

科学学研究
Studies in Science of Science
ISSN 1003-2053, CN 11-1805/G3

《科学学研究》网络首发论文

题目： 科研合作网络演化机制研究：以光刻领域为例
作者： 刘景康，陈虹枢，金茜茜，刘子凯，汪雪锋
DOI： 10.16192/j.cnki.1003-2053.20240229.003
收稿日期： 2023-11-27
网络首发日期： 2024-03-01
引用格式： 刘景康，陈虹枢，金茜茜，刘子凯，汪雪锋. 科研合作网络演化机制研究：
以光刻领域为例[J/OL]. 科学学研究.
<https://doi.org/10.16192/j.cnki.1003-2053.20240229.003>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

科研合作网络演化机制研究：以光刻领域为例

刘景康¹ 陈虹枢^{1*}金茜茜¹刘子凯²汪雪锋¹

(1. 北京理工大学管理与经济学院, 北京, 100081;

2. 北京理工大学计算机学院, 北京, 100081)

摘要：在创新驱动的大背景下，复杂科学技术创新的组织与协调吸引了大量学者开展研究。深入理解科研机构间合作关系的动态演化机制是进一步组织与优化合作创新的基础问题之一。本研究以科研合作网络为研究对象，采用社会网络分析方法以及随机行动者模型，重点分析了科学研究合作网络的演化特征与影响其动态变化的主要因素。具体地，本文构建了2011年—2022年光刻领域科研合作网络和知识要素共现网络，在分析网络拓扑特性影响合作关系动态变化的基础上，同时考虑了创新主体所持有的知识要素特征对网络动态演化的影响机制。结果显示，光刻领域的科研合作网络呈现核心机构数量减少而合作关系日益紧密的演化趋势。知识邻近性、知识多样性以及合作网络的三元传递性对创新主体间合作关系的形成具有正向影响，而知识组合机会以及机构在合作网络中的地位与新合作关系的建立负相关。同时，较高的知识相似度降低了相关机构之间的沟通成本，进而增加了机构合作关系形成的可能。本文的研究方法及结论为进一步组织及协调科研合作网络提供了参考。

关键词：科研合作网络；知识网络；随机行动者模型；网络动态演化

中图分类号：G301 文献标识码：A

收稿日期：2023-11-27；修回日期：2024-02-20

基金项目：国家自然科学基金青年项目“多源异质网络视角下产学研合作产生机理及潜在机会发现研究”（项目编号：72004009）

作者简介：刘景康（2004-），男，本科生，研究方向为科学计量学与创新管理。陈虹枢（1986-），女，满族，博士，特别副研究员、博士生导师，研究方向为知识管理与创新管理、科技评价与创新政策，通讯作者，Email: Hongshu.Chen@bit.edu.cn。金茜茜（1997-），女，博士研究生，研究方向为科技文本挖掘与创新管理。刘子凯（2004-），男，本科生，研究方向为文本挖掘。汪雪锋（1977-），男，博士，教授、博士生导师，研究方向为技术创新管理、科技文本挖掘、技术预测。

引言

党的二十大报告强调，“科技是第一生产力、创新是第一动力”，科技创新已成为我国经济社会发展的主引擎^[1]。随着全球科技迅猛发展，科研创新活动不再拘泥于单打独斗，而是逐步形成了跨组织、跨国界、跨学科等多种合作模式。如何在谋划创新初期洞悉合作机理、构建和优化合作网络，并确保其高效稳定运行，已经成为学界与业界关注的重点问题。

随着科学与技术合作日益成为各个领域的重要知识生产模式^[4]，合作网络与知识网络构成了两个核心研究对象。社会网络理论认为，网络中不同位置的节点获取新信息和资源的能力也有所不同^[2]，学者们可以通过网络分析方法研究网络结构、功能和演化^[3]，深入地探究系统特征。合作网络的构建与分析通常基于论文的共同撰写、专利的共同申请等创新活动^[5,6]；知识网络则体现了论文关键词、分类编码、标签等知识节点的共现关系^[7,8]，进而反映出宏观知识结构，但具体知识内容的变动却难以通过此类方法进行捕捉。

在已有研究中，合作网络与知识网络通常被视为两个较为独立的研究对象^[9]，但随着越来越多的研究证实了知识网络对于合作创新的重要作用^[10]，学者们开始分析知识网络特征如何影响创新过程。例如，知识网络的中心势、结构洞等特征，会直接影响突破性创新绩效^[11]，同时知识网络的结构也会影响知识的扩散和重组，进而影响知识持有者在社交网络中的创新行为^[12]。在科学研究过程中，创新主体会根据其网络位置、知识结构等多方面因素的变化，不断调整合作关系。合作网络同时体现了科学知识创造、传播和吸收的过程^[13]，而知识网络能够反映知识间的组织结构^[14]，合作网络与知识网络之间存在相互作用与联系。为了进一步理解科研活动中的合作行为，需要构建更为全面的框架，深入探究合作网络、知识网络及其交互如何影响合作的动态变化。

面向以上问题与挑战，本研究以 2011 年—2022 年间国际光学协会 SPIE 下设的权威光刻会议所发表的论文为研究对象，构建机构—知识双层网络模型并分析其演化机制。具体地，采用 KeyBERT 算法^[15]从论文数据中提取具有代表性的知识要素，构成知识要素共现网络，同时将论文作者所属机构视为创新“行动者”，构成机构间

合作网络。以此为基础，本文测度了双层网络中机构的三元传递性和网络地位、知识网络反映出的知识组合机会、知识组合潜力，以及机构—知识网络的层间联系所反映的多维度属性与特征，并基于随机行动者模型（Stochastic Actor-Oriented Models, SAOMs）^[16]探讨了光刻领域科研合作动态演化的动因，以期为进一步布局、协调、优化科研合作网络提供借鉴与参考。

