0.15* [−0.27,−0.04]
产业数字化供给水平			−0.15* [−0.19,−0.02]	−0.16* [−0.19,−0.00]
产业数字化接收水平			−0.05 [−0.12,0.03]	−0.08 [−0.21,0.02]
效率流入贡献				−4.12 [−33.25,33.71]
效率流出贡献				−5.30 [−20.46,16.02]
冗余流入贡献				9.91* [4.26,16.54]
冗余流出贡献				−0.00 [−6.05,5.22]

注：* 表示 0 不在置信区间；括号中的数字表示在置信水平 95%的置信区间。

出关联。这与现实中投入产出表的核心行业主导、边缘行业关联稀疏的特征一致。随着后续变量的加入，边系数逐渐趋近于 0 且不再显著，说明数字经济与网络韧性等因素对网络密度的调节作用弱化了固有稀疏性。互惠性变量系数在所有模型中均显著为负（−1.05～−0.81），表明投入产出网络的双向关联倾向较弱，行业间投入产出关系多呈现单向流动特征。这符合产业分工中上游供给、下游需求的单向传导逻辑。几何加权出度系数持续显著为负（−1.64～−1.46），说明出度较高的核心行业进一步拓展产出关联的边际效应递减，其产出方向更倾向于固定下游行业，体现了核心行业的产出结构刚性。传递闭合性变量系数始终显著为正（0.20～0.23），且系数逐步小幅上升，表明投入产出网络存在显著的传递闭合性特征，反映了产业间接关联带动直接关联的聚类效应。而几何加权边共享伙伴系数始终不显著且接近 0，说明在控制三角闭合性后，通过共享中间行业形成关联的间接效应较弱，投入产出关联更依赖直接的供需匹配。

时间效应变量中，滞后效应系数在所有模型中均显著为正且数值稳定（5.30～5.58），表明投入产出网络具有极强的路径依赖特征，前期存在的行业间投入产出关联在当期延续的概率极高。这源于产业投入产出关系

的长期性与稳定性,行业间的供需合作一旦形成,会因沉没成本、合作惯性等因素保持黏性,验证了投入产出网络演化的惯性定律。时间趋势系数始终为负(-0.20~-0.16)但未通过显著性检验,说明投入产出网络密度随时间的整体变化趋势不明显,即未呈现持续趋紧或趋松的特征。这可能是因为数字化转型、产业政策等长期因素的影响被网络惯性与行业属性效应抵消,使得网络整体关联密度保持相对稳定。

在个体属性变量中,稳定性与变异性作为行业固有属性,对投入产出网络的影响呈现逐步弱化趋势。在基准模型中,稳定性系数显著为正(2.42),表明投入结构越稳定的行业,越容易与其他行业形成固定投入产出关联,其关联关系的可持续性更强,但随着数字经济与外生协变量的加入,该系数逐渐下降且不再显著。这说明数字化转型打破了部分行业的投入结构刚性,弱化了稳定性对关联形成的驱动作用。变异性系数在所有模型中均不显著,且系数符号波动,表明行业投入产出的集中程度对关联形成的影响有限,无论是投入集中于少数行业的专业化行业,还是投入分散的多元化行业,其与其他行业形成关联的概率无显著差异。这与投入产出网络的供需适配优先于集中度的核心逻辑一致。数字产业化与产业数字化对投入产出网络的影响存在显著异质性,且作用方向相对稳定。数字产业化层面,数字产业化接收水平系数始终显著为负(-0.11~-0.15),表明接收方数字产业化水平越高,越倾向于减少传统投入产出关联,可能是因为数字化转型降低了对传统中间投入的依赖,优化了投入结构;而数字产业化供给水平系数始终不显著,说明发送方的数字产业化水平对产出关联的拓展无明显驱动作用。产业数字化层面,产业数字化供给水平系数显著为负(-0.15~-0.16),表明发送方产业数字化程度越高,其产出关联的拓展意愿越弱,可能是因为产业数字化提升了生产效率,使得现有产出渠道足以满足需求,无需新增关联;产业数字化接收水平系数始终不显著,说明接收方产业数字化投入关联的影响不明显,数字化转型的投入优化效应主要体现在接收方对传统关联的替代,而非新增关联的筛选。

