



图书馆论坛

Library Tribune

ISSN 1002-1167, CN 44-1306/G2

《图书馆论坛》网络首发论文

题目：要素依赖性与结构异质性：战略性新兴产业背景下的“科学-技术”知识要素组合模式与转移路径分析

作者：王宇航，吴天骏，康乐乐

收稿日期：2024-11-18

网络首发日期：2025-01-16

引用格式：王宇航，吴天骏，康乐乐．要素依赖性与结构异质性：战略性新兴产业背景下的“科学-技术”知识要素组合模式与转移路径分析[J/OL]．图书馆论坛．
<https://link.cnki.net/urlid/44.1306.g2.20250116.1527.004>



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。

*本文系国家自然科学基金项目“从驱动到扩散:基于多元方法的移动应用创新机理研究”(项目编号: 72072087)研究成果。

要素依赖性与结构异质性：战略性新兴产业背景下的“科学-技术”知识要素组合模式与转移路径分析*

王宇航，吴天骏，康乐乐

摘 要 前沿基础科学与新兴产业技术的深度融合构成战略性新兴产业的交叉性、前沿性和颠覆性的核心要素，但从“科学-技术”知识转移视角来分析战略性新兴产业中的新质生产力知识要素的产生及演化的研究仍十分有限。文章基于要素依赖性和结构异质性两种维度构建知识转移过程的四种类型化知识要素组合模式，分别是连通式异质网络、连通式均质网络、离散式异质网络、离散式均质网络。同时，结合网络结构熵与转移熵识别出不同产业之间存在的“科学-技术”知识转移路径，并将其概括为知识迁移、知识异质化、知识均质化、知识连通化、知识离散化、连通异质化、连通均质化七种知识转移模式。最后结合转移过程中的互信息-词频权重提取出转移路径中的知识要素，对转移知识要素进行了内容分析。本文研究成果为战略性新兴产业的发展提供了分析框架和演化模式，有助于未来推动战略性新兴产业发展。

关键词 新质生产力 知识转移 前沿基础研究 战略性新兴产业 科学-技术融合

引用本文格式 王宇航，吴天骏，康乐乐.要素依赖性与结构异质性：战略性新兴产业背景下的“科学-技术”知识要素组合模式与转移路径分析[J]. 图书馆论坛，2025.

Element Dependence and Structural Heterogeneity: Analysis of “Science-Technology” Knowledge Element Combination Mode and Transfer Path under the Background of Strategic Emerging Industries

WANG Yuhang, WU Tianjun, KANG Lele

Abstract: The deep integration of cutting-edge basic science and emerging industrial technologies constitutes the core elements of the intersectionality, cutting-edge, and disruptive nature of strategic emerging industries. However, there is currently a lack of empirical research in analyzing the generation and development of knowledge elements of new quality productivity from the perspective of “science-technology” knowledge transfer. This article constructs four types of knowledge element combination patterns for the knowledge transfer process based on two dimensions: element dependence and structural heterogeneity, namely connected heterogeneous network, connected homogeneous network, discrete heterogeneous network, and discrete homogeneous network. At the same time, this article combines network structure entropy and transfer entropy to identify the “science-technology” knowledge transfer paths between different industries, and summarizes them into seven knowledge transfer modes: knowledge transfer, knowledge heterogeneity, knowledge homogenization, knowledge connectivity, knowledge discretization, connectivity heterogeneity, and connectivity homogenization. Finally, this article combines mutual information word frequency weights during the transfer process to extract knowledge elements in the transfer path, and conducts content analysis on the transferred knowledge elements. Our work provides an analytical framework and evolutionary model for the development of strategic emerging industries, thereby promoting the high-quality development of strategic emerging industries.

Keywords: New Quality Productivity; Knowledge Transfer; Frontier Basic Research; Strategic Emerging Industries; Integration of Science and Technology

0 引言

以新能源、新材料、先进制造、电子信息等为代表的战略性新兴产业作为新质生产力的关键领域，受到广泛关注。“战略性新兴产业”是指围绕关键性颠覆性技术突破而产生的，对经济社会全局具有重大引领带动作用的关键行业。目前讨论较少关注“科学-技术”融合如何影响新质生产力知识要素在战略性新兴产业内的产生、演化和扩散机制。战略性新兴产业依赖于多种要素的协同参与，在要素组合上高度依赖前沿科学要素的参与，呈现出“科学-产业”交织相容的态势^[1-2]。新兴产业发展有赖于前沿技术、社会制度和组织形式的协同演

化^[3-4]，然而目前的探讨在理解技术长期演化和创新驱动机制，尤其是在解释中国战略性新兴产业中的“新质生产力”要素产生扩散与发展机制上仍是“黑箱”^[3]。本文从“科学-技术”知识网络的要素组合模式、知识转移路径与转移类型、知识转移的内容分析等三个角度分析战略性新兴产业中新质生产力的演化与传播机制（如图1）。本文基于科学网络与知识网络的网络指标特征，使用因子分析将网络维度分为要素依赖性维度与结构异质性维度，以此将知识网络的要素组合模式类型化，分为四种网络：离散式均质网络、离散式异质网络、连通式均质网络与连通式异质网络。参考王超等^[5]识别知识网络传播路径方法，使用网络结构熵和转移熵识别出存在因果关系的“科学-技术”传播路径，根据网络类型将传播模式类型化，分为知识迁移、知识异质化、知识均质化、知识连通化、知识离散化、连通异质化、连通均质化七种转移模式。最后，本文统计网络社区层面的互信息，并根据互信息-词频的权重指标提取出7个战略性新兴产业中的“科学-技术”知识转移的主要知识要素内容。

