

科技强国目标下中国科学成果的技术转化效应

——基于全球专利引文网络的多维评估

易先忠 查龙 潘锐*

摘要:作为全球科学论文最大产出国,中国国际科学论文究竟在多大程度影响了技术创新?由于缺乏基于微观科学—技术转化的衡量方法与国际比较,既有研究难以评估中国科学成果的技术转化效应及其与科技强国建设目标的差距。本文基于全球专利引文网络的海量数据,运用大数据处理方法,在破解科技强国建设中战略性技术领域科学—技术精准映射难题的基础上,通过构建科学—技术转化综合效能指数和基于国际知识引用网络加权 PageRank 模型,多维度量化比较了 2000~2024 年中国在全球科学—技术转化网络中的影响力和中国科学知识流向。研究发现:无论是在全领域、第四次工业革命核心技术领域还是“卡脖子”技术领域,中国国际科学论文在全球科学—技术转化网络中的影响力均已跨越式提升,已成为全球技术创新的重要知识来源。中国国际科学成果大量被国外专利转化,是全球技术创新的重要推动力量,本土转化虽然进步明显,但仍有提升空间,整体呈现“高全球影响力与低本土转化”的显著特征。导致这一现象的深层原因在于,面向本土技术需求的科学供给不足,以及本土企业对科学成果的吸收转化能力不强。

关键词:科学—技术转化 专利引文网络 科技强国 基础研究

* 易先忠(通讯作者),教授,南京审计大学经济学院,电子邮箱:yixianzhong007@163.com;查龙,硕士研究生,南京审计大学经济学院,电子邮箱:18070193131@163.com;潘锐,博士研究生,华东师范大学经济与管理学院,电子邮箱:pr1999414@163.com。本文获得国家社会科学基金重大项目(25&ZD110)、国家社会科学基金项目(25BJY033)和江苏省习近平新时代中国特色社会主义思想研究中心专项课题(23ZXZB035)的资助。本文未使用 AI。感谢匿名审稿专家的宝贵意见,文责自负。

一、引言

“科技自立自强水平大幅提高”是“十五五”时期经济社会发展的主要目标之一,也是实现“2035年建成科技强国”目标的关键一环。自 Bush(1945)确立“科学推动”创新范式以来,科学研究对技术创新的作用得到广泛认同(亢延锬等,2022;胡凯和王炜哲,2023)。基于这一理论共识,中国科学研究在过去20余年间实现了跨越式发展,根据《中国科技统计年鉴2024》,中国SCI论文发表数量在2000~2022年间增长26倍,居全球第1位。同时,中国科学研究成果的学术影响力也实现了历史性跃升,根据《2023年中国科技论文统计报告》,中国2013~2023年累计被引次数进入全球前1%的高被引论文占全球30.8%,居世界第2位。

“论文大国”向“技术强国”转变是建设科技强国的关键。一国科学研究能力与技术创新之间的关系并非简单的线性对应。特别是在全球化的知识流动网络中,具有可编纂性、显现性和流动性等特征的科学研究成果可能服务于其他国家的技术创新(Johnson等,2002),形成“研究在此、受益在彼”的复杂知识流动格局。因此,准确测度中国科学研究成果对技术创新的影响,不仅是评估中国科技实力的重要指标,更是推进“科技自立自强水平大幅提高”的关键依据。

如何有效测度科学研究对技术创新的影响,是学界关注的核心议题。现有研究主要从知识流动与人才流动两个方面测度“科学—技术”转化效应。第一,基于知识流动量化科学向技术转化,包括显性和隐性知识转化测度两个方面。在显性知识转化测度方面:一是以“科学—技术关联”作为主要测度方法,通过测量专利对科学文献的引用数量衡量科学知识向技术创新的转化程度(Roach和Cohen,2013);二是产学研合作产出效应测度,通过校企联合专利申请、技术转让合同金额等指标反映产学研协同转化成果(张艺等,2024);三是知识内容追踪测度,基于知识基因构建专利—论文链接网络,追踪科学知识在专利间的传播轨迹(张生太等,2022)。在隐性知识转化测度方面,主要通过量化科学出版物对技术创新的知识溢出效应来评估转化效应(Lian等,2025)。第二,基于人才流动的测度方法,通过量化科研人员在科技成果转化过程中的中介与桥梁作用,评估知识转化效应的强度。一是基于网络分析等方法,统计科研机构向企业输送创新人才的规模与质量,进而衡量创新人才对企业技术创新绩效的促进效应(Wang等,2023);二是测度技术转让经纪人等专业化中介在科技转化活动中的转化成功率,从而评估中介服务对知识转化速率的作用(Terhorst等,2024);三是分析博士后、科学企业家等高层次科研人员在学术界与产业界之间的跨界流动所带来的知识转化效应(Hayter等,2022)。

既有测度方法在解答“中国科学研究多大程度影响创新”这一问题时,面临三个层面的挑战。一是战略性技术领域科学—技术精准映射的技术挑战。对中国科技强国建设具有关键意义的第四次工业革命核心技术领域和“卡脖子”技术领域,

这两个维度的科技转化效应评估需要准确识别其所依托的核心支撑学科体系,但由于缺乏基于大规模引文数据构建“技术—学科”映射方法,导致无法准确评估战略性新兴产业领域支撑学科的转化效应。二是缺乏基于微观科学—技术转化的宏观衡量方法困境下的结论分歧。一方面,基于知识流与人才流的宏观研究普遍发现高校科学研究与企业技术创新之间存在明显脱节(Cao等,2023;张杰和白铠瑞,2022);而另一方面,基于专利引文分析(Qiu等,2022)和案例研究(张艺等,2024)却表明,中国科学研究在部分领域显著促进了技术创新。这一“宏观脱节”与“微观繁荣”研究悖论的根源在于现有研究缺乏基于微观转化的宏观度量方法,制约了对中国科技成果技术转化效应的认知。三是主流测度方法的系统性局限。现有主流研究主要通过专利引用科学文献的频次来衡量显性知识转化,或者通过产学研合作度量潜在的知识流动。这一测度体系既不能体现科学研究被产业技术吸收利用的相对强度、转化速率和地理辐射范围等特征,也难以刻画各国科学研究成果在全球技术创新网络中的影响力、知识流向以及网络地位变迁,从而也难以以为中国科学—技术转化效能与科技强国差距提供科学参照系和决策依据。

鉴于此,本文构建了一个多层次、多维度的科学—技术转化效应评估框架,将中国科学研究的影响力置于全球创新网络中进行量化比较,并分析中国科学知识的流动格局。以美国、德国、日本、中国等10个主要创新国家2000~2024年数据为样本,包括这10个国家在世界五大知识产权局下的5372万余项发明授权专利以及引用的1009万余篇国际论文、这10个国家的3063万余篇国际论文及引用这些论文的236万余项全球专利,运用大数据处理方法,通过以下两个层面的方法创新,实现对中国科技成果影响力的有效评估与国际比较。

第一,构建科学—技术转化的双维度测度方法,系统评估中国科技成果对全球技术创新的影响。本文提出两个互补性指标:其一,基于熵权—TOPSIS模型,创新性构建包含吸收强度、转化速率、技术渗透、空间辐射的科学—技术转化“综合效能指数”,运用批量文件遍历算法、正则表达式匹配法等大数据处理方法,测度中国国际科学成果转化为技术创新的综合水平;其二,基于国际知识引用网络构建加权PageRank模型,运用矩阵运算、迭代收敛计算等大数据处理方法,测度中国在全球科学—技术转化网络中的结构性影响力。两个维度相结合,既能评估中国科学知识“转化得好不好”,又能识别其在全球网络中“影响力大不大”,为全面评估中国科技成果对全球技术创新的贡献提供了可靠的测度工具。

第二,在破解战略性新兴产业领域科学—技术映射难题的基础上,构建了“全领域—第四次工业革命核心技术领域—‘卡脖子’技术领域”的递进式分析框架,系统刻画中国国际科学研究成果在不同层面的转化效应及科学知识流向。这一递进式分析框架基于科技强国建设的战略目标需求:第四次工业革命核心技术领域代表了全球科技发展的前沿方向,是科技强国建设必须抢占的战略制高点;而“卡脖子”技术领域则是中

国科技自立自强的重点攻坚领域。为此,本文破解这两大领域的科学—技术精准映射难题,基于专利对科学知识的引用模式构建“技术分类—学科分类”的映射矩阵,实现对复杂技术领域多学科知识来源的精确识别,并对关键支撑学科科学知识流向进行精细化追踪,为评估中国科技强国建设的科学制约提供精准依据。

基于上述方法创新,本文系统揭示了中国国际科学论文影响全球技术创新的真实图景和中国建设科技强国的科学供给制约。本文证实了无论在全领域、第四次工业革命核心技术领域还是“卡脖子”技术领域,中国科学成果已成为全球相关技术创新的重要知识支撑,这说明中国基础研究已具备支撑“高水平科技自立自强”的知识基础。更为重要的是,本文发现中国国际科学成果大量被国外专利转化,本土转化能力需要进一步加强。这一发现识别了科技强国建设的核心症结,具有深刻的政策含义,有助于修正“基础研究薄弱是中国创新瓶颈”的传统认知,揭示了实现科技强国目标的关键制约并非仅在于基础研究总体水平,更在于面向本土技术需求的科学供给结构失衡与本土转化不足,为推进科学研究供给侧改革、构建本土需求导向的科研体系提供了现实依据。