模型 4 加入的网络外生协变量的影响呈现分化特征。冗余流入贡献系数显著为正(9.91),表明在投入产出结构中,上游供应来源呈现多元化特征的行业,更容易与其他行业建立并维持投入产出关联。而效率流入贡献、效率流出贡献与冗余流出贡献系数均不显著,且置信区间跨度较大,表明单纯追求投入或产出端的集中高效配置,或仅在产出端保持多元化的销售路径,对于促进产业关联形成的作用并不明显。这意味着,在投入产出网络中,关联形成的驱动因素更侧重于需求侧的结构冗余性,而非供给侧的配置特征。以上表明,在中国产业关联的动态演化中,行业层面上游供应结构的多元化程度是提升其网络连接活跃度的重要外生因素。也就是说冗余性对网络连接具有促进作用,这与生态学理论一致,适度的冗余能够增强系统的稳健性和连接可能性。

2. 稳健性检验

为进一步验证模型结果的稳定性,通过以下方法重新进行 TERGM 模型的估计(表 4):①构建 2 阶和 3 阶滞后网络,实证结果对应模型 5 和模型 6;②将模型仿真次数从 500 次调整为 1000 次,实证结果对应模型 7;③将投入产出表各行均值的 60%、80%、120%为阈值构建新的网络,实证结果对应模型 8~模型 10。结合模型 5~模型 10 的拟合结果来看,本文结论具有较好的稳健性。

表 4　稳健性检验

变量	模型 5	模型 6	模型 7	模型 8	模型 9	模型 10
边数	-0.58 [-4.66,2.90]	0.25 [-4.46,2.99]	1.42 [-3.59,4.95]	3.16 [-2.17,4.96]	2.68 [-1.76,5.52]	1.08 [-4.32,2.65]
互惠性	-0.73* [-1.08,-0.37]	-0.66* [-0.95,-0.39]	-0.81* [-1.13,-0.47]	-0.56* [-0.87,-0.14]	-0.56* [-0.66,-0.38]	-0.74* [-1.12,-0.26]
几何加权入度	0.39 [-0.24,0.98]	0.44 [-0.21,0.95]	0.46 [-0.06,1.08]	1.02 [-0.06,2.16]	0.32 [-0.34,1.07]	0.45* [0.16,0.70]
几何加权出度	-1.34* [-1.78,-0.57]	-1.23* [-1.63,-0.85]	-1.46* [-2.67,-0.66]	-1.40* [-2.08,-0.61]	-0.61 [-1.83,118.51]	-1.39* [-1.97,-0.72]
传递闭合性	0.22* [0.12,0.28]	0.22* [0.14,0.25]	0.22* [0.15,0.25]	0.17* [0.10,0.20]	0.11* [0.08,0.12]	0.25* [0.14,0.28]
几何加权边共享伙伴	0.00 [-0.15,0.26]	0.06 [-0.19,0.20]	0.11 [-0.21,0.47]	0.09 [-0.07,0.33]	0.14 [-0.08,0.36]	0.07 [-0.01,0.19]