1 合作网络演化研究综述

1.1 合作网络与知识网络

网络视角下，科学研究系统可被描述为一个复杂、自组织且不断演化的学术信息网络，科学研究主体之间的创新活动既嵌入在合作网络中，也嵌入在由知识要素建立的知识网络中^[7,17]。由于网络结构不同，合作网络与知识网络对于合作创新的影响机制也有所不同。大量研究揭示了科学合作活动与机构间互动以及知识传播之间的密切联系。首先，创新主体通过与其他主体的交流与合作，融合自身及外部的知识库，增加产生创新想法的机会^[18,19]。不同的知识属性会影响创新主体之间的交流合作方式^[12]，进一步影响其创新活动。同时，创新主体之间的交流和合作同样影响着其所属机构的合作创新方式。同一机构下创新主体间的交流促进了机构内部知识的传播，改变了机构的知识属性，影响机构在其合作网络中的影响力和行为。创新主体的交流合作是其所属机构与其他机构创建连结、进行知识重组的重要渠道^[20]。综上所述，知识网络的特征是影响机构合作网络演化的重要因素之一。近年来，越来越多的研究试图使用具有时间跨度的纵向数据集来描述机构合作网络的动态演化，探究知识维度的特征如何作为关键的驱动因素影响机构间合作网络的动态演化成为了学界关注的热点问题。

1.2 随机行动者模型

合作网络的结构与特征决定创新主体的知识获取、创造和传播能力^[21]，而网络动态研究将社交网络视为复杂的自适应系统，参与者出于对当前网络中信息的反应所做出的每个微小行动，共同推进了宏观层面的网络结构演化^[22,23]。其中，随机网络模型，如随机行动者模型（SAOMs），被广泛用于分析网络生成及动态演化机制

^[16]。SAOM 模型的主要特点是从行动者（即网络节点，本研究中为机构）的视角来模拟网络变化。在网络演化中，行动者可能建立、维持或终止与其他行动者的连结。通常假设行动者的决策会受到网络本身的结构、行动者自身以及网络中其他行动者的特性和行为的影响。有别于传统回归分析模型中的自变量独立性假定，随机行动者模型允许各个研究变量之间存在相关性，不需要强假设变量间彼此独立。同时，该模型假定每个行动者拥有关于网络中的合作关系连结和所有其他行动者行为的完整信息，依据这些信息以及当前的网络和行为状态，行动者可以依据模型中的目标函数理性决定是否改变自己已经建立的合作关系以适应当前网络的状态。在过去的十年中，以 SAOM 为代表的网络统计模型得到了快速发展，但采用实证视角分析网络形成、发展与动态演化机制，并将其运用于管理决策及政策讨论中，仍然具有较为广阔的研究空间。

1.3 科学知识要素抽取

近年来，越来越多的实证研究基于网络视角，针对“知识”在创新主体间的流动展开了分析。其中，“知识网络”通常基于论文关键词（keywords）的共现^[7]、文本数据的共有标签^[8]、或共同专利申请的专利分类代码^[5,24,25]来建立节点与连边。在深入分析和理解机构或个体层面的微观知识结构时，这些方法往往难以把握文本的丰富信息与内容更迭^[9]，同时，提前设定好的知识分类体系也难以覆盖迅速增长的科学术语。因此，如何有效从科学文本中提取知识要素成为构建知识网络的关键。

从非结构化文本中提取代表性词语和短语的方法可以大致分为以下几类：基于统计的方法、基于聚类的方法、基于图的方法以及基于深度学习的方法。具体来说，统计视角下的方法通常只需要来自语料库和文档原始数据的词语统计信息，仅通过词频或者逆文本频率来识别关键词语；聚类方法旨在将候选词语分簇，再从每个簇中挑选最具代表性的词语；基于图的方法则将文档构建成词语网络，使用图排名的相关方法识别关键词语^[15]；针对非结构化科学文本知识提取问题，基于深度学习的知识嵌入方法近年来成为研究热点^[26]，这类方法能够充分利用词和短语的语义和上下文信息，从而准确提取文本中的知识要素。KeyBERT 方法是典型的基于深度学习、无监督的词语提取方法，该方法使用 BERT 算法来协助识别最能代表目标文本语义

的代表性词语。由于其专注于句子中的关联性，提取知识要素时可以考虑科学文本中的上下文信息，在所提取词语与作者指定关键词的相似性上已经被证明结果优于传统方法^[14]。

2 研究方法

2.1 研究框架

(1) 数据获取

本研究选取光刻领域权威国际会议的论文开展实证分析。作为半导体行业的关键核心技术，光刻技术的科学研究与技术创新活动复杂程度极高，是一个需要多组织、多领域、多阶段协调与合作的复杂领域。本研究在 Web of Science 核心合集中检索国际光学协会 SPIE¹下设的权威光刻相关会议所发表的会议论文，并利用 SPIE 数据库对数据集进行内容补齐。检索的时间跨度为 2011 年—2022 年，具体检索式为，CF = (Lithography OR Microlithography OR Nanolithography) AND (PUBL = (SPIE) OR SO = (SPIE) OR CF = (SPIE))。

在剔除论文集目录数据、时间跨度内未查询到合作记录的机构的记录等不符合研究问题的数据后，本研究使用 SPIE 数据库再次检索相关会议及会议论文，并补充缺失记录及属性，最终得到 3565 条数据用于科研合作网络演化研究。以 SPIE 数据库为基础的数据补全进一步提升了 Web of Science 会议论文数据的质量，所有记录均包含用于网络构建和模型分析的文章作者、标题、摘要、关键词、DOI 号以及作者所属机构等信息。

为了深入分析知识网络的结构特征和创新主体拥有的知识属性如何影响合作网络演化，本文以科学论文的发表机构作为网络节点构建合作网络，并利用 ITGInsight² 软件对机构名称进行消歧与归一化，并辅以人工清洗判断机构信息，将机构划分为企业（1）、大学或研究所（0）两种类型。

¹ SPIE 全称为国际光学工程学会，成立于 1955 年，是目前全球范围内致力于光学、光子学和电子学领域理论、工程和应用的最为权威的专业学会。SPIE 数据库收录了约 55 万篇会议论文及期刊论文，并以每年 20,000 篇的频率更新。