二、方法与数据

为系统评估中国国际科学研究成果对全球技术创新的影响,融合科学—技术转化“综合效能指数”与“结构性影响力”两个维度,构建可用于国际比较的双维度测度方法。“综合效能指数”通过熵权—TOPSIS模型综合吸收强度、转化速率、技术渗透、空间辐射四个维度,反映一国科学知识向技术转化的综合表现水平。相比之下,基于国际知识引用网络的加权PageRank模型通过递归权重算法和知识输出稀释效应,能有效刻画一国科学知识在全球创新网络中的“结构性影响力”。一国科学知识的网络拓扑地位不仅取决于其“被引数量”,也取决于“被谁引用”和“引用国的引用行为是否集中”,这些因素共同影响一国在全球知识网络中的结构性影响力。递归权重算法使得来自高PageRank值国家的引用能更大幅度地提升接收引用国的影响力,知识输出稀释效应使引用国的影响力按其对各被引国的引用权重比例进行分配。双维度的内在逻辑关系在于:“综合效能指数”着重测度单个国家科学知识向技术转化的综合表现,回答“转化得好不好”的效能评价问题;“结构性影响力”则衡量该国在全球科学—技术转化网络中的“结构地位”,回答“影响力大不大”的地位识别问题。

(一)科学—技术转化综合效能指数

为突破以专利引文频次衡量科学—技术转化效应的局限性,参考已有研究(Jiang等,2024;Liu和Lu,2025),构建涵盖吸收强度、转化速率、技术渗透、空间辐射四个维度的综合效能评价体系,并通过熵权—TOPSIS模型生成“综合效能指数”。

1. 科学—技术转化效应四维度

吸收强度为一国被专利引用的论文数量与其同期发文总数之比。该指标衡量科学知识被技术吸收的程度,反映科学研究成果对技术创新体系实际需求匹配水平,减少高频但低价值引用的干扰(Jiang等,2024)。高吸收强度表明科研体系具备“技术实践问题导向型”研究能力。

转化速率通过测算科学论文发表至被专利引用的时间长度,刻画科研知识向技术应用的转化速率。该指标有效弥补了引文频次指标忽视时间维度的缺陷,能够反映不同国家科学成果向技术转化速率方面的差异性,公式为:

$$EF_{it} = [1 + e^{-(time_{it}-\mu_i)/\sigma_i}]^{-1} \quad (1)$$

其中,下标*i*是指国家,*t*是指年份,*time*是指一国*t*年论文的发表时间到引用了科学论文所有专利的授权时间的平均跨度, μ 和 σ 分别是指*t*年所有国家科学论文转化时间平均跨度的均值和方差。

技术渗透指标通过分析引用科学成果的专利CPC分类号分布,评估科学知识对技术领域的覆盖广度,弥补以往评价体系无法量化转化广度的不足(Liu和Lu,2025),公式为:

$$TP_{it} = \left(\frac{n+1}{n} \right) - \left[\frac{2 \sum_{j=1}^n j \times y_j}{n \sum_{j=1}^n y_j} \right] \quad (2)$$

按照专利在各技术领域(CPC分类号)中的分布数量从小到大排序,下标*j*表示序号, y_j 表示排序后第*j*个技术领域的专利数量。*n*表示技术领域总数, $\sum_{j=1}^n y_j$ 是所有技术领域的专利数量之和, $\sum_{j=1}^n j \times y_j$ 是序号与对应专利数量乘积的累加和。

空间辐射衡量一国科研成果对国际技术体系的地域辐射范围,该指标是评价其国际影响力与技术溢出效应的重要维度,公式为:

$$SDI_{it} = \sum_{k=1}^3 w_k \frac{N_{it}^k}{T^k} \quad (3)$$

其中, N_{it}^k 是指第*k*梯队中引用国家*i*论文的国家数量, T^k 是指第*k*梯队的国家总数, w_k 为权重系数。考虑来自高创新能力国家的专利引用应贡献更高的辐射分数,根据《2024年全球创新指数报告》排名将国家分为三个梯队:第一梯队高创新能力国家,如美国和中国等,权重为0.5;第二梯队中等创新能力国家,其余国家归属于第三梯队,权重分别为0.3和0.2。

2. 熵权—TOPSIS模型

运用熵权—TOPSIS模型整合吸收强度、转化速率、技术渗透、空间辐射四维指标,构建“综合效能指数”。一方面,该模型利用熵权法能解决权重分配问题,有效规避了赋权偏差;另一方面,结合TOPSIS方法引入正负理想解,能够测算各指标的数值与最优解和最劣解之间的相对距离,进而得出反映科学—技术转化综合表现

的指数(Xueshan等,2025)^①。

(二)基于国际知识引用网络的加权PageRank模型与三维网络中心性指标的互补验证

1. 基于国际知识引用网络的加权PageRank模型

基于国际知识引用网络的加权PageRank模型测度各国科学成果在全球知识网络中的结构性影响力。在PageRank算法的基础上,加权PageRank模型引入引用数量作为边权重,构建加权转移矩阵。这一改进体现了“重要节点的认可更有价值”的网络效应原理,并利用知识输出稀释效应实现引用影响力合理分配,从而更真实地反映国家间知识流动的实际依赖关系及其网络传导效应(Baranyi等,2024)。算法通过递归迭代,量化在全球知识网络中的结构性影响力,核心迭代公式如下所示:

$$PR^{(t+1)} = \frac{(1-d)}{N} \times I + d \times M \times PR^{(t)} \quad (4)$$

其中, d 表示阻尼因子,在专利引用网络中通常为0.5(Chen等,2007); N 表示网络节点的总数量, I 表示单位向量; M 为归一化后的加权转移矩阵; $PR^{(t)}$ 为第 t 次迭代的PageRank值向量。当迭代结果满足收敛条件时,输出最终的PageRank值(公式推导过程详见附录2)。

2. 三维网络中心性指标

为了检验测度结果的稳健性,引入度中心性、介数中心性与接近中心性三类经典网络中心性指标进行补充验证。不同中心性指标从不同角度揭示节点地位:度中心性聚焦直接连接规模,介数中心性测度在知识链条中的重要程度,接近中心性衡量知识扩散效率(公式说明详见附录3)。

(三)样本与数据

依据《2024年全球创新指数报告》,选取瑞士、瑞典、美国、英国、韩国、芬兰、荷兰、德国、中国、日本10个国家用于对比国际科学成果的技术转化效应。2024年这10个国家发明专利授权占全球86.28%。尽管本文以10个主要创新国家为样本,但在构建科学—技术转化网络以及确定战略性技术领域科学—技术映射时,多处运用全球的专利与论文数据。以The Lens平台作为核心数据来源,从该平台中获取2000~2024年10个国家在世界五大知识产权局下的全球专利和国际论文。基于第四次工业革命技术演进轨迹和标志性发展节点,将2000~2024年划分为四个阶段:技术基础构建期(2000~2010年),以信息化与自动化技术的深度融合为核心特征;概念形成期(2011~2015年),以2011年德国首次提出“工业4.0”为标志;技术成熟期(2016~2020年),在2016年世界经济论坛达沃斯年会正式提出“第四次工业革命”

^① 关于熵权—TOPSIS模型公式,详见附录1。本文附录详见《数量经济技术经济研究》杂志网站,下同。

概念,并扩展至涵盖人工智能等多维领域;深度融合期(2021~2024年),以5G通信技术、人工智能等深度融合为标志。

三、科学—技术转化效应的整体评估

(一)科学—技术转化综合效能指数的测度与国际比较

1. 数据处理与指标计算

基于2000~2024年10个国家的完整科学论文—专利引用数据构建指标,包括3063万余篇国际学术论文元数据及剔除重复引用后的236万余项全球专利信息。具体步骤如下:第一步,通过批量文件遍历算法对数据文件进行逐年处理,运用正则表达式匹配技术提取信息,并整合完整的时间序列数据。第二步,计算每篇论文发表时间到每项引文专利授权时间的转化周期,运用式(1)生成转化速率指数。第三步,解析专利CPC分类号,运用式(2)对技术分布范围量化。第四步,构建空间辐射分析模块,识别专利申请人国别,运用式(3)计算各国的空间辐射。第五步,基于熵权—TOPSIS模型对四个维度进行客观权重计算,然后计算正负理想解距离,最终生成10个国家科学—技术转化“综合效能指数”,数据详见附录4。