续表

变量	模型 5	模型 6	模型 7	模型 8	模型 9	模型 10
时间趋势	−0.31* [−0.70,−0.02]	−0.38 [−0.93,0.05]	−0.17 [−0.43,0.02]	−0.12 [−0.31,0.11]	−0.15 [−0.39,0.07]	−0.17 [−0.44,0.04]
滞后效应	5.87* [5.21,7.42]	5.91* [5.16,7.82]	5.54* [4.93,7.00]	5.16* [4.52,6.46]	4.66* [3.97,5.97]	5.72* [5.01,7.05]
稳定性	3.01* [0.54,5.07]	3.39 [−0.08,4.59]	0.46 [−1.19,3.34]	0.09 [−1.10,2.64]	−1.14 [−2.95,0.34]	0.40 [−0.64,3.04]
变异性	1.16 [−1.77,3.04]	1.56 [−2.00,2.60]	−0.62 [−3.23,1.34]	−0.91 [−2.76,0.98]	−1.97* [−4.64,−0.73]	−0.59 [−1.98,1.27]
数字产业化供给水平	0.05* [0.01,0.06]	0.03* [0.00,0.04]	0.04 [−0.02,0.07]	0.02 [−0.03,0.05]	0.04 [−0.02,0.06]	0.04 [−0.02,0.08]
数字产业化接收水平	−0.06* [−0.19,−0.01]	−0.06* [−0.14,−0.01]	−0.15* [−0.26,−0.05]	−0.16* [−0.26,−0.07]	−0.12* [−0.21,−0.05]	−0.15* [−0.27,−0.04]
产业数字化供给水平	−0.24* [−0.28,−0.08]	−0.28* [−0.35,−0.07]	−0.17* [−0.19,−0.03]	−0.21* [−0.22,−0.07]	−0.08 [−0.11,0.10]	−0.16 [−0.19,0.03]
产业数字化接收水平	−0.07* [−0.13,−0.01]	−0.09* [−0.16,−0.04]	−0.09 [−0.20,0.01]	−0.13* [−0.18,−0.05]	−0.17* [−0.21,−0.09]	−0.07 [−0.16,0.01]
效率流入贡献	15.30 [−6.63,27.99]	19.42* [6.74,36.26]	−6.83 [−34.46,31.50]	−4.12 [−29.40,30.88]	−15.36 [−36.44,13.68]	−6.05 [−31.31,32.65]
效率流出贡献	5.47 [−16.92,23.68]	11.43 [−21.89,24.43]	−4.02 [−18.55,19.78]	0.65 [−12.40,18.50]	4.83 [−8.04,19.70]	−1.76 [−19.97,20.26]
冗余流入贡献	3.04 [−2.28,8.20]	1.27 [−2.10,6.96]	10.40* [5.30,17.18]	11.40* [6.13,17.87]	11.99* [8.46,16.78]	7.38* [2.53,13.40]
冗余流出贡献	−1.35 [−4.10,2.94]	−1.60 [−3.81,1.93]	−0.54 [−7.24,4.47]	−3.36 [−11.33,1.88]	−2.70 [−9.35,1.83]	2.31 [−3.88,7.16]

注：* 表示 0 不在置信区间，括号中的数字表示在置信水平 95%的置信区间。

3. 拟合优度检验

为验证 TERGM 模型对投入产出网络的拟合质量，参考相关文献[38]，采用拟合优度检验，通过对比模型模拟的网络度分布与实际投入产出网络的度分布，从统计显著性和数值偏差两个维度评估拟合效果，核心指标包括总度、出度、入度的 KS（Kolmogorov-Smirnov）检验 P 值与均方误差（MSE）（表 5），结果表明模型拟合结果较好。

表 5　拟合优度检验结果

模型	总度 P	总度 MSE	出度 P	入度 P
模型 1	0.9999	0.000442	0.9999	1
模型 2	0.9997	0.000469	1	0.9999
模型 3	1	0.00042	0.9999	1
模型 4	0.9999	0.000436	1	1

四、结论与建议

（一）结论

基于 2005—2023 年中国投入产出表的动态分析表明，中国产业网络的韧性总体呈现波动增强的演进特征。研究期内，网络始终处于过度冗余状态（$\theta<1/e$），整体稳健性较高，但韧性水平并非线性提升，而是在 2012—2018 年等阶段出现显著回调。韧性波动主要由网络内部节点间流量集中程度的变化所驱动，其贡献率在多数时段占据主导地位，反映出资源配置集中度的变化是影响系统抗干扰与恢复能力的核心结构性因素。此外，网络韧性受效率与冗余二者协同变化的动态调节，其主导角色在不同时期发生了从效率主导到冗余主导的转换，揭示了经济系统在追求运行效率与维持稳健性之间的持续权衡。传统关键部门，如电力、热力供应及重化工业，构成了韧性网络的稳定基石，其作用贯穿始终，尤其在应对极端外部冲击时显现出不可或缺的稳定器功能。

