

随机与蓄意攻击下长三角城市知识网络 稳健性特征及其对创新绩效的影响

叶 琴¹, 曾 刚², 蒋海云¹

(1. 上海师范大学环境与地理科学学院, 上海 200234; 2. 华东师范大学中国现代城市研究中心, 上海 200062)

摘要: 新发展格局下, 提升长三角城市知识网络稳健性成为积极应对全球科技合作中“逆全球化”挑战, 推动高质量一体化发展的有效途径。本研究基于2017—2021年长三角41个城市的授权发明专利数据, 以4位数技术类为节点, 以技术组合频率为链接, 构建城市内部知识网络。通过模拟随机与蓄意攻击情景, 计算网络崩溃阈值来评估长三角城市知识网络的稳健性, 并采用面板计量模型探讨其对城市创新绩效的影响。研究发现: ① 长三角城市知识网络对随机攻击的抵御能力明显强于蓄意攻击。② 长三角城市知识网络稳健性整体呈现东高西低的格局, 受新冠疫情影响, 出现先上升后下降态势。蓄意攻击下杭州、上海、南京、宁波知识网络稳健性排名稳居前4位, 池州排名最后。③ 随机与蓄意攻击下长三角整体知识网络稳健性均高于单个城市知识网络稳健性, 提高技术的跨城市、跨部门组合机会可以增强知识网络风险抵御能力。5年间长三角跨部类技术融合比例由41%上升至47%。④ 在控制知识相关多样化和非相关多样化、合作网络中心性后, 回归分析结果表明城市知识网络稳健性与创新绩效呈正相关关系, 且相比于随机攻击, 蓄意攻击下知识网络稳健性能力对创新绩效的影响更大。将网络崩溃阈值替换为网络效能比进行稳健性检验, 回归结果依然显著。最后, 建议集合科技创新力量于核心技术领域, 包括分离技术、电数字数据处理、测试或分析材料、清洁技术、高分子化合物等5个在知识网络中占据核心位置的技术领域, 并加强城市间技术互补以提高长三角城市知识网络稳健性。

关键词: 知识网络; 稳健性; 创新; 随机攻击; 蓄意攻击; 长三角

DOI: 10.11821/dljy020230805

1 引言

当今世界正经历百年未有之大变局, 新一轮科技革命和产业变革带来的激烈竞争前所未有; 而中美贸易摩擦、俄乌冲突、全球经济增速放缓、以及新冠疫情的持续冲击, 使得世界科技合作遭受前所未有的风险, 科技竞争持续深化。2015年, 国务院发布“中国制造2025”计划, 该计划为10个领先部门制定发展路线图。2017年美国商会批判了该计划, 指出“与‘德国工业4.0’计划不同, ‘中国制造2025’旨在通过为中国企业提供优先获得资本的渠道来提升企业的研发能力, 并通过引进国外技术来提高竞争力”^[1]。2018年美国宣布基于《美国贸易法》第301条对中国实施制裁, 特别是遏制对华技术转让, 收紧美国公司与中国高科技公司(尤其是华为)开展业务的限制^[2]。两国争端焦点从

收稿日期: 2023-09-15; 录用日期: 2023-12-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(42130510、41901142、41730642)

作者简介: 叶琴(1989-), 女, 福建泰宁人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事创新网络与区域发展研究。

E-mail: yeqin@shnu.edu.cn

通讯作者: 蒋海云(2001-), 女, 湖南永州人, 硕士研究生, 主要从事专利数据分析与建模、创新网络研究。

E-mail: jianghy-shnu@qq.com

1088-1106 页

贸易相关问题转向技术问题, 贸易战升级为技术战^[3]。中美博弈的同时, 中欧科技合作也面临挑战。中国不仅是欧盟的第二大贸易伙伴, 而且还已成为科技、技术和创新的强大参与者。尽管欧盟和中国一直致力于建立全面战略伙伴关系, 但欧盟委员会发布的《中欧战略展望》(EU-China-A Strategic Outlook) 指出, “中国带来的挑战与机遇的平衡已经发生了变化”^[4], 欧盟将中国视为科技与经济领域的竞争对手^[5]。

最近的文献为科技竞争与合作现象提供了新的见解。创新是知识网络和合作网络的双重嵌入^[6,7]。知识网络由创新实践中的异构知识元素组成; 相比之下, 合作网络由不同的利益相关者构建, 通过各种类型的有效协作努力产生创新成果^[8]。创新依赖于合作网络中组织之间的多种合作和互动, 但创新的前沿水平则取决于不同组织的异构知识元素的组合。在这种情况下, 嵌入合作网络的组织可以通过限制特定知识元素的可用性来干预合作伙伴的创新。例如上述案例, 美国通过限制中美高科技公司之间的贸易与合作, 制约中国的科技发展, 典型的行业领域为半导体芯片。采取限制性的策略来阻止合作伙伴使用重要的知识元素成为一种有效的商业竞争行为, 被比喻为导致知识网络中特定元素“失败”的蓄意(针对性)攻击^[9,10]。有针对性的攻击可能产生重大的破坏性影响, 导致关键知识元素的连接失败而使网络崩溃^[9]。在这种情况下, 知识网络表现出很强的脆弱性, 从而严重影响创新进程。因此, 在外部创新合作风险加强的情况下, 研究城市内部知识网络的稳健性(Robustness)至关重要。

网络稳健性的衡量方法在许多领域都有应用, 但在知识网络中的应用较为缺乏。在生物网络中, 稳健性有助于了解疾病的传播和对疾病的免疫力^[11]; 在通信网络中, 稳健性有助于了解路由器故障时系统的行为^[12]。在城市网络中, 城市地理学者引入“韧性”概念, 在“流空间”理论指导下, 展开了城市网络韧性的评估, 为增强区域城市“稳健性”、制定区域韧性发展规划提供参考借鉴。例如郭卫东等^[13], 魏石梅等^[14], 李博等^[15]、彭翀等^[16]基于信息、交通、经济、旅游等联系数据, 从层级性、匹配性、传输性等维度评价城市网络结构韧性。在企业网络中, 管理学家从企业战略角度, 分析企业的收购、剥离、进入和退出等节点行为改变导致的连接改变和企业间网络结构改变^[9]。在知识网络中, 已有研究衡量单一工业部门的知识网络稳健性, 但相关结论不能推广到其他工业部门, 且未考虑不同攻击方法对知识网络解耦的影响。总体来看, 知识网络拓扑结构如中心性、结构洞、小世界性的演变及创新效应研究备受瞩目^[8,17,18], 但知识网络稳健性作为衡量网络抵御风险能力的重要指标, 其量化研究尚处于初级阶段。

知识网络稳健性是影响区域创新能力的关键变量。已有研究将网络稳健性作为认知区域韧性的重要手段^[16], 侧重于对稳健性指标的测度, 鲜有研究衡量它对区域经济或创新的影响程度。Chandra等^[19]采用蓄意攻击方法, 按中介中心性降序删除节点来测试美国压电能力收集和碳纳米管两个领域的专利引文网络稳健性, 结果表明知识网络的稳健性越强, 知识转移的效率越高, 从而产生更有价值的发明(专利被高频引用)。该研究仅采用一种方法攻击知识网络, 且仅测试了两个行业领域的网络稳健性与技术创新价值的关系。现实世界的网络遭受各种故障或攻击, 代表性的攻击是随机攻击与基于中心性的蓄意攻击。不同的攻击策略会显著影响网络的结构与动态, 需要不同的应对策略^[20]。长三角是中国经济发展最活跃、开放程度最高、创新能力最强的区域之一, 城市内部创新资源丰富, 知识元素密集, 形成了完整和多样的知识网络。为弥补已有研究的不足, 本文基于2017—2021年长三角41个城市授权发明专利数据, 探讨随机攻击与蓄意攻击下长三角41个城市知识网络的稳健性特征及其对创新绩效的影响, 一方面有助于我们了解区域如何维持知识网络的运行以及响应攻击, 另一方面为推动长三角科技创新共同体建设、

长三角一体化高质量发展提供科学依据。

2 文献回顾

2.1 知识网络与知识网络稳健性定义

知识网络是由不同知识要素组成的复杂信息系统^[19]。可以在任何空间尺度上产生的知识网络捕捉了特定地点的知识积累状态,更重要的是捕捉了当地知识库的网络结构(即不同知识领域之间的关系)及其随时间的演变。因此,知识网络提供了观察和分析特定地方知识结构的可能性。此外,它们可以用作衡量工具来调查基于地点的知识及其结构特性对创新的贡献。更进一步,知识网络可用于预测将知识节点引入或者删除时对现有网络产生的影响^[21,22];用于预测产业进入与退出、衡量科技竞争与合作对地方经济效益和创新效益的影响^[23]。这些预测是区域高质量发展战略的核心,旨在促进以创新为基础的经济的发展。本研究中,知识要素被定义为创新特有的技术知识,它们不是独立存在,而是在先前创新的基础上进行知识重组^[17,24]。

知识网络稳健性是指网络遭遇攻击时,维持其特定结构并防止知识网络碎片化的能力^[10],在一定程度上反映了系统对攻击的抵御能力^[25]。需要说明的是,在地理学领域,虽然网络韧性的概念使用广泛,尤其在刻画交通网络^[13]、信息网络^[26]、旅游网络^[27]及生态网络^[28]方面,但网络韧性强调的是网络在面对故障或攻击时,能够保持正常运行并快速恢复的能力。而网络稳健性则强调网络的稳定性和安全性。由于本文不考虑网络在遭受攻击后是否能恢复到原有状态或更新状态,只考虑网络在遭受攻击后能维持的稳定性状态对于城市创新绩效的影响,因此采用复杂网络研究中常用的稳健性概念。