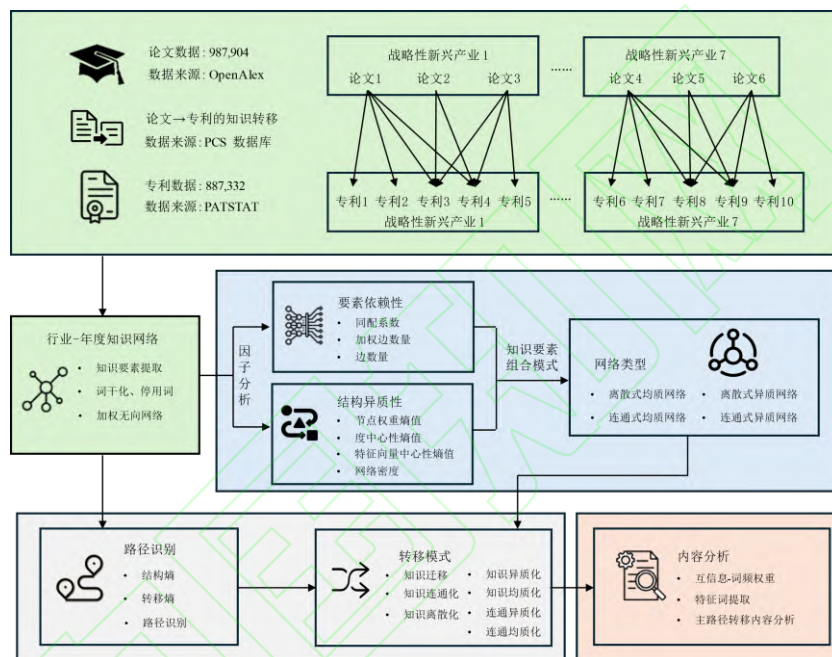


图1 本文分析框架示意图

1 知识要素组合模式与扩散机制

1.1 “科学-技术”知识转移

“科学-技术”知识转移是指将科学研究中获得的知识和理论通过各种方式应用到技术开发和产业实践中的过程^[6-7]，是新质生产力发展的关键驱动力。在“科学-技术”知识转移背景下，一种知识在转移的过程中表现为上游的科学要素形式和下游的技术要素形式。

1.2 知识要素组合模式

战略性新兴产业因为产业技术要素和前沿基础研究的紧密关联，在知识组合模式上呈现出显著的前沿性、交叉性和高度的不确定性的特点^[8]。目前研究主要从知识网络的要素依赖性和结构异质性两种维度分析知识要素的组合模式。知识要素的依赖性反映了知识要素之间持续性的关联与交互关系，依赖性将已获得一定影响力和稳定性的技术与那些仍处于变化状态而尚未出现的技术区分开来^[9]。知识要素的依赖性可以根据网络结构的变化来评估，网络节点的平均边数的增加或减少、两个节点之间的平均路径长度，以及其他网络指标被认为是技术要素产生变化的信号^[9-10]。知识要素的异质性被视为网络结构中不同子团体之间的变异程度，反映了技术要素的多样性^[11]。网络结构中更多样的技术聚类反映了

更丰富的技术方案,增加了知识要素重组创新的机会,不同技术方案形成溢出效应,能在现有基础上重新组合成新颖的优质替代方案,推动颠覆性新兴技术的更新换代^[12-13]。

1.3 知识要素扩散路径

目前研究关注新质生产力发展过程中的知识要素扩散。根据弗里曼和卢桑的新技术经济范式,新兴技术范式反映为新的技术要素和生产要素出现和扩散的过程,技术要素扩散会推动产业发展,形成相应的社会组织和制度规范,带来整个生产体制的变革^[14]。近年颠覆性技术对科学知识的依赖越来越大,科学知识与技术知识的融合通过提供更全面的解决方案和创新路径,加速了新质生产力发展,促进了科学技术转移^[6]。在研究方法方面,目前研究重视综合多种数据源,包括科学论文、专利数据和产业经济数据,以全面描绘这些领域之间的知识流动^[5,15]。同时,在分析“科学-技术”知识转移时,重视通过知识元素在网络中的结构位置与耦合关系分析知识流动的方向和内容^[5]。

2 相关工作概述

在战略性新兴产业中,科学与技术的知识转移和知识要素的组合模式及扩散机制是当前研究的重要领域。目前对于战略性新兴产业中“科学-技术”知识转移的讨论关注知识要素组合与知识要素扩散两方面内容。知识要素组合方面,侧重于对知识要素的关联与协同关系进行区分识别,进而识别技术集群、技术信号以及颠覆性技术;而知识要素扩散方面,研究侧重于对技术的传播路径、技术的扩散机制与融合特征、跨领域的技术影响等方面进行分析和评估。首先,知识要素组合模式涉及如何将不同的知识要素通过创新性的方式结合起来,形成新的技术结构和功能配置。相关研究重视分析知识要素之间的关联与协同关系,通过区分和识别这些关系,可以有效地识别出技术集群、技术信号及颠覆性技术^[12,13]。例如,依赖性分析帮助界定技术之间的连接强度和依赖程度,而结构异质性分析则揭示了技术之间的多样性和复杂性。其次,知识扩散与转移路径关注的是技术如何在不同的应用领域中传播和扩散。相关研究涉及技术要素在跨领域时的传播方式和机制,以及这些技术要素如何在新的环境中被采纳和融合^[6,14]。综上所述,战略性新兴产业中的知识转移和知识要素组合模式是理解和推动新质生产力发展的关键。本文主要围绕“科学-技术”知识转移、知识要素的组合模式,以及这些模式如何推动新质生产力的发展进行展开。

