网络演变与国家利益：全球科学重组与科学民族主义的兴起

Caroline S. Wagner[1]；Xiaojing Cai[2]

摘要

过去二十年来，全球科学合作网络经历了根本性重组，对地缘政治关系和科学政策产生了重大影响，也在一定程度上受到它们的塑造。中国融入这一网络，重新分配了权力与影响力格局，挑战了围绕国家间科学竞争、主权和安全的传统零和叙事。基于结构洞理论（Burt，1992；2004）和 Bianconi-Barabási适应度模型（2001），我们提出，中国在过去20年间进入全球网络，加速了网络成熟过程中已然开始的结构重组。随着中国日益增强的科学吸引力带来了绕过美国中介的直接合作联系，美国所跨越的结构洞逐渐由替代路径填补。网络分析揭示了一种不对称模式：美国的拓扑中介中心性大幅下降（约80%），而纳入合作规模的加权中介中心性则相对稳定。这表明，美国分别丧失了经纪资本（连接互不连通社群并控制其间信息流动所带来的结构优势）和闭合资本（维系深厚双边关系、使合作产出不依赖经纪功能的优势）。格兰杰因果检验显示，中国早期的网络参与能够预测随后多个指标和领域中的结构变化，这与其作为高适应度进入者的作用相符。涵盖六个主要领域的领域层面分析得到一致结果，证实无论中国或其他国家处于何种位置，美国的中心性均有所下降。

[1] 俄亥俄州立大学，美国俄亥俄州哥伦布；0000-0002-1724-8489[2] 扬州大学，中国江苏；0000-0001-7346-6029

全球科学传播网络的增长

过去三十年来，公共资助研究的一个显著特点，是从由国家组织的科学转向研究人员广泛参与国际互联的传播网络。以学术出版物中的共同署名为代表的国际合作，在 Web of Science 中所占比例从1980年的4%增长至2020年的27%（Gui等，2025；Docampo与Bessoule，2019；Leydesdorff与Wagner，2008；Howells，1990）。尽管相关证据未必更新，但研究表明，国际合作获得的引文多于国内研究，带来更高的产出和更大的影响力（Frenken、Ponds与Van Oort，2010；Wagner等，2019；Jefferson等，2024）。研究人员越是精英，越有可能开展国际层面的工作（Tang，2013）。我们的研究显示，在科学发达国家，所有增长都发生在国际层面。

这一转变不仅仅是跨境合作在数量上的增加，更代表着科学组织逻辑的质变。1980年之后，全球网络显著增长，可以说已成为一个拥有自身结构动态的自组织系统；在重要方面，这些动态独立于为参与者提供资金、培训和支持的国家体系（Adams & Szomszor，2022年；Pan 等，2012；Rosvall & Bergstrom，2007；Börner 等，2003）。

这一论断的理论基础源自早期研究。这些研究检验了国际合作能否由传统的结构、机构或政策因素解释，例如中心—边缘动态、大科学的发展、地理邻近性，以及信息与通信技术的扩展（Wagner et al., 2015; Wagner & Leydesdorff, 2005）。无论单独考察还是综合考量，这些因素都不足以解释观察到的国际共同署名增长。相反，数据揭示了一个通过优先连接机制不断演化的自组织系统：研究人员会寻找已经拥有广泛联系的合作伙伴，以获得资源、声誉和研究机会（Jeong et al., 2003）。网络的增长并非源于机构引导，而是由身处竞争性奖励结构中的个体科学家基于自身利益所作的选择汇聚而成（Milojevic, 2014）。这一发现将全球科学

网络明确归入 Barabási 和 Albert（1998）、Leydesdorff（2001）及 Dijk（2005）所界定的复杂适应系统之列；在这类系统中，秩序源于局部互动，而非集中协调。

我们的分析考察了 20 年间科学合作的全球网络，揭示出该网络经历了反复的结构变化：在这一时期，检测到的社群数量时增时减，反映出碎片化与整合的周期性变化；随着新行动者加入，合作模式也随之重组，以作出回应。社群数量的波动本身并非重要发现——关键在于每次相继发生的重组具有怎样的特征。网络并非只是来回波动，而是在每一轮变化中形成定义日益清晰、内部日益凝聚的社群，这表明重组是累积性的，而非仅仅动荡不定。这种行为是复杂适应系统的典型特征：表面上的不稳定时期，正是促使更具优势的组织结构涌现的机制。

理论框架：结构位置、经纪与科学网络的重组

地缘政治背景与网络结构之间的关系似乎既非直接，也非确定，而对这一关系的研究和理论探讨都还不充分。我们此前与 Leydesdorff 合作的研究发现，全球网络变得“更加紧密，但集群化程度并未提高”，且“网络内部的权力关系并未再现政治体系中的权力关系”，这表明网络动态会产生与国际政治秩序系统性背离的结构性结果（Wagner & Leydesdorff, 2015; Wagner & Leydesdorff, 2005）。这说明，科学交流的运行和演变遵循的是网络动态，而非政治实体的逻辑。Lee 等人（2020）在 Fry 等人（2021）的支持下，通过一个情势紧迫的案例对此进行了实证检验：在政治言论日益激烈之际，中美在 COVID-19研究领域的科学合作实际上有所增加，这表明网络的合作逻辑能够在很大程度上独立于其政治环境运行。Glänzel 等人（2004）证实，合著分析是一种可靠的文献计量工具，可用于追踪这些动态。现有证据既不支持纯粹的结构性解释——即网络的运行不受地缘政治影响；也不支持纯粹的政治性解释——即合作只是国际秩序的映照。这种关系复杂且因情境而异。

数据表明，网络发生了显著变化，尤其是中国的加入。现有文献尚未提供网络层面的理论解释，说明网络动态变化如何影响科学政策。本文提出了这样的解释，借助结构洞理论解读数据所记录的结构转型，并考察中国的崛起、交流模式的变化，以及这些变化对美国作用所产生的影响。

至少自1980年起，美国便居于全球网络的中心。作为冷战后时期世界领先的科学强国，美国吸引了数量远超其他国家的早期连接，而每一次新增连接又通过累积优势进一步巩固其中心性。到2000年，在网络中连接任意两个国家的最短路径里，绝大多数都经过美国——这表明美国几乎完全扮演着中介角色。优先连接解释了这一地位是如何形成的。然而，它并不能解释这一地位的价值何在、为何逐渐衰退，或这种衰退对科学政策意味着什么。要回答这些问题，我们将转向另一种理论框架。

Burt的结构洞理论（1992年；2004）为此提供了理论框架。其核心观点是，网络位置的竞争优势并非来自某个节点拥有的连接数量，而是取决于这些连接的模式——具体而言，这些连接是否将原本互不连通的社群联系起来，抑或连接到彼此已经相连的节点。结构洞是指两个共享同一联系人但彼此之间没有直接连接的节点之间的空缺。跨越此类结构洞的节点位于不同社群的交汇处，并由此获得三种截然不同的优势：更广泛、更早地接触在彼此不重叠的科学领域中流通的信息；在一定程度上掌控各个社群对其他社群的了解；以及Burt（2010）所称的“结构视野”——能够以嵌入单一集群的节点无法企及的方式，纵览系统分散的全貌。在科学网络中，这些优势兼具社会性与认知性：经纪人掌控的不仅是关系，还有知识本身的流动。这些角色为美国科学体系带来了巨大优势，使其得以洞察世界各地的科学进展、顺利获取顶尖人才，并建立起美国知识的扩散机制。

文献区分了两种互为补充的网络逻辑，它们会为网络参与者带来不同形式的优势（Burt，2004年；Coleman，1988年）。经纪是指跨越

互不连通社群之间结构洞的经纪行为，可带来信息与视野方面的优势。它还能带来深厚而大量的双边关系所形成的优势，从而维持合作产出，且不依赖经纪功能。闭合是指社群内部密集、凝聚的联系，能够形成信任与共同规范，并提升持续集体努力的能力。对于中心枢纽而言，闭合带来的优势是深厚而大量的双边关系，这些关系能够维持合作产出，且不依赖经纪功能。最强的网络位置兼具两者：连接密集集群之间的结构洞，而非单独将任一逻辑发挥到极致。这一区分对于解读本文所研究时期的核心实证发现至关重要。在拓扑中介中心性方面，美国下降了约80%，但在纳入合作规模的加权中介中心性方面仍保持显著优势。这两项指标并不矛盾，而是直接体现了经纪／闭合之分。随着伙伴国家彼此建立直接联系，不再需要美国居间，美国失去了经纪资本。它保留下来的是闭合资本——深厚而大量的双边关系所带来的真正合作价值，即使这些关系不再发挥经纪功能，依然如此。将这两种网络资本混为一谈，并把拓扑中心性下降解读为科学全面衰退的证据，是一种分析错误；这或许正是本文所考察的政策应对的根源。我们将在下文进一步探讨这一点。