2.2 知识网络稳健性度量

稳健性作为网络越来越重要的特征,可以通过评估网络在遭受攻击时保持连接的能力进行测量^[29]。彭翀等^[16]、郭卫东等^[13]以网络中的节点为模拟攻击对象,测度网络的稳健性。管理学者更关注在蓄意攻击的状态下,知识网络发生的变化^[10,30]。然而在现实社会中,知识网络除了遭受到如商业竞争等的蓄意攻击之外,可能更多的受到随机攻击。Toth等^[31]指出随机攻击导致的网络崩溃指的是某种不符合社会发展的技术淘汰后,导致极度依赖这种技术的行业或公司的衰落,当一个区域的技术网络更能抵御随机攻击时,这更有利于区域创新。因此,单方面的考虑知识网络在某一攻击策略下的稳健性是不全面的,这可能使我们无法全面了解知识网络在区域发展方面发挥的作用,需要综合评估两种攻击策略下区域知识网络的稳健性水平。

在复杂网络理论中,网络稳健性测量方法主要有中断模拟方法^[16]与网络连通性分析^[32],这两种方法都是模拟网络去除节点或边后网络的状态。本研究采用计算机仿真模拟的方法,通过随机攻击和蓄意攻击来模拟知识网络中断情况,以评估知识网络的稳健性^[32]。蓄意攻击是导致特定知识要素失效的行为^[33]。本文根据度分布规律对网络进行蓄意攻击,即按照网络中节点的度由大到小依次消除节点,对知识网络进行压力测试,直至网络严重碎片化^[34]。随机攻击导致的网络崩溃是复杂网络中经常观察到的现象^[35]。随机攻击每次去除的节点都是不可预测的,可能去除的是网络中最重要的节点,也可能去除的是网络中最不重要的节点,可以影响到网络中的任意节点。

2.3 知识网络稳健性与创新绩效关系

创新是通过知识元素的重新组合来实现的,每个知识元素都与核心科学或技术概念相关联,知识元素之间的相互作用创造了新的知识,成为创新的基础^[36]。知识网络可以看

成知识元素互动组成的动态创新系统,因为它捕捉了知识转移和知识组合活动的潜力^[37]。知识网络结构与区域创新关系是学界关注的热点,已有研究分析了知识网络结构的多中心性、小世界性、多样性、规模等对创新绩效的影响。Kim等指出知识网络稳健性是知识网络结构的一种独特属性^[38],其创新效应有待进一步探究。

创新不仅依托于知识网络的完整性与多样性,还取决于知识网络的稳健性^[39,30]。正如Acemoglu等^[40]所指出,一个稳健的创新网络为科技进步这一累积过程提供渠道。一个强大的、稳健的知识结构为知识流动提供了多条冗余途径,以抵抗由于知识元素丢失而造成的网络中断,从而影响创新进程。相反,当网络在遭受攻击崩溃时,网络中的知识要素的连接性变得十分脆弱甚至消失,这不利于区域中依靠异质性知识元素和技术交流的创新主体开展创新活动^[34]。也就是说,稳健性强的网络具有更好的连通性^[41],这意味着不同类型的知识元素之间有更多的连接与互动,确保了知识在网络中能够顺畅流动,从而激发创新。此外,稳健性强的网络能够更好地抵御外部冲击,如市场波动、恶性竞争、技术变革。这种抵抗能力可以让组织和区域更好的应对不确定性和挑战,从而创造更多的创新机会。在面临变革时,稳健性网络也能更快的适应新变化,加速创新周期。综上所述,本文认为稳健性强的知识网络结构具有更好的连通性、抵抗外部冲击能力、快速响应冲击能力,确保了网络中的知识流动,从而促进创新。本文提出假设1:蓄意攻击与随机攻击下城市知识网络稳健性越强越有利于城市创新产出。

知识网络符合无标度网络的优先链接特征^[33]。度高的知识元素在网络中具有前沿性和先进性,因此,其他知识元素倾向于与度高的知识元素建立联系,以产生创造性的新知识组合。反之,度低的知识元素决定了它不太可能与其他知识元素形成富有成效的新知识组合^[8]。蓄意攻击表现为知识网络中重要的节点(度高的节点)故障或失效,可能会迅速破坏现有的知识组合关系^[33],将原始网络分割成许多由低度知识元素组成的子图,从而大大降低了知识网络的连通性,以及创建前沿知识组合的可能性。在一个地区的技术空间中,随着新的技术解决方案的出现,随机攻击表现为技术能力过时或依赖特定技术能力的行业退出。此外,由于技术知识倾向于分布在各种参与者中,随机失败也被认为是严重依赖特定技术能力或者其组合的公司衰落,例如地方最大公司的技术空间重新部署^[31]。相比于蓄意攻击,随机攻击下知识网络的链接和边界具有更充足的时间及时调整,也将保证新知识组合新颖性。本文提出假设2:相比于随机攻击,蓄意攻击下城市知识网络稳健性对城市创新产出的影响更大。

3 研究方法

3.1 数据来源与知识网络构建

本文使用专利数据建立知识网络。从专利之星检索系统(<https://cprs.patentstar.com.cn/>)中收集2017—2021年长三角41个城市已获授权的发明专利,共计得到466 969条。以长三角41个城市为空间分析单元,为每个城市构建城市内部知识网络。网络节点为4位数的国际专利分类号(IPC),链接权重为2个4位数IPC类在同一个城市内部授权专利中共现的频率。专利数据经常被用于技术创新和技术进步有关的研究^[42,43]。每个专利文件都根据其涉及的不同技术领域,用一个或多个国际专利分类号(IPC)进行索引。4位数IPC类(部、大类、小类)作为知识要素的代理,有效地表示了专利的知识特征,被广泛用于检测技术之间的关系^[43]。2017—2021年长三角发明专利共包含608项4位数IPC代码。每个网络都代表本地知识组合的模式,这意味着相同的两类技术之间的联系权重因

地区而异。这一点非常重要,在区域多样化研究中的网络建设也强调区域内部的技术组合,认为技术相关性是区域内部的特征,而不是全球特征^[44]。

利用 Python 程序,使用 networkx 模块中的 Random-Layout 布局构建城市内部知识网络。图 1 可视化出 2017 年和 2021 年直辖市上海及省会城市南京、合肥、杭州的知识网络拓扑结构。节点颜色代表利用特定技术类别的广泛经济部门,而节点大小与该技术类别的总量成正比,节点之间的链接表示两种技术类同时出现在同一专利中的频次,连接线的粗细与技术组合(融合)程度成正比。不同的 IPC 分类号代表不同的技术领域和主题,涵盖了广泛的技术知识。这些技术可以链接到不同领域和行业的技术创新者和知识持有者。创新者可以更容易地发现和访问相关技术领域的知识,促进技术创新和知识转移,这有助于加快区域内的技术进步和创新活动。

通过计算 2017 年与 2021 年上海、南京、杭州与合肥城市知识网络拓扑结构参数发现,4 个城市的小世界系数远远大于 1,具有较强的聚集性。上海、杭州、合肥的小世界系数随着时间的演变降低,而南京有所提升,上海由 4.02 降低为 3.97、杭州由 3.80 降低为 3.53、合肥由 5.32 降低为 4.71、南京由 3.42 提升至 4.72。4 个城市知识网络密度明显增加,上海的网络密度由 0.027 增加到 0.039,南京由 0.035 增加至 0.044,杭州由 0.030 增加至 0.048,合肥由 0.019 增加至 0.030。上海、南京、杭州与合肥的核心技术类型集中在 G 部(物理)、H 部(电学)、B 部(作业与运输)以及 C 部(化学),来自这些部门的知识更容易流入其他部门,与其他类知识组合的潜力大。从图 1 和表 1(见第 1094 页)可以看出,4 个城市的核心技术节点类别相似,2021 年 4 个城市知识网络中度排名前 5 个技术类均包括 G06F(电数字数据处理)、G01N(测试或分析材料)、B01D(分离技术)、B08B(清洁技术),说明这 4 项技术在城市知识网络中的主导地位。区别在于上海在 H01L(半导体器件)、南京在 G08B(信号装置)、杭州在 A61L(医学卫生学)、合肥在 C08L(高分子化合物的组合物)技术领域分别具有比较优势。

3.2 模型设定

3.2.1 核心变量 被解释变量为城市创新绩效。虽然衡量创新绩效的方法有很多种,从创新感知调查到计算引入市场的新产品数量,但正如 Turkina 等所指出专利计数依然是最受欢迎的方法之一^[45],特别是在研究高新技术产业与城市创新绩效时。尽管专利总量并不是代表创新绩效的完美指标,也一直成为辩论的焦点,但由于专利数据易获取,在不同地点随时间推移具有可比性^[46],因此被广泛使用。例如 Di Cataldo 等^[47]、Broekel 等^[46]、Ascani 等^[48]以专利总量衡量城市创新绩效,分别研究了地方体制结构、人口规模、全球-本地知识互动与城市创新绩效的关系。马海涛等^[49]、段德忠等^[50]、叶琴等^[51]以专利总量表征城市或产业创新绩效,分析技术空间、技术网络结构对创新绩效的影响。参考以上研究,本文使用城市发明授权专利总量对长三角 41 个城市的创新绩效进行近似估计。

核心解释变量为知识网络稳健性。根据模拟攻击方式的差异,选择随机攻击与蓄意攻击策略下知识网络稳健性作为自变量。参考 Toth 等^[31]的方法,引入 Ω 代表网络的稳健性, $\Omega \in (0, 1)$, 即不存在一个节点都不移除就崩溃的网络或移除所有节点都不崩溃的网络;引入 λ 代表节点攻击策略,当 $\lambda=0$ 时,意味着网络正处于随机攻击状态,当 $\lambda=1$ 时,意味着网络正处于蓄意攻击状态。由于随机攻击每次去除的节点都不一致,其稳健性也会存在差异,因此本文对随机攻击进行训练,将训练 100 次后的稳健性取平均值作为随机攻击下的最终稳健性。最后,参考 molly-reed 准则,当 $\langle k^2 \rangle / \langle k \rangle$ 比值 ≤ 2 时表示网络崩溃,由此可以确定网络崩溃的阈值 ($\langle k^2 \rangle$ 代表网络的平均平方度, $\langle k \rangle$ 为网络的平均度)。