TERGM 模型揭示了中国产业投入产出网络演化的内在规律与驱动机制。首先，网络演化表现出强烈的路径依赖与结构惯性（滞后效应系数 5.30～5.58），前期存在的关联极大可能得以延续，这奠定了网络结构

稳定的基础。其次,网络固有的稀疏性(基准边系数-4.74)、弱互惠性(互惠性系数-1.05~-0.81)及核心行业产出刚性(几何加权出度系数-1.64~-1.46)等拓扑特征显著抑制了关联的随机形成,而传递闭合性(系数0.20~0.23)则促进了产业集聚与间接关联向直接关联的转化。最后,影响关联形成的关键外生因素呈现出清晰的需求侧导向。研究表明,行业层面上游供应结构的多元化能有效促进新关联的形成,而追求投入或产出端的单一高效配置,其促进作用则不明显。这说明,维持适度多元的供给来源,增强需求侧的弹性和缓冲能力,是驱动产业网络有机演化、提升其连接活力的重要结构性条件。

本文进一步识别了数字经济在产业网络韧性与演化中的双重角色。在韧性维度,数字经济部门的影响力存在显著的阶段性演进。数字产业化部门在早期及新冠肺炎疫情复苏期作用关键,而产业数字化部门则在经济转型深化期成为驱动网络稳健性的核心节点,体现了数字经济从增长新动能向系统稳定性基石角色的深化。在演化机制维度,数字产业化与产业数字化对关联形成的影响呈现非对称性。数字产业化接收水平系数显著为负(-0.11~-0.15),体现对传统投入关联的优化与替代;产业数字化供给水平系数显著为负(-0.15~-0.16),表明效率提升抑制了新增产出关联的拓展。这说明,数字技术对产业关联的塑造更多体现在对存量关联的优化与替代,而非单纯促进增量关联的拓展,其通过提升资源配置效率与重塑供应链,改变了产业网络的演化逻辑。

(二)建议

基于上述结论,为优化数字经济布局、增强宏观经济抗风险能力,本文提出以下建议:

首先,实施差异化、精准化的数字经济韧性培育策略。实证结果显示,数字产业化与产业数字化在韧性贡献阶段与作用机制上存在显著差异。从节点贡献的演化轨迹看,在2005—2012年数字产业化部门表现突出,尤其在金融危机后复苏期成为关键节点,反映了基础数字基础设施在后危机时期作为新兴增长动力的重要性。而2012年后产业数字化部门实现主导,连续三个时期稳居节点贡献首位,但其在2012—2018年网络韧性下降期间产生了较大的负向净贡献。这一发现提示,产业数字化深入期可能伴生一定的供应链结构性调整风险,即传统产业在数字化改造过程中,通过资源再配置与供应商重构,在提升自身效率的同时,也可能在短期内对整体网络的稳健性形成冲击。数字产业化的正向贡献与产业数字化在持续推进过程中产生的负面影响,共同表明数字经济对网络韧性的作用并非单一方向,这为分类施策提供了实证依据。基于此,政策制定可考虑依据两类数字化模式的不同韧性贡献阶段进行分类引导。在产业数字化加速推进期,可配套建设供应链备份体系,探索建立转型风险缓冲机制。例如,通过设立数字化转型过渡期补贴、推动行业级供应链协同平台建设等方式,缓解单一企业数字化改造对上下游关联的潜在影响。针对化学工业、建筑业等在韧性下降期同样呈现负向贡献的传统部门,亦应纳入产业数字化的配套缓冲设计,引导其数字化改造与供应链冗余建设同步推进。对于数字产业化领域,则可聚焦核心技术攻关与创新生态培育,在芯片、基础软件等关键环节构建自主可控的供给体系,同时完善数字技术扩散机制,促进其与传统产业的深度融合。