3 数据处理与变量测量

3.1 数据获取

新质生产力是指由技术革命性突破、生产要素创新性配置、产业深度转型升级而催生的先进生产力,一方面以战略性新兴产业为引导^[16],另一方面以前沿科学知识为核心构成要素^[17]。本文旨在从“科学-技术”知识转移视角分析战略性新兴产业中的新质生产力要素的发展过程,因此,将发生在战略性新兴产业内的、存在“科学-技术”知识转移的知识要素定义为“战略性新兴产业中具有新质生产力特点的知识要素”,这些知识要素源自战略性新兴产业内的专利文本,以及被这些专利引用过的论文文本。

本文参照国家知识产权局发布的《战略性新兴产业分类与国际专利分类参照关系表(2021)(试行)》^[18]中有关战略性新兴产业的划分,将产业领域界定为在新一轮科技革命和产业变革中与前沿基础研究存在知识交叉转移的7个重要颠覆性新兴产业,即新一代信息技术产业、高端装备制造产业、新材料产业、生物产业、新能源汽车产业、新能源产业、节能环保产业,如表1所示。值得注意的是,因为数字创意产业(设计产业、金融业、服务业等)中,专利并不是一种常用的知识产权保护形式,因此本文的分析内容中并未考虑数字创意产业领域。

在专利数据采集部分,本文根据《战略性新兴产业分类与国际专利分类参照关系表

(2021)(试行)》获得战略性新兴产业对应的专利分类号(IPC)的对应关系,最终获得战略性新兴产业与专利信息之间的映射关系。使用 PATSTAT 全球专利数据库^[19]和 OpenAlex 全球论文数据库^[20]获得专利与论文数据。PATSTAT 数据库已将中国专利文本内容翻译为英文版本。同时,只保留 OpenAlex 数据库中的英文论文进行分析。之后,通过专利和论文的引用关系建立起论文与专利的映射关系。根据 Marx 和 Fuegi^[2]发布的 Patent Citations to Science (PCS)数据库,本文建立专利和论文之间的引用关系,从 OpenAlex 全球论文数据库中筛选出 7 种战略性新兴产业专利曾经引用过的英文论文。最后,将引用过前沿基础科学、同时属于 7 种战略性新兴产业的专利判定为属于新质生产力的产业技术;而被新质生产力专利引用过的论文,则属于与新质生产力有关的前沿基础研究。最终,在 2000-2022 年的时间窗口期内,笔者从 PATSTAT 全球专利数据库中获得的专利数据有 887,332 份,而被这些专利引用过的论文则有 987,904 篇。

表 1 战略性新兴产业分类(2018)

行业序号	行业名称	行业内新质生产力发展状况介绍
1	新一代信息技术产业	新一代信息技术产业作为新质生产力的重要组成部分,其发展主要推动数据处理和信息传输的革命,包括云计算、大数据、物联网等技术应用,这些技术不仅提高信息处理的效率,还改变传统产业的运营模式,促进产业结构优化升级。
2	高端装备制造产业	高端装备制造产业通过引入智能制造和工业互联网等新技术,实现了生产过程的自动化和智能化。这不仅提升了产品的质量和生产效率,也促进了传统制造业的转型升级,使得生产力水平得到了显著提升。
3	新材料产业	新材料产业的发展带来了材料科学的突破,这些新材料如轻质高强材料、智能材料等,被广泛应用于多个领域,如航空航天、新能源汽车等。这些材料的应用不仅提高了产品性能,还有助于节能减排和环境保护。
4	生物产业	生物产业特别是在生物医药、基因编辑等领域的发展,推动了健康医疗和农业生物技术的进步。这不仅改善了人们的生活质量,还有助于食品安全和疾病控制,推动了生产力的质的飞跃。
5	新能源汽车产业	新能源汽车产业的发展促进了汽车产业的绿色转型。同时,电动车技术的进步也推动了相关产业如电池制造、智能网联技术的发展,加速了整个产业的创新和成长。
6	新能源产业	新能源产业包括太阳能、风能等可再生能源的开发利用,这不仅减少了环境污染,还改善了能源结构,促进了能源生产的可持续发展。此外,新能源的应用也带动了能源技术的创新和能源效率的提高。
7	节能环保产业	节能环保产业通过提供节能减排和污染治理的技术和产品,直接贡献于环境的改善和资源的可持续利用。这不仅有助于构建绿色低碳的社会,也是现代化经济体系中不可或缺的一环,推动了社会生产力的全面提升。
8	数字创意产业	专利数据不适用。

3.2 构建“科学-技术”时序网络

根据论文及专利的文本信息,分别构建出“年度-行业”的科学知识网络和技术知识网络。具体而言,将专利和论文中标题和摘要合并后,去除停用词,进行词干化后,选择每年前 1,000 个高频词,以单词共现关系为边,以共现频次为权重,构建“年度-行业”的无向加权知识网络图。每个年度的每个新兴产业内有一个科学网络和一个技术网络,共计 322 个网络观察样本。