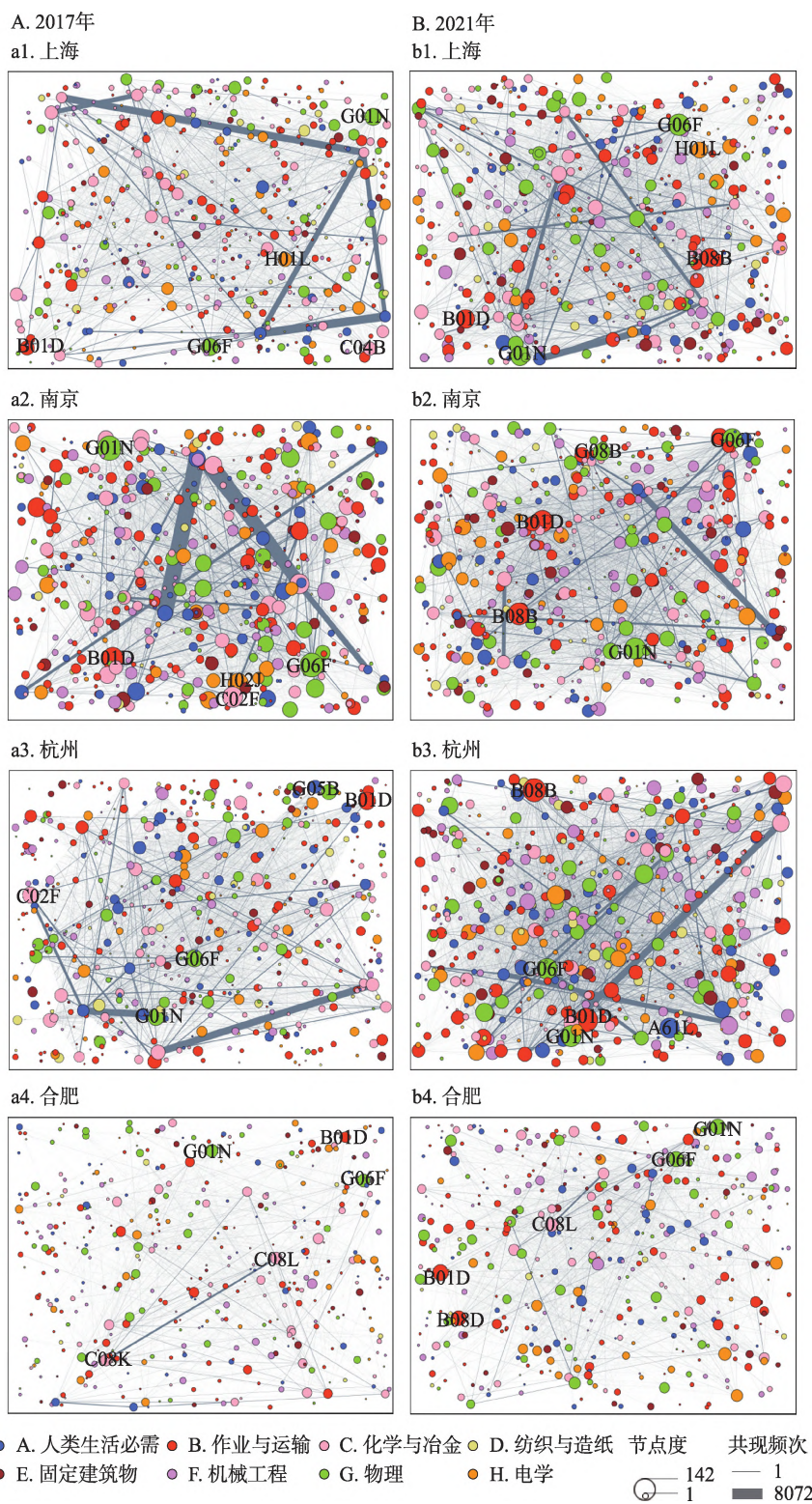


图1 2017年与2021年上海、南京、杭州、合肥城市内部知识网络拓扑结构

Fig. 1 Topological structures of knowledge networks in Shanghai, Nanjing, Hangzhou, and Hefei in 2017 and 2021

3.2.2 控制变量

(1) 知识相关多样化与非相关多样化。知识多样化主要通过地理集中带来的外部性、知识溢出和路径依赖等过程推动区域创新^[52]。但是对于何种水平的多样化更有利于创新还未达成共识。本文拟控制知识相关多样化与非相关多样化,探讨其在促进创新方面发挥的作用。参考 Castaldi 等^[53]的熵分解方法,利用城市内部专利 IPC 分类号的熵值计算知识相关多样化和非相关多样化水平。由于一位数 IPC 技术类之间的相关性较弱,因此以城市内部专利的一位数专利数量占专利总数的占比来衡量知识非相关多样化(UV)。采用3位数与2位数的熵值差值来计算知识相关多样化(RV)。具体公式如下:

$$UV = \sum_{g=1}^G P_{gt} \ln\left(\frac{1}{P_{gt}}\right) \tag{1}$$

式中: P_{gt} 变量表示 t 年城市内部一位数专利 g 的数量占当年专利总数的比例。

$$RV = \sum_{m=1}^M P_{mt} \ln\left(\frac{1}{P_{mt}}\right) - \sum_{n=1}^N P_{nt} \ln\left(\frac{1}{P_{nt}}\right) \tag{2}$$

式中: P_{mt} 变量和 P_{nt} 变量分别表示 t 年城市内部3位数专利 m 的数量占比与2位数专利 n 的数量占比。

(2) 合作网络度中心性。创新所基于的海量知识元素是随着时间的推移而累积起来的,这些知识可能来自于组织或区域的内部与外部。合作网络使企业或区域能够利用其在网络结构中的有利地位从外部合作伙伴那获取信息、知识或技术^[54,55],从而提高城市创新绩效。知识网络为企业或区域内部知识流动和知识搜索提供渠道,并指导知识元素的未来潜在组合或重组。Yao 等^[56]、Guan 等^[17]学者将合作网络与知识网络整合到一个研究框架中,分析两个网络的结构特征对组织创新的影响。

Balland 等指出度中心性最直接的定义了一个城市在合作网络中的重要性^[57]。本文基于合作发明专利数据构建长三角41个城市的全国创新合作网络,并计算各城市的度中心性值来衡量该城市与其他城市之间的合作强度,将度中心性值作为控制变量置于模型中。计算步骤:① 筛选合作发明专利数据:从长三角城市发明专利数据中筛选出包含2个及2个以上申请单位专利,将包含2个以上申请单位的专利拆分为两两单位合作专利。② 地理信息提取与匹配:在企查查与百度地图中匹配申请单位地址,将申请单位地址归并到地级市,筛除两个申请单位地址位于同一城市内的专利。③ 根据合作频数计算度中心性:将一条专利的合作频数看作是1,那么拆分为两两单位合作的专利频数即为一条合作专利所有两两组对数的倒数,最后应用Ucinet软件计算长三角41个城市的国内创新合作网络度中心性值。

表1 2017年与2021年上海、南京、杭州、合肥知识网络度排名前五的技术类

Tab. 1 Top five technology categories in degree rankings of knowledge networks for Shanghai, Nanjing, Hangzhou, and Hefei in 2017 and 2021

	2017年		2021年	
	节点	度	节点	度
上海	G06F	108	G06F	183
	G01N	104	G01N	133
	B01D	74	B01D	125
	H01L	72	B08B	121
	C04B	64	H01L	92
南京	G01N	142	B08B	170
	G06F	133	B01D	169
	B01D	116	G01N	161
	H02J	106	G06F	144
	C02F	101	G08B	106
杭州	B01D	110	B01D	198
	G06F	104	B08B	191
	G01N	101	G01N	159
	C02F	94	G06F	154
	G05B	86	A61L	141
合肥	G06F	59	B01D	91
	G01N	57	G01N	85
	C08L	51	G06F	81
	C08K	50	B08B	79
	B01D	39	C08L	61

(3) 平均聚类系数。聚类系数表示网络节点聚集程度，而平均聚类系数是所有节点聚类系数的平均数。在区域技术能力基础的背景下，更高的聚类水平表明一个更紧密的频繁组合技术的核心，但其从某种程度上会降低网络的连通性与信息传播的能力。从形式上看，平均聚类系数代表一个给定节点的邻居相互连接的程度。公式如下：

$$C' = \frac{1}{n} \sum_i \frac{2L}{k_i(k_i - 1)} \quad (3)$$

式中： C' 代表平均聚类系数； L 指节点 i 邻居的连接数； k_i 代表 i 节点的度； n 代表节点数。

另外，选取各城市人均GDP以及R&D占比作为控制变量^[52]。R&D占比通过计算地方财政科学支出占GDP的占比衡量，数据来源于2017—2021年《中国城市统计年鉴》(<https://www.stats.gov.cn/>)和2022年江苏省统计年鉴(<https://tj.jiangsu.gov.cn/>)、浙江省统计年鉴(<https://tjj.zj.gov.cn/>)、安徽省统计年鉴(<http://tjj.ah.gov.cn/>)和上海市统计年鉴(<https://tjj.sh.gov.cn/>)。人均GDP在很大程度上反映了一个国家或地区的经济发展水平和综合实力。R&D占比体现了地方政府对于创新的支持力度。表2列出模型中各变量的详情。