其次,将上游供给冗余度纳入产业链供应链安全评估与建设框架。研究的实证分析发现,冗余流入贡献系数显著为正,表明上游供应来源相对多元化的行业,更容易建立并维持投入产出关联,而效率相关变量的影响则不显著。这一结果对传统以效率为导向的产业政策思路提供了一点补充性视角,即在投入产出网络的动态演化中,关联形成的驱动因素或更侧重于需求侧的结构冗余性,而非单纯追求供给侧的高效配置。也就是说,一个行业若拥有相对多元化的供应商组合,即同一类中间品能从多个不同上游行业获取,这种多源供应模式不仅可能增强其应对特定供应链中断的能力,也可作为一种结构性因素,提升其在整体网络中的连接活跃度。根据这一发现,供给多元化不应仅被视为应对外部冲击的被动防护手段,更可作为培育产业网络长期连接活力的一般性策略,适用于各行业的供应链韧性建设。因此,政策实践或可将上游供给冗余度纳入产业链供应链安全的相关评估指标,在关键行业,特别是数字经济核心部门开展供应商多元化程度监测。对于芯片、能源、高端装备等战略领域,可考虑制定关键中间品来源多元化的引导目标,通过进口来源地适度分散、国内替代供应商培育、区域协同备份建设等组合方式,探索构建更具弹性的供应渠道。同时,也需关注过度追求短期效率可能带来的韧性损耗,避免因成本压力迫使企业过度集中采购而影响长期安全。这一导向可进一步推广至一般性产业安全评估,可将供应来源多元化程度作为与效率指标并行的常态化监测维度。

最后，在推动数字化转型中兼顾关联优化与生态培育。实证分析显示，数字产业化与产业数字化对关联形成的影响呈现出一定的非对称性，主要表现为对存量关联的优化与替代。数字产业化接收水平系数为负，表明接收方数字化水平越高，或倾向于减少传统中间投入关联；产业数字化供给水平系数同样为负，说明发送方产业数字化程度越高，其拓展新增产出关联的意愿可能相对减弱。这一双向替代效应提示，数字化转型在提升节点效率的同时，可能使部分传统供应链关系趋于简化或发生重组。因此，数字化政策不仅要关注单点效率提升，还需同步考虑网络层面如何重建和拓展产业关联。基于此，政策制定在鼓励企业应用数字技术的同时，或可进一步关注基于数字技术的新型产业生态与协同网络建设。可兼顾存量调整与增量拓展，对已受影响的传统关联予以平滑过渡支持，同时培育由数据驱动的新型协同关系，避免因替代导致网络连接的整体弱化。具体而言，可推动工业互联网平台发展，通过平台促进设备、产线、供应链的互联互通，降低跨行业协同的交易成本；探索数据要素市场化流通机制，在数据确权、定价与交易规则方面开展试点，使数据成为连接不同行业的新型纽带，同时可鼓励平台企业、链主企业牵头构建行业级数字生态，促进中小企业融入数字化协同网络。

参考文献

[1] 中华人民共和国中央人民政府. 深入推进数字中国建设[E/OL]. (2025-11-27)[2026-01-27]. https://www.gov.cn/zhengce/202511/content_7051962.htm.

[2] 王文举，钱新新. 中国产业链韧性测度研究——基于外部冲击风险和效率驱动视角[J]. 数量经济技术经济研究，2025，42(5)：115-135.

[3] 钞小静，廉园梅，元茹静，等. 数字基础设施建设与产业链韧性——基于产业链恢复能力数据的实证分析[J]. 数量经济技术经济研究，2024，41(11)：112-131.

[4] 王亚菲，李明娜. 数字经济投入产出表编制方法与中国实践[J]. 统计研究，2026，43(3)：25-38.

[5] 任雪，秦瑶，周先东，等. 数字经济全口径增加值核算方法研究[J]. 当代经济科学，2026，48(1)：1-16.

[6] ZHOU X，ZHOU D，WANG Q，et al. How information and communication technology drives carbon emissions：A sector-level analysis for China[J]. Energy Economics，2019，81：380-392.

[7] ZHOU X，ZHOU D，ZHAO Z，et al. A framework to analyze carbon impacts of digital economy：The case of China[J]. Sustainable Production and Consumption，2022，31：357-369.

[8] 朱思宇，李永. 双重价值链韧性能否抑制中国国内外系统性风险传染？[J]. 世界经济研究，2025(7)：120-134，137.