² <http://itginsight.com/>

(2) 知识要素抽取

本研究充分利用了会议论文标题和摘要的上下文信息，采用 KeyBERT 算法抽取科学文本中更为丰富、更为贴近研究内容的代表性词汇作为知识要素，构成知识网络的节点。作为利用 BERT 词向量实现词语提取的无监督方法，相较统计方法，KeyBERT 综合考虑了词语之间的关联性和上下文信息^[15]，使得所提取的词语更具语义代表性。由于数据集为学术论文，本文在 KeyBERT 模型框架内，选择采用 SciBERT 获取输入文本的语义表示。作为基于大规模科学论文语料进行预训练的 BERT 模型，SciBERT 相比原始 BERT 更适合处理科研领域的语言，可以更准确地表达科研文献的语义信息^[14]。

KeyBERT 算法的详细流程框架如图 1 所示。具体地，本研究将包含标题 (TI)、摘要 (AB) 和作者关键词 (KW) 的论文语料作为模型输入，将预处理并得到标记后的文本信息和多个 n -gram 词组作为候选关键词， n 的取值为 1 或 2。之后，运用 SciBERT 模型获得每个候选关键词在文本中所处上下文的词向量表示以及文本信息的向量表示。计算每个候选关键词词向量与文本信息的余弦相似度，并从高到低排序。考虑每个文本的知识体量不同，选择相似度最高的前 m 个关键词作为最终知识要素结果， m 的取值为文本长度的 5%。

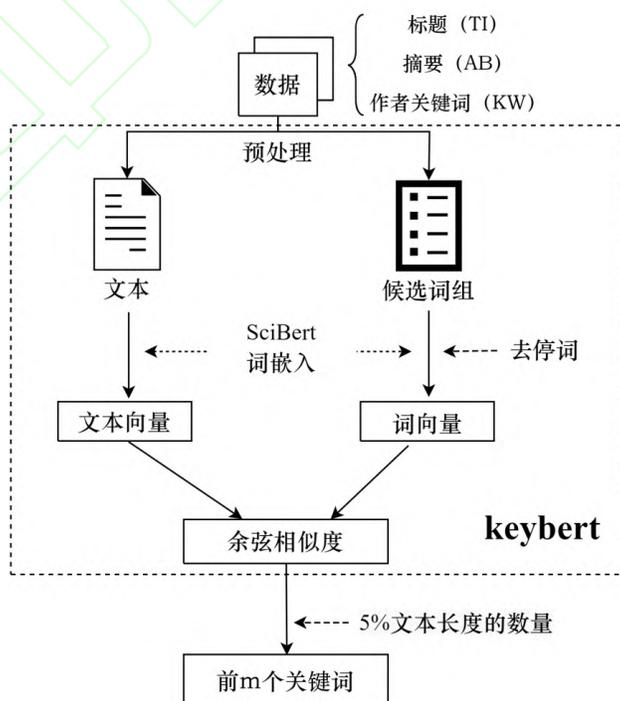


图 1 KeyBERT 具体算法流程

Figure 1 Specific algorithmic process of KeyBERT

(3) 机构—知识双层网络构建

本研究基于网络动态演化的视角，构建起机构—知识双层网络模型，深入探究以光刻领域为代表的科研合作网络动态发展及演化机制。为了确保以合适的时间粒度来反映机构间的互动变化，在已有研究的基础上，本文采取每三年为一个时间窗口的策略。

如图 2 所示，本研究首先利用各个时期的会议论文数据，识别机构间的合作关系，构建合作网络；其中，合作网络的节点代表参与科学研究的机构，节点之间的连边代表机构之间的合作关系。为了更全面地反应各个机构所持有知识的内容和结构特征，本文基于各机构所发表论文中的知识要素及其共现关系，进一步构建了知识网络。在知识网络中，节点是利用 KeyBERT 从数据集中提取的知识要素，相同知识要素出现在不同的文献，连边代表知识要素间的共现关系。图 2 的双层网络更直观地展现了机构和知识之间的关系，其中，机构之间的连线反映了合作关系，而知识要素之间的连线则表示关键词汇与短语的共现，两层网络之间的联系表示机构对知识的持有关系。每个机构可以同时拥有多种知识要素，而同一知识要素也可以被多个机构共同拥有^[5]。

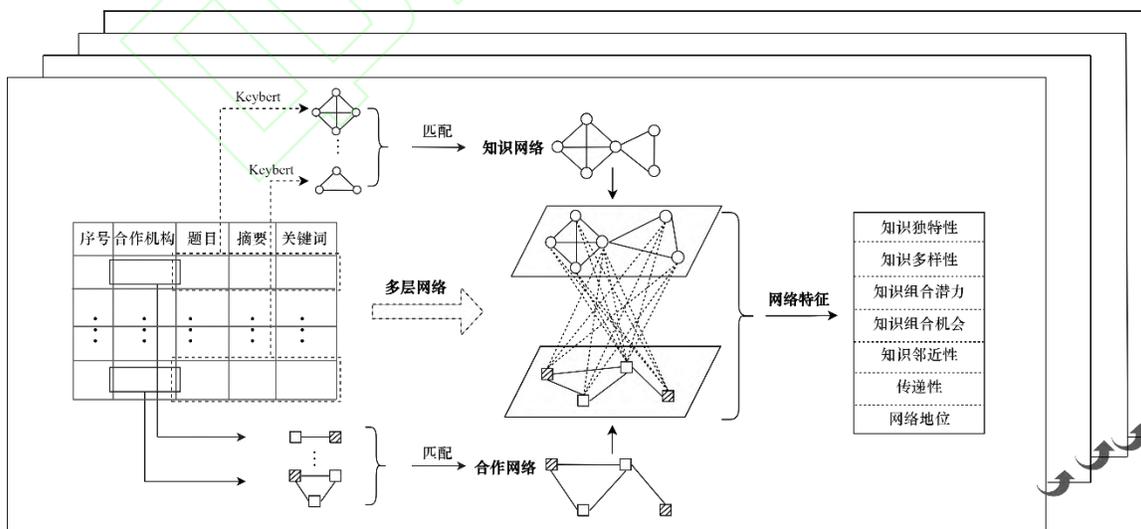


图 2 网络构建框架

Figure 2 Network construction framework

2.2 指标构建

基于机构—知识双层网络模型，本文构建了包括知识独特性、知识多样性、知识组合潜力与组合机会、知识邻近性，以及若干网络结构拓扑变量的指标体系，对可能影响网络动态发展的因素进行测度，如表 1 所示。值得提到的是，由于本研究使用极大似然方法对 SAOM 模型进行估计，因此对知识组合潜力、知识多样性两项指标进行了对数化处理，以保证其具有良好的渐进分布。本文基于该指标体系计算变量，并将其作为 SAOMs 模型的输入，深入剖析影响科研合作网络动态变化的主要因素。