表2 变量描述与测度

Tab. 2 Variable description and measurement

	变量	测度方法
被解释变量	城市创新绩效 ($INNO$)	城市每年授权发明专利数量
核心解释变量	随机攻击下知识网络稳健性 ($\Omega^{k=0}$)	对知识网络进行随机攻击时网络崩溃的阈值 (随机攻击100次后取稳健性均值)
	蓄意攻击下知识网络稳健性 ($\Omega^{k=1}$)	对知识网络进行蓄意攻击时网络崩溃的阈值
控制变量	知识相关多样化 (UV)	城市内部专利3位数与2位数的熵值差值
	知识非相关多样化 (RV)	城市内部专利的1位数专利数量占专利总数比例
	合作网络度中心性	全国创新合作网络中的度中心性值
	平均聚类系数 (C')	知识网络中特定节点 i 的邻居相互连接的程度
	R&D占比	城市每年地方财政科学支出占GDP的比例
	人均GDP	城市每年人均GDP

3.2.3 模型设定 为减小各个指标之间的异方差性，对所有指标数据取对数处理后，选择面板广义最小二乘法 (GLS) 对数据进行回归，模型如下：

$$INNO_{it} = \alpha + \gamma_1 \Omega_{it}^\lambda + \beta_1 [Z_{it}] + \beta_2 [A_{it}] + e \quad (4)$$

式中：因变量 $INNO_{it}$ 指的是 t 年城市 i 的创新绩效，因变量比自变量滞后一期以解决内生性问题^[58]； Ω_{it}^λ 表示 t 年城市 i 的网络的稳健性， λ 取0或1； $[Z_{it}]$ 是一组描述 t 年一个城市 i 技术能力结构特征的控制变量，具体包括：知识相关多样性、知识非相关多样性、合作网络度中心性、平均聚类系数。 $[A_{it}]$ 是一组 t 年与城市 i 社会经济相关的控制变量，具体包括：人均GDP、R&D占比； e 表示误差项； γ_1 、 β_1 、 β_2 表示模型参数。

3.2.4 稳健性检验 使用网络效能比作为自变量的替换变量进行稳健性检验。网络效能比是一个量化节点间连通性和通信效率的稳健性指标，为网络中任意两个节点间最短路径距离的倒数的平均值。网络效能 E 的计算公式如下：

$$E = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j \in V} \frac{1}{d_{ij}} \quad (5)$$

式中： N 表示节点数； d_{ij} 变量表示节点 i 和 j 间的最短路径长度，若不存在通路，则 $1/d_{ij} = 0$ 。为了便于对比网络攻击前后的效果，需要将网络效能做归一化处理，形成网络效能比

指标 EM , 计算公式如下:

$$EM = E_c / E_i \quad (6)$$

式中: E_i 变量和 E_c 变量分别表示攻击前和攻击后的网络效率, 网络效能比 EM 越大, 则网络稳健性越强。

4 结果分析

4.1 随机与蓄意攻击下长三角城市知识网络稳健性特征

整体来看, 随机攻击下长三角 41 个城市知识网络表现得更稳健, 蓄意攻击下知识网络表现的十分脆弱 (图 2)。也就是说, 在一系列技术能力随机消失, 例如企业退出或者技术的变革之后, 长三角城市的技术结构也不会分裂成互不相关的部分; 但长三角城市非常容易受到对组合程度最高的技术节点干扰的影响。2017—2021 年, 在随机攻击下除池州外所有城市知识网络稳健性值均大于 0.41 (2017 年池州在蓄意攻击下和随机攻击下知识网络稳健性值最低, 分别为 0.02 和 0.28), 而在蓄意攻击下仅 2020 年杭州和南京知识网络稳健性值超过 0.41 (分别为 0.43 和 0.42)。2021 年, 在随机攻击下, 上海、杭州、南京、合肥要移除 90% 以上的节点, 网络才会崩溃, 但是在蓄意攻击下, 分别移除 37%、40%、35%、31% 的节点即到达了崩溃的阈值。

长三角城市对随机与蓄意攻击的抵御能力存在相当大的差异。淮北与池州作为长三角城市知识网络密度最低的两个城市, 与上海、杭州等核心城市相比, 其知识网络结构更加脆弱 (图 3 见第 1098 页)。2017—2021 年, 在网络不崩溃情况下, 随机攻击时淮北和池州分别可以移除 58% 与 66% 的节点, 蓄意攻击时只能容忍移除 13% 与 16% 的节点, 这与城市内部技术能力基础与技术多元化程度相关。从空间规律看, 随机攻击与蓄意攻击下长三角城市知识网络稳健性整体东部高于西部, 具有显著的空间自相关性, 2017—2021 年, 蓄意攻击下全局 Moran's I 均大于 0.26 ($P < 0.003$), 随机攻击下全局 Moran's I 均大于 0.18 ($P < 0.01$)。2017 年蓄意攻击下知识网络稳健性值排名前五的城市是南京 (0.41)、宁波 (0.38)、杭州 (0.37)、上海 (0.35)、台州 (0.27); 2021 年杭州 (0.40)、上海 (0.37)、南京 (0.35)、宁波 (0.34) 排名稳居前 4 位, 南通 (0.33) 跻升至第 5 位, 台州 (0.21) 跌至第 19 位; 2017 年和 2021 年池州均排名最后 (蓄意攻击下知识网络稳健性值 2017 年为 0.02, 2021 年为 0.09)。局部空间自相关性分析发现, 蓄意攻击下, 东部为高高集聚区, 安徽北部和南部等城市为低低集聚区; 随机攻击下, 东部为高高集聚区, 安徽南部为低低集聚区。

从变化趋势看, 受新冠疫情危机的冲击, 2017—2021 年随机和蓄意攻击下长三角城市知识网络稳健性整体呈现先上升再下降的趋势。与 2017 年相比, 2020 年随机和蓄意攻击下仅安徽亳州市知识网络稳健性降低, 其余城市知识网络稳健性不同程度上升, 湖州、安庆、淮北、苏州均提高 10% 以上。但 2021 年, 南京、宁波等核心城市知识网络稳健性下降较快。从图 4 (见第 1098 页) 可以看出, 2017—2021 年, 南京、宁波、台州、阜阳、宿州、亳州、芜湖、马鞍山、淮南等 9 个城市在两种攻击策略下稳健性出现负增长; 上海、杭州、合肥、淮北、安庆等 24 个城市在两种攻击策略下的稳健性上升。

长三角整体知识网络表征不同类型知识在城市群内的组合机会。在两种攻击策略下长三角整体知识网络稳健性均高于单个城市知识网络的稳健性, 表明长三角城市协同创新能够增强城市群的风险抵御能力。2021 年在随机与蓄意攻击下长三角整体知识网络稳健性值为 0.983 与 0.524, 高于排名最高城市杭州的 0.952 与 0.396。根据专利部类统计分

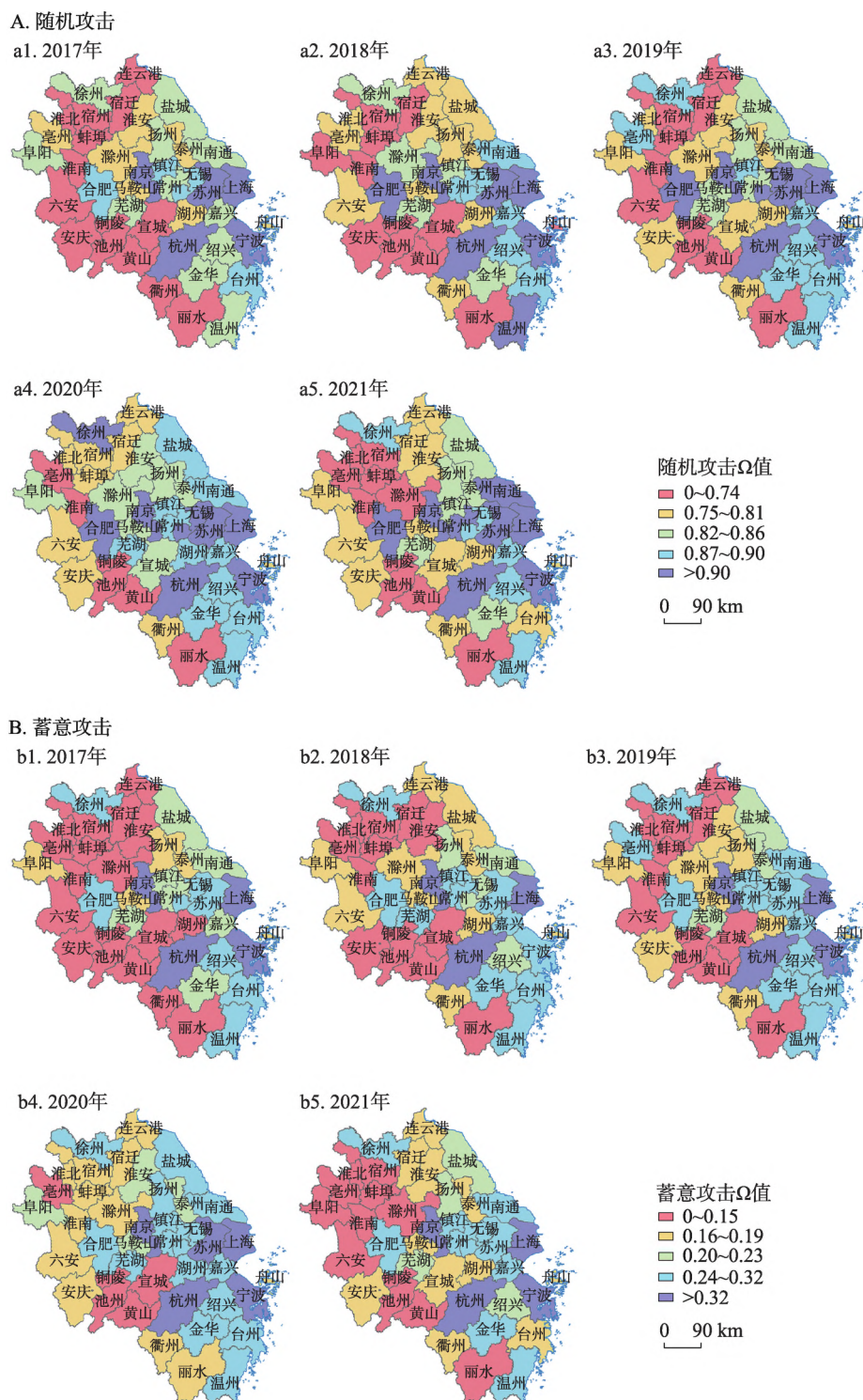


图2 2017—2021年随机与蓄意攻击下长三角城市知识网络稳健性空间分异

Fig. 2 Spatial variation of knowledge network robustness in the Yangtze River Delta under random and targeted attacks from 2017 to 2021