[9] 韩梦雨，田贵良，阎晓东. 中国水资源空间转移网络及其结构韧性分析[J]. 人民长江，2024，55(6)：136-142.

[10] ZHANG P，WANG T，YAN J. PageRank centrality and algorithms for weighted，directed networks[J]. Physica A：Statistical Mechanics and Its Applications，2022，586：126438.

[11] 李杰，杨海生，谢婉晴，等. 数字经济核心部门技术进步、新增产业关联与经济效应——基于生产网络的分析框架[J]. 经济研究，2025，60(5)：55-71.

[12] 杨淋杰，程云洁. 中国城市群网络系统的时空演进及韧性评估[J]. 统计与决策，2025，41(17)：35-41.

[13] PICHLER A，PANGALLO M，DEL RIO-CHANONA R M，et al. Forecasting the propagation of pandemic shocks with a dynamic input-output model[J]. Journal of Economic Dynamics and Control，2022，144：104527.

[14] 邱思远，杨冕. 生产网络视角下城市经济循环韧性：测度、路径与影响因素[J]. 经济学动态，2025(12)：111-129.

[15] 赖国书，赵昊，郭晔，等. 产业链视角下的行业韧性测度与网络关联效应——来自行业日度用电量数据的经验证据[J/OL]. 系统工程理论与实践，2026，46(3)：1025-1042.

[16] ZHANG Z，CUI P，HAO J，et al. Analysis of the impact of dynamic economic resilience on post-disaster recovery "secondary shock" and sustainable improvement of system performance[J]. Safety Science，2021，144：105443.

[17] CORNARO A，RIZZINI G. Environmentally extended input-output analysis in complex networks：A multilayer approach[J]. Annals of Operations Research，2024，342(3)：2021-2048.

[18] JIANG Y，LIU H，WANG L. The impacts of digital economy on the industrial chain resilience：The moderating effect from infrastructure improvement and factor market development[J]. Sustainable Futures，2025，10：101242.

[19] ULANOWICZ R E. The dual nature of ecosystem dynamics[J]. Ecological Modelling，2009，220(16)：1886-1892.

[20] KHARRAZI A，YU Y，JACOB A，et al. Redundancy，diversity，and modularity in network resilience：Applications for international trade and implications for public policy[J]. Current Research in Environmental Sustainability，2020，2：100006.

[21] CHATTERJEE A，LAYTON A. Mimicking nature for resilient resource and infrastructure network design[J]. Reliability Engineering & System Safety，2020，204：107142.

[22] KISS T，BRAUN E，SEBESTYEN T. Production network structure，specialization and unemployment：Measuring the structural resilience of