在任何传播网络中，结构洞都不稳定。结构洞两侧的节点都有动机建立直接联系，绕过经纪人以及中心枢纽所造成的延迟或相关中介成本。随着网络逐渐成熟并变得稠密，结构洞会逐步闭合。这是个体连接决策累积作用的结果，这些决策共同使经纪人的位置变得多余。这是网络演化过程中涌现出的属性，而非任何协调策略的结果（Burt，1992）。这一过程会产生一种具体且可检验的经验特征，称为无权网络中拓扑中介中心性的下降。它可以被解读为网络内全局效率的提升，因为知识在节点间传播得更加直接。我们可以通过考察聚类系数的变化来衡量这一点：节点形成直接联系，进而构建更稠密的局部邻域。我们在2001–2024年的完整时段数据中，均可测量到这三种模式。

结构洞框架解释了为何随着全球网络日趋成熟，美国的经纪优势容易逐渐消退。Bianconi-Barabási适应度模型（2001年）则解释了为何中国尤其加速了这一消退过程。标准的优先连接机制会极大地偏向现有枢纽：新进入者获得的连接数量与其现有连接度成正比，这种强者愈强的动态会使美国受益，而不利于任何后来者。适应度模型引入了一种独立于当前连接度的节点层面吸引力：高适应度的新进入者能够以远超其初始地位所能预示的速度积累连接，因为其他节点会同时考虑科学质量和网络中的既有地位。中国在2000年代和2010年代的发展轨迹——引文影响力、科研基础设施和领域特定卓越表现的迅速提升——正体现了适应度的上升。随着中国机构在科学依据上日益成为令人信服的直接合作伙伴，网络各处的研究人员纷纷与其建立联系，绕过美国的中介作用，逐步填补了美国原先跨越的结构洞。这种重组并非针对美国，也不是由中国刻意推动的；它是个体连接决策的总体结果，这些决策对中国（以及其他国家）日益增强的科学吸引力作出理性回应，其运行遵循的是网络自身的逻辑，而非政治指令；这也与我们以往的研究及更广泛的文献关于网络动态具有自主性的观点相一致。

假设与预期

这套由三部分构成的解释——优先连接生成最初的枢纽结构，结构洞理论说明这一位置赋予了什么以及它如何变化，而适应度模型则解释中国发挥的催化作用——提出了五项可用网络数据检验的预期。1. 美国的拓扑中介中心性将会减弱，而加权中心性得以维持，这反映了经纪／闭合之分。2. 这种衰退将表现为替代路径和新的连接出现（而非形成一个新的枢纽），这与分布式空洞闭合相符。3. 随着冗余路径增多、连接日益密集，全局效率和聚类系数将会上升。4. 由于这种变化具有系统性，重组将在各科学领域中一致地显现。5. 中国早期的网络参与将能够预测多个指标和领域随后发生的结构变化，这与中国作为高适应度新进入者的作用相符；其不断增强的科学吸引力催化了直接连接的形成，从而闭合了

此前由美国跨越的结构洞。下文的分析将依次检验每项预期。

数据收集与网络分析方法

本研究采用 OpenAlex 数据库 (Priem, J., Piwowar, H., & Orr, R., 2022，这是一个开放获取的学术产出索引。我们从该数据库中提取了 2001年至2024年间发表的可引用出版物（文章、札记和来信），共计 1.366亿份文献，主要为学术研究（而非企业研究）。为确保整个时期合作指标的可比性，排除了会议论文、书籍及其他类型的文献。根据每篇出版物中记录的机构地址确定国家机构隶属关系，并采用完全计数法，即无论每个国家的作者人数多少，每篇出版物中的每一对国家合作关系均计为一次。为减少边缘参与者带来的噪声，每年发表的国际合著论文少于十篇的国家均从该年度网络中排除。

我们构建了覆盖24年期间的年度合作网络，其中节点代表国家，边代表合著关系。边权重反映每年每对国家之间合著出版物的总数。为减少年度间波动并凸显长期结构趋势，分析和图表中报告的所有网络指标均采用三年滚动窗口计算。OpenAlex 将其收录内容按层级分类体系组织，涵盖四个高层级领域、36个领域、252个子领域和4,500多个具体主题；这些分类依据标题、摘要和引文数据通过算法确定，本研究采用了这一分类体系。我们的分析在领域层级开展，分别构建涵盖所有领域的年度合作网络，以及36个独立领域各自的年度合作网络，从而支持整体和特定领域分析。所有网络构建、分析和可视化均使用 Python 中的 NetworkX 软件包完成，并在可视化布局中采用 Fruchterman-Reingold算法。数据可在 figshare 获取，DOI：10.6084/m9.figshare.31567417。

本文通过中介中心性、k核分解、社群结构和格兰杰因果关系分析，探讨了2001–2024年全球网络的结构变化

分析，并讨论了在科学民族主义日益抬头的时代，这些发现所蕴含的政策含义。

本研究考察的主要结构指标是中介中心性，它衡量一个节点位于网络中其他节点之间最短路径上的程度。该指标可以识别哪些国家的研究人员在科学知识流动中发挥着关键桥梁作用。为确保结果在各国出版物数量不同的情况下依然稳健，我们计算了标准化、归一化和加权的中介中心性。此外，研究还采用了其他网络指标，包括特征向量中心性、k核分解、聚类系数、社群结构和全局效率。各项指标的完整数学定义见技术附录。

为检验关于中国适应力的假设，我们采用格兰杰因果分析，考察中国在全球网络中的参与程度（以其国际合著论文占全球产出的比例衡量）在较早年份是否能够预测全球网络结构随后发生的变化。与描述性网络指标不同，格兰杰因果分析基于未经滚动窗口平滑的原始年度时间序列数据进行，因为平滑会扭曲该检验旨在识别的时间关系。我们针对所有领域合并后的数据以及各个单独领域，分别对每项网络指标估计向量自回归模型，滞后阶数设为一至六年，并依据赤池信息准则选择最优滞后阶数。显著性达到 $p \le 0.05$ 的结果被视为证据，表明中国的网络参与会格兰杰导致随后发生的结构变化。格兰杰因果分析的完整程序详见技术附录。

解读我们的研究发现时，一个重要考量是，我们的网络分析所依据的出版数据反映的是科学活动的滞后指标。出版物通常反映的是数年前启动的研究活动——合作关系可能早已形成，资金支持也已落实，项目也已启动，而相关出版物可能要到五年后才会出现在数据库中。承认这种时间滞后，对于正确理解我们观察到的网络重组至关重要。

结果

我们依据理论框架中提出的五项预期评估网络分析，并依次逐项讨论。

图1展示了2003年至2024年美国（U.S.）、英国（GB）和中国的标准化介数中心性（面板a）及标准化加权介数中心性（面板b）；两幅图共同呈现了网络重组的图景。面板（a）显示，在整个时期内，美国的拓扑桥接角色持续大幅减弱，从2003年的约0.17降至2024年的0.035左右，降幅约为80%。英国的走势相似，从约0.085降至约0.02。相比之下，中国的数值始终基本持平，其标准化介数中心性仅从接近零的起点略有上升。值得注意的是，三个国家随时间呈现向下趋同的趋势——这并非因为中国崛起并承担了相当的桥接角色，而是因为美国和英国的数值逐渐降至中国一直维持的低位。这一发现意义重大：美国拓扑中心性的衰落不能归因于中国崛起，因为中国在无权网络中的桥接角色几乎没有增长。更恰当的解释是，美国的衰落源于网络致密化：随着越来越多的国家彼此建立直接合作关系，对单一中心枢纽的需求系统性地减弱了。一个数据即可说明这一转变的规模：1980年，Web of Science收录的学术论文超过5,000篇的国家有17个；到2020年，这一数字已增至70多个。这种多极化科学格局的出现，创造了相应的结构条件，使得围绕美国形成的枢纽依赖逐渐变得不再必要或高效。