注: 该图基于自然资源部地图技术审查中心标准地图(审图号: GS(2019)1822号)绘制, 底图边界无修改。

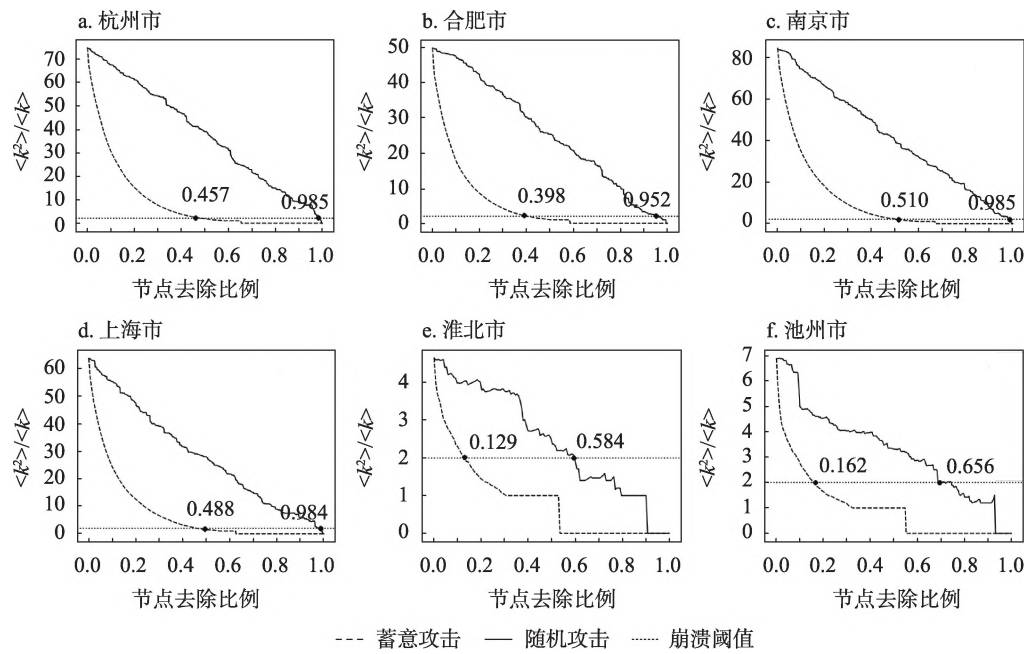


图3 2017—2021年长三角选定城市的随机与蓄意攻击的节点移除曲线

Fig. 3 Node removal curves for random and targeted attacks on selected cities in the Yangtze River Delta from 2017 to 2021

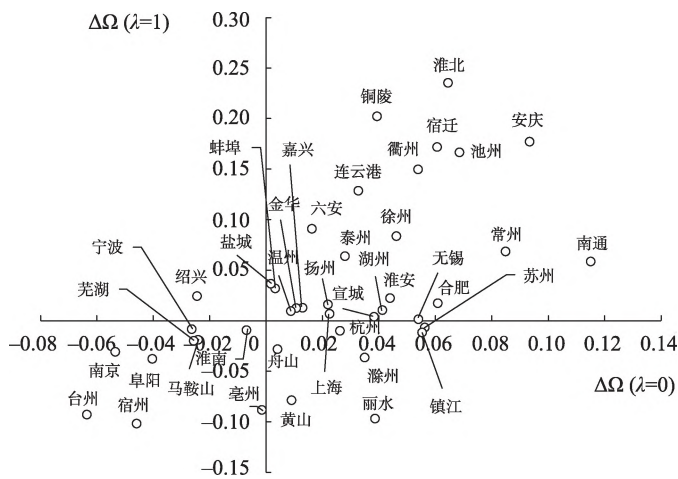


图4 2017—2021年长三角城市知识网络稳健性变化

Fig. 4 Changes in the robustness of knowledge networks in the Yangtze River Delta from 2017 to 2021

析发现，2017年长三角专利技术集中于B部（26%）、C部（15%）、G部（14%）、F部（13%），2021年长三角专利技术依然集中于这4个部类，但比例有所调整，其中B部技术比例上升至28%，G部与F部技术比例上升为15%，C部技术比例下降至12%。2017年长三角整体知识网络度高于200的技术节点仅6个，分别为B01D（分离技术）、G06F（电数字数据处理）、G01N（测试或分析材料）、B08B（清洁技术）、C08L（高分子化合物的组合物）、C02F（水、废水、污水或污泥的处理）；到2021年度高于200的节点增至21个，其中G部最多（物理，8个），其次是B部（作业与运输，6个），排名前10的技术

分别为B01D、B08B、G01N、G06F、F16F（减震装置）、B65G（运输或贮存装置）、F26B（干燥技术）、A61L（医学卫生学）、G01D（测量装置）、G08B（信号装置），这些热门技术对维持长三角知识网络结构的稳健性作用突出。

通过计算知识网络的平均聚类系数和平均路径长度发现，2017—2021年，长三角整体知识网络的平均聚类系数由0.464上升为0.507，平均路径长度由2.216下降至2.208，平均聚类系数上升幅度高于同期城市内部知识网络，表明长三角城市群知识网络演进具有小世界特征，形成显著的集聚效应，跨部类技术融合的比例由2017年的41%提高至2021年47%（部类指IPC专利分类系统的8个部门大类），不同学科之间的知识互动更加高效。

4.2 长三角城市知识网络稳健性的创新产出效应

利用面板广义最小二乘法（GLS）估计知识网络稳健性对城市创新产出的影响，估计结果如表3所示。模型1是仅包含控制变量的基线模型。知识的相关多样化（RV）与创新绩效呈正向关系，这一结果与Castaldi等^[53]和Aarstad等^[59]研究结论一致。平均聚类系数与创新绩效呈显著的负相关关系，表明网络中技术节点过高的“凝聚”会造成群落的“固化”和“孤立”，导致资源信息的冗余和同质，不利于城市创新活动的持续发展。

模型2引入了网络稳健性度量（ Ω ），参数 $\lambda = 1$ ，反映一个区域知识网络在最频繁结合的技术受到攻击时的脆弱程度。该系数为正，表明蓄意攻击下网络稳健性与创新绩效具有显著的正相关关系。当区域对蓄意攻击的抵抗能力差，区域创新主体在现有知识库寻求技术支持的难度增加，技术组合的机会迅速减少，导致创新产出的能力下降。值得注意的是，在模型2中RV变成了不显著，这是因为相关多样化忽视了技术能力基础的相互依存性和地方特性。虽然区域多样化文献中也强调了技术空间中技术的近邻关系，但并不了解类似于此类网络中相关知识的整体特征。我们倾向认为相关多样化仍然在发挥作用，但它通过知识网络的稳健性表达。模型3中加入了参数 $\lambda = 0$ 的稳健性，代表了区域的技术知识网络正在受到随机攻击策略的干扰，该系数也为正，但影响系数小于 $\lambda = 1$ 时，表明本地知识网络结构稳健性是影响区域创新能力的决定性因素，且蓄意攻击时知识网络稳健性能力对创新的影响更大。回归结果验证了假设1和假设2。

遵循Toth等^[31]的研究，本文将解释变量替换为蓄意攻击下的网络效能比（模型4）和随机攻击下的网络效

表3 面板广义最小二乘法回归结果

Tab. 3 GLS regression results

自变量	模型1	模型2	模型3
蓄意攻击($\Omega^{i=1}$)		1.840*** (0.4000)	
随机攻击($\Omega^{i=0}$)			0.638*** (0.1860)
知识非相关多样化	-0.235** (0.0993)	-0.231** (0.0946)	-0.243** (0.0966)
知识相关多样化	0.049 (0.0526)	0.023 (0.0504)	0.051 (0.0512)
平均聚类系数	-2.917*** (0.2960)	-1.876*** (0.3610)	-2.303*** (0.3390)
人均GDP	0.021*** (0.0037)	0.014*** (0.0039)	0.020*** (0.0036)
R&D占比	0.132*** (0.0266)	0.128*** (0.0253)	0.134*** (0.0259)
合作网络度中心性	0.542*** (0.1070)	0.418*** (0.1050)	0.482*** (0.1060)
常数项	4.680*** (0.3650)	3.806*** (0.3960)	3.868*** (0.4270)
观测量	205	205	205
城市数量	41	41	41