表 2 主要网络指标与指标定义

指标	指标定义
节点权重熵值 Entropy of Node Weight	节点权重熵值用以衡量网络中各节点权重的分布不均匀性。如果节点权重在网络中分布得较为均匀,熵值会较低;反之,如果权重集中在少数几个节点上,熵值则较高。
度中心性熵值 Entropy of Degree Centrality	度中心性熵值用于衡量网络中节点度分布不均衡程度的指标。在网络中,度中心性熵值越高,意味着节点的度分布越不均匀,部分节点具有非常高的度,而大多数节点具有较低的度。
特征向量中心性熵值 Entropy of Eigenvector Centrality	特征向量中心性熵值使用特征向量中心性的熵值,衡量网络中节点的影响力不平衡性。特征向量中心性熵值越高,表示节点的影响力分布不均衡,部分节点具有较高的影响力。
网络密度 Network Density	网络密度是描述网络中连接的紧密程度的指标。它表示实际存在的边数量与可能存在的所有边数量之间的比率。网络密度越高,表示节点之间的连接越紧密,网络结构越复杂。
同配系数 Assortativity Coefficient	同配系数是一种用于衡量网络中节点度值之间相关性的指标。它描述了在网络中度较高的节点是否更倾向于连接到度较高的节点。度同配系数为正表示度正相关,为负表示度负相关,为 0 表示度随机分布。
边数量 Edge Number	边数量指的是网络中的边的数量,用来描述网络的连接关系。
加权边数量 Weighted Edge Number	加权边数量是指边的权重的总数。边的权重反映了节点的连接强度,更高的加权边数量反映了网络中地节点存在更强的连接关系。

3.3 因子分析与网络模式

因子分析揭示观察变量之间的潜在结构和相关性。本文使用因子分析找到可以解释观

察变量之间共同变异的潜在因子。参考相关文献^[21-25], 选择 7 个常用网络指标测量知识网络的结构特征: 节点权重熵值、度中心性熵值、特征向量中心性熵值、网络密度、同配系数、边数量和加权边数量。节点权重熵值反映网络的多样性, 度中心性和特征向量中心性被广泛用来测度网络节点影响力, 网络密度测量网络紧密度的常用指标, 同配系数反映节点间的相似性偏好, 边数量和加权边数量反映网络的规模和连接强度。具体指标含义及测量方法见表 2。本文将指标标准化后开展因子分析。表 3 提供因子分析的网络指标的原始数值与标准化后的数值, 标准化后均值均为 0, 标准差均为 1, 因此表格中仅提供标准化后的网络指标最大值和最小值。

表 3 网络指标描述性统计结果

指标	数量	均值	标准差	最小值	最大值	标准化后最小值	标准化后最大值
节点权重熵值	322	9.32	0.16	8.67	9.53	-4.10	1.32
度中心性熵值	322	9.87	0.19	8.46	9.97	-6.34	0.72
特征向量中心性熵值	322	9.89	0.18	8.44	9.97	-6.05	0.70
网络密度	322	0.74	0.29	0.06	0.99	-5.02	1.15
同配系数	322	-0.11	0.05	-0.25	-0.03	-3.04	1.96
边数量	322	369,552.10	147,209.30	10,452.00	493,274.00	-5.02	1.15
加权边数量	322	15,632,887.84	15,251,951.36	19,728.00	75,416,504.00	-1.21	3.52

3.4 “科学-技术”网络的路径识别

参照王超等^[5]的基于网络特征结构的路径识别方法, 本文使用网络结构熵反映“年度-行业”的科学知识网络和技术知识网络的网络结构特征。网络结构熵从拓扑结构的角度探索和定量化网络结构特征, 它主要反映知识网络的结构异质性。本文使用 Louvain 算法获得网络中的社区分布状况, 再基于结构熵计算出网络整体特征层面上的社区结构异质性。具体计算公式如式 (1)。根据结构熵数值, 本文计算出跨领域之间科学网络 x_t 和技术网络 y_{t+1} 的之间的传递熵转移关系, 当传递熵大于零, 网络结构 y_{t+1} 与 x_t 之间存在驱动关系, 即 x_t 的变化会影响 y_{t+1} 的变化; 若传递熵等于零, 则网络结构 y_{t+1} 与 x_t 互不影响, 彼此之间不存在驱动关系^[5]。

$$E_{com}(t) = - \sum_{i=1}^{M(t)} \left[\frac{c_{i,t}}{N_t} \log \frac{c_{i,t}}{N_t} \right] \quad (1)$$

3.5 转移路径中的内容识别

通过网络结构特征识别出有效的知识传播路径后, 本文再利用存在于知识传播路径中的社区互联信息明确指示传递的具体内容。本文使用行业之间专利和论文网络的互信息 (Mutual Information) 衡量网络之间的知识转移强度。互信息指的是两个随机变量共享的信息, 用于量化两个变量之间的相互依赖性, 即一个变量包含关于另一个变量的信息量, 使用 $I(X; Y)$ 表示。在本文中, 科学网络 x_t 存在 m 个网络知识社区, 技术网络 y_{t+1} 存在 n 个网络知识社区, 统计出科学网络社区 $C_t^{x_m}$ 和技术网络社区 $C_{t+1}^{y_n}$ 中存在的共享单词, 作为两个社区中的共享知识要素 N , 分别统计出共享知识要素 N 在科学网络社区 $C_t^{x_m}$ 中的边缘概率分布 $p(N_x)$ 、共享知识要素 N 在技术网络社区 $C_{t+1}^{y_n}$ 中的边缘概率分布 $p(N_y)$ 、共享知识要素 N 在科学网络社区 $C_t^{x_m}$ 和技术网络社区 $C_{t+1}^{y_n}$ 中的联合概率分布 $p(N_x, N_y)$, 计算获得在网络社区层面上的 $C_t^{x_m} \rightarrow C_{t+1}^{y_n}$ 的知识转移强度。具体见如式 (2)。最后结合转移知识要素的互信息与词频权重, 将行业之间的“科学-技术”知识转移路径进行可视化, 提取主要的转移知识要素, 对知识转移的具体路径内容进行分析。