表 1 面向科研合作网络演化分析的指标体系

Table 1 Variables for SAOMs

变量	数据	解释	数据维度
解释变量	四个时期机构合作网络的邻接矩阵	描述合作网络的动态变化	$n \times n \times m$
一元恒定协变量	机构类型	企业或学校	$n \times 1$
一元变化协变量	知识独特性	主体在此领域知识存储独占性	$n \times 1 \times (m-1)$
	知识多样性	主体在此领域拥有知识的广度	$n \times 1 \times (m-1)$
	知识组合潜力	获取新信息和资源的能力	$n \times 1 \times (m-1)$
	知识组合机会	重新组合内部知识的可能	$n \times 1 \times (m-1)$
	传递性	三元闭包	$n \times 1 \times (m-1)$
	网络地位	度数中心度	$n \times 1 \times (m-1)$
二元变化协变量	知识邻近性	基于 doc2vec 嵌入的主体间知识相似度	$n \times n \times (m-1)$

(1) 知识独特性

知识独特性是指创新主体在某一领域具有其他主体不具备的独特知识的整体程度^[12]。网络视角下，具有较多独特知识要素的机构掌握更稀缺的资源，在合作关系的建立中更具话语权。然而，也有学者认为独特的知识对机构创新活动的重要性或

价值较低^[27,28]，对相应机构在网络中的受欢迎程度产生负面影响。本研究中，知识独特性的计算方法如下。

对于每个知识节点*i*，其独特性的计算方法为：

$$U_{kn}(i) = \frac{1}{N_i} \quad (1)$$

其中， N_i 是与知识节点*i*相关的机构数量。

对于每个机构*j*，其独特性的计算方法为：

$$U_{in}(j) = \frac{\sum_{i \in K_j} U_{kn}(i)}{|K_j|} \quad (2)$$

其中， K_j 是与机构*j*相关的知识节点集合。

(2) 知识多样性

知识多样性衡量创新主体持有知识要素的种类。基于多样的知识要素储备，机构具有更多的机会进行知识的组合，从而开展学术研究与创新发展，知识的多样性被认为是科学创新的关键^[12]。多样性可以提高机构快速吸收外部技术的能力，使其成为网络中更受欢迎的节点^[29,30]。但是，与知识狭窄的机构相比，其可能不太依赖其他机构的知识要素进行创新^[12]，同时，高度多样性会导致机构间花费更多的时间和金钱进行谈判和解决问题^[31,32]。在本研究中，知识多样性的计算方法如下。

对于每个机构节点*i*：

$$D(i) = |K_i| \quad (3)$$

其中， K_i 是与机构节点*i*相关的知识节点集合。

(3) 知识组合潜力

知识的组合潜力由创新主体的知识要素在知识网络中的位置决定，旨在测度网络节点的不同位置访问新信息和资源的整体能力^[12]。在已有研究中，拥有高组合潜力的知识要素在机构的知识网络中占据核心位置^[5,33]，而具有低组合潜力的知识要素通常位于知识网络的边缘位置，表明其拥有者对其价值的预期较低，或该知识要素不适合与其他知识要素形成广泛的连结^[28,33]。机构知识要素的组合潜力将影响其与其他机构的知识交流方式，从而成为影响合作网络动态演化的关键指标之一。在本研究中，知识组合潜力的计算方法如下。

对于每个机构节点 j :

$$P(j) = \frac{\sum_{i \in K_j} d(i)}{|K_j|} \quad (4)$$

其中, $d(i)$ 是知识节点 i 的度中心性, K_j 是与机构 j 相关的知识节点集合。

(4) 知识组合机会

与组合潜力类似,组合机会同样考虑机构拥有的知识要素在知识网络中的位置,具有高组合机会的机构访问并重新组合大量内部知识的可能性较高^[12]。知识要素若能与之前未曾结合过的其他知识要素连接,其就具有较高的知识组合机会,未曾连接的空隙也称为结构洞,意味着知识存在重新组合的可能性^[33]。然而,周围缺少结构洞的知识要素往往代表着它们的发明潜力可能已经被大幅度利用,从而未被探索的组合机会较少^[34]。在本研究中,知识组合机会的计算方法如下。

对于每个知识节点对 (i, j) , 二进制约束 c_{ij} 定义为:

$$c_{ij} = \left(p_{ij} + \sum_k p_{ik} p_{jk} \right)^2 \quad (5)$$

其中, p_{ij} 是知识节点 i 和 j 之间的连接比例。

对于每个知识节点 i , 累积约束 C_i 定义为:

$$C_i = \sum_j c_{ij} \quad (6)$$

对于每个知识节点 i , 结构洞 S_i 的计算方式为:

$$S_i = 2 - C_i \quad (7)$$

对于每个机构节点 j , 组合机会为:

$$O(j) = \frac{\sum_{i \in K_j} S_i}{|K_j|} \quad (8)$$

其中, K_j 是与机构 j 相关的知识节点集合。

(5) 知识邻近性

知识邻近性指不同机构拥有的知识要素之间的相似性。在一个机构或个体的知识体系中,具有较高邻近性的知识要素通常来源于相似的领域或有相似的应用背景。从网络视角来看,知识邻近性可以帮助理解知识网络中节点之间的连接强度和模式。在技术创新和研发背景下,知识邻近性对于知识的转移、分享和再创造起到至关重要的作用,是机构在合作网络中建立联系的重要驱动力^[35,36]。当机构在科学研究过程中遇到问题或挑战时,往往首先考虑更容易被理解和整合的、与其现有知识体系最为邻近的知识资源。但同时也有研究表明,尽管向具有相似知识要素的机构寻求合作的沟通成本更小,交流更有效率,但向拥有不同知识的机构寻求交流可有效降低创新的固有风险^[37,38]。根据这些相反的论点,本研究期望探究在科学合作领域中,知识邻近性对于机构合作网络中联系的建立是否具有影响。