注：***、**分别表示在1%、5%的水平下显著；括号内数值为标准误差。

能比（模型5），因变量依然是城市创新绩效，进行GLS回归检验，结果见表4。稳健性检验结果与表3的回归结果方向一致，验证了假设1和假设2。

已有关于经济网络、城市网络、旅游网络结构韧性的研究，从层级性、匹配性、传输性多维指标分析网络韧性演化，加深了对网络结构与网络稳健性关系的理解。其中传输性是以网络的平均路径长度表特征。魏石梅等^[14]、李博等^[15]、郭卫东等^[13]、方叶林等^[27]、Kim等^[38]的研究指出传输性与网络韧性（稳健性）呈负相关。经过Pearson相关系数检验，本文验证了长三角城市知识网络稳健性与传输性呈显著的负相关关系。在随机与蓄意攻击下，网络稳健性与平均路径长度相关系数分别为-0.53（ $P<0.000$ ）、-0.69（ $P<0.000$ ），一定程度上反映了本研究评估结果的准确性。为进一步深化网络稳健性对区域创新影响的实证内容，需要简化稳健性评估指标，遵循Zhao等^[10,30]、Toth等^[31]、彭翀等^[16]的研究，将计算机仿真模拟下得出的知识网络稳健性作为自变量置于回归模型中。

基于实证分析结果，本文绘制了知识网络稳健性对区域创新绩效影响机理示意图5。图5显示，蓄意攻击下，知识网络经历了2次重要节点的删除后崩溃，删除节点的数量依次为：2个节点、1个节点，在删除3个节点后网络崩溃（所有节点至多两条连线）。随机攻击下，知识网络经历了4次随机节点删除后崩溃，删除节点的数量依次为：2个节点、1个节点、2个节点、2个节点，共需要删除7个节点才导致网络崩溃，可见蓄意攻击对网络结构具有更强的破坏性。知识网络稳健性能力对区域创新产出的影响，主要体现在以下三个方面。首先，稳健性强的网络结构具有更好的连通性，它为知识元素之间提供了多条冗余途径，从而有助于促进知识的组合和流动，进而推动创新。第二，强稳健性的网络结构具有更强的风险抵御能力，有助于化解创新的不确定和高风险性，实现从创新需求到创新成果的市场落地^[60]。第三，稳健性强的网络结构还具备敏捷性，能够快速响应外部冲击，及时调整知识网络边界与连接方式，确保知识组合的新颖性。

5 结论与讨论

全球正经历百年未有之大变局，科技创新成为国际战略博弈的主要战场，科技竞争空前激烈。科技创新环境复杂多变，在科技合作中断风险加剧背景下，长三角作为中国创新资源的集聚高地及融入全球创新网络的前沿和窗口，增强区域内部知识网络抵御风险冲击的能力对于中国稳定经济和畅通国内国际双循环具有重要意义。本文通过对

表4 稳健性检验

Tab. 4 Robustness checks

变量	模型4	模型5
蓄意攻击(EM)	0.0717*** (0.0232)	
随机攻击(EM)		0.0715*** (0.0237)
非相关多样化	-0.0091 (0.0772)	-0.0179 (0.0771)
相关多样化	0.1310*** (0.0410)	0.1300*** (0.0411)
平均聚类系数	-3.6160*** (0.2300)	-3.6520*** (0.2300)
R&D 占比	0.0622*** (0.0206)	0.0629*** (0.0207)
人均GDP	0.0129*** (0.0029)	0.0129*** (0.0029)
合作网络度中心性	0.8890*** (0.0831)	0.8860*** (0.0832)
常数项	4.3850*** (0.2870)	4.4560*** (0.2850)
观测量	205	205
城市数量	41	41

注：*** 表示在 1% 的水平下显著；括号内数值为标准误差。

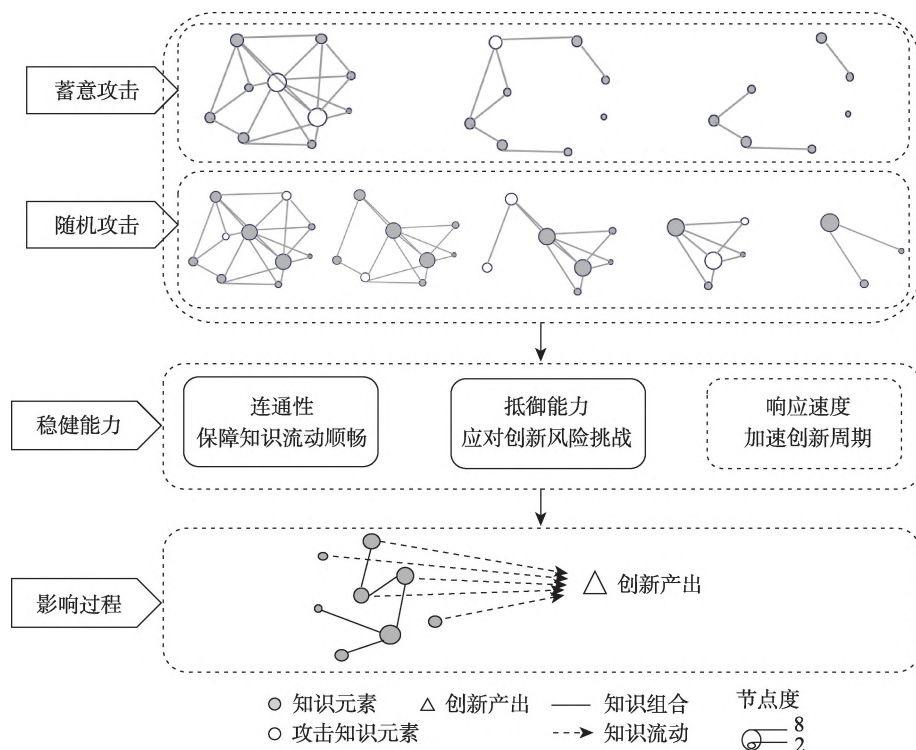


图5 知识网络稳健性对城市创新产出作用机理

Fig. 5 Illustration of the impact of knowledge network robustness on innovative output

2017—2021年长三角41个城市知识网络进行压力测试,分析知识网络稳健性特征及其对区域创新的影响。研究发现:

(1) 长三角城市知识网络对随机攻击的抵御能力明显强于蓄意攻击。在蓄意攻击下长三角城市减轻蓄意攻击对知识网络的消极影响很大程度上取决于对核心技术节点的保护,以及为知识元素提供足够的组合机会。长三角专利核心技术集中于作业与运输、物理、机械工程、化学四大领域,其中细分领域包括分离技术、电数字数据处理、测试或分析材料、清洁技术、高分子化合物的组合物等热门技术在长三角知识网络中的度中心性最高,在专利中广泛应用,在整合知识组合关系、维持网络功能稳健性方面发挥重要作用。

(2) 长三角城市知识网络对随机攻击与蓄意攻击的抵御能力差异显著。2021年,蓄意攻击下长三角知识网络稳健性值排名最高的杭州是排名最低池州的4倍(随机攻击下杭州知识网络稳健性值是池州的2倍)。长三角城市知识网络稳健性整体呈现东高西低的格局,具有显著的空间自相关性,东部为高高集聚区,蓄意攻击下安徽北部和南部为低低集聚区,随机攻击下安徽南部为低低集聚区。受新冠疫情危机的冲击,2017—2021年随机和蓄意攻击下长三角城市知识网络稳健性整体呈现先上升再下降的态势。南京、宁波、台州、阜阳、宿州、亳州、芜湖、马鞍山、淮南等9个城市在两种攻击策略下知识网络稳健性出现负增长;上海、杭州、合肥、淮北、安庆等24个城市在两种攻击策略下知识网络稳健性表现出不同程度上升。

(3) 长三角城市协同创新可以提高知识网络稳健性。在两种攻击策略下长三角整体知识网络稳健性均高于单个城市知识网络稳健性。2021年在随机与蓄意攻击下长三角整

体知识网络稳健性值为 0.983 与 0.524, 高于排名最高城市杭州的 0.952 与 0.396。跨部类技术融合的比例由 2017 年的 41% 提高至 2021 年 47%, 表明提高城市群内技术的跨城市、跨部类组合机会可以增强知识网络风险抵御能力。

(4) 城市知识网络稳健性是影响城市创新能力的关键因素。在控制知识相关多样化与非相关多样化特征后发现, 城市知识网络稳健性与创新绩效呈正相关。从网络角度看, 一个强大的、稳健的知识网络结构提供多条知识溢出渠道, 即使在删除一些知识元素节点之后, 也存在足够的路径使知识从其余的知识元素中流向发明人, 从而促进创新。如果知识网络结构脆弱, 仅删除少数节点即导致发明人难以获得所需的知识, 将不利于知识创造。稳健的知识网络结构还具有更强的冲击抵御能力和更快的冲击响应能力, 有助于化解创新风险和加速创新周期, 促进区域内的知识学习与创新。

本文为知识网络稳健性动态评估、知识网络结构与创新绩效关系研究做出贡献。目前有关知识网络结构稳健性的研究较少, 研究内容侧重于基于交通、经济、旅游、信息等单一网络的静态分析; 关于知识网络结构与绩效关系的研究侧重于整体网络规模、网络密度、集聚系数等对创新绩效的影响分析, 鲜有研究考虑知识网络稳健性的贡献。本研究表明知识网络稳健性作为网络的重要特征, 可能通过影响知识组合机会(连通性)、创新风险抵御力、创新周期从而影响创新绩效。本文还有助于在创新环境复杂多变时期的技术评估与创新规划。从技术管理的角度看, 长三角核心技术布局于作业与运输、物理、机械工程、化学四大领域, 其中分离技术、电数字数据处理、测试或分析材料、清洁技术、高分子化合物 5 个细分领域对维持网络稳健性尤为重要, 在这些重点领域需要持续性投入, 集合科技创新力量, 取得核心技术突破。不同城市技术比较优势不同, 就上海、南京、杭州、合肥而言, 上海在半导体器件、南京在信号装置、杭州在医学卫生学、合肥在高分子化合物的组合物技术领域分别具有比较优势, 需要加强区域合作, 提高区域内部技术互补, 强化相互赋能。