图（b）揭示了对这一解读的一项重要限定。当通过边加权纳入合作规模后，整体图景发生了变化。在整个时期内，美国始终占据主导地位，其标准化加权介数中心性在大部分时间里保持在0.90以上，到2024年略微下降至0.91左右。然而，中国在这一指标上显著增长，从接近零升至约0.10，到期末已接近英国的水平。这表明，美国并未失去其作为合作伙伴的重要作用，中国也没有取得可与美国相提并论的拓扑桥接作用。这说明，中国实际的合作关系已显著深化

并大幅多元化，但并未以牺牲与美国的连接为代价。为确保这些发现并非特定归一化方法造成的假象，我们进一步比较了对数、Salton和Jaccard归一化变体下的加权中介中心性；三种方法均一致显示，美国的中介中心性相对下降，而中国则相对上升，证实了该指标的稳健性（见附录）。两个面板共同支持了关于中介中心性和加权中心性的第一项预期。美国失去了其作为全球科学合作关键中介者的结构位置，这并非源于直接取代，而是由于替代路径不断增加——在这一过程中，中国合作范围的扩大是推动更广泛网络重组的若干因素之一。

图*1* 标准化介数中心性（*2001—2024*年）。中国中心性的上升与美国和英国的下降形成对照，表明其在全球合作网络中的角色正在发生变化。采用*3*年滚动平均值来平滑短期波动并凸显长期趋势。

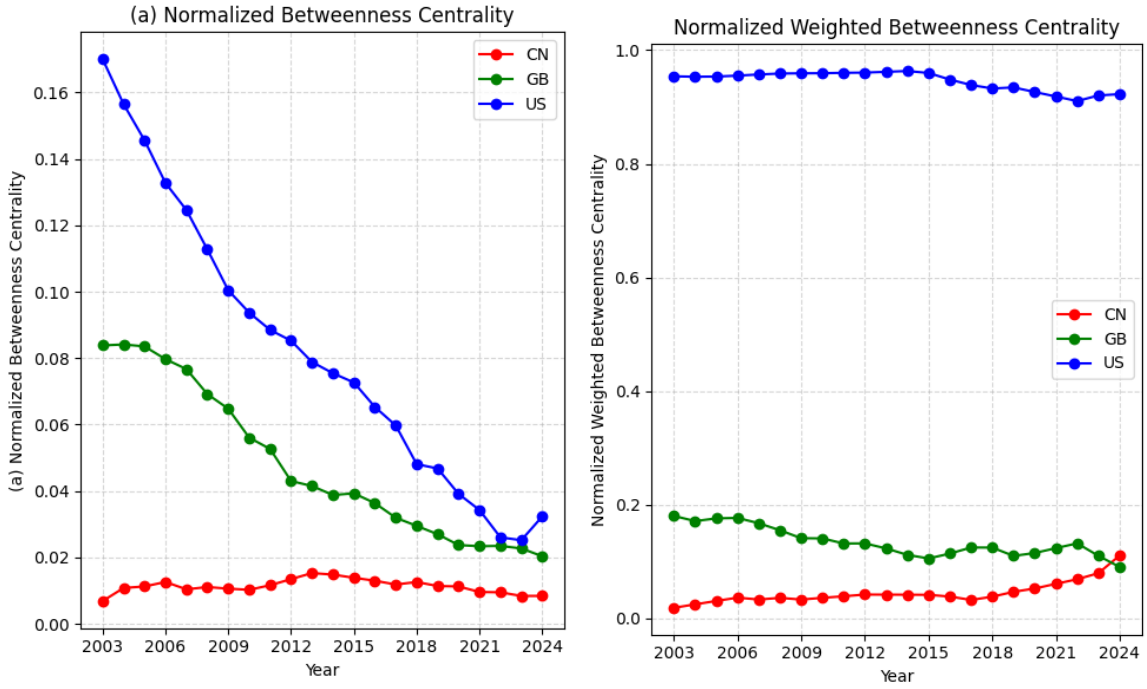


图2利用预测建模将中介中心性分析延伸至2030年，并在图1的基础上增加了两个重要维度。首先，历史轨迹证实了这一模式：

2001—2024年期间，美国和英国的中心性持续大幅下降，而中国则相对稳定。2023—2024年前后，美国中心性明显回升，这可能反映了疫情后国际合作的复苏，也可能是网络对地缘政治状况变化的早期响应，但这种回升能否持续仍有待观察。其次，更为重要的是，预测轨迹显示，三个国家的不确定性水平存在显著差异。美国的预测显示，到2030年可能温和回升至约0.045—0.05，但置信区间极宽，表明美国的走势确实存在不确定性，而英国和中国则没有这种情况。英国和中国的置信带都较窄，预测也相对平缓，表明它们的网络位置已趋于稳定，处于较低但可预测的水平。到2030年，三个国家的中心性值趋于相近，这与效率将会提高的预期一致：若没有外部冲击，全球网络可能演变为一种分布式结构，不再有任何单一国家占据美国曾拥有的主导性桥接位置。美国预测值周围宽阔的不确定性带本身就具有重要的分析意义——这表明近期的政策选择，包括有关国际合作和科研安全的决策，可能会显著影响美国的网络位置究竟趋于稳定还是继续下降。这对我们将在后文展开的政策讨论具有直接影响。