对于机构对 (i, j) , 知识邻近性定义为:

$$P(i, j) = \cos(\vec{v}_i, \vec{v}_j) \quad (9)$$

其中, \vec{v}_i 和 \vec{v}_j 分别表示由 doc2vec 算法对机构节点 i 和 j 所拥有的知识要素分别生成的知识向量, \cos 为余弦相似度函数。

2.3 随机行动者模型

随机行动者模型 (SAOMs) 是一种网络演化仿真模型。该模型依循马尔可夫过程, 假定在每个瞬间, 根据当前网络和知识的完整信息, 只可能有某一个特定的机构发生微小的变化。这可能是与另一机构形成新的合作关系 (例如机构 A 与机构 B 建立新的合作), 或者是机构自身的属性变化 (例如机构 A 在知识网络中的结构变化)。这种微小的变化不仅改变了整个合作网络的结构, 而且影响了下一瞬间的网络演化, 进而引发其他机构在下一时刻的属性变化或合作关系的形成。

SAOM 模型使用速率函数 (rate function) 与评价函数 (evaluation function) 来模拟合作网络关系和知识属性的动态变化过程。其中, 速率函数捕捉机构在两次观察时间点中的变化机会, 评价函数则用来捕捉机构合作关系变化发生的概率。由于本研究旨在探讨影响知识连接与变化的机制, 模型分析将主要集中在评价函数上,

速率函数仅作为模型的控制变量。本研究将知识网络的特征变化作为驱动机构合作网络动态演进的重要因素，从而构建用于捕捉合作关系动态变化的评价函数为：

$$f_i^{(\text{net})}(x) = \sum_k \beta_k^{(\text{net})} s_{ik}^{(\text{net})}(x) \quad (10)$$

其中， $\beta_k^{(\text{net})}$ 是对机构*i*而言，第*k*个变量 $s_{ik}^{(\text{net})}$ 表示对节点因变量合作选择的估计。

前文提及的为控制网络内生性所加入的变量也被包含在 $s_{ik}^{(\text{net})}$ 中。

3 实证分析

3.1 数据处理结果

在对数据进行初步清洗和处理后，为了避免每年的数据波动以及考虑到论文发表所需要的时间周期，在已有研究的基础上，本文采取了每三年为一个时间窗口的策略，具体得到 2011 年—2013 年 (T1) 有效数据 1140 条，2014 年—2016 年 (T2) 有效数据 1008 条，2017 年—2019 年 (T3) 有效数据 912 条，2020 年—2022 年 (T4) 有效数据 505 条，共计 3565 条有效数据。在每个时间窗口上，构建起机构—知识双层网络，以深入探究光刻领域科研合作网络的动态发展及变化。图 3 使用 2020 年—2022 年 (T4) 的部分数据给出了双层网络的示意图，机构之间的连线反映了合作关系，而抽取的关键词汇及短语之间的连线则表示知识要素的共现，两层网络之间的联系表示机构对知识的拥有关系。

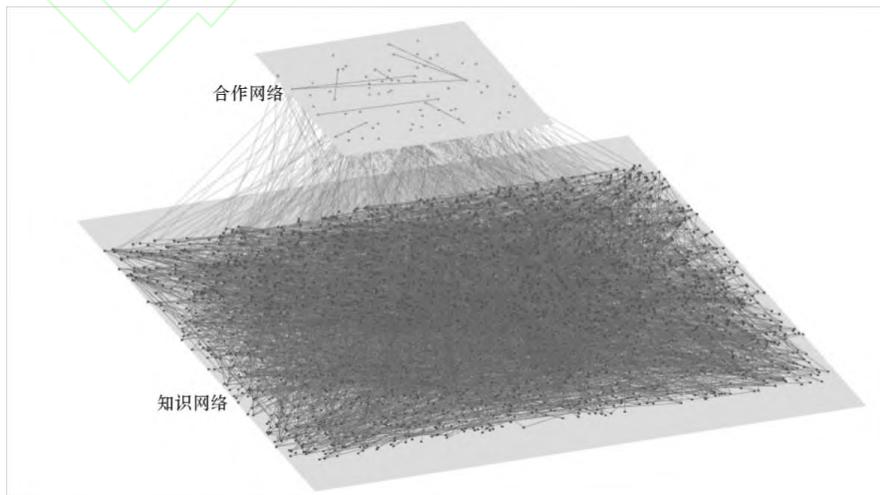


图 3 双层网络结构视图

Figure 3 Two-layer network structure view

3.2 光刻领域机构科研合作网络演化特征

科研合作网络本身的动态变化揭示了目标领域合作行为的整体发展趋势。通过对 4 个时间窗口下合作网络的整体结构进行统计分析，可以清晰地观察光刻领域科研合作网络动态演化的整体特征，如表 2 所示，相关特征为：

表 2 各时期网络的宏观特征指标

Table 2 Macro feature indicators of the period network

	T1	T2	T3	T4
网络节点数	269	241	250	181
企业类型节点数	173	180	179	135
学校类型节点数	96	61	71	46
网络连边数	548	548	487	370
网络密度	0.0152	0.0189	0.0156	0.0227
平均聚类系数	0.4548	0.4312	0.4929	0.5029

网络规模有所减小，密度上升。从表 2 数据中可以观察到，科研合作网络的节点数从 T1 时期的 269 减少到 T4 时期的 181，边的数量从 T1 时期的 548 减少到 T4 时期的 370，表明光刻领域的科学合作关系数量递减。但该网络的密度从 0.0152 增加到了 0.0227，意味着虽然行动者数量减少，但其合作关系变得更加紧密。具体来看，企业类型的节点数量从 173 下降到 135，而学校类型的节点数量从 96 下降到 46。这可能意味着一些较为松散的合作关系被剔除，部分企业和学校形成了稳定的合作关系，而一些不太活跃的机构则随着时间的发展退出了合作网络。

平均聚类系数变动明显。聚类系数反映了网络中节点的紧密程度。从表 2 数据中可以看到，T1 时期的平均聚类系数为 0.4548，而到 T4 时期为 0.5029，反映出光刻领域的科研合作网络中，节点间的互动关系逐渐增强，形成了更加紧密的合作小团体。考虑到光刻技术的复杂性和高成本，容易导致只有部分机构有能力和资源进行深入研究。但由于这些机构需要共享资源、知识和技术来共同面对挑战，其合作关系变得更加紧密。资源在紧密合作中能够被有效集中，从而实现技术突破。