本文还存在一些不足之处: 首先, 仅根据专利文献中的技术共现来代表本地知识网络结构, 这仅捕获了本地技术能力的一部分。技术能力与工业部门的经济活动更相关。未来研究有必要在工业部门领域建立全面反映技术能力的知识网络。其次, 技术能力广泛分布在本地经济活动参与者与各类组织中, 本文并未深入剖析它们对知识网络稳健性的影响。未来研究应根据实地调研数据, 加强微观层面的影响机理分析。

致谢: 真诚感谢匿名评审专家在论文评审中所付出的时间和精力, 评审专家对本文研究思路、方法选择、指标选取、结果分析、结论梳理方面的修改意见, 使本文获益匪浅。

参考文献 (References)

- [1] US Chamber of Commerce. Made in China 2025: Global ambitions built on local protections. Washington: US Chamber of Commerce, 2017: 65.
- [2] Kwan C H. The China-US trade war: Deep-rooted causes, shifting focus and uncertain prospects. *Asian Economic Policy Review*, 2020, 15(1): 55-72. DOI: 10.1111/aep.12284.
- [3] 宋敏, 张学人, 聂聪. 中美专利影响力研究: 基于 PageRank 算法. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1805.G3.20230619.1606.002.html>, 2023-09-20. [Song Min, Zhang Xueren, Nie Cong. Research on the patent influence of China-US: Based on the PageRank Algorithm. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1805.G3.20230619.1606.002.html>, 2023-9-20.]
- [4] European Commission. "EU-China: A Strategic Outlook". Strasbourg: European Commission, 2019: 11.
- [5] Cai Y. Towards a new model of EU-China innovation cooperation: Bridging missing links between international university collaboration and international industry collaboration. *Technovation*, 2023, 119: 102553. DOI: 10.1016/j.technovation.2022.102553.

- [6] Yayavaram S, Ahuja G. Decomposability in knowledge structures and its impact on the usefulness of inventions and knowledge-base malleability. *Administrative Science Quarterly*, 2008, 53(2): 333-362. DOI: 10.2189/asqu.53.2.333.
- [7] Wang C, Rodan S, Fruin M, et al. Knowledge networks, collaboration networks, and exploratory innovation. *Academy of Management Journal*, 2014, 57(2): 484-514. DOI: 10.5465/amj.2011.0917.
- [8] Brennecke J, Rank O. The firm's knowledge network and the transfer of advice among corporate inventors: A multilevel network study. *Research Policy*, 2017, 46(4): 768-783. DOI: 10.1016/j.respol.2017.02.002.
- [9] Hernandez E, Menon A. Corporate strategy and network change. *Academy of Management Review*, 2021, 46(1): 80-107. DOI: 10.5465/amr.2018.0013.
- [10] Zhao J, Bai A, Xi X, et al. Impacts of malicious attacks on robustness of knowledge networks: A multi-agent-based simulation. *Journal of Knowledge Management*, 2020, 24(5): 1079-1106. DOI: 10.1108/jkm-10-2019-0531.
- [11] Kiss I Z, Green D M, Kao R R. The effect of network mixing patterns on epidemic dynamics and the efficacy of disease contact tracing. *Journal of the Royal Society Interface*, 2008, 5(24): 791-799. DOI: 10.1098/rsif.2007.1272.
- [12] Zhang F, Cantwell J A. Regional and global technological knowledge search strategies and the innovative performance of large multinational corporations. *Industry and Innovation*, 2013, 20(7): 637-660. DOI: 10.1080/13662716.2013.850809.
- [13] 郭卫东, 钟业喜, 冯兴华. 基于脆弱性视角的中国高铁城市网络韧性研究. *地理研究*, 2022, 41(5): 1371-1387. [Guo Weidong, Zhong Yexi, Feng Xinghua. Research on the resilience of China's high-speed rail urban network from the perspective of vulnerability. *Geographical Research*, 2022, 41(5): 1371-1387.]. DOI: 10.11821/dljy020210421.
- [14] 魏石梅, 潘竟虎. 中国地级及以上城市网络结构韧性测度. *地理学报*, 2021, 76(6): 1394-1407. [Wei Shimei, Pan Jinghu. Network structure resilience of cities at the prefecture level and above in China. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(6): 1394-1407.]. DOI: 10.11821/dlxb202106006.
- [15] 李博, 曹盖. 基于涉海A股上市公司的中国沿海地区海洋经济网络结构韧性演化研究. *地理科学进展*, 2022, 41(6): 945-955. [Li Bo, Cao Gai. Structural resilience change of China's marine economic network based on the data of sea-related A-share listed companies. *Progress in Geography*, 2022, 41(6): 945-955.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2022.06.001.
- [16] 彭翀, 陈思宇, 王宝强. 中断模拟下城市群网络结构韧性研究: 以长江中游城市群客运网络为例. *经济地理*, 2019, 39(8): 68-76. [Peng Chong, Chen Siyu, Wang Baoqiang. Analyzing city network's structural resilience under disruption scenarios: A case study of passenger transport network in the middle reaches of Yangtze River. *Economic Geography*, 2019, 39(8): 68-76.]. DOI: 10.15957/j.cnki.jjdl.2019.08.009.
- [17] Guan J, Liu N. Exploitative and exploratory innovations in knowledge network and collaboration network: A patent analysis in the technological field of nano-energy. *Research Policy*, 2016, 45(1): 97-112. DOI: 10.1016/j.respol.2015.08.002.
- [18] 盛科荣, 王传阳, 刘乐, 等. 中国城市知识网络嵌入与科技企业孵化的交互影响研究. *地理研究*, 2023, 42(1): 34-52. [Sheng Kerong, Wang Chuanyang, Liu Le, et al. The interplay between knowledge network embeddedness and technology enterprise incubation of cities in China. *Geographical Research*, 2023, 42(1): 34-52.]. DOI: 10.11821/dljy020220371.
- [19] Chandra P, Dong A. Knowledge network robustness: A new perspective on the appropriation of knowledge from patents. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2022, 69(6): 2806-2816. DOI: 10.1109/tem.2020.3016278.
- [20] Pu C, Wang K, Xia Y. Robustness of link prediction under network attacks. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2020, 67(8): 1472-1476. DOI: 10.1109/tcsii.2019.2938894.
- [21] Boschma R, Balland P A, Kogler D F. Relatedness and technological change in cities: The rise and fall of technological knowledge in US metropolitan areas from 1981 to 2010. *Industrial and Corporate Change*, 2015, 24(1): 223-250. DOI: 10.1093/icc/dtu012.
- [22] Kogler D F, Rigby D L, Tucker I. Mapping knowledge space and technological relatedness in US cities. *European Planning Studies*, 2013, 21(9): 1374-1391. DOI: 10.1080/09654313.2012.755832.
- [23] Rocchetta S, Ortega-Argiles R, Kogler D F. The non-linear effect of technological diversification on regional productivity: Implications for growth and smart specialisation strategies. *Regional Studies*, 2022, 56(9): 1480-1495. DOI: 10.1080/00343404.2021.1939292.
- [24] Fleming L, Mingo S, Chen D. Collaborative brokerage, generative creativity, and creative success. *Administrative Science Quarterly*, 2007, 52(3): 443-475. DOI: 10.2189/asqu.52.3.443.
- [25] Chen S, Ding Y T, Zhang Y F, et al. Study on the robustness of China's oil import network. *Energy*, 2022, 239: 122139. DOI: 10.1016/j.energy.2021.122139.
- [26] 赖建波, 朱军, 郭煜坤, 等. 中原城市群人口流动空间格局与网络结构韧性分析. *地理与地理信息科学*, 2023, 39(2): 55-63. [Lai Jianbo, Zhu Jun, Guo Yukun, et al. Spatial pattern of population flow and the resilience of network structure of central plains urban agglomeration. *Geography and Geoinformation Science*, 2023, 39(2): 55-63.]. DOI: 10.3969/j.issn.

1672-0504.2023.02.008.