$$\begin{aligned} I(C_t^{x_m}; C_{t+1}^{y_n}) &= H(C_t^{x_m}) - H(C_t^{x_m} | C_{t+1}^{y_n}) \\ &= H(C_t^{x_m}) + H(C_{t+1}^{y_n}) - H(C_t^{x_m}, C_{t+1}^{y_n}) \\ &= \sum_{C_t^{x_m}, C_{t+1}^{y_n}} p(N_x, N_y) \log \frac{p(N_x, N_y)}{p(N_x)p(N_y)} \end{aligned} \tag{2}$$

4 实证研究结果

4.1 知识组合模式区分

4.1.1 网络特征识别

通过因子分析找出能解释观察变量之间共同变异的潜在因子，有助于简化数据集并提取关键信息。如表 4，数据通过 KMO 检验和巴特利特球状度检验。KMO 是用来评估数据集中变量之间相关性的度量，取值范围介于 0 到 1。当 KMO 值大于 0.6 时，说明观察变量之间的相关性程度较高，能通过因子分析发现指标共性并找到潜在的因子结构。巴特利特球状度检验的 P 值小于 0.001，观察变量之间存在一定程度的相关性。这意味着观察变量之间可能存在一些共性或潜在结构，适合进行因子分析来揭示这些潜在因素。如图 2，本文使用了碎石图来确定提取因子的数量，通过特征根大于 1 的准则，确定提取 2 个公因子。

表 4 因子分析条件检验

KMO 检验	Bartlett's 球度检验	
	卡方值	p value
0.64	6.826.92	<0.001

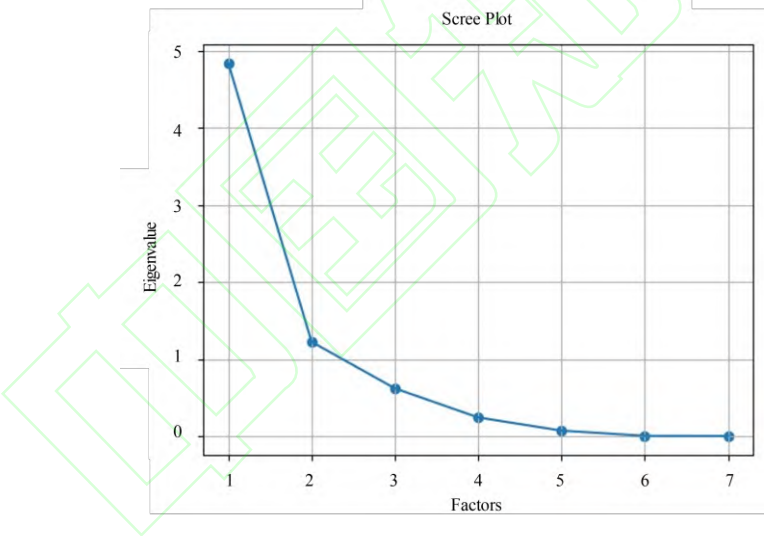


图 2 公因子选择碎石图

建立因子分析模型，并通过 Varimax 旋转来优化因子的解释性。如图 3 所示，基于因子分析，将 7 个网络指标降维成两个主要维度，分别是反映网络分布均衡程度的“结构异质性”维度和关注网络节点关联的紧密程度的“要素依赖性”维度。在图 3 中，每个指标在两个因子维度中具有更高因子载荷数值的维度，即为该指标所属的公因子维度。