2. 中国科学—技术转化效应的整体评估与国际比较

10个国家“综合效能指数”测度结果如图1所示,中国的“综合效能指数”在2000~2024年实现了历史性跃迁,从2000年的第10位跃升至2024年的第4位,是排

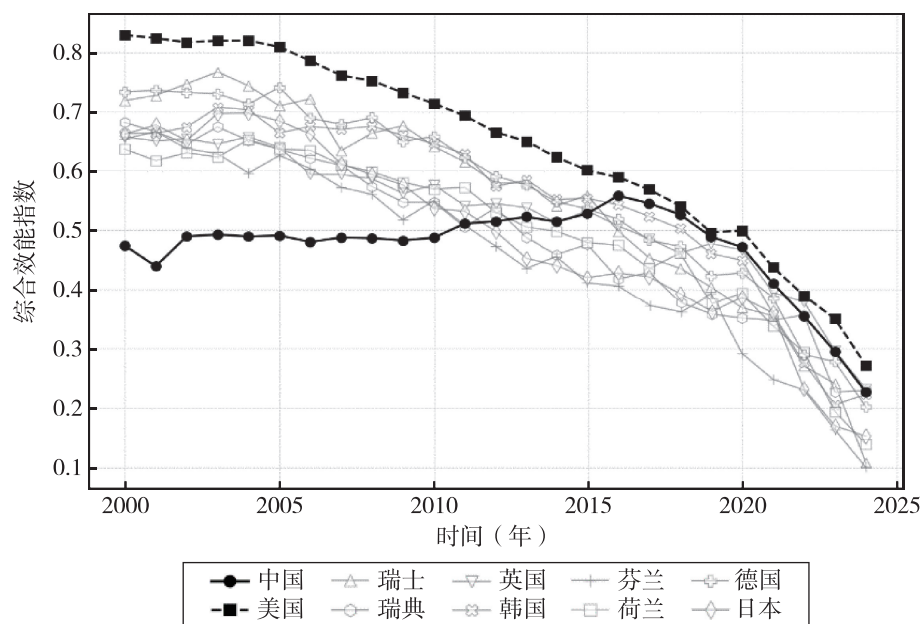


图1 10个国家的科学—技术转化“综合效能指数”:全领域

注:由于“综合效能指数”受引文“数据截断”影响,各国的“综合效能指数”呈现下降趋势。但这种影响在所有国家都是对称存在,因而并不影响国际比较。以下涉及“综合效能指数”的测度相同,如表4和表7。

名提升幅度最大的国家,标志着中国国际科学成果对全球技术创新的重要性不断提升。并且,中国与传统科技强国的差距发生了根本性逆转。与美国的效能差距从2000年的0.356大幅缩小至2024年的0.045,实现了从显著落后到接近并跑的战略转换;与德国从2000年的0.260劣势缩小至2024年的0.025领先;与日本从2000年的0.188差距到2012年开始实现持续反超,也超过了瑞士等国家。

为剖析中国科学—技术转化效能跨越式提升的维度特征,进一步将“综合效能指数”分解为吸收强度等四个维度进行国际比较。结果表明,中国科学—技术转化效能的提升主要体现在吸收强度、转化速率和空间辐射三个方面,而在技术渗透维度存在相对短板,详见附录5。

(二)中国国际科学成果在全球科学—技术转化网络中的影响力

基于10个国家的5372万余项授权发明专利,以及这些专利引用的1009万余篇全球各国的国际论文,构建包含数千万条的科学—技术转化网络数据集。具体方法为:第一步,从原始引用记录中提取每条引用关系的国家信息,将论文—专利引用数据转换为标准化的网络流动格式。第二步,统计各国间的引用强度,计算每对国家间的知识流动权重,构建国家知识流向矩阵,归一化处理得到转移矩阵。第三步,基于加权PageRank模型,将转移矩阵中知识来源国和知识流向国转换为网络节点,进行迭代计算和运用收敛判断机制,最终输出各国的影响力指数。

测度结果如表1所示,各国影响力演变呈现两大特征。其一,中国实现了跨越式发展。其PageRank值大幅跃升,排名从第9位攀升至第2位,先后超越了英国、德国和日本等传统科技强国。这反映出中国科学研究正从边缘节点向核心枢纽转变。其二,美国始终占据主导地位。其PageRank值虽有些回落,但依然远超其他国家,表明美国是全球科技网络的核心知识源。各国全球科学—技术转化网络中的影响力格局正从美国独大的“单极格局”向“美中并立”的双极格局转变。三维网络中心性指标印证了加权PageRank模型揭示的核心趋势,数据详见附录6。

表1 全领域各国科学成果在全球科学—技术转化网络中的影响力

2000~2010年		2011~2015年		2016~2020年		2021~2024年	
国家	PageRank 值	国家	PageRank 值	国家	PageRank 值	国家	PageRank 值
美国	0.405	美国	0.348	美国	0.347	美国	0.332
日本	0.037	日本	0.034	中国	0.049	中国	0.079
德国	0.023	德国	0.033	日本	0.027	日本	0.022
英国	0.016	中国	0.032	德国	0.025	英国	0.021
韩国	0.010	英国	0.024	韩国	0.021	韩国	0.020

(续)

2000~2010年		2011~2015年		2016~2020年		2021~2024年	
国家	PageRank 值	国家	PageRank 值	国家	PageRank 值	国家	PageRank 值
瑞士	0.010	瑞士	0.017	英国	0.019	德国	0.018
荷兰	0.010	韩国	0.014	瑞士	0.016	瑞士	0.014
瑞典	0.009	荷兰	0.012	荷兰	0.011	荷兰	0.010
中国	0.007	瑞典	0.012	瑞典	0.009	瑞典	0.007
芬兰	0.005	芬兰	0.006	芬兰	0.005	芬兰	0.005

(三)科学成果本土转化的国际对比

中国的“综合效能指数”和结构性影响力都实现大幅度上升,表明中国国际科学研究成果已成为全球技术创新的重要知识来源。需要进一步分析的问题是,中国国际科学成果知识流向情况。基于10个国家3063万余篇国际学术论文和引用这些论文的236万余项全球专利数据,通过计算这些专利中的本土专利比例,能揭示各国科学成果的本土转化程度。如表2所示,国际科学知识本土转化的国际对比表明,其一,美国始终处于领先地位,尽管美国本土转化占比略微下降,但远超其他国家。其二,中国的本土转化水平有所提升,但落后于美国、日本、德国等。2000~2010年中国本土专利占比仅为0.043,到2021~2024年,中国本土转化占比提升至0.177,实现了显著增长,但与美国、德国、日本等主要创新国家仍存在较大的差距。

表2 国际比较:引用本国论文的全球专利中本土专利比例

时期	瑞士	瑞典	美国	英国	韩国	芬兰	荷兰	德国	日本	中国
2000~2010年	0.068	0.059	0.595	0.071	0.087	0.037	0.062	0.120	0.191	0.043
2011~2015年	0.090	0.058	0.587	0.082	0.148	0.048	0.075	0.131	0.175	0.058
2016~2020年	0.107	0.083	0.547	0.091	0.214	0.058	0.114	0.155	0.203	0.108
2021~2024年	0.149	0.119	0.507	0.125	0.347	0.101	0.124	0.229	0.267	0.177

表3进一步展示了中国科学知识的具体流向,可以发现中国科学知识自主供给显著提升,但中国科学知识本土转化相对较低,而美国是吸收中国科学知识的主体。中国本土专利引用占比2000~2010年仅为4.26%,在2021~2024年期间升至17.71%,但美国仍以30.94%占据首位,德国、韩国、日本也分别占据7.08%、6.98%、5.03%的份额。这表明中国大量科学知识为国际技术创新提供了知识支撑。

表3 中国科学知识流向:各国引用中国国际论文的专利占比

单位:%

2000~2010年		2011~2015年		2016~2020年		2021~2024年	
国家	百分比	国家	百分比	国家	百分比	国家	百分比
美国	51.27	美国	49.47	美国	40.83	美国	30.94
日本	6.14	中国	5.83	中国	10.80	中国	17.71
德国	5.81	日本	5.46	韩国	6.88	德国	7.08
中国	4.26	德国	5.21	德国	5.57	韩国	6.98
法国	3.89	韩国	5.07	日本	5.16	日本	5.03
英国	3.48	法国	3.78	法国	4.26	法国	4.99
韩国	3.37	英国	3.43	英国	3.58	英国	3.86
瑞士	2.21	瑞士	2.69	荷兰	2.39	瑞士	2.63
加拿大	2.16	荷兰	1.88	瑞士	2.39	荷兰	1.97
荷兰	1.71	加拿大	1.86	加拿大	1.70	西班牙	1.74

注:由于引用中国国际论文的国家较多,每个时期仅展现百分比前十的国家。

四、第四次工业革命核心技术领域科学—技术转化效应评估

(一)4IR 核心技术领域范围

基于欧洲专利局发布的《专利与第四次工业革命:赋能数据驱动型经济的全球技术趋势》,确定第四次工业革命(The-Fourth-Industrial-Revolution, 4IR)核心技术领域为IT硬件、软件和连接技术领域,以及对应的CPC分类号范围^①。为准确识别各国4IR核心技术领域,采用专利的主CPC分类号作为判断标准,因为专利主分类号能够准确地定义技术所属领域范围。