图*2.* 归一化介数中心性趋势与预测

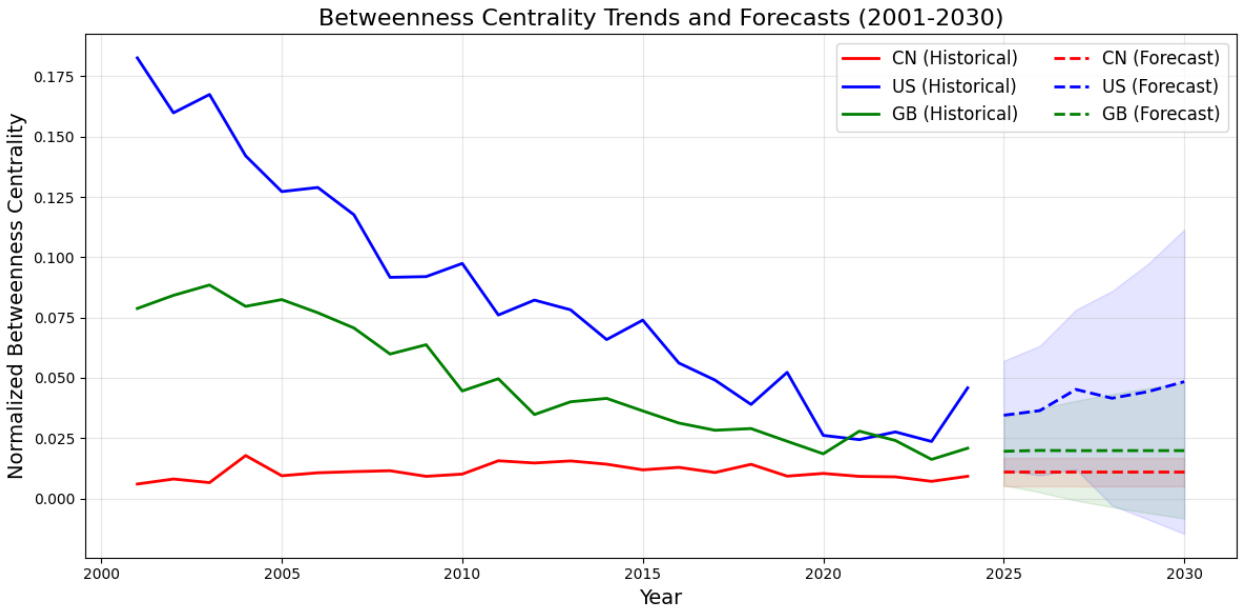


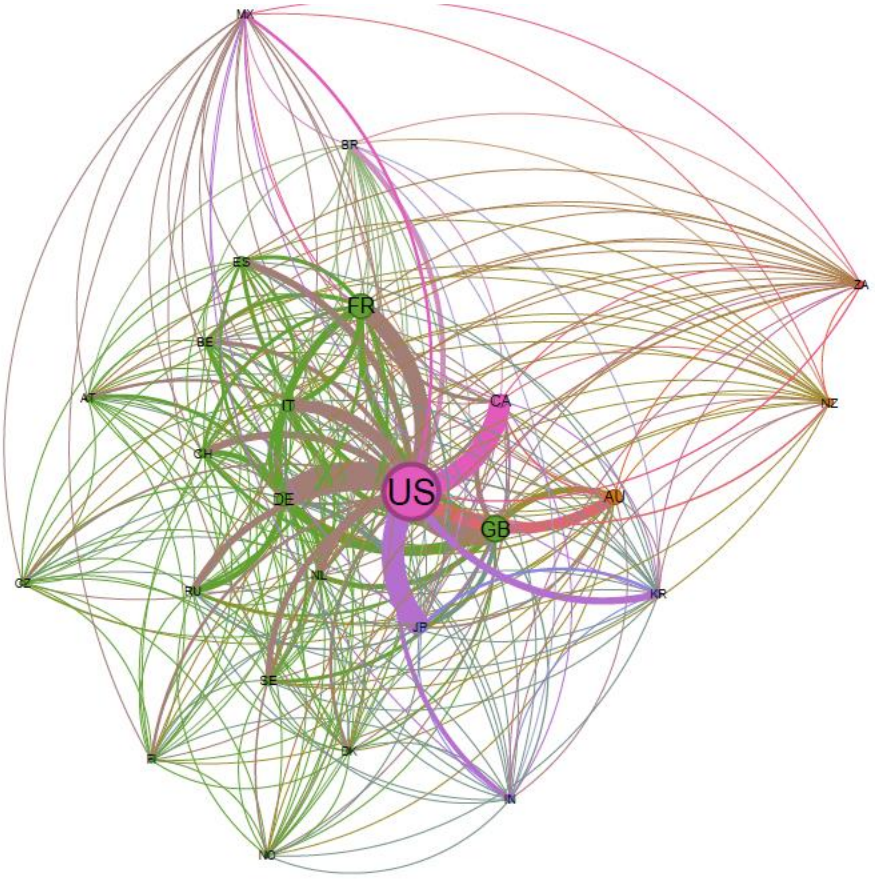
图3和图4分别展示了2001年和2022年的最大 k-核合作网络可视化图——这是国家之间联系最为密集的子网络，其中每个成员都与至少 k 个其他成员保持合作关系。（k-核揭示了合作中心的联系变得多么紧密，以及该中心的参与范围扩大得多么广泛。）节点大小反映在 k-核子网络中计算得出的标准化介数中心性，边厚度反映合作规模。这种呈现方式在分析上不同于图1和图2所示的完整网络分析：它并非涵盖所有国际合作，而是聚焦于知识流动最为密集、结构位置影响最为显著的紧密合作核心。这两幅图共同为以下预期提供了直接的视觉证据：中国的融入通过去中心化适应而非直接取代，催化了系统性网络重组。

2001年，k-核网络呈现出以美国为中心的显著轮毂辐条架构：美国节点远大于其他所有节点，其边向外辐射，几乎连接到核心中的每个国家。英国是第二大节点，法国、德国、加拿大、澳大利亚、日本和韩国则处于次要位置。此时，中国完全未出现在k-

核中，这反映出在该时期初始阶段，中国在国际合作网络高度互联的核心中的存在极为有限。

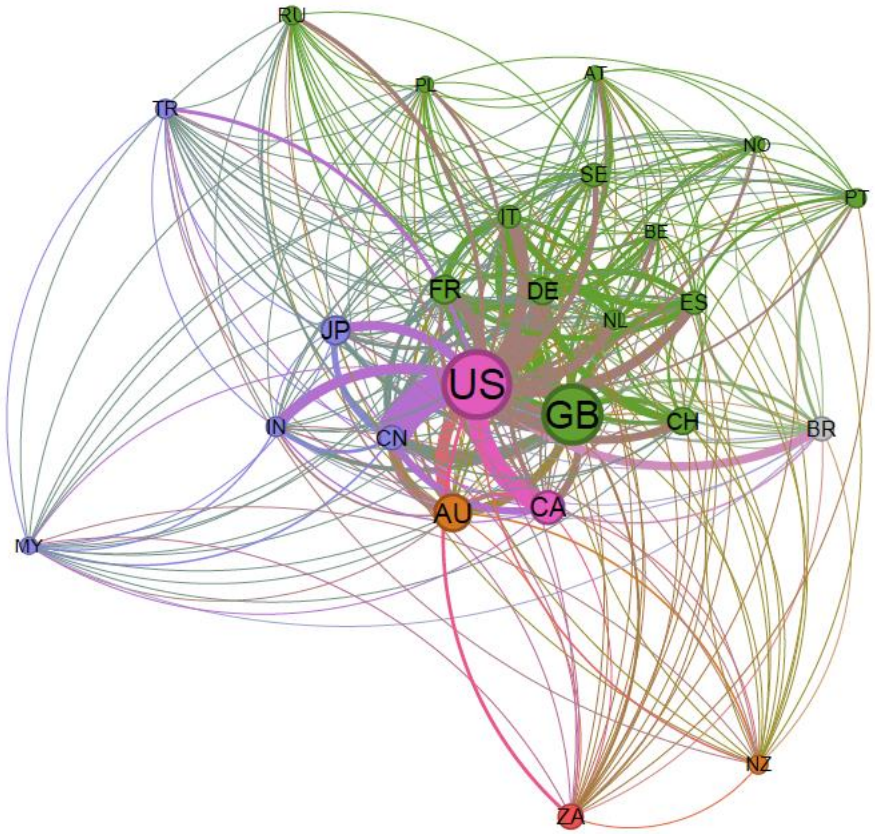
到2022年，k-核内部的结构转型已十分显著。美国节点仍然最大，但英国的规模大幅增长——这反映了英国脱欧后在密集合作核心中的桥接作用：它连接着欧洲集群与美加澳轴线，而非其在全球整体网络中的拓扑位置；在全球整体网络中，英国的中介中心性已大幅下降（图1）。欧洲集群的联系密度显著提高——法国、德国、意大利、西班牙、荷兰、比利时、瑞典、挪威等国，如今在核心内部彼此之间形成了强有力的直接联系，而不再主要经由美国连接。中国已进入k-核，成为一个清晰可见的节点，位于美国与英国之间；印度、土耳其、南非、马来西亚和波兰等新进入者也已加入核心，证实了图5所示密集互联合作中心的扩展。正如预期，k-核的整体架构已从依赖枢纽转向日益分散的形态。关键在于，美国并未被取代：它仍然是k-核中规模最大、中心性最高的节点。变化在于，美国已不再像2001年那样是不可或缺的中介，因为替代路径和新的区域集群已在全球网络中不断涌现。

图*3.. 2001*年使用中介中心性的核心合作国家



US
GB
FR
AU
DE
CA
IT
JP
ES
SE
CH
NL
NZ
BR
IN
BE
RU
ZA
AT
MX
KR
CZ
NO
FI

图*4*。基于三年平均值并采用中介中心性指标确定的核心合作国家，*2022*年



US
GB
CN
DE
FR
IT
CA
ES
AU
NL
IN
CH
JP
SA
SE
BR
BE
KR
RU
PL
DK
PK
AT
TR

图5通过考察连接主要国际参与者的最短路径中经过美国或中国的比例，为替代路径的发展预期提供了最有力的证据之一。图(a)显示，2003年，连接中国与其国际合作伙伴的最短路径中，约99%经过美国；连接英国和德国与各自国际合作伙伴的路径中，约有89%—95%经过美国。这证实，在这一时期初期，美国几乎是全球科学合作中唯一的中介。此后，这一比例逐步下降，讲述了网络逐渐重组的过程：欧洲国家，

尤其是英国和德国，比其他国家更早开始构建替代路径——约在2013—2015年——这可能反映了欧洲内部合作网络日益密集。中国对美国中介作用的依赖下降得更为显著，时间也更晚，始于约2017—2018年；这一时间点与中美科研安全紧张局势开始出现相吻合，也表明地缘政治压力加速了网络动态早已启动的进程。到2024年，美国仍出现在中国约87%的最短路径、英国约70%的最短路径以及德国约78%的最短路径中——比例依然可观，但与二十年前近乎全面的主导地位相比，已大幅下降。

图（b）展示了相反方向的发展：中国逐渐成为其他国家国际合作最短路径中的桥梁。直到约2017年，中国的桥接作用基本微不足道，三个源国的数值都徘徊在0.02左右。自2017年起，中国的桥接作用迅速增强并加速增长，到2024年，德国对应的数值约为0.065，而美国和英国的曲线则维持在较低水平，且彼此接近、重叠。德国对中国中介作用的依赖增长尤为迅速，这表明中国在连接欧洲和亚洲科学界方面发挥着日益重要的作用。两幅图共同为这一预期提供了直接的实证支持：随着中国和其他国家发展出替代性的桥接联系，美国作为不可或缺中介的作用已显著减弱，由此形成预期中的路径，降低了网络对枢纽的依赖。最显著变化集中在2017—2018年左右，这一时间点也进一步表明，在政策干预加速变化之前，网络重组就已全面展开；我们将在讨论部分回到这一点。