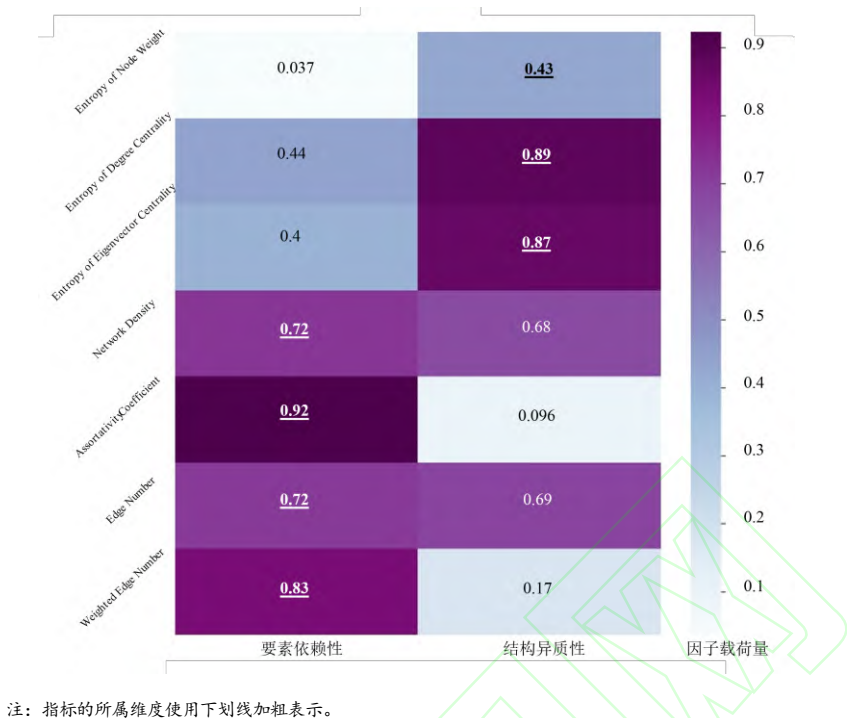


图 3 因子载荷热力图

结构异质性表述的是网络分布均衡程度，包括度中心性基尼系数、特征向量中心性基尼系数、网络密度和网络边数等指标。要素依赖性描述的是节点之间关联的紧密程度和彼此之间产生关联的倾向性，包括网络同配性系数和网络边权重数。如表 5 所示，2 个因子的特征值之和占特征值总和 80.44%，意味着两个因子解释了大部分变量信息。

表 5 因子分析特征值及方差贡献率

指标	特征根	方差贡献率	方差累计贡献率
要素依赖性	2.93	0.42	0.42
结构异质性	2.70	0.39	0.81

4.1.2 网络模式区分

根据“结构异质性”“要素依赖性”均值为分界，将科学网络和技术网络分为“低结构异质性-低要素依赖性”离散式均衡网络、“高结构异质性-低要素依赖性”离散式异质网络、“低结构异质性-高要素依赖性”连通式均衡网络和“高结构异质性-高要素依赖性”的连通式异质网络四种类型，如表 6。

表 6 知识要素组合模式类型

组合模式类型	要素依赖性	结构异质性
离散式均衡网络	低	低
连通式均衡网络	高	低
离散式异质网络	低	高
连通式异质网络	高	高

离散式异质网络是指网络中的结构异质性较高，但元素间的依赖性较低。离散式均衡网络是指网络中的结构异质性较低，元素间的依赖性也较低。在这种类型的网络中，各节点具有较为相似的性质和功能，且彼此之间的连接和依赖不强。连通式均衡网络是指网络

中的结构异质性较低，但元素间的依赖性较高。连通式异质网络是指网络中不仅结构异质性较高，元素间的依赖性也较高。如表 7 所示，本文依据专利和论文的知识网络，将 7 个战略性新兴产业的网络类型进行了具体划分。

表 7 战略性新兴产业的知识网络类型

产业名称	科学网络			技术网络		
	要素依赖性	结构异质性	网络类型	要素依赖性	结构异质性	网络类型
新一代信息技术产业	低	高	离散式异质网络	低	高	离散式异质网络
高端装备制造产业	低	高	离散式异质网络	低	高	离散式异质网络
新材料产业	高	高	连通式异质网络	高	高	连通式异质网络
生物产业	高	低	连通式均衡网络	高	高	连通式异质网络
新能源汽车产业	低	低	离散式均衡网络	低	低	离散式均衡网络
新能源产业	低	高	离散式异质网络	低	高	离散式异质网络
节能环保产业	低	高	离散式异质网络	高	低	连通式均衡网络

4.2 路径识别与转移模式

如表 8，根据知识网络转移路径演化特点，将知识传播路径区分为七种类型：知识迁移、知识异质化、知识均质化、知识连通化、知识离散化、连通异质化、连通均质化。

（1）“知识迁移”知识转移。“知识迁移”的知识转移侧重于跨产业的技术融合和创新应用，推动产业内新质生产力的持续发展和技术进步。

（2）“知识异质化”知识转移。“知识异质化”的技术转移，实际上是一种结构性的知识流动，它不仅仅是技术本身的转移，更是包括了生产组织形式、商业模式等一系列适应性的变化。

（3）“知识均质化”知识转移。此时源头基础研究的特点是各个节点（企业、研究机构和政府等）具有不同的资源和能力，这种网络结构有助于各种创新输入的多样性和丰富性，而下游产业技术网络的各个节点开始具有相似的能力和资源，促进了更有效率的知识共享和技术转移。

（4）“知识连通化”知识转移。“知识连通化”的知识转移增强了整个网络的协同效应和创新能力，使得知识流动的方式变得更加集成和连贯。

（5）“知识离散化”知识转移。“知识离散化”的知识转移重点在于如何管理和优化知识的流动，确保知识可以在保持其创新性的同时，有效转化为具有商业价值的技术成果。

（6）“连通异质化”知识转移。“连通异质化”的知识转移可以通过整合分散的研发成果和技术路径，形成统一的技术标准和生产流程，从而加速知识的落地和产业化进程。

（7）“连通均质化”知识转移。“连通均质化”的知识转移重视跨领域的技术融合和创新，要求技术知识在更广泛的范围内流动和应用，因此形成了更为连通和均衡的网络结构，以支持不同产业和技术领域之间的协作和知识共享。