(二)识别4IR核心技术的支撑学科

通过分析全球共计2091469项4IR核心领域的授权专利及这些专利引用的全球326068篇论文,构建“技术分类—学科分类”映射矩阵。该方法的核心逻辑在于,专利对科学论文的引用数量直接揭示科学研究成果向技术创新转化的强度与路径,通过构建这种引用关系矩阵,可以系统性地识别和量化技术领域所依托的学科支撑体系。数据处理方法为:第一步,把数据转化为网络结构,先按学科分类统计汇总4IR核心技术领域的专利引用的科学论文数量,构建包含学科分类、CPC分类号和引用数量的数据结构。第二步,通过R语言将引用数量转化为可视化权重,并构建技术领域—学科映射矩阵图(详见附录8),揭示了4IR三大核心技术领域主要依赖于计算机科学、人工智能、计算机网络学科知识。进一步对4IR核心技术领域引用的学科分布进行频次累加,构建学科分布格局,结果表明,计算机科学、人工智能、计算机网络和分布式计算等十大学科,构成了4IR核心技术领域主要支撑学科(详见附录9)。

^① 资料见官网:<https://www.epo.org/trends-4IR>。4IR核心技术领域的描述及对应的CPC分类号范围,详见附录7。

(三)4IR 核心技术领域支撑学科的转化效应评估与分指标对比验证

整合 10 个国家十大支撑学科的 7622847 篇国际论文以及引用这些论文的 1223856 项全球授权专利,以评估 4IR 核心技术领域支撑学科的转化效应(数据处理同全领域的“综合效能指数”测度)。测度结果如表 4 所示,呈现以下两个特征。其一,中美两国转化效应呈现典型的“追赶收敛”特征。在 2000~2010 年,美国(0.869)领先中国(0.655),处于优势地位。然而,伴随全球 4IR 的深入推进,两国差距呈现持续性收敛态势,在 2021~2024 年,中美差距锐减至 0.009,这表明中国在该领域的跨越式追赶成效。其二,从全球科技竞争版图的视角审视,中国在 2021~2024 年已成功跻身全球第 2 位,赶超了瑞士、荷兰、德国等科技强国,为新一轮科技革命的全球科技创新格局重塑注入了强劲动力。进一步分析“综合效能指数”四维度,反映出中国在 4IR 核心技术领域以吸收强度和空间辐射为核心的科学—技术转化能力提升(详见附录 10)。

表 4 各国 4IR 核心技术领域支撑学科的科学—技术转化“综合效能指数”

时期	瑞士	瑞典	美国	英国	韩国	芬兰	荷兰	德国	中国	日本
2000~2010 年	0.757	0.665	0.869	0.742	0.799	0.725	0.708	0.783	0.655	0.717
2011~2015 年	0.672	0.600	0.838	0.682	0.708	0.544	0.616	0.664	0.670	0.568
2016~2020 年	0.524	0.528	0.724	0.599	0.676	0.534	0.554	0.566	0.652	0.538
2021~2024 年	0.415	0.389	0.474	0.439	0.393	0.300	0.401	0.408	0.465	0.388

(四)4IR 核心技术领域中国科技成果的全球影响力

基于 4IR 核心技术领域的 CPC 分类体系,收集 10 个国家的 1654369 项 4IR 核心授权专利及这些专利引用的全球 321202 篇国际科学论文数据,运用加权 PageRank 模型对数据实施迭代运算,量化 4IR 核心领域各国科学成果在全球科学—技术转化网络中的影响力。测度结果如表 5 所示,呈现以下两个特征。其一,中国正从全球科技转化网络的边缘节点快速向核心枢纽转变。中国 PageRank 值大幅上升至 2021~2024 年的 0.114,全球排名升至第 2 位。这一变化反映了中国在 4IR 核心技术领域的科学研究国际影响力显著增强,与表 1 中的演变趋势相似。其二,全球知识流动呈现“双中心”演进格局。美国在 4IR 核心技术转化网络中始终保持领导地位,表明其在该领域中科学知识输出的持续优势;中国的影响力超越了日本、德国等传统科技强国;日本影响力持续衰减,排名跌至第 4 位;德国、英国、瑞士等国家的影响力则维持了相对稳定。这说明全球知识流动格局正在发生结构性变化,形成了以美国为核心枢纽、中国快速崛起的双中心网络结构^①。

^① 运用度中心性、介数中心性和接近中心性验证加权 PageRank 算法所测结论的稳健性,详见附录 11。

表5 4IR核心技术领域各国科学成果在全球科学—技术转化网络中的影响力

2000~2010年		2011~2015年		2016~2020年		2021~2024年	
国家	PageRank	国家	PageRank	国家	PageRank	国家	PageRank
美国	0.414	美国	0.382	美国	0.402	美国	0.331
日本	0.053	日本	0.038	中国	0.031	中国	0.114
德国	0.023	德国	0.033	日本	0.021	韩国	0.023
韩国	0.013	英国	0.025	德国	0.020	日本	0.018
英国	0.012	中国	0.016	韩国	0.017	德国	0.015
荷兰	0.009	韩国	0.014	英国	0.014	英国	0.013
瑞典	0.009	瑞典	0.012	瑞典	0.009	瑞典	0.008
瑞士	0.008	瑞士	0.011	瑞士	0.008	瑞士	0.007
芬兰	0.008	荷兰	0.010	荷兰	0.008	芬兰	0.007
中国	0.006	芬兰	0.009	芬兰	0.008	荷兰	0.006

(五)中国4IR核心技术领域支撑学科的科学知识流向

图2揭示了2000~2024年中国4IR核心技术领域支撑学科的科学知识流向。美国成为吸收中国4IR核心技术领域支撑学科科学知识的主体。4IR核心技术领域前四大支撑学科知识流向美国的流带较大,计算机科学流向美国的知识流量较多,这反映出中国对这一领域科学成果的本土转化有待增强。

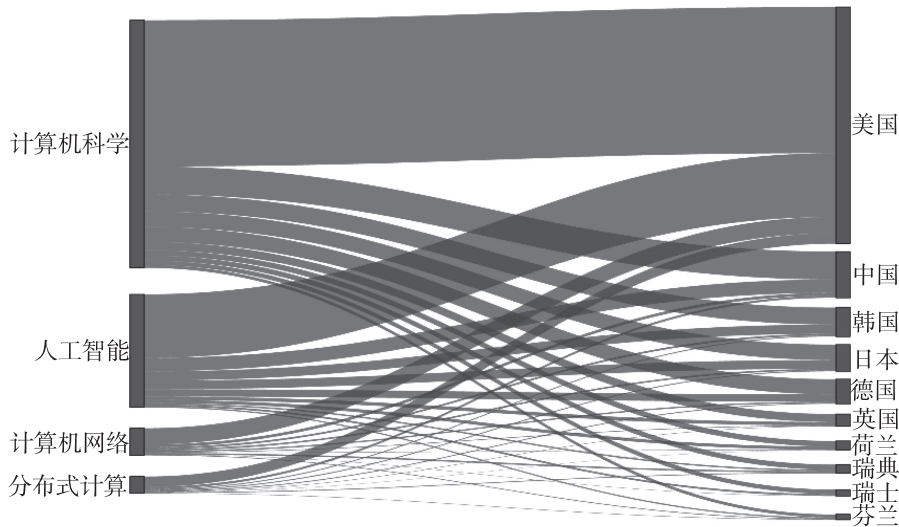


图2 中国4IR核心领域支撑学科的科学知识流向:2000~2024

注:左侧为科学知识源头,右侧为流向国家,中间的流带通过宽度大小反映了各学科知识的流量规模。为了便于区分支撑学科的知识流向,仅展示科学知识分布占比超过1%的学科,其余六大支撑学科知识流向详见附录12。

表6进一步展示了各国4IR核心技术领域支撑学科科学成果被本土专利引用情况。结果显示,其一,美国、日本、德国等科技强国的科学知识被本土专利引用占比较高,如美国本土转化率始终保持在50%以上。其二,2000~2024年,中国的本土转化率从4.16%大幅提升至15.08%,但与国际相比仍存在较大提升空间,说明中国生产的科学知识仍亟待实现本土转化,助力科技强国建设。

表6 国际比较:引用本国4IR十大支撑学科论文的全球专利中本土专利比例

单位:%

时期	瑞士	瑞典	美国	英国	韩国	芬兰	荷兰	德国	日本	中国
2000~2010年	4.60	6.29	62.15	6.38	8.97	2.99	6.23	13.65	22.06	4.16
2011~2015年	7.09	7.63	57.62	7.34	14.77	5.27	10.02	14.90	21.79	6.20
2016~2020年	7.94	10.13	53.49	7.56	19.17	6.35	12.78	16.40	22.73	10.74
2021~2024年	10.58	10.07	50.13	10.02	32.14	10.62	13.14	24.07	23.58	15.08

总之,中国的“综合效能指数”和全球结构性影响力都仅次于美国,说明中国在4IR核心技术领域支撑学科的科学研究成果对全球相关技术创新具有重要影响,中国正成为新一轮科技革命下全球科技格局重塑的重要力量。

五、中国“卡脖子”技术领域科学—技术转化效应评估

(一)识别中国“卡脖子”技术领域

“卡脖子”技术是指在关键环节高度依赖外部供给,且尚未实现自主可控的核心技术。参考陈劲等(2020),以G03F(光刻技术)和H01L(半导体器件)作为中国“卡脖子”代表性技术领域。原因在于,G03F涵盖光刻工艺等,是芯片制造中重要领域;而H01L则系统涵盖了半导体材料、器件结构等,这两个领域在全球产业链中长期被部分发达国家垄断。