图*5. 2001—2024*年，最短路径中作为桥梁的美国或中国。采用了*3*年滚动窗口。

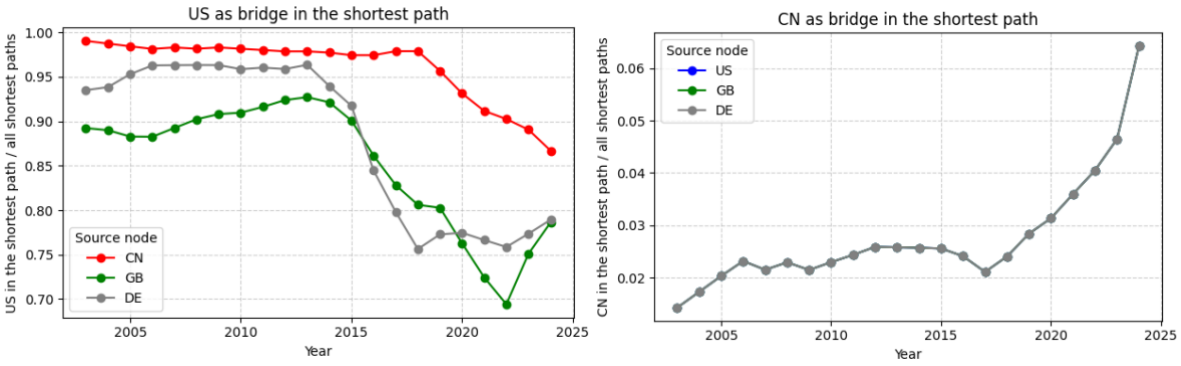


图6展示了2003—2024年期间中国、英国和美国网络整合度的两项互补指标。图（a）显示归一化度中心性——即各国已建立的合作连接占所有可能合作连接的比例——并最直观地呈现了中国融入全球科学网络的程度不断加深。期初，中国的数值约为0.51，与约半数可能的伙伴国家建立了连接；此后数值持续大幅上升，到2024年约为0.91。这一增长轨迹远超英国和美国较为温和的增幅；两国期初均已接近饱和，并在该时期末趋近于全面连接。这一模式直接支持了该假设的第三项预测：中国进入网络后创造了新的连接机会，并逐步把握这些机会，大幅拓展了合作范围；与此同时，既有强国则逐渐接近可能连接数量的上限。到2024年，三个国家的连接度都趋近饱和，这进一步证实，全球网络已变得比该时期初期更加包容，连接也更加密集。

图（b）展示了各国自我网络的模块度得分，这一指标反映了围绕各国形成的合作社群的结构变得多么鲜明。2003年至约2018—2019年，三个国家的模块度均呈上升趋势，表明在此期间，合作社群的界定日益清晰，内部凝聚力也不断增强。约在2018—2019年，三个国家的模块度同步急剧达到峰值，随后又同步大幅下降，这是我们数据中最引人注目的发现之一

。不同科学体系和地缘政治地位迥异的三个国家同时呈现这一模式，强烈表明其背后存在共同的外部原因，而非各自独特的国家动态。鉴于出版数据通常比实际合作活动滞后两到三年，这一峰值所反映的行为变化最有可能始于2015—2016年——我们将在讨论部分详细考察这一时期。美国和英国的模块度在2022—2024年左右略有回升，而中国的回升似乎稍晚且幅度较小。这一模式的影响将在讨论部分充分阐述。

图*6* 中国自我网络的扩展，*2001—2024*年。*(a)* 中国、英国、美国的归一化度中心性。*(a)* 三个国家自我网络的模块度得分。采用*3*年滚动窗口。

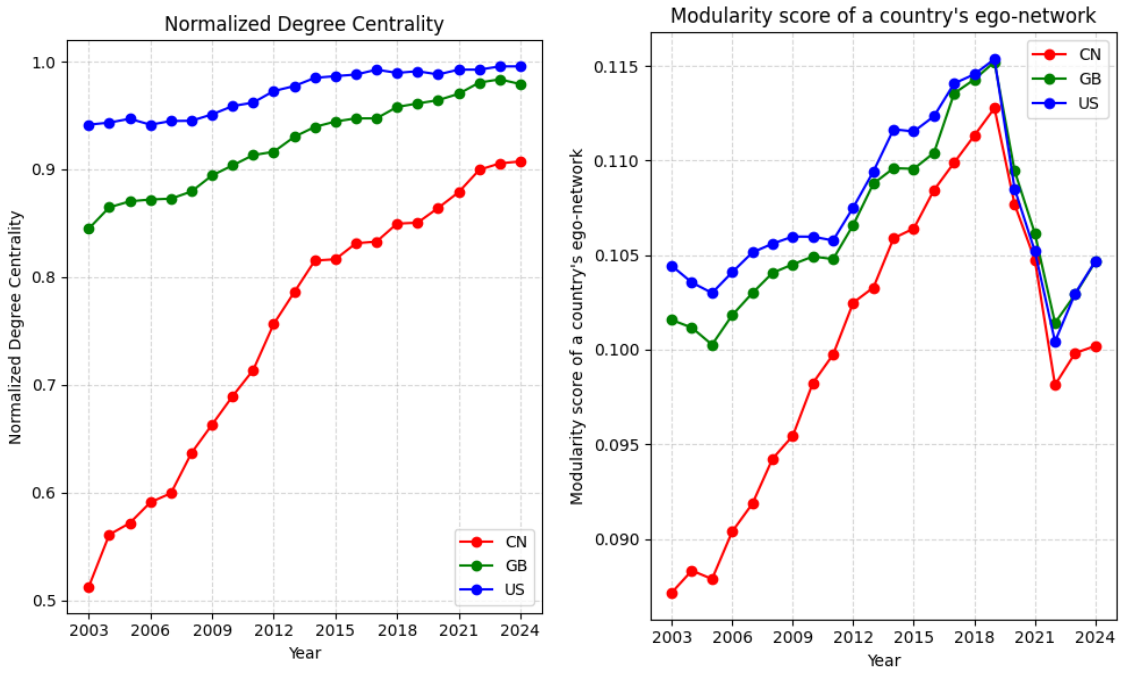
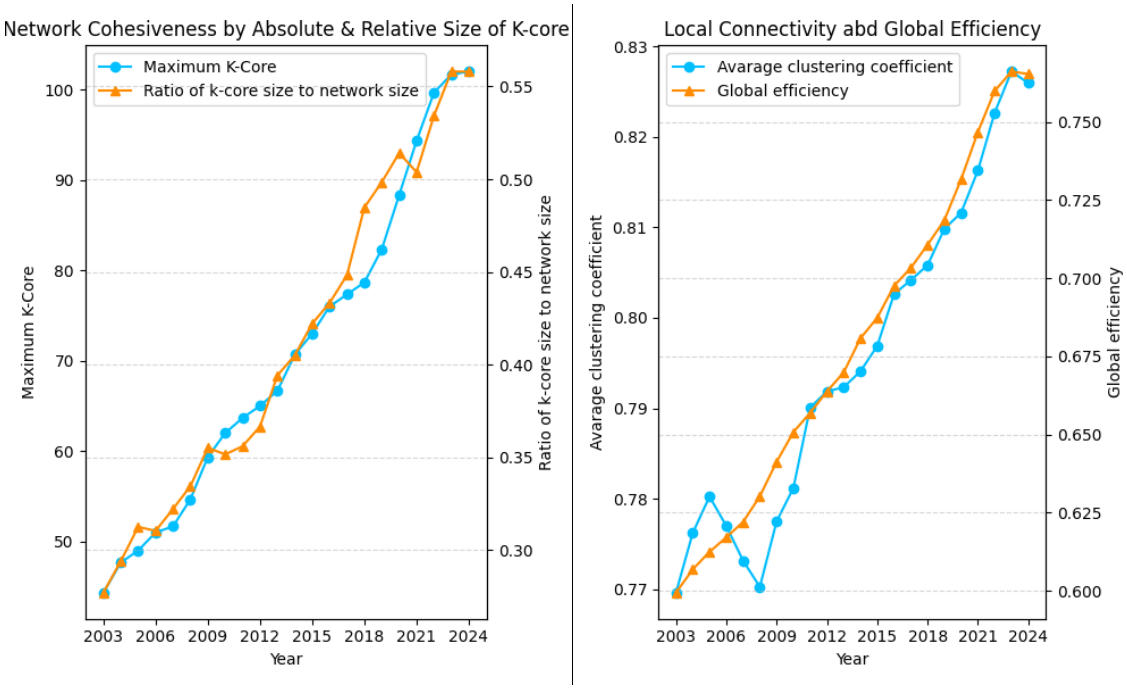