3.3 SAOM 模拟结果

本文选取在研究时段内（2011 年—2022 年）至少出现于两个时期、累计出现 3 年及以上，且具有合作经历的机构作为实证分析对象。该处理方式借鉴了 Balland^[11] 等人的已有研究，降低了部分创新主体短时间进入或退出对创新网络演化造成的影响，避免网络稳定性过低。这有助于确保模拟网络动态演化的近似算法能够较好收敛，提升结果的可靠性。具体地，经过大量随机模拟过程，本研究得到速率函数的估计结果以及各动力因素参数的估计结果如表 3 所示。由结果可以看出，所有变量 t 比率 < 0.1 ，整体最大收敛比为 0.1771，满足小于等于 0.25 的收敛准则，表明 SAOM 模型得到了比较理想的收敛结果。

表 3 SAOM 模型模拟结果

Table 3 SAOM model simulation results

参数	参数估计	标准差	t 比率
速率 λ_{T1-T2}	22.327	6.036	-
速率 λ_{T2-T3}	7.7713	1.043	-
速率 λ_{T3-T4}	8.505	1.318	-
网络地位	-2.653***	0.083	0.0825
传递性	0.367***	0.025	0.0268
知识邻近性	3.189***	0.313	0.0324
机构类型	0.017	0.114	0.0574
知识组合机会	-3.895***	0.681	-0.0116
知识组合潜力	0.385	0.200	-0.0169
知识多样性	0.877***	0.112	0.0323
知识独特性	0.343	0.366	0.0136

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$;

所有 t 比率 < 0.09

最大收敛比 0.18

其中,速率函数表明了不同时间段内,机构之间改变科学合作关系的活跃程度。如表 3 所示,从 T1 到 T2 时期,创新主体改变合作关系的速率为 22.327,表明了在这一阶段,机构有相对较高的可能性去建立或改变合作关系。T2 到 T3 时期和 T3 到 T4 时期的速率相较 T1 到 T2 时期有所下降,这可能是由于在 2011-2013 年间,机构们更积极地寻找合作伙伴来弥补自身在某些技术方面的不足,但随着时间的推移,它们已经建立起了合适的合作关系,特定的合作伙伴关系可能已经稳固,因此对于新合作的需求逐渐减少。

网络地位系数为负且显著。意味着在光刻领域的科研合作网络中,占据核心地位的机构更不倾向与其他机构建立新的合作关系。这可能是由于核心机构已有较为稳定的合作伙伴,不需要再建立新的合作关系来扩大合作范围。一定程度上与光刻领域技术门槛逐渐提高,合作规模不断缩小有关。当新的合作机构加入网络时,由于掌握的知识资源较少,优先选择与占据网络中心位置的机构合作是一个明智选择。但是当不断有参与者退出时,这一效应也将反过来导致具有更强中心性的机构更容易失去合作关系。

传递性系数为正且显著。传递性的存在体现了学术界的“朋友引朋友”现象。这也意味着,一旦机构 A 与机构 B 和 C 都有合作关系,B 和 C 之间也更容易建立联系,这一现象也被称为三元闭包效应。三元闭包效应有利于行动者对朋友的朋友产生较高的信任感,基于可靠的潜在合作伙伴搜集信息,减少不确定性和信息不对称。通过中间朋友的中介关系,创新主体构建合作关系呈现闭合倾向,使得具有共同邻近节点的创新主体间有建立连接的趋势,对网络演化起促进作用。在技术密集型的光刻领域,由于一项技术的研发可能需要多方的合作,这种现象尤为突出。

知识邻近性系数为正且显著。显著的正参数估计值表明,机构更倾向于与知识结构和内容相似的其他机构合作。这符合 Kleinbaum^[35]和 McPherson^[36]等人的研究结论,在技术领域,知识邻近性对合作关系的形成至关重要。当机构在研发过程中遇到问题或挑战时,考虑到沟通成本和合作效率,它们往往首先考虑更容易被理解和整合的、与其现有知识体系最为邻近的知识资源。

机构类型影响并不显著。本研究将光刻领域涉及的机构分为学校和企业两种类型。但结果显示，机构类型并不是决定合作的主要因素，表明在高度复杂的科研领域中，能够参与研发活动的学校和企业和合作行为上可能不存在显著差异。

知识组合机会和知识组合潜力这两个指标都与机构在知识网络中的位置有关。结果显示，知识组合机会与合作关系呈负相关。根据 Wang^[33]等人的研究，具有高组合机会的机构已经发现了其现有知识的巨大潜力，因此更倾向于独立研发。当机构的知识要素缺乏组合机会时，它们更有动机去寻找新的知识，意味着他们会在新的、之前未涉及的领域或技术上进行创新^[33]，从而推动网络的动态演化。

知识多样性和知识独特性的参数估计值表明，多样性高的机构更有可能与其他机构合作。具有广泛的知识往往代表着该机构拥有快速吸收外部技术的能力且掌握多种技术，可以为合作伙伴提供更多的技术选择和解决方案。由于光刻领域较高的知识门槛，这种特性会使得该机构更容易吸引其他机构前来合作，使其在网络中成为更受欢迎的节点。知识独特性在统计上不显著，表明尽管知识独特性对于合作有一定的吸引力，但它不是决定合作关系的主要因素。

4 总结与讨论

本研究采用随机行动者模型探究了光刻领域机构间科研合作网络动态演化的内在机制，深入分析了在科学研究合作中，知识网络特征如何参与驱动机构合作网络的动态演化。研究结果表明，从整体结构特征来看，光刻领域的机构合作网络呈现核心机构数量减少而网络关系变得日益紧密的发展趋势。这说明随着时间推移，部分机构已经构建了稳定的合作关系，而另一些机构则逐渐退出了合作生态。同时，合作网络传递性和知识邻近性这两个变量对合作关系的形成具有正向影响。这符合科研合作网络的特征，核心机构倾向于与知识结构相近的机构进行合作。另一方面，知识组合机会对合作关系的建立具有负相关效应。这可能是因为这些机构已经充分发现现有知识的应用潜力，因此更倾向于独立研发。最后，知识多样性与合作关系呈正相关，这表明光刻领域对跨领域知识的需求，驱动不同知识背景的机构进行合作。上述发现表明，知识网络的特征在很大程度上决定了机构的科研合作方式。知识邻近性降低了沟通成本，有助于合作关系的启动，但具有核心位置的机构更倾向