(二)识别“卡脖子”技术的支撑学科

通过构建“卡脖子”技术领域与学科分类之间的映射矩阵(方法与“识别4IR核心技术领域的支撑学科”相同),识别“卡脖子”技术领域的支撑学科。结果如图3所示,G03F与H01L两个“卡脖子”技术领域与多个学科密切关联,体现了其背后复杂的科学支撑体系,但具有以下明显特征。其一,材料科学呈现出最大的节点规模,表明该学科向G03F和H01L两大技术领域输送最大规模的科学知识。其二,纳米技术、光学、复合材料与光电子学等学科节点规模也相对较大,构成了支撑“卡脖子”技术领域的次级支撑学科群体。因此,这五大学科构成“卡脖子”技术领域的核心支撑学科。

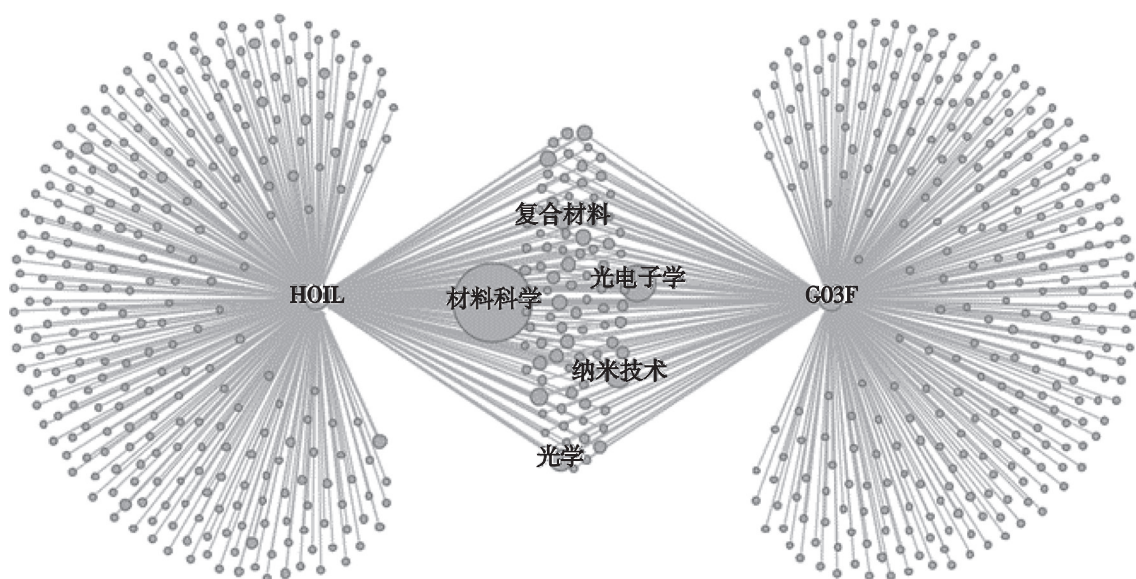


图3 “卡脖子”技术领域的支撑科学

注:每个节点为一个学科,节点大小为知识流出量,为了便于分析,只展示了科学知识流出量前五名的学科。

(三)“卡脖子”技术领域支撑学科的转化效应评估

基于“卡脖子”技术领域五个核心支撑学科的562万余篇国际科学论文和引用这些论文的123万余项全球专利,测度五个核心支撑学科的转化效应(数据处理同全领域的“综合效能指数”测度)。测度结果如表7所示,美国在各时期均保持领先地位,中国则呈现出“追赶”态势。2000~2010年,中国明显滞后于美国、日本、韩国、瑞士、德国、英国等国,在2011~2015年实现对日本的赶超,2016~2020年超过德国和英国,2021~2024年超过韩国,展现出强劲的追赶势头。这表明,中国“卡脖子”技术的支撑学科正成为全球相关技术的重要科学知识来源。进一步对综合效能四维度指标进行国际比较,也支持这一基本结论,详见附录13。

表7 “卡脖子”技术支撑学科的科学—技术转化“综合效能指数”

时期	瑞士	瑞典	美国	英国	韩国	芬兰	荷兰	德国	中国	日本
2000~2010年	0.754	0.652	0.871	0.745	0.794	0.656	0.730	0.758	0.657	0.732
2011~2015年	0.629	0.626	0.815	0.662	0.701	0.528	0.632	0.666	0.636	0.586
2016~2020年	0.486	0.490	0.683	0.568	0.642	0.523	0.539	0.529	0.624	0.508
2021~2024年	0.353	0.335	0.440	0.374	0.351	0.276	0.379	0.351	0.420	0.352

(四)“卡脖子”技术领域中国科技成果的全球影响力

为深入剖析中国科技成果在“卡脖子”技术领域全球科技转化网络中的结构性影响力,采集2000~2024年10个国家在“卡脖子”技术领域的完整科学论文—专利引用数据,涵盖530782项授权专利信息以及这些专利引用的全球79221篇国际科学论文信息。运用加权PageRank模型对数据集进行递归计算,测算各国科学在“卡脖子”技术领域科学—技术转化网络中的影响力水平。测度结果如表8所示,表现为两个特征:其一,相对于中国科技成果的整体影响力(见表1)和4IR核心技术领域的全球影响力(见表5),中国科技成果在“卡脖子”技术领域的全球影响力相对不足。2021~2024年中国的PageRank值仅位居第5位,这意味着突破核心技术“卡脖子”需要基础研究能力的进一步提升。其二,中国科技成果的影响力增强,排名上升。这表明中国科学研究在“卡脖子”技术领域正成为全球科技网络中的重要增长极。使用度中心性、介数中心性和接近中心性三维指标验证了这一基本结论的稳健性,详见附录14。

表8 “卡脖子”技术领域各国科技成果在全球科学—技术转化网络中的影响力

2000~2010年		2011~2015年		2016~2020年		2021~2024年	
国家	PageRank	国家	PageRank	国家	PageRank	国家	PageRank
美国	0.396	美国	0.345	美国	0.337	美国	0.334
日本	0.070	日本	0.065	日本	0.052	荷兰	0.049
德国	0.030	韩国	0.041	荷兰	0.039	日本	0.043
荷兰	0.019	德国	0.035	中国	0.034	韩国	0.035
韩国	0.014	荷兰	0.024	韩国	0.034	中国	0.031
英国	0.009	中国	0.014	德国	0.029	德国	0.021
瑞典	0.008	英国	0.014	英国	0.009	英国	0.013
芬兰	0.007	瑞士	0.010	芬兰	0.009	瑞典	0.011
中国	0.007	瑞典	0.008	瑞士	0.008	瑞士	0.010
瑞士	0.007	芬兰	0.007	瑞典	0.007	芬兰	0.008

(五)中国“卡脖子”技术领域关键支撑学科的知识流向

中国在“卡脖子”技术领域科学产出成果已呈现显著的数量优势,在复合材料、材料科学、纳米技术、光学和光电子学五个核心学科领域中,中国论文发表数量均大幅超越美国,详见附录15。但存在明显的知识外溢现象,如图4所示。这一知识流向格局说明,无论是材料科学、复合材料,还是纳米技术、光学和光电子学等领

域,中国科学知识对国际上的贡献量,均超过中国本土的吸收量。这意味着一方面中国“卡脖子”技术领域已具有突出的科学成果产出优势,另一方也体现出中国本土知识转化能力仍需进一步提升。

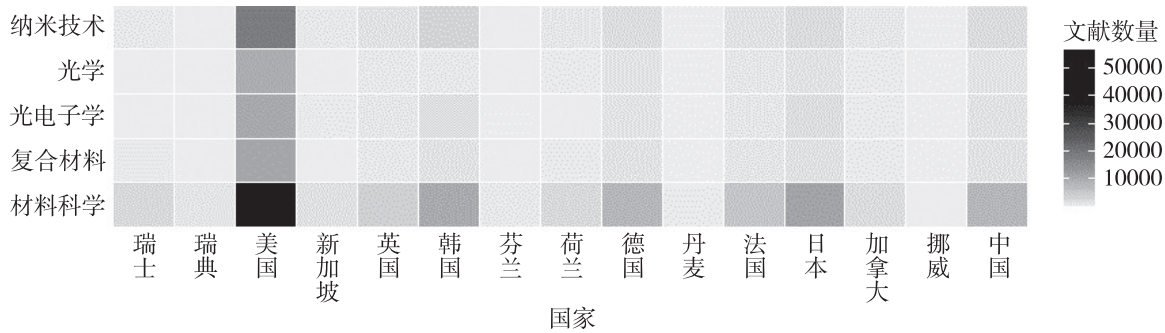


图4 中国“卡脖子”技术领域支撑学科的科学知识流向:2000~2024

表9进一步展示了各国引用“卡脖子”技术领域五大支撑学科论文的全球专利中本土专利的占比情况。相比美国、日本、德国、韩国等国家,中国本土专利占比虽有增长但存在较大提升空间。