图7展示了全球网络凝聚力和效率的四项指标，这些指标共同为基于该假设的效率预测所预言的网络致密化提供了有力的结构性证据。面板(a)显示了两项互补的k核指标——最大k核值以及k核规模与网络总规模之比——二者均呈上升趋势

在整个2003—2024年期间，这一趋势持续且几乎呈线性发展。最大k-核规模从约45增至约102，增幅超过一倍，这表明全球网络中连接最密集的核心在绝对规模上显著扩大。与此同时，参与这一密集核心的国家占所有国家的比例从约28%升至55%，这意味着到2024年，网络中超过半数的国家都已成为这一密集连接核心的成员，而在二十年前，这一比例还不到三分之一。核心的扩张直接支持了该假设的第三项预测：外围国家获得了新的连接机会，并逐步加入全球网络中连接密集的中心区域，而全局效率也随之提升。

图（b）进一步支持全局效率有所提升这一结论。可以看到，平均聚类系数和全局效率均从2003年到2024年持续上升。聚类系数从约0.77升至0.83，表明各国的合作邻域日益紧密相连——拥有共同合作伙伴的国家如今更有可能彼此直接合作，从而形成更致密的局部集群。全局效率从约0.60升至0.77，表明网络中任意两个国家之间的知识传播可以通过更少的中间步骤、更直接地进行——这是一项直接衡量枢纽依赖降低程度的结构性指标。两项指标在2018—2021年左右均显著加速上升，这表明网络致密化不仅持续进行，而且恰恰在地缘政治紧张局势最严重的时期进一步加剧。综合来看，两个面板呈现出一个引人注目的发现：图6显示，自我网络模块度在2018—2019年前后受到地缘政治事件的显著扰动，而网络凝聚力和效率等更广泛的结构性指标却不受影响，继续呈上升趋势。这种分化表明，政策驱动的扰动改变了合作社群的性质，却没有扭转全球网络向更高密度、更高效率和更分布式连接发展的深层结构转型——这一转型由适应性动力学驱动，其作用层面比任何单一政策干预所能预测的都更为根本。

图7. 网络凝聚力与相对 k 核；全局效率、美国和中国，*2001—2024*年。采用了*3*年滚动窗口。



格兰杰因果分析：中国早期影响力的实证支持

图8展示了格兰杰因果检验的结果，考察中国在早些年份参与全球网络的情况——以其国际合著论文所占百分比衡量——是否能够预测全球网络结构后续的变化。针对每个领域，使用涵盖2001—2024年的面板数据，估计滞后阶数为1至6年的向量自回归模型，并报告不同滞后期设定下的最小p值。热图以浅红色标出显著的p值（≤ 0.05）；行代表领域——第0行表示所有领域的合并结果，第11至36行表示具体科学领域；列代表网络指标，包括聚类系数、k-核指标、社群结构、模块度得分、中介中心势、平均中介中心性和全局效率。红色单元格表示，在相应领域中，中国参与全球网络的情况可以预测该列所示网络指标的后续变化。

格兰杰因果关系分析结果是依据结构框架的第五项预期来解读的：作为高适应度进入者，中国早期参与应能预测随后发生的结构重组，而且这种预测关系应在不同领域中保持一致。首先必须明确一项重要的解读限制：由于其他主要科学强国也呈现出类似的预测关系，因此本分析无法证明中国是导致结构重组的唯一原因。结果能够证明的是，中国的融入是否符合预期的系统性特征——广泛存在、跨越不同领域，并集中体现于与结构洞闭合最相关的结构指标中；这正是该框架所要求的。热图中的若干模式与这一预期相符，但在不同网络指标和领域之间存在重要差异。

最显著且最一致的发现是，聚类系数、k-核节点和全局效率这三项网络指标，几乎在所有考察领域中都与中国的网络参与呈现显著的格兰杰因果关系。这种近乎普遍的模式表明，中国早期融入全球网络，系统性地预示了随后局部连通性的改善、紧密连接的网络核心的扩展，以及知识在国家间传播效率的提高；这与图6和图7所示的结构变化相吻合。从农业与生物科学、计算机科学、数学到社会科学，这些关系在各种不同领域中都一致存在，表明中国的融入催生了广泛而系统的网络转型。这一发现构成了本分析中支持结构洞假说的最有力实证证据。

中介中心势一栏呈现出异质性模式。在包括农业与生物科学、商业管理与会计，以及从化学到材料科学的各个领域在内的部分领域中，中国早期参与与随后中介中心势变化之间存在显著的预测关系（这一指标与图1和图2所记录的桥接角色重新分配最为直接相关）。这种选择性具有启示意义：中国的参与最能预测桥接角色分布随后发生变化的领域，正是中国最早发展出显著科研能力的领域，这与该假设的预期一致，即网络重组会从新进入者最先获得能力的领域逐步扩散。

模块度得分一栏显示，各领域之间的格兰杰因果关系最弱，也最缺乏一致性。这种异质性模式与将网络视为复杂适应系统的观点相符：在这一系统中，中国的融入通过不同的因果路径，以不同的速度影响了不同的结构维度。

显著的因果关系并未均匀地出现在所有领域，而是呈现出差异，这反映了中国在不同领域科研能力发展的步伐并不一致。这一复杂模式支持了该假设对网络重组的构想，即网络重组是一个涌现过程，级联适应会随着时间推移在网络中逐步渗透，而滞后期则反映了个体行为变化聚合为可测量结构变化所需的时间。

总体而言，格兰杰因果关系结果提供了与该假设一致但有限且对滞后期敏感的提示性证据，表明中国不断变化的网络参与先于全球网络结构随后在多个维度和领域发生的重组，并在时间上与之相关。