national economies[J]. Structural Change and Economic Dynamics, 2025, 72: 11-28.
[23] 胡梦雅, 衣春波, 吴爱华, 等. 基于 SAOM 模型的集成电路企业创新合作网络动态演化研究: 多维相似性与网络结构的影响[J]. 科学学与科学技术管理, 2025, 46(12): 152-165.
[24] 叶堂林, 王传恕, 严亚雯. 基于随机行动者导向模型的京津冀创新网络演化研究[J]. 工业技术经济, 2025, 44(9): 107-117.
[25] 白云霞, 曹磊, 薛云奎. 巅峰之争: 新兴市场跨国企业如何构建与维持全球价值链高端地位? ——动态网络嵌入视角的纵向案例研究[J/OL]. 南开管理评论, 1-22[2026-06-23]. https://link.cnki.net/urlid/12.1288.F.20250902.0836.002.
[26] 宋琪, 吴宇森. 数字技术创新合作网络的演化特征及影响因素——以中国数字经济核心产业专利为例[J]. 科技管理研究, 2025, 45(18): 150-160.
[27] 李晓, 刘宝琦. 制造业国际贸易网络结构演变: 1995—2018——基于社会网络方法的分析[J]. 国际经贸探索, 2023, 39(12): 4-20.
[28] 彭邦文, 吴家威, 杨晴青, 等. 全球光刻机贸易网络的演化特征与驱动因素研究[J]. 地理科学进展, 2026, 45(1): 44-61.
[29] 李磊, 路优. 国际直接投资收益网络特征与影响因素——基于全球价值链视角[J]. 国际贸易问题, 2026(1): 156-174.
[30] LIU Y, YU Q, LI J. The impact of knowledge attributes and life cycle on the evolution of emerging technology innovation network: A TERGM analysis[J]. Journal of Knowledge Management, 2025, 29(2): 639-662.
[31] YAN J, GUO Y, ZHANG H. The dynamic evolution mechanism of structural dependence characteristics in the global oil trade network[J]. Energy, 2024, 303: 131914.
[32] 李清如, 王冰雪. 全球数字产品贸易依赖网络的演化机制及影响因素研究[J]. 经济问题探索, 2023(10): 151-169.
[33] 王一新, 沈丽珍. 基于 TERGM 的长三角数字技术应用业产业网络演化及影响因素研究[J]. 热带地理, 2025, 45(12): 2252-2264.
[34] 马述忠, 杜特. 全球数字服务贸易壁垒与贸易网络演化[J]. 广东社会科学, 2025(4): 29-43, 284.
[35] 韩君, 高瀛璐. 中国省域数字经济发展的产业关联效应测算[J]. 数量经济技术经济研究, 2022, 39(4): 45-66.
[36] 吕承超, 郭梦瑶, 殷伟远, 等. 中国产业关联网络的结构特征与演化机制[J]. 技术经济, 2025, 44(11): 66-79.
[37] LIANG S, YU Y, KHARRAZI A, et al. Network resilience of phosphorus cycling in China has shifted by natural flows, fertilizer use and dietary transitions between 1600 and 2012[J]. Nature Food, 2020, 1(6): 365-375.
[38] LEIFELD P, CRANMER S J, DESMARAIS B A. Temporal exponential random graph models with btergm: Estimation and bootstrap confidence intervals[J]. Journal of Statistical Software, 2018, 83: 1-36.

Resilience Measurement and Formation Mechanism of China's Digital Economy Input-output Network

Fan Yu[1,2], Wang Miao[1], Song Luona[1], Qi Lin[1]
(1. School of Management Science and Engineering, Beijing Information Science & Technology University, Beijing102206, China;
2. Beijing Key Laboratory of Big Data Decision for Green Development, Beijing 102206, China)

Abstract: Against the backdrop of the deep integration of the digital economy and the real economy, an industrial network incorporating the digital economy sector was constructed based on China's input-output tables from 2005 to 2023. The efficiency-redundancy framework from ecological network analysis was introduced to measure industrial network resilience, and the resilience indicators were embedded into a temporal exponential random graph model to systematically investigate the evolutionary patterns and formation mechanisms of China's digital economy input-output network resilience. The findings reveal the following. Firstly, China's industrial network has remained in a state of excessive redundancy, with resilience exhibiting a fluctuating upward trend. The concentration of inter-node flows serves as the core driver of resilience fluctuations, and the dominant factor influencing resilience shifted from efficiency change to redundancy change around 2020. Secondly, network evolution exhibits significant path dependence and structural rigidity. Transitive closure facilitates the transformation of indirect linkages, and the contribution of redundant inflows is significantly positive, indicating that industries with diversified upstream supply are more likely to establish connections, whereas efficiency-related variables are not significant. Thirdly, the digital economy sector assumes a dual role. In terms of resilience, its influence has evolved from being dominated by digital industrialization (2005—2012) to being led by industrial digitization (2012—2020). In terms of evolutionary mechanisms, the two sub-sectors exhibit asymmetric effects on link formation, primarily manifested in the optimization and substitution of existing linkages. Thus, a novel analytical framework and empirical evidence are provided for understanding the resilience characteristics and evolutionary logic of industrial networks in the digital economy era. Moreover, theoretical insights and decision-making references are offered for balancing efficiency and security and promoting the deep integration of the digital economy and the real economy within the new development paradigm.

Keywords: digital industrialization; industrial digitization; network resilience; TERGM; input-output analysis; evolutionary mechanism