表9 国际比较:引用本国“卡脖子”技术五大支撑学科论文的
全球专利中本土专利比例 单位:%

时期	瑞士	瑞典	美国	英国	韩国	芬兰	荷兰	德国	日本	中国
2000~2010年	4.88	5.42	56.64	7.17	8.42	3.41	7.44	14.96	23.14	3.74
2011~2015年	7.13	7.95	56.70	8.83	16.62	6.78	12.18	16.82	23.84	5.25
2016~2020年	8.55	9.95	52.94	10.33	22.89	9.63	17.88	19.35	26.38	9.73
2021~2024年	14.08	14.84	49.38	14.72	40.36	21.43	20.88	30.92	27.42	16.68

总之,无论是科学—技术转化“综合效能指数”,还是在全球科学—技术转化网络中的地位,都表明中国“卡脖子”技术支撑学科的科学研究成果已经成为全球相关技术的重要科学知识来源。

六、基于研究主体的拓展分析

已证明无论是在全领域、第四次工业革命核心技术领域还是“卡脖子”技术领域,中国国际科学论文影响力均已跨越式提升,但本土转化能力仍需进一步增强。需进一步探究中国主要研究主体的表现。鉴于中国科学—技术转化综合效能和

PageRank 值显著提升主要集中在 2021~2024 年,聚焦于这一重要阶段,并依据已有文献(张艺等,2024),选取大学、企业、科研院所和医疗机构四大基础研究主体,探索这四大主体的转化效能与知识流动特征。

(一)中国四大研究主体科学—技术转化综合效能及分指标对比

对大学、科研院所、企业和医疗机构四大研究主体进行综合效能和分指标对比分析,结果如表 10 所示。知识供给占比指标印证了大学和科研院所是中国科学研究知识的主要源头(Cao 等,2023)。大学的知识供给占比达到 88.30%,表明大学是科学知识的主要供给者,科研院所次之,而企业和医疗机构的知识供给占比较低。从“综合效能指数”来看,大学以 0.943 居首位,领先于科研院所(0.698)、企业(0.591)和医疗机构(0.513)。

表 10 中国四大研究主体的科学—技术转化“综合效能指数”及分指标对比

主体类型	知识供给占比	吸收强度	转化速率	技术渗透	空间辐射	综合效能指数
大学	88.30%	0.027	0.568	0.483	0.589	0.943
企业	2.10%	0.028	0.627	0.349	0.307	0.591
医疗机构	2.30%	0.023	0.156	0.390	0.290	0.513
科研院所	7.30%	0.021	0.710	0.532	0.388	0.698

各研究主体在科学—技术转化中“各有所长”,但中国大学成为全球科学—技术转化网络中的重要力量。大学作为综合效能最强的主体,其优势集中体现在多维度的均衡发展上。大学在技术渗透和空间辐射两个维度上均表现优异,这可能得益于大学广泛的国际学术交流网络和人才流动机制等。科研院所转化速率高达 0.710,在四类研究主体中居首位,说明科研院所的科学成果能快速转化为技术。企业产出的科学知识类似于科研院所,具有“快速响应”的特点。医疗机构在转化速率上表现相对滞后,“综合效能指数”仅为 0.513,在所有分项指标上均处于相对较低水平。

(二)中国四大研究主体科学知识流动格局与国际比较

图 5 展示了中国四大研究主体生产的科学知识国际流动格局。从整体流向看,美国在吸纳中国各类研究主体科学知识方面占据主导地位,其节点规模明显大于中国和其他国家。这一科学知识流动格局表明,无论是从事基础研究的大学与科研院所,还是注重应用导向的企业与医疗机构,其生产的科学知识均面临本土转化相对不足的问题。

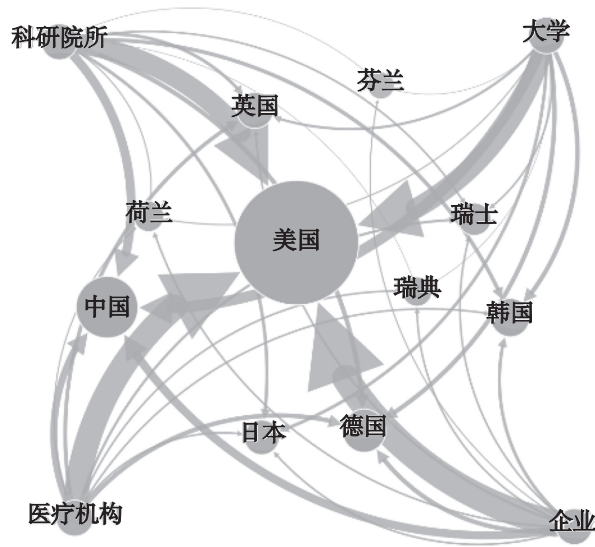


图5 中国四大研究主体的科学知识流向

注：箭头指标表示科学知识流向，线条宽度反映知识的流量规模百分比，节点大小反映接收科学知识规模。

国际对比进一步印证了科学成果本土转化相对不足的问题在中国四大研究主体普遍存在。如表11所示，美国、德国、日本等国的四大研究主体生产的科学知识主要被本土专利引用和吸收。美国四类研究主体的本土引用占比均稳定保持在48%~55%之间，德国占比均值为20.34%，日本企业达到28.23%。相比之下，中国四大主体生产的科学知识本土转化相对不足。中国大学的科学成果本土转化为17.02%，科研院所为14.84%，企业为14.69%，医疗机构仅为11.65%。

表11 国际比较：引用本国四大主体科学论文的全球专利中本土专利百分比
单位：%

主体类型	瑞士	瑞典	美国	英国	韩国	芬兰	荷兰	德国	日本	中国
大学	11.75	10.87	50.54	10.85	33.34	8.91	11.16	20.36	25.03	17.02
企业	14.13	14.34	54.73	8.26	25.44	6.29	12.17	21.72	28.23	14.69
医疗机构	13.16	9.33	50.64	11.75	18.82	6.62	9.28	17.20	7.75	11.65
科研院所	11.62	4.76	48.87	13.28	30.02	8.73	7.51	22.10	23.66	14.84

七、“高全球影响力与低本土转化”的深层逻辑简析

中国国际科学成果转化格局是语言障碍、科研导向、评价体系、产学研协同、企业吸收能力、金融支持等多重因素交织作用的结果。这一转化格局表明，中国科研体系在知识生产和知识应用两个环节上呈现一定的阶段性特征。在知识生产端，

中国已深度参与全球学术合作与知识创造,形成了具有较强国际影响力的科学成果,并对全球技术进步作出积极贡献;在知识应用端,科研成果向国内产业发展和国家战略需求的转化衔接仍需进一步增强。

(一)面向本土需求的科学供给不足

长期以来,中国科学研究在一定程度上受到 Bush(1945)“科学推动”范式的影响,强调不以直接实用目标为导向的自由探索,并依托 Merton(1942)提出的“科学精神”实现科学共同体的规范治理。在这一范式下,科研活动较多被视为生产普适性知识的重要过程,并强调科学知识的开放性与共享性。这一取向一方面推动了中国科学研究深度融入全球学术体系并不断提升国际影响力,另一方面也使科研成果面向国内产业实践和国家战略需求的转化机制仍存在不足,由此产生了两个方面的深刻影响。一是价值导向上,过度追踪国际学术热点与全球公共品价值,对本土经济主战场与国家重大需求响应不足;二是实践上,将科学发现视为创新源,把企业创新视为下游转化,形成了“接力式”创新分工(孙喜和窦晓健,2019)。这种“默顿式”范式也继承了其固有不足,即科学研究与技术发明的普遍脱节(Bartunek 和 Rynes, 2014; Amara 等, 2019)。自 20 世纪 70 年代以来,科学社会学已强调知识生产的“情境化”(Nowotny 等, 2001)和“用途启发型基础研究”(Stokes, 1997)。在此背景下,部分基础研究更多通过国际学术体系实现知识传播与价值彰显,从而在一定程度上形成了中国科学研究国际贡献突出而国内转化仍有提升空间的认知基础。

(二)学科导向科研供给与本土技术需求的错位

国际学术话语体系下学科导向科研是“高全球影响力与低本土转化”的制度诱因。高校集中了全国超 88% 的基础研究论文产出,学科建设是中国高等教育发展的主要途径,但长期以来,“以什么口径来评价学科”的关键问题没有达成共识。在国际顶刊主导全球学术话语权的背景下,“以评促建”的量化考核机制逐步使得学科评估体系依赖国际期刊论文产出作为学科建设的核心绩效度量(孙喜和窦晓健,2019),驱动研究者深度嵌入以西方学科前沿为主导的全球学术锦标赛。这种学科导向科研模式造成了追踪学术热点与本土技术需求的系统性错位。

表 12 高影响力论文占比与引用高影响力论文的全球专利中本土专利占比

单位:%

时期	高影响力论文百分比				引用高影响力论文的全球专利中本土专利百分比			
	美国	德国	日本	中国	美国	德国	日本	中国
2000~2010 年	68.53	12.26	10.45	8.77	59.23	11.75	16.45	4.24
2011~2015 年	57.32	12.18	7.84	22.66	58.43	12.35	17.48	6.19

(续)

时期	高影响力论文百分比				引用高影响力论文的全球专利中本土专利百分比			
	美国	德国	日本	中国	美国	德国	日本	中国
2016~2020年	47.15	10.59	6.33	35.92	52.90	13.54	18.96	10.72
2021~2024年	35.99	8.21	5.02	50.78	49.49	19.80	23.10	16.53