于利用自身资源，而非与外部机构合作。知识组合机会代表机构内部的研发潜力，因而知识组合机会越高的机构越不倾向于合作。这为评估科研机构的合作策略提供了参考，也为优化科研机构的合作网络决策提供了依据。

同时，本研究也存在一些局限性。其一，本研究仅考察了光刻这一复杂技术领域的科研合作网络及对应的知识网络，具有不同技术复杂度及合作生态的领域研究结论可能存在差异，在未来研究中将进一步扩大研究对象范围，考虑增添多个领域的数据进行横向比较，探究不同领域科研合作网络动态变化的特征。其二，本研究的时间跨度较短，无法观察科研合作网络的长期演变趋势。未来可获取更长时间跨度的合作网络数据，观察科研合作网络的长期演化趋势。

参考文献

- [1] 范旭, 肖鸿波. 科技创新试点能否成为创新增长极? ——来自 15 项试点政策的经验证据[J]. 科学学研究. 1-22. Fan Xu, Xiao Hongbo. Can Science and Technology Innovation Pilot Become Innovation Growth Poles? Empirical Evidence from 15 Pilot Policies[J]. Studies in Science of Science. 1-22.
- [2] Wuchty S, Jones B F, Uzzi B. The increasing dominance of teams in production of knowledge[J]. Science, 2007, 316(5827): 1036-1039.
- [3] Burt R S. Structural Holes[M]. Harvard University Press, 1992.
- [4] 周建林, 牛琪锴, 曾安, et al. 基于复杂网络视角的科学文献数据分析[J]. 科技导报, 2018, 36(8): 55-64. Zhou Jianlin, Niu Qikai, Zeng An, et al. Analysis of scientific literature database from a perspective of complex network[J]. Science & Technology Review, 2018, 36(8): 55-64.
- [5] Guan J, Liu N. Exploitative and exploratory innovations in knowledge network and collaboration network: A patent analysis in the technological field of nano-energy[J]. Research Policy, 2016, 45(1): 97-112.
- [6] Magazinik A, Makinen S J, Lasheras N C, et al. Research-Industry Collaboration: A Review of the Literature on Evaluation Methods and Motivations[C]. Kocaoglu D,

- Anderson T, Kozaoglu D, et al. 2019 Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET). 2019.
- [7] Guan J, Yan Y, Zhang J. The impact of collaboration and knowledge networks on citations[J]. *Journal of Informetrics*, 2017, 11(2): 407-422.
- [8] Hellsten I, Leydesdorff L. Automated Analysis of Actor-Topic Networks on Twitter: New Approaches to the Analysis of Socio-Semantic Networks[J]. *Journal of the Association for Information Science and Technology*, 2020, 71(1): 3-15.
- [9] Chen H, Jin Q, Wang X, et al. Profiling academic-industrial collaborations in bibliometric-enhanced topic networks: A case study on digitalization research[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2022, 175.
- [10] 李鹏, 吴瑶, 彭华涛. 知识网络嵌入与国际创业企业成长关系研究[J]. *科学学研究*, 2022, 40(8): 1441-1451. Li Peng, Wu Yao, Peng Huatao. The Relationship Between Knowledge Network Embedding and the Growth of International Entrepreneurial Enterprises[J]. *Studies in Science of Science*, 2022, 40(8): 1441-1451.
- [11] 李彦勇, 林润辉. 知识网络结构、跨界搜索对组织突破性创新的影响: 美国人工智能技术领域专利的分析[J]. *科技管理研究*, 2020, 40(23): 204-212. Li Yanyong, Lin Runhui. The Impact of Knowledge Network Structure and Boundary-spanning Search on Organizational Radical Innovation: An Analysis of Patents in the Field of Artificial Intelligence Technology in the United States[J]. *Science and Technology Management Research*, 2020, 40(23): 204-212.
- [12] Brennecke J, Rank O. The firm's knowledge network and the transfer of advice among corporate inventors—A multilevel network study[J]. *Research Policy*, 2017, 46(4): 768-783.
- [13] Phelps C, Heidl R, Wadhwa A. Knowledge, Networks, and Knowledge Networks: A Review and Research Agenda[J]. *Journal of Management*, 2012, 38(4): 1115-1166.

- [14] Balland P A, Belso-Martinez J, Morrison A. The Dynamics of Technical and Business Knowledge Networks in Industrial Clusters: Embeddedness, Status, or Proximity?[J]. *Economic Geography*, 2016, 92: 35-60.
- [15] Khan M Q, Shahid A, Uddin M I, et al. Impact analysis of keyword extraction using contextual word embedding[J]. *PeerJ Computer Science*, 2022, 8: e967.
- [16] Snijders T A B. The Statistical Evaluation of Social Network Dynamics[J]. *Sociological Methodology*, 2001, 31(1): 361-395.
- [17] Fortunato S, Barthelemy M. Resolution limit in community detection[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(1): 36-41.
- [18] Burt R. Structural holes and good ideas[J]. *American Journal of Sociology*, 2004, 110(2): 349-399.
- [19] Ibarra H. Network centrality, power, and innovation involvement - determinants of technical and administrative roles[J]. *Academy of Management Journal*, 1993, 36(3): 471-501.
- [20] Carnabuci G, Operti E. Where do firms' recombinant capabilities come from? Intraorganizational networks, knowledge, and firms' ability to innovate through technological recombination[J]. *Strategic Management Journal*, 2013, 34(13): 1591-1613.
- [21] Liefner I, Hennemann S. Structural holes and new dimensions of distance: the spatial configuration of the scientific knowledge network of China's optical technology sector[J]. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 2011, 43(4): 810-829.
- [22] Powell W, White D, Koput K, et al. Network dynamics and field evolution: The growth of interorganizational collaboration in the life sciences[J]. *American Journal of Sociology*, 2005, 110(4): 1132-1205.