表 8 基于网络结构特征转移熵的“科学-技术”行业领域知识转移路径识别

转移类型	Source: 科学	Target: 技术	转移熵	转移路径	
知识迁移	新一代信息技术产业	高端装备制造产业	0.01	离散式异质网络	→ 离散式异质网络
	新一代信息技术产业	新能源产业	0.09	离散式异质网络	→ 离散式异质网络
	新能源汽车产业	新能源汽车产业	0.03	离散式均衡网络	→ 离散式均衡网络
	新能源产业	新一代信息技术产业	0.04	离散式异质网络	→ 离散式异质网络
	新能源产业	高端装备制造产业	0.16	离散式异质网络	→ 离散式异质网络
	新能源产业	新能源产业	0.25	离散式异质网络	→ 离散式异质网络
	节能环保产业	高端装备制造产业	0.01	离散式异质网络	→ 离散式异质网络
	节能环保产业	新能源产业	0.01	离散式异质网络	→ 离散式异质网络
知识异质化	新能源汽车产业	新一代信息技术产业	0.02	离散式均衡网络	→ 离散式异质网络
	新能源汽车产业	高端装备制造产业	0.03	离散式均衡网络	→ 离散式异质网络

	新能源汽车产业	新能源产业	0.03	离散式均衡网络	→	离散式异质网络
知识均质化	新一代信息技术产业	新能源汽车产业	0.09	离散式异质网络	→	离散式均衡网络
	新能源产业	新能源汽车产业	0.14	离散式异质网络	→	离散式均衡网络
	新材料产业	节能环保产业	0.01	连通式异质网络	→	连通式均衡网络
	新能源汽车产业	节能环保产业	0.02	离散式均衡网络	→	连通式均衡网络
知识连通化	新能源产业	新材料产业	0.13	离散式异质网络	→	连通式异质网络
	新能源产业	生物产业	0.13	离散式异质网络	→	连通式异质网络
	新材料产业	高端装备制造产业	0.01	连通式异质网络	→	离散式异质网络
知识离散化	新材料产业	新能源产业	0.01	连通式异质网络	→	离散式异质网络
	新能源汽车产业	新材料产业	0.03	离散式均衡网络	→	连通式异质网络
连通异质化	新能源汽车产业	生物产业	0.03	离散式均衡网络	→	连通式异质网络
	新一代信息技术产业	节能环保产业	0.01	离散式异质网络	→	连通式均衡网络
连通均质化	新能源产业	节能环保产业	0.07	离散式异质网络	→	连通式均衡网络
	节能环保产业	节能环保产业	0.13	离散式异质网络	→	连通式均衡网络

4.3 传播路径中的知识要素

根据科学网络和技术网络的互联信息情况，绘制从科学到技术的知识转移情况，如图 4 所示。从科学领域、技术领域、转移主题及主要转移知识要素方面对“科学-技术”知识转移过程中的主要知识要素进行提取与分析。在选取高频知识要素时，结合知识要素在科学网络中的词频以及“科学-技术”网络转移过程中互信息权重，使用二者乘积测度每个特征词的重要性，将前 20 名作为转移路径中的主要知识要素。篇幅所限，仅讨论每个行业的上游基础知识转移强度最高的产业技术方向，见表 9。“科学-技术”知识转移内容说明当前战略性新兴产业发展中的技术融合与创新正在不断加速，技术创新在多个领域同时发生。同时，数据作为核心生产要素，已经成为战略性新兴产业的一个重要的生产要素。最后，科技与产业之间的联系越来越紧密，科技不仅推动产业升级，也直接催生新的产业形态。



图 4 “科学-技术”知识转移路径图

表 9 “科学-技术”知识转移主题与主要转移知识要素（部分）

科学领域	技术领域	转移主题	主要转移知识要素
新一代信息技术产业	高端装备制造产业	数据管理、系统优化、算法应用	system; model; data; base; network; algorithm; time; power; design; optim; inform; gener; effect; comput; improv; problem; high; process; perform; control
新材料产业	高端装备制造产业	材料性能、高效制备、表面反应	activ; high; structur; surfac; properti; composit; materi; cell; prepar; show; reaction; perform; effect; applic; catalyst; oxid; enhanc; temperatur; nanoparticl; method
新能源汽车产业	新一代信息技术产业	系统架构、网络智能、数据高效	system; network; data; perform; base; high; model; structur; properti; algorithm; time; power; surfac; control; composit; result; materi; design; scheme; effici
新能源产业	生物产业	数据分析、系统模型、性能测定	system; result; base; structur; surfac; control; model; materi; time; activ; data; measur; high; perform; power; differ; properti; current; analysi; composit
节能环保产业	高端装备制造产业	精密制造、耐用材料、质量控制	imag; model; base; data; detect; differ; system; high; featur; effect; structur; network; algorithm; show; activ; result; time; gener; increas; properti

5 结语

目前产业技术与基础科研在融合方式、发展轨迹以及创新组合模式上,展示了比以往更为复杂和多样的特点。因此,从“科技-技术”知识转移的角度来探讨战略性新兴产业中新质生产力的培育、成长、演变及其传播,对于当前中国的创新实践具有深远的意义。

本文创新性地将“科学-技术”知识网络中的要素组合模式细化为离散式均质网络、离散式异质网络、连通式均质网络和连通式异质网络四种类型。同时,本文采用网络结构熵和转移熵的方法,系统识别并分类了“科学-技术”知识的传播路径。此外,本文对知识转移内容进行了深入分析,通过统计网络社区层面的互信息并结合词频权重指标,有效地识别并提取了战略性新兴产业中的主要“科学-技术”知识转移要素。

本文的分析结果有助于从政策实践角度上,对未来跨领域的“科学-技术”培育与融合工作开展有针对性的政策指导。相关企业可以结合相关产业内的基础科学和产业技术特征,开展有效的产学研融合和基础研究产业化孵化工作。在具体性的政策建议方面,本文有助于政策制定者强化政策支持的针对性和灵活性、优化知识产权保护机制以及搭建多层次的知识转移平台。