注:测度方法详细说明见附录16。

如表12所示,数据结果有力印证了学科导向科研模式的不足。学科导向科研模式下,中国高影响力论文全球占比由2000~2010年的8.766%跃升至2021~2024年的50.781%。然而,同期中国高影响力论文的本土专利引用率仍低于国际水平。这说明,中国在高影响力学术成果的国际供给能力持续增强的同时,其面向国内技术创新和产业应用的转化效能仍有进一步提升空间。究其根源,在学科导向科研模式下,高校科学研究以国际期刊论文产出作为学科建设的核心绩效,尽管国家级科研计划有意吸纳产业界声音,但主导权仍在学术共同体手中,企业的技术痛点难以有效传导至科研立项源头。其结果便是大量科研成果从诞生之初与本土产业亟须解决的“卡脖子”技术难题存在显著鸿沟。这种追踪国际学术热点的学科导向型科研取得的研究成果虽易于在全球知识网络中传播并获得认可,却由于与本土技术需求脱节而难以本土转化。

(三)本土企业对科学知识的转化吸收能力不足

科学—技术转化环节的缺陷进一步强化了“高全球影响力与低本土转化”格局。科学成果的本土转化需要应用导向的知识生产、科学成果识别评估与吸收、中试熟化验证、工程化应用的价值实现链条。然而,本土企业对科学知识的转化吸收能力不足导致这一链条存在多处关键断裂。

从转化前端看,产学研协同知识生产模式滞后是企业吸收转化科学知识的重要障碍。如表13所示,2000~2010年,中国国际论文的产学研合作比例仅为1.25%,显著低于美、德、日同期水平;即便到2021~2024年,该比例上升至2.22%,与发达国家的差距仍呈扩大趋势。究其深层机理,企业参与基础研究是提升对科学知识吸收转化能力的重要途径,但中国企业基础研究投入比例偏低,企业在科学知识生产阶段的参与度较低(郑世林等,2024),导致从源头上识别和内化前沿科学成果的能力受限。同时,兼具深厚科学背景与商业转化能力的“科学企业家”群体匮乏,导致产学研协同面临实质性的人才断层与转译机制缺失。这种因基础研究投入不足与跨界领军人才匮乏构成的“双重约束”,极大地削弱了企业对科学知识的吸收转化能力,最终产生了Amara等(2019)所描述的“转化前丢失”形式的科学—技术脱节。

表 13 产学研协同生产论文占比与吸收国际科学知识的企业集中度

时期	产学研协同生产论文百分比				吸收国际科学知识的企业集中度			
	美国	德国	日本	中国	美国	德国	日本	中国
2000~2010年	4.63%	7.25%	4.69%	1.25%	0.465	0.589	0.548	0.643
2011~2015年	6.01%	9.18%	6.44%	1.55%	0.488	0.517	0.537	0.663
2016~2020年	7.09%	11.03%	7.92%	1.68%	0.527	0.521	0.448	0.755
2021~2024年	8.47%	12.41%	10.34%	2.22%	0.458	0.516	0.428	0.688

注:①产学研协同测度方法说明见附录 17。②集中度指标说明见附录 18。

从转化末端看,中国企业对国际科学知识的吸收与转化能力呈现出一定的结构性特征。如表 13 所示,各个时期中国能吸收科学知识的企业集中度相对高于美国、德国和日本,表明中国企业吸收科学知识的能力相对集中于少数企业。进一步从企业微观视角,分析引用国际科学论文的企业专利占比,中国前十企业合计占比高达 70.89%,呈现出相对集中的态势;相比之下,美国、德国、日本各头部企业占比分布也相对均衡,体现出多元化的吸收格局(详见附录 19)。这表明,中国在科学知识吸收与转化方面已形成一批能力较强的领先企业,但整体上仍存在企业间能力分布不均衡的问题,特别是中小企业在相关能力建设方面仍有较大提升空间,从而在一定程度上制约了科研成果在国内更广范围内的转化应用。

与中国本土转化体系仍在持续完善的阶段性特征相对应,部分发达国家已形成较为成熟的科技成果转化生态,拥有跨国企业、专业投资机构以及较强的工程化与产业化能力,能够更高效地识别、吸收并整合全球高价值科研成果。在这一背景下,中国科学研究成果不仅为本国创新发展提供了重要知识供给,也通过全球创新网络为国际技术进步作出了积极贡献。与此同时,由于中国在成果转化链条、企业吸收能力和工程化衔接机制等方面仍有进一步提升空间,部分源自中国的科学发现更多率先进入国际研发体系并转化为技术发明,这也体现出中国科学知识国际贡献较强而国内转化应用仍需加强的阶段性特征。

八、结论与政策启示

作为全球科学论文最大产出国,中国国际科学论文究竟多大程度影响了技术创新?为回答这一问题,本文基于全球专利引文网络的海量数据,运用批量文件遍历、正则表达式匹配、收敛判断等大数据处理技术,构建了融合科学—技术转化“综合效能指数”与“结构性影响力”的双维测度方法,将中国科学研究的影响力置于全球专利引文网络中进行量化比较。并从科技强国建设的战略逻辑出发,构建了“全领域—第四次工业革命核心技术领域—‘卡脖子’技术领域”的三层递进式

分析框架,系统刻画中国国际科学成果在多个层面的全球影响力和科学知识流向。研究发现:第一,在全领域和第四次工业革命核心技术领域,中国科学成果的转化效能和全球影响力都仅次于美国。中国科学成果对本土技术创新的支撑作用不断增强,但本土转化仍存在一定的提升空间。第二,中国科学成果在“卡脖子”技术领域的全球影响力相对较弱,但中国这一领域支撑学科成果也成为全球技术的重要知识源;相对于全领域和第四次工业革命核心技术领域,中国“卡脖子”技术领域支撑学科具有科学成果本土转化不足的特征。第三,大学、科研院所、企业和医疗机构四大研究主体在科学—技术转化中各有所长,但存在科学成果本土转化不足的问题。第四,导致这一现象的深层逻辑在于国内科学研究价值导向的认知偏差,以及由此引致的学科导向科研模式和科技转化链条关键环节的断裂。

本文的边际贡献不仅在于,构建了一套有国际可比性的科学—技术转化统计核算体系,也揭示了实现科技强国目标的关键制约并非仅在于基础研究总体水平,更在于科学成果的本土转化相对不足。

第一,深化科学研究供给侧改革,提升面向本土技术需求的科学知识供给。亟须在深刻理解“把论文写在祖国大地上”基础上,推进科学研究供给侧结构性改革:一方面,重构科研价值认知与评价体系,破解学科导向科研不足。突破“科学无国界”传统观念束缚,深化对“把论文写在祖国大地上”科研价值导向的理论认知,强化科学研究服务本土技术需求的功能。在此基础上优化评价体系,以“用途启发型基础研究”的科研范式引导科研人员在追求学术前沿的同时回应本土技术需求,建立基础理论学科与工程技术学科的分类评价机制,合理平衡追求国际影响力与本土应用价值。另一方面,构建本土需求导向的科研体系。在资源配置上,提升面向本土技术需求研究的资助比例和支持强度,鼓励高校围绕产业链部署科学研究。在需求对接上,在国家级科研计划中强化企业话语权,形成企业—高校联合选题机制,推动科研选题从源头对接本土需求。在学术平台建设上,增设高质量国内科学期刊,为扎根本土技术实践的科研成果提供发表平台,扭转“从国外期刊找题、向国外期刊投稿”的“两头在外”科研格局,提升面向本土技术需求的科学供给。

第二,提升企业对科学知识的吸收转化能力,破解科学成果本土转化不足的困局。本文研究发现,中国国际科学论文已成为全球技术创新的重要知识来源,但本土转化相对美日德明显滞后。破解这一瓶颈,关键在于强化企业作为创新主体对科学源头知识的识别与内化能力。一方面,重点培育能够跨越科学话语与市场语言的“科学企业家”群体。依托高能级创新平台集聚高水平科研人才与发明人,培养既洞悉科学原理又精通市场逻辑的“科学企业家”。利用其双重专业背景消除产学研协作中的话语藩篱,发挥其在解读前沿科学知识、识别技术机会中的领军作

用,从而降低科学知识向技术应用迁移的摩擦成本。另一方面,通过强化企业基础研究筑牢科学知识吸收的能力根基。引导企业从单纯的“技术应用”向“源头创新”转型,通过深度参与高水平基础研究,在科学知识生产阶段即实现本土技术需求的嵌入。通过政府财税支持与研发投入激励的协同发力,提升企业对前沿科学成果的识别、消化与再创新能力,从源头上破解科学供给与本土场景的错位问题,使中国科学成果更高效地驱动高水平科技自立自强。

第三,建立战略技术领域科学—技术协同攻关机制,实现关键领域自主可控。一方面,围绕战略技术需求组织科学研究。改变传统“接力式”科研模式,针对光刻技术、半导体器件、量子信息等关键技术瓶颈,系统梳理其背后的科学问题,开展有组织的科研攻关。建立基础研究、技术攻关、产业应用一体化的实验室体系,让科学家在技术问题中发现科学问题,在解决科学问题的同时推动关键技术突破。另一方面,在战略技术领域设立科学成果本土转化专项计划,为具有重大应用前景的科学成果提供从概念验证到工程化应用的全链条支持。建立战略技术领域的科学成果评估与对接机制,组织相关领域的科学家、工程师和企业家交流与协同攻关,促进科学成果与本土技术需求的精准匹配,形成科学知识生产直接服务关键技术突破的协同攻关机制。通过科学知识生产与技术发明的深度协同,把中国战略技术领域的科学优势转化为现实技术优势,夯实科技强国建设的战略支点。