- [23] Snijders T, van de Bunt G, Steglich C. Introduction to stochastic actor-based models for network dynamics[J]. *Social Networks*, 2010, 32(1): 44-60.
- [24] Chang S H. The technology networks and development trends of university-industry collaborative patents[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2017, 118: 107-113.
- [25] 刘晓燕, 孙丽娜, 单晓红. 资源视角下组织创新合作机制研究[J]. *科学学研究*: 卷 41. 2023: 1525-1536. Liu Xiaoyan, Sun Lina, Shan Xiaohong. Research on organizational innovation cooperation mechanism from resource perspective[J]. *Studies in Science of Science*: Volume 41. 2023: 1525-1536.
- [26] Zhai Y, Ding Y, Zhang H. Innovation adoption: Broadcasting versus virality[J]. *Journal of the Association for Information Science and Technology*, 2021, 72(4): 403-416.
- [27] Kuhn T S, Hawkins D. The Structure of Scientific Revolutions[J]. *American Journal of Physics*, 1963, 31: 554-555.
- [28] Yayavaram S, Ahuja G. Decomposability in knowledge structures and its impact on the usefulness of inventions and knowledge-base malleability[J]. *Administrative Science Quarterly*, 2008, 53(2): 333-362.
- [29] Moreira S, Markus A, Laursen K. Knowledge diversity and coordination: The effect of intrafirm inventor task networks on absorption speed[J]. *Strategic Management Journal*, 2018, 39(9): 2517-2546.
- [30] Melero E, Palomeras N. The Renaissance Man is not dead! The role of generalists in teams of inventors[J]. *Research Policy*, 2015, 44(1): 154-167.
- [31] Sampson R C. Organizational choice in R&D alliances: Knowledge-based and transaction cost perspectives[J]. *Managerial and Decision Economics*, 2004, 25(6-7): 421-436.

- [32] Sampson R C. R&D Alliances and Firm Performance: The Impact of Technological Diversity and Alliance Organization on Innovation[J]. *Academy of Management Journal*, 2007, 50(2): 364-386.
- [33] Wang C, Rodan S, Fruin M, et al. Knowledge Networks, Collaboration Networks, and Exploratory Innovation[J]. *Academy of Management Journal*, 2014, 57(2): 484-514.
- [34] Kim D J, Kogut B. Technological Platforms and Diversification[J]. *Organization Science*, 1996, 7(3): 283-301.
- [35] Kleinbaum A M, Stuart T E, Tushman M L. Discretion Within Constraint: Homophily and Structure in a Formal Organization[J]. *Organization Science*, 2013, 24(5): 1316-1336.
- [36] McPherson M, Smith-Lovin L, Cook J M. Birds of a Feather: Homophily in Social Networks[J]. *Annual Review of Sociology*, 2001, 27(1): 415-444.
- [37] Boschma R. Proximity and Innovation: A Critical Assessment[J]. *Regional Studies*, 2005, 39(1): 61-74.
- [38] Crescenzi R, Nathan M, Rodríguez-Pose A. Do inventors talk to strangers? On proximity and collaborative knowledge creation[J]. *Research Policy*, 2016, 45(1): 177-194.

Research on the Evolutionary Mechanism of Scientific Collaboration Networks: The Case of Lithography Technology

Liu Jingkang¹ Chen Hongshu^{1*} Jin Qianqian¹ Liu Zikai² Wang Xuefeng¹
(1. School of Management and Economics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081; 2. School of Computer Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Abstract: In the context of innovation-driven development, the organization and coordination of complex scientific and technological innovations have garnered significant interest from scholars, which revealing the nature of research and innovation activities shifting from individual pursuits to a stage of collaboration among researchers and organizations. Gaining insight into the dynamic mechanisms that underpin collaboration among organizations participating in scientific and research activities is fundamental for further organizing and optimizing further collaborative innovation. Facing above challenges, this study focuses on scientific and research collaboration networks, employing social network analysis methods and stochastic actor-oriented models (SAOMs) to analyze the evolutionary characteristics and mechanism of collaborations, as well as the primary factors that influence the dynamics of scientific and research collaborations. Specifically, this research employs academic publications from year 2011 to year 2022 in the top lithography conferences to construct organizational collaboration networks and knowledge element co-occurrence networks. In this context, organizations that published academic papers are regarded as innovation entities, while knowledge elements extracted from these papers serve as nodes in the corresponding knowledge networks. We then examine the dynamic changes in collaboration relationships based on the analysis of network topology characteristics, while also considering the influence of the knowledge element characteristics held by innovative entities on the dynamic evolution of the network. In this empirical study, the findings indicate that the scientific and research collaboration network in the area of lithography displays a trend of diminishing the number of core organizations,

accompanied by a strengthening of collaborative relationships among participating innovative entities, suggesting a growing emphasis on building robust partnerships within the network. The findings of the study also highlight the influence of network status and transitivity on scientific and research collaboration. Knowledge proximity, knowledge diversity, and the triadic transfer of the collaboration network positively impact the formation of collaborative relationships among innovative entities. The positive coefficient of transitivity supports the facilitative effect of triadic closure on the formation of the collaboration network, reflecting the "friends of friends" phenomenon. The beneficial effect of knowledge proximity is also notable, indicating that organizations prefer to collaborate with those sharing similar knowledge structures and content, thereby reducing communication costs, and improving communication efficiency. In contrast, a high degree of knowledge combination opportunities reduces the likelihood of collaboration in this area. The negative coefficient of network status indicates that organizations in core positions are less inclined to establish new collaborations with other entities, since they may prefer to utilize their resources rather than engage in external collaborations. Moreover, we found that higher knowledge similarity reduces communication costs between related institutions, thereby increasing the likelihood of forming cooperative relationships. The findings demonstrate that the characteristics of the knowledge network significantly determine the modes of collaboration among participating organizations. Through a detailed analysis of the dynamic evolution of collaboration networks and knowledge networks, this study provides theoretical foundations and practical guidance for optimizing collaborative strategies and network decisions for innovative entities. These insights offer important references for the purposes of evaluating the collaborative strategies and further organizing research collaborations.

Keywords: Scientific collaboration networks; Knowledge networks; Stochastic actor-oriented models; Network dynamics