参考文献

- [1] 高帆.“新质生产力”的提出逻辑、多维内涵及时代意义[J].政治经济学评论,2023,14(6):127-145.
- [2] MARX M,FUEGI A.Reliance on Science: Worldwide Front-Page Patent Citations to Scientific Articles[J].Strategic Management Journal,2020,41(9):1572-1594.
- [3] 李瑞.创新驱动的新质生产力——工业革命的历史考察[J/OL].科学学研究,2024:1-15[2025-1-10].<https://doi.org/10.16192/j.cnki.1003-2053.20240929.001>.
- [4] 杜传忠,疏爽,李泽浩.新质生产力促进经济高质量发展的机制分析与实现路径[J].经济纵横,2023(12):20-28.
- [5] 王超,许海云,齐砚翠,等.知识网络视角下科学、技术、产业间创新驱动关系识别方法研究[J].情报学报,2024,43(1):10-24.
- [6] KONG J,ZHANG J,DENG S,et al.Knowledge Convergence of Science and Technology in Patent Inventions[J].Journal of Informetrics,2023,17(3):101435.
- [7] HEWITT-DUNDAS N.Research intensity and knowledge transfer activity in UK universities[J].Research Policy,2012,41(2):262-275.
- [8] 沈梓鑫,江飞涛.未来产业与战略性新兴产业的创新与新质生产力:理论逻辑和实践路径[J].暨南学报(哲学社会科学版),2024,46(6):115-129.
- [9] ROTOLO D,HICKS D,MARTIN B R.What is an Emerging Technology?[J].Research Policy,2015,44(10):1827-1843.
- [10] BETTENCOURT L M A,KAISER D I,KAUR J,et al.Population Modeling of the Emergence and Development of Scientific Fields[J].Scientometrics,2008,75(3):495-518.
- [11] LIN L H,GENG X J,WHINSTON A B.A Sender-Receiver Framework for Knowledge Transfer[J].MIS Quarterly,2005,29(2):197-219.
- [12] VAN DEN BERGH J C J M.Optimal Diversity: Increasing Returns versus Recombinant Innovation[J].Journal of Economic Behavior & Organization,2008,68(3):565-580.
- [13] FLEMING L.Recombinant Uncertainty in Technological Search[J].Management Science,2001,47(1):117-132.
- [14] 弗里曼,卢桑.光阴似箭:从工业革命到信息革命[M].沈红亮,译.北京:中国人民大学出版社,2007.
- [15] IKEUCHI K,MOTOHASHI K,TAMURA R,et al.Measuring science intensity of industry using linked dataset of science, technology and industry[EB/OL].RIETI.(2017)[2025-01-10].<https://www.rieti.go.jp/jp/publications/dp/17e056.pdf>.
- [16] 胡洪彬.习近平总书记关于新质生产力重要论述的理论逻辑与实践进路[J].经济学家,2023(12):16-25.
- [17] 夏银平,申正.从渗透要素到核心构成:新质生产力对科学技术的身份变革[J].宁夏社会科学,2024(4): 107-114.
- [18] 国家知识产权局.战略性新兴产业分类与国际专利分类参照关系表(2021)(试行)[EB/OL].(2021)[2025-01-06].https://www.cnipa.gov.cn/art/2021/2/10/art_75_156716.html.

- [19] DE RASSENFOSSE G, DERNIS H, BOEDT G. An Introduction to the Patstat Database with Example Queries[J]. Australian Economic Review, 2014, 47(3): 395-408. DOI: 10.1111/1467-8462.12073.
- [20] PRIEM J, PIWOWAR H, ORR R. OpenAlex: A fully-open index of scholarly works, authors, venues, institutions, and concepts[EB/OL]. arXiv. (2022)[2025-01-06]. <http://arxiv.org/abs/2205.01833>. DOI: 10.48550/arXiv.2205.01833.
- [21] 陈玲, 孙君, 孔文豪, 等. 国际科技创新中心发展模式的聚类分析与比较[J]. 科学学研究, 2024, 42(9): 1967-1978.
- [22] DONG J Q, YANG C H. Being Central is a Double-Edged Sword: Knowledge Network Centrality and New Product Development in US Pharmaceutical Industry[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2016, 113: 379-385. DOI: 10.1016/j.techfore.2016.07.011.
- [23] HOFFMANN C P, LUTZ C, MECKEL M. A Relational Altmetric? Network Centrality on ResearchGate as an Indicator of Scientific Impact[J]. Journal of the Association for Information Science and Technology, 2016, 67(4): 765-775. DOI: 10.1002/asi.23423.
- [24] KHANNA R, GULER I. Degree Assortativity in Collaboration Networks and Invention Performance[J]. Strategic Management Journal, 2022, 43(7): 1402-1430. DOI: 10.1002/smj.3367.
- [25] AHUJA G, SODA G, ZAHEER A. The Genesis and Dynamics of Organizational Networks[J]. Organization Science, 2011, 23(2): 434-448.

作者简介 王宇航, 南京大学信息管理学院/南京大学数据智能与交叉创新实验室博士研究生; 吴天骏, 南京大学信息管理学院/南京大学数据智能与交叉创新实验室硕士研究生; 康乐乐 (通信作者, lelekang@nju.edu.cn), 南京大学信息管理学院/南京大学数据智能与交叉创新实验室教授、博士生导师。

收稿日期 2024-11-18

(责任编辑: 刘洪)