- [27] 方叶林, 苏雪晴, 黄震方, 等. 中国东部沿海五大城市群旅游流网络的结构特征及其韧性评估: 基于演化韧性的视角. *经济地理*, 2022, 42(2): 203-211. [Fang Yelin, Su Xueqing, Huang Zhenfang, et al. Structural characteristics and resilience evaluation of tourism flow networks in five major urban agglomerations in coastal China: From the perspective of evolutionary resilience. *Economic Geography*, 2022, 42(2): 203-211.]. DOI: 10.15957/j.cnki.jjdl.2022.02.022.
- [28] 黄梅, 刘晨曦, 俞晓莹, 等. 城市水生态网络韧性评价与优化策略: 以长沙市为例. *经济地理*, 2022, 42(10): 52-60. [Huang Mei, Liu Chenxi, Yu Xiaoying, et al. Resilience evaluation and optimization of urban water ecological network: Take changsha as an example. *Economic Geography*, 2022, 42(10): 52-60.]. DOI: 10.15957/j.cnki.jjdl.2022.10.007.
- [29] Auerbach J, Kim H. Measuring robustness and coverage of transportation networks with multiple routes and hubs. *Annals of the American Association of Geographers*, 2022, 112(6): 1741-1760. DOI: 10.1080/24694452.2022.2047577.
- [30] Zhao J, Wei J, Yu L, et al. Robustness of knowledge networks under targeted attacks: Electric vehicle field of China evidence. *Structural Change and Economic Dynamics*, 2022, 63: 367-382. DOI: 10.1016/j.strueco.2022.05.008.
- [31] Toth G, Elekes Z, Whittle A, et al. Technology network structure conditions the economic resilience of regions. *Economic Geography*, 2022, 98(4): 355-378. DOI: 10.1080/00130095.2022.2035715.
- [32] Ando H, Bell M, Kurauchi F, et al. Connectivity evaluation of large road network by capacity-weighted eigenvector centrality analysis. *Transportmetrica A-Transport Science*, 2021, 17(4): 648-674. DOI: 10.1080/23249935.2020.1804480.
- [33] Fleming L. Recombinant uncertainty in technological search. *Management Science*, 2001, 47(1): 117-132. DOI: 10.1287/mnsc.47.1.117.10671.
- [34] Zhang H H, Wu W Q, Zhao L M. A study of knowledge supernetworks and network robustness in different business incubators. *Physica A-Statistical Mechanics and Its Applications*, 2016, 447: 545-560. DOI: 10.1016/j.physa.2015.12.051.
- [35] Zitnik M, Sosic R, Feldman M W, et al. Evolution of resilience in protein interactomes across the tree of life. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(10): 4426-4433. DOI: 10.1073/pnas.1818013116.
- [36] Xiao T, Makhija M, Karim S. A knowledge recombination perspective of innovation: Review and new research directions. *Journal of Management*, 2022, 48(6): 1724-1777. DOI: 10.1177/01492063211055982.
- [37] Abbasiharofteh M, Kogler D F, Lengyel B. Atypical combinations of technologies in regional co-inventor networks. *Research Policy*, 2023, 52(10): 104886. DOI: 10.1016/j.respol.2023.104886.
- [38] Kim Y, Chen Y S, Linderman K. Supply network disruption and resilience: A network structural perspective. *Journal of Operations Management*, 2015, 33-34: 43-59. DOI: 10.1016/j.jom.2014.10.006.
- [39] Dong G, Gao J, Du R, et al. Robustness of network of networks under targeted attack. *Physical Review E*, 2013, 87(5): 052804. DOI: 10.1103/PhysRevE.87.052804.
- [40] Acemoglu D, Akcigit U, Kerr W R. Innovation network. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(41): 11483-11488. DOI: 10.1073/pnas.1613559113.
- [41] Mu D, Ren H Y, Wang C, et al. Structural characteristics and disruption ripple effect in a meso-level electric vehicle Lithium-ion battery supply chain network. *Resources Policy*, 2023, 80: 103225. DOI: 10.1016/j.resourpol.2022.103225.
- [42] Lee P C. Investigating the knowledge spillover and externality of technology standards based on patent data. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2021, 68(4): 1027-1041. DOI: 10.1109/tem.2019.2911636.
- [43] Wang Z, Porter A L, Wang X, et al. An approach to identify emergent topics of technological convergence: A case study for 3D printing. *Technological Forecasting and Social Change*, 2019, 146: 723-732. DOI: 10.1016/j.techfore.2018.12.015.
- [44] Boschma R. Relatedness as driver of regional diversification: A research agenda. *Regional Studies*, 2017, 51(3): 351-364. DOI: 10.1080/00343404.2016.1254767.
- [45] Turkina E, Oreshkin B, Kali R. Regional innovation clusters and firm innovation performance: An interactionist approach. *Regional Studies*, 2019, 53(8): 1193-1206. DOI: 10.1080/00343404.2019.1566697.
- [46] Broekel T, Knuepling L, Mewes L. Boosting, sorting and complexity-urban scaling of innovation around the world. *Journal of Economic Geography*, 2023, 23(5): 979-1016. DOI: 10.1093/jeg/lbad006.
- [47] Di Cataldo M, Ferranna L, Gerolimetto M, et al. Splitting up or dancing together? Local institutional structure and the performance of urban areas. *Economic Geography*, 2023, 99(1): 81-110. DOI: 10.1080/00130095.2022.2130749.
- [48] Ascani A, Bettarelli L, Resmini L, et al. Global networks, local specialisation and regional patterns of innovation. *Research Policy*, 2020, 49(8): 104031. DOI: 10.1016/j.respol.2020.104031.
- [49] 马海涛, 徐植钊, 江凯乐. 中国城市群技术知识多中心性演化特征及创新效应. *地理学报*, 2023, 78(2): 273-292. [Ma Haitao, Xu Xuanfang, Jiang Kaile. The evolutionary characteristics and innovation effects of technological knowledge

- polycentricity in Chinese urban agglomerations. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(2): 273-292.]. DOI: 10.11821/dlxb202302002.
- [50] 段德忠, 杜德斌. 中国城市绿色技术创新的时空分布特征及影响因素. *地理学报*, 2022, 77(12): 3125-3145. [Duan Dezhong, Du Debin. Green technology innovation in China city system: Dynamics and determinants. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(12): 3125-3145.]. DOI: 10.11821/dlxb202212012.
- [51] 叶琴, 曾刚. 不同知识基础产业创新网络与创新绩效比较: 以中国生物医药产业与节能环保产业为例. *地理科学*, 2020, 40(8): 1235-1244. [Ye Qin, Zeng Gang. The comparison of innovation networks and Innovation performance between different knowledge-based Industries: Taking China's biomedical industry and environmental industry as examples. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, 40(8): 1235-1244.]. DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2020.08.002.
- [52] 高旻昱, 曾刚, 王丰龙. 相关多样化、非相关多样化与区域创新产出: 以长三角地区为例. *人文地理*, 2020, 35(5): 103-110. [Gao Minyu, Zeng Gang, Wang Fenglong. Related, unrelated variety and regional innovation output: A case study of Yangtze River Dwlta. *Human Geography*, 2020, 35(5): 103-110.]. DOI: 10.13959/j.issn.1003-2398.2020.05.013.
- [53] Castaldi C, Frenken K, Los B. Related variety, unrelated variety and technological breakthroughs: An analysis of US state-level patenting. *Regional Studies*, 2015, 49(5): 767-781. DOI: 10.1080/00343404.2014.940305.
- [54] Corbo L, Kraus S, Vlačić B, et al. Coepetition and innovation: A review and research agenda. *Technovation*, 2023, 122: 102624. DOI: 10.1016/j.technovation.2022.102624.
- [55] Hani M, Dagnino G B. Global network coepetition, firm innovation and value creation. *Journal of Business & Industrial Marketing*, 2021, 36(11): 1962-1974. DOI: 10.1108/jbim-05-2019-0268.
- [56] Yao Y H, Gao H, Sun F Q. The impact of dual network structure on firm performance: The moderating effect of innovation strategy. *Technology Analysis & Strategic Management*, 2020, 32(9): 1020-1034. DOI: 10.1080/09537325.2020.1739263.
- [57] Balland P A, Boschma R, Ravet J. Network dynamics in collaborative research in the EU, 2003-2017. *European Planning Studies*, 2019, 27(9): 1811-1837. DOI: 10.1080/09654313.2019.1641187.
- [58] Mawdsley J K, Somaya D. Relational embeddedness, breadth of added value opportunities, and business growth. *Organization Science*, 2021, 32(4): 1009-1032. DOI: 10.1287/orsc.2020.1415.
- [59] Aarstad J, Kvitastein O A, Jakobsen S E. Related and unrelated variety as regional drivers of enterprise productivity and innovation: A multilevel study. *Research Policy*, 2016, 45(4): 844-856. DOI: 10.1016/j.respol.2016.01.013.
- [60] 杨婷羽, 崔永梅, 王慧. 突破性创新风险的双轮驱动化解机制: 基于交控科技的扎根研究. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1725.c.20231019.1802.010.html>, 2023-12-20. [Yang Tingyu, Cui Yongmei, Wang Hui. Two dimensiona driving mechanism of resolving breakthrough innovation risk: A grounded theory research of TCT. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1725.c.20231019.1802.010.html>, 2023-12-20.]

Robustness of knowledge networks in the Yangtze River Delta and their impact on innovation performance under random and targeted attacks

YE Qin¹, ZENG Gang², JIANG Haiyun¹

(1. School of Environmental and Geographical Sciences, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China;

2. Center for Modern Chinese City Studies, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: In the new development paradigm, enhancing the robustness of the urban knowledge network in the Yangtze River Delta (YRD) is increasingly recognized as an effective strategy to address the challenges of "anti- globalization" in global technological cooperation and to promote high-quality integrated development. This study is based on the authorized invention patent data from 2017 to 2021 for 41 cities in the YRD. It constructs intra-city knowledge networks using four-digit technology categories as nodes and the frequency of technology combinations as connections. The study evaluates the robustness of knowledge networks by simulating both random and deliberate attacks and calculating the network collapse threshold. A panel econometric model is employed to explore the impact on city innovation performance. The findings reveal that: (1) The knowledge networks in YRD cities exhibit stronger resilience to random attacks compared to deliberate attacks. (2) The overall robustness of these networks shows a pattern of high in the east and low in the west, influenced by the COVID-19 pandemic, with an initial rise followed by a decline. Under deliberate attacks, Hangzhou, Shanghai, Nanjing, and Ningbo consistently rank in the top four in network robustness, while Chizhou ranks last. (3) The overall robustness of the YRD knowledge network, under both random and deliberate attacks, surpasses that of individual cities' networks. Enhancing cross-city and cross-sector technology integration opportunities increases the network's ability to resist risks. Over five years, the rate of cross-sector technology integration in the YRD increased from 41% to 47%. (4) After controlling for related and unrelated variety of knowledge, and network centrality in cooperative networks, regression analysis shows a positive correlation between the robustness of city knowledge networks and innovation performance. The impact of knowledge network robustness on innovation is more significant during deliberate attacks compared to random attacks. Even when substituting the network collapse threshold with network efficiency ratio for robustness testing, the regression results remain significant. Finally, the study recommends consolidating technological innovation efforts in core technology areas, including separation technology, digital data processing, material testing or analysis, clean technology, and polymer compounds- five fields that hold central positions in knowledge networks. Strengthening inter-city technological complementarity is also advised to enhance the robustness of the knowledge network in YRD cities.

Keywords: knowledge networks; robustness; innovation; random attacks; targeted attacks; Yangtze River Delta