图*8 2001—2024*年网络指标的格兰杰因果检验结果。对于每个领域—指标组合，首先使用 *Benjamini–Hochberg*错误发现率（*FDR*）

校正对所有检验的p值进行调整，并报告六种滞后期设定下最小的FDR校正后的p值。

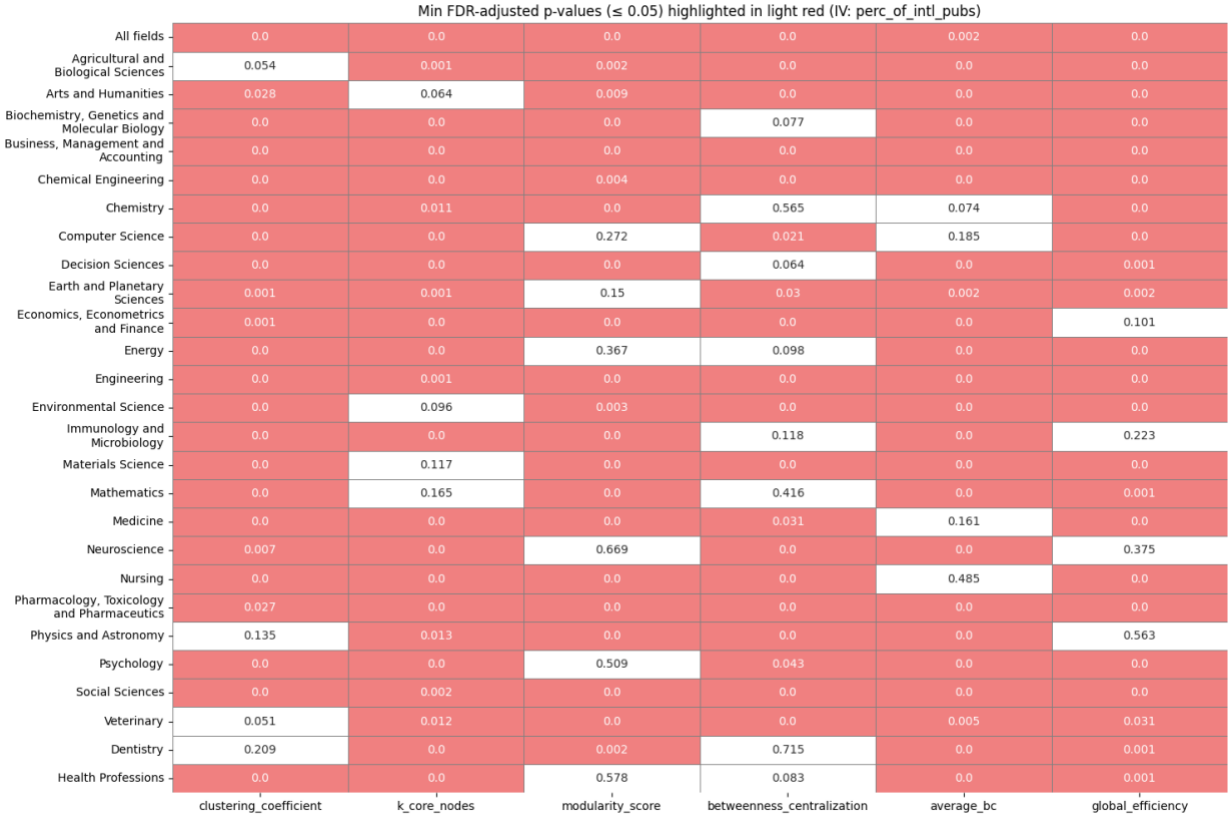
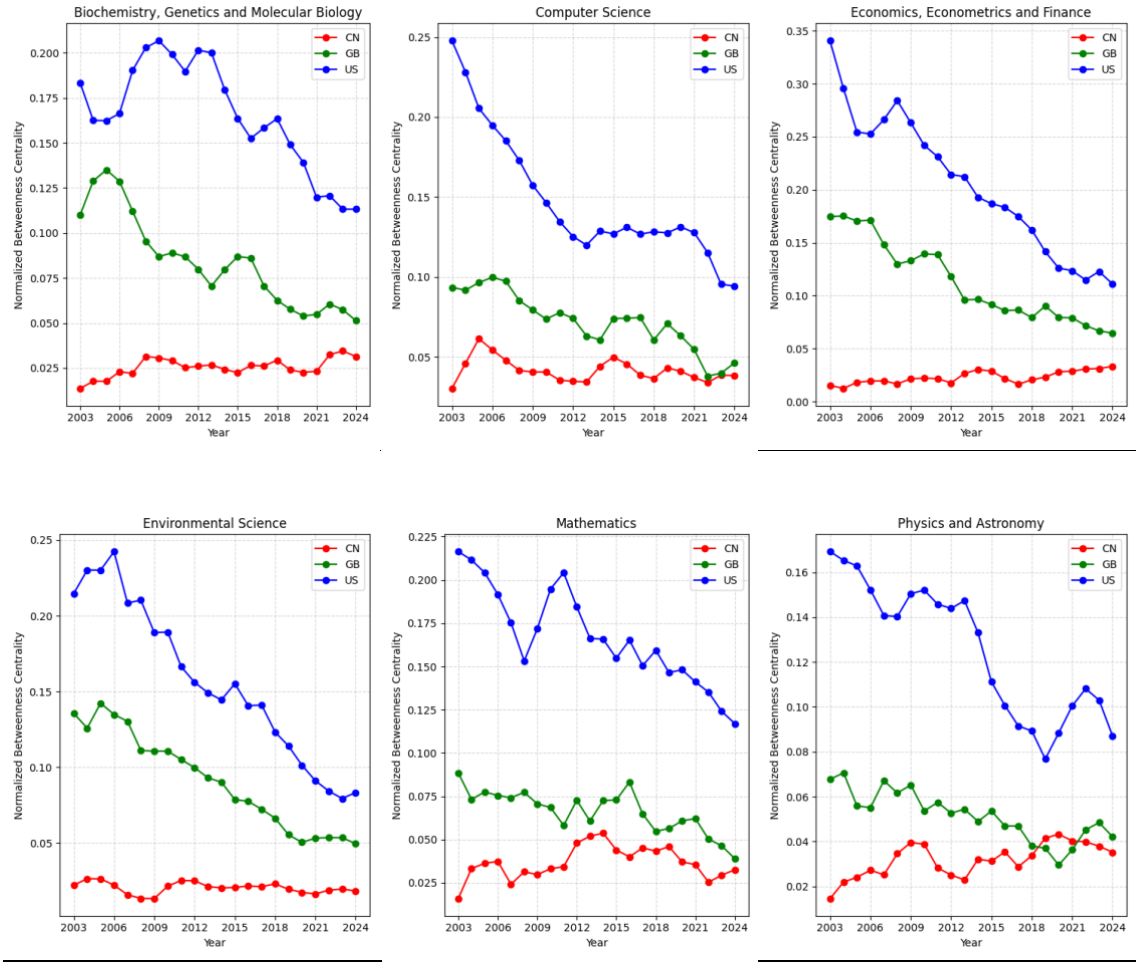


图9展示了2003年至2024年六个主要科学领域的标准化介数中心性趋势——生物化学、遗传学与分子生物学、计算机科学、经济学、计量经济学与金融学、环境科学、数学以及物理学与天文学。六个面板中最显著的发现是美国中心性下降趋势的一致性：毫无例外，美国在所考察的每个领域中，桥接中心性均有所下降，这证实网络重组是系统性的，而非集中在特定领域。各领域的下降速度有所不同，其中计算机科学和经济学的份额流失速度快于数学或物理学与天文学。

中国在各领域的具体模式呈现出更加异质化的特征。在环境科学和生物化学领域，中国的中心性始终微不足道；而在数学领域，尤其是在物理学与天文学领域，中国表现出最持久且最稳定的增长，

在后一个领域，到2024年几乎与英国趋于一致。英国的下降趋势与美国在全部六个领域中的模式相呼应，进一步支持了这样的解释：无论涉及哪些国家，依赖枢纽的网络结构正逐渐让位于更加分布式的架构。

图*9 2001—2024*年六个领域按领域划分的标准化介数中心性。采用了*3*年滚动窗口。



讨论

所提出的结构框架提出了五项可检验的预期，可据此评估网络分析。总体而言，研究结果为该框架提供了强有力的实证支持，同时也提出了重要限定条件，并揭示了一项框架未曾预见的重大新发现；这一发现指向一种仅凭网络数据无法解决的因果复杂性。

结构预期得到了有力支持：网络重组是通过去中心化路径扩增实现的，而非枢纽替代。美国的拓扑中心性下降了约 80%，而加权中心性则得以保留。全局效率和 k-核参与度持续上升——这正是分布式空洞闭合的特征。

第四项预测——即中国早期的网络参与度能够预测后续结构变化，并通过格兰杰因果分析进行检验——得到了有条件的支持。分析表明，在多个领域中，中国早期的网络参与度与聚类系数、k核指标和全局效率的后续变化之间存在显著的预测关系，这与中国的融入催化了整个网络适应性响应这一假设相符。需要强调这一限定：格兰杰因果关系确立的是预测性时间关系，而非真正的因果关系；具体的领域层面模式也需要谨慎解读。更恰当的理解是，这一发现表明，中国的融入与网络重组相关，且先于网络重组发生，其方式与演化网络机制相符，而不是证明了直接的因果链条。

第五项预期认为，重组将在各科学领域中持续显现。图9的分领域分析充分支持了这一预期：在研究期间，美国的中介中心性在考察的六个主要领域中均有所下降。下降速度虽有差异，但方向一致，其中计算机科学和经济学的下降最为显著，生物化学、遗传学与分子生物学的下降最缓。这种跨领域的一致性反映的是全球网络的系统性结构转型，而非集中于特定科学领域的竞争动态。

假设未能预料到的情况

有两项发现值得进一步讨论，因为它们偏离了假设最初的预测。第一，中国的拓扑中心性——即其在无权网络中的标准化介数中心性——在这一时期并未显著上升。图2的（a）面板显示，中国的中心性在整个时期基本持平；即便美国的中心性急剧下降，中国的桥接作用仍微乎其微。该假设预期，随着现有枢纽中心性下降，新进入者的中心性会有所提升；但数据表明，美国中心性下降所释放的中心性，是分散到整个网络之中，而非转移至中国或任何其他单一的继任枢纽。实际上，这比简单的“美国向中国转移”更有力地印证了网络演化的解释，但这也要求对假设作出比暗示中国崛起是美国衰落之镜像的版本更谨慎的表述。