参 考 文 献

- [1]陈劲,阳镇,朱子钦.“十四五”时期“卡脖子”技术的破解:识别框架、战略转向与突破路径[J].改革,2020,(12):5~15.
- [2]胡凯,王炜哲.如何打通高校科技成果转化的“最后一公里”?——基于技术转移办公室体制的考察[J].数量经济技术经济研究,2023,(4):5~27.
- [3]亢延锟,黄海,张柳钦,黄炜.产学研合作与中国高校创新[J].数量经济技术经济研究,2022,(10):129~149.
- [4]孙喜,窦晓健.我们需要什么样的基础研究——从科学与技术的关系说起[J].文化纵横,2019,(5):104~113+143.
- [5]张杰,白铠瑞.中国高校基础研究与企业创新[J].经济研究,2022,(12):124~142.
- [6]张生太,姬亚俊,仇沪毅,刘娜.从科学到技术的知识传播机理研究:基于知识基因[J].科研管理,2022,(11):21~31.
- [7]张艺,陈凯华,周志勇.后发国家产业核心技术追赶的产学研合作创新机制——基于中国高铁产业的案例分析[J].管理世界,2024,(11):20~48.
- [8]郑世林,汉馨语,郭锡栋,张子盈.国家战略科技力量与企业关键核心技术突破——来自国家和省级重点实验室的证据[J].中国工业经济,2024,(09):62~80.

- [9] Amara N., Olmos-peñuela J., Fernández-de-lucio I., 2019, *Overcoming the “Lost Before Translation” Problem: An Exploratory Study* [J], *Research Policy*, 48(1), 22~36.
- [10] Baranyi J., Csorba S., Farkas Z., Pacza T., Józwiak Á., 2024, *Internal Dynamics of Patent Reference Networks Using the Bray–Curtis Dissimilarity Measure* [J/OR], *Journal of Big Data*, 11(1). <https://doi.org/10.1186/s40537-024-00883-z>.
- [11] Bartunek J.M., Rynes S.L., 2014, *Academics and Practitioners Are Alike and Unlike: the Paradoxes of Academic–Practitioner Relationships* [J], *Journal of Management*, 40(5), 1181~1201.
- [12] Bush V., 1945, *Science, the Endless Frontier: A Report to the President* [M], Washington D. C.: United States Government Printing Office.
- [13] Cao Q., Li Y., Peng H., 2023, *From University Basic Research to Firm Innovation: Diffusion Mechanism and Boundary Conditions Under a U-shaped Relationship* [J], *Technovation*, 123, 102718.
- [14] Chen P., Xie H., Maslov S., Redner S., 2007, *Finding Scientific Gems with Google’s Pagerank Algorithm* [J], *Journal of Informetrics*, 1(1), 8~15.
- [15] Hayter C. S., Fischer B., Rasmussen E., 2022, *Becoming an Academic Entrepreneur: How Scientists Develop an Entrepreneurial Identity* [J], *Small Business Economics*, 59(4), 1469~1487.
- [16] Jiang M., Yang S., Gao Q., 2024, *Multidimensional Indicators to Identify Emerging Technologies: Perspective of Technological Knowledge Flow* [J], *Journal of Informetrics*, 18(1), 101483.
- [17] Johnson B., Edward L., Lundvall B.-å., 2002, *Why All This Fuss About Codified and Tacit Knowledge?* [J], *Industrial and Corporate Change*, 11(2), 245~262.
- [18] Lian X., Zhang Y., Wu M., Guo Y., 2025, *Do Scientific Knowledge Flows Inspire Exploratory Innovation? Evidence from Us Biomedical and Life Sciences Firms* [J], *Technovation*, 140, 103153.
- [19] Liu K., Lu Q., 2025, *Identifying High-impact Interdisciplinary Knowledge Flows: An Approach Combining Backward and Forward Citation Analysis* [J], *Journal of Informetrics*, 19(3), 101677.
- [20] Nowotny H., Scott P., Gibbons M., 2001, *Re-Thinking Science: Knowledge and the Public in an Age of Uncertainty* [M], Cambridge: Polity Press.
- [21] Qiu S., Cao Q., Jiao M., Liang S., 2022, *Research Types and Innovation Performance: the Mediating Effect of Paper Influence and Patent Novelty* [J], *Technology Analysis and Strategic Management*, 34(8), 919~932.
- [22] Roach M., Cohen, W. M., 2013, *Lens or Prism? Patent Citations as a Measure of Knowledge Fows from Public Research* [J], *Management Science*, 59(2), 504~525.
- [23] Stokes D.E., 1997, *Pasteur’s Quadrant : Basic Science and Technological Innovation* [M], Washington D.C.: Brookings Institution Press.
- [24] Terhorst A., Wang P., Lusher D., et al., 2024, *Broker Roles in Open Innovation* [J], *Journal of Open Innovation : Technology, Market, and Complexity*, 10(1), 100186.
- [25] Wang Y., Liu J., Wu Y., et al., 2023, *Deepening Integration of Research and Education,*

Cultivating Future Leading Talents in Science and Technology [J], *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 38 (5), 693~699.

[26] Xueshan A., Yangxin Y., Zhiming L., et al., 2025, *Multilayer Entropy-Weighted Topsis Method and Its Decision-Making in Ecological Operation during the Subsidence Period of the Three Gorges Reservoir* [J], *Scientific Reports*, 15(1), 2954.

Technology Transformation Effect of China's Scientific Achievements: Multi-dimensional Evaluation Based on the Global Patent Citation Network

YI Xianzhong¹ ZHA Long¹ PAN Rui²

(1.School of Economics, Nanjing Audit University;

2.School of Economics and Management, East China Normal University)

Summary: The remarkable enhancement of China's scientific research has raised a critical yet under-explored question: As the largest producer of scientific papers in the world, to what extent does China's international scientific output drive technological innovation? The transformation from "papers power" to a "powerhouse of technology" is the key to building science and technology (S&T) power, and the relationship between a country's scientific research and its technological innovation is far from a simple linear correspondence. In globalized knowledge networks, scientific achievements—characterized by codifiability, visibility, and mobility—often serve the technological progress of other nations, creating a complex "research here, benefit there" paradigm. Therefore, accurately measuring the impact of China's scientific output on technology is not only a vital metric for assessing national S&T strength but also a critical foundation for strategic policymaking.

This study constructs a multi-layered evaluation framework to quantify China's influence in the global innovation network. Drawing on comprehensive data (2000~2024) on 10 leading innovative nations, covering 53.72 million granted patents from the IP5 offices and 30.63 million international papers, we employ big data processing techniques to achieve two key methodological innovations: (1) Dual-dimensional measurement framework. We develop a "comprehensive efficiency index" using the entropy weight-TOPSIS model, which integrates four dimensions—absorption intensity, transformation rate, technological penetration, and spatial radiation. In parallel, we apply a weighted PageRank model to the international citation network to measure China's structural influence. (2) Progressive

analytical framework. Based on resolving the “technology–discipline” mapping problem, we establish a progressive framework: “General Evaluation–4IR Core Fields–choke–point Technologies”. This allows for the precise identification of disciplinary support structures and knowledge flow trajectories in strategic domains essential for national S&T self–reliance.

The empirical analysis yields significant insights: First, China has emerged as a pivotal source of knowledge for global innovation. Its influence on global innovation networks ranks second globally in both general and 4IR domains. This proves that China’s basic research already possesses the knowledge base required for high–level S&T self–reliance. Second, a structural paradox of “High Global Influence vs. Low Domestic Transformation” is identified. The underlying logic lies in the cognitive bias regarding the value orientation of domestic scientific research under the influence of the traditional Merton research paradigm, which has led to a systemic misalignment between discipline–oriented research and domestic technological needs, as well as critical fractures in key links of the science–technology transformation chain. In critical technologies, China’s high–impact scientific achievements have become an important source of knowledge for global technological innovation and have played an active role in international patent transformation. At the same time, the domestic application and transformation of these achievements still have room for further improvement, and a certain gap remains in comparison with the United States, Japan, and Germany in terms of domestic patent transformation.

The contribution of this study is twofold: first, it develops an internationally comparable statistical system to measures science–to–technology transformation; second, it demonstrates that the binding constraint on China’s emergence as a S&T power lies in the insufficient domestic absorption of scientific output rather than the absolute level of basic research. Such evidence calls for a thorough implementation of the guiding principle to “write research papers on the motherland’s soil”. Consequently, we propose a supply–side reform in the research sector to prioritize the delivery of scientific knowledge that serves domestic technical needs.

Keywords: Science–technology Transformation; Patent Citation Network; Science and Technology Power; Basic Research

JEL Classification: O33; O34; C34

(责任编辑:曹 畅;数据编辑:朝 阳)