其次，也是最重要的一点，三个国家的模块度在2018—2019年左右同步达到峰值后又同步崩塌，这一现象并非结构框架所能预测，也是本分析中最令人费解的涌现性发现。该框架预期的是分布式空洞逐步闭合，而非在科学体系和地缘政治地位迥异的国家中同时出现明显的剧烈中断。这一发现指向一种范围足够广的外生冲击，足以同时扰乱整个网络的合作社群结构。关键在于，这种冲击可能体现为与地缘政治变化相关的网络变化，也可能是地缘政治关系恶化导致网络中断，或者两者通过反馈循环共同作用；我们的数据无法判定究竟属于哪种情况。面对这种不确定性，恰当的分析方式不是断言单一解释，而是清晰梳理可能的因果空间，并指出区分相互竞争的解释还需要哪些证据——我们在下文的政策讨论中尝试这样做，但这一问题仍需进一步研究。

全球转向科学民族主义

本文所记录的结构转型，正值科技发达国家的政策发生重大且日益扩大的变化之际（见James等，2025年）。自约2015年以来，尤其是2018年后变化显著加快，北美、欧洲和亚太地区各国政府纷纷出台或大幅扩展相关框架，分别称为科研安全、技术主权、防范外国干预以及科学与技术领域的战略自主。尽管具体措施

因国家背景而异，涵盖正式的研究安全指南、合作审查机制、技术投资中的本土含量要求，以及明确推行技术自给自足的政策。这些政策有着共同的底层逻辑：国家之间，尤其是与中国之间的科技相互依存，被视为需要加以管理的脆弱性，而非值得培育的富有成效的关系。

最后这一点值得强调，因为它正是我们的分析所揭示的政策悖论的核心。各机构普遍不愿与中国科研合作伙伴开展合作、不愿聘用中国研究人员和学生、不愿承认中国在其科研领导力已显而易见的领域所取得的成就，或不愿与中国维持合作关系，这些做法都忽视了网络化关系所带来的益处。全球科学界通过过去二十年间数百万次有关合作关系和共同署名的个体决策所表达的集体判断，始终基于真正的科研能力和互利，将中国纳入网络核心。政策言辞和机构实践却日益背道而驰，将网络自身的互惠逻辑早已认可并接受的贡献视为威胁。

这一现象的核心悖论在于其结构性。尽管网络数据表明，分布式、网络化的科学社群比由美国主导的枢纽依赖型结构更高效、更具生产力，也更具包容性，科学民族主义的转向仍在发生。在整个研究期间，全局效率持续上升。k-核不断扩展，涵盖了半数以上的国家。与现代科学时代以往任何时候相比，网络中任意两点之间的知识流动都更加直接。换言之，各国正在退出一个运行状况比以往任何时候都更好的体系。如此一来，它们可能恰恰会失去分布式参与更高效网络所能带来的益处。

结论

本文旨在考察2001—2024年全球科学网络的结构重组，并评估这一重组对科学政策的影响，尤其是在

科学民族主义日益抬头的时代。研究结果明确，并在多种分析指标下均表现稳健。我们认为，这些结果对科学发达国家的政策制定者理解其所面临的竞争格局具有重要意义。在所考察的时期内，全球科学网络经历了根本性且不可逆的结构转型。通过对24年来1.366亿篇出版物进行网络分析，我们记录了这一转变：全球科学网络从以少数科学强国为中心、依赖枢纽的架构，转变为分布式多极结构。在这种结构中，知识流动更加高效，合作社群的连接更加紧密，网络核心的参与范围也已扩大至涵盖超过半数活跃于科学领域的国家。我们考察的每一项结构指标（中介中心性、k-核扩展、全局效率、聚类系数、度中心性和最短路径分析）都呈现出一致的趋势：网络日益稠密，资源分布不断调整，效率持续提升，产出不断增长。

在这一转变过程中，美国的拓扑中介中心性急剧下降——2003年至2024年间降幅约为80%——但按加权中心性衡量，其合作规模仍然可观。这一区别至关重要：美国已失去其作为全球科学知识流动中关键中介的结构位置，但仍是该体系中连接最广泛、产出最高的节点之一。美国失去了其在网络中的中心位置所带来的优势，但仍与众多国际伙伴保持着稳固的关系。

中国的融入推动了这一重组，而其规模和适应度很可能使其贡献在性质上有别于其他新进入者。中国加入网络，符合适应度模型的预测：高吸引力的新进入者会以低适应度新进入者无法做到的方式加速结构洞闭合。格兰杰因果分析表明，中国早期的网络参与能够预测随后在多个指标和领域中出现的结构变化。这一重组同时受到数十个国家的发展、区域集群的致密化，以及网络自然成熟过程中结构洞逐步闭合的影响。中国只是加快了重组进程。结构框架得到了支持：网络按照结构洞闭合和适应度驱动的连接所预测的方式发生了重组，而由此产生的结构变化，与其说是任何单一行为体政策的预期结果，不如说是网络动态涌现出的属性。

更应被视为网络动态的涌现属性，而非任何单一行动者政策的预期结果。

一种误读及其后果

本文在解释层面的核心贡献，是提出这样一种观点：科学发达国家，尤其是美国，借助一种混淆了两个分析上截然不同的问题的框架，来理解全球科学网络的结构转型：一是保护敏感军事研究和两用研究免遭利用这一真实而狭义的问题；二是在一个不断重组的格局中摸索前行这一结构性网络问题，在这一格局中，枢纽中心性因内生动态而不断减弱。所采取的保护性国家政策工具似乎主要针对第一个问题而制定，但结构性证据表明，第二个问题的影响可能更为深远，也更难解决。我们并不认为所有安全关切都毫无根据，因为有记录证实，知识产权侵占以及对大学研究关系的利用确实发生过。我们认为，政策应对的范围超出了这些案例所能证明的合理限度；过度限制针对的是一种政治机制，而网络变化才是解释脆弱感的更有力依据。

一种解释是，枢纽中心性的丧失，会让美国体系感到迷失，因为它失去了访问渠道、可见度，以及枢纽地位原本赋予的种种优势所带来的吸引力。在枢纽中心性急剧下降的时期，中国是网络中最显眼的新参与者，因此成了这一损失的直接解释；然而，造成这一损失的实际原因分布在整个网络重组过程中。

我们数据中显现的代价确实存在，只是目前尚无法完全量化。正如图6图（b）所示，2018—2019年遭到破坏的合作社群仅部分恢复。曾经居于核心地位的科学强国与中国之间的合作署名有所减少，而减少恰恰发生在先进技术、计算科学和工程学等领域——在这些领域，合作产出最能体现其价值（Flynn等，2024年）。与那些大力限制同中国合作的国家相比，那些维持更广泛对华交流的国家是否表现更好，是一个本文无法利用现有数据回答的实证问题。我们所

有数据能够确立的是：网络中断确实发生了，而且仍在持续；我们的分析并不支持广泛脱离的结构性理由。

逆向的政策要务

枢纽中心性具有自我强化效应：作为全球网络中的主导节点，意味着全球最优秀的思想、最有才华的研究人员和最重要的进展几乎会自动流向美国。在分布式网络中，这种引力逻辑已不再起作用。如今，全球科学前沿真正呈现多极格局，分布于中国实验室、欧洲联盟、新兴的亚洲科学强国，以及全球南方各地的研究社群之中；这些社群在二十年前还只是微不足道的行动者。一个国家若从这一分布式格局中退缩，并不能保护自己免受竞争，反而会使自己对那些与之失去联系的节点上正在发生的进展视而不见。

因此，在分布式网络中，战略要务与枢纽中心性所催生的要务正好相反。科学发达国家不应再将世界吸引到一个中心，而必须走向世界，主动扫描分布式全球前沿，在最重要的思想出现之处及时发现它们；无论领域领军者位于哪个国家，都应与之建立战略联系；同时还要维持必要的制度条件，确保在全球网络任何地方获得的知识，都能回流并增强国内科研能力。这不仅要求采取不同的科学政策，更要求从根本上转变战略取向：将广泛的国际联系视为竞争所必需，而非安全漏洞；并认识到，网络自身的优先连接逻辑可成为国家科学战略的工具，而不是对其构成的威胁。

这种重新界定具有具体影响。限制科研人才流动的移民和签证政策，恰恰切断了知识在分布式网络中流动所依赖的连接。基于国籍而非具体的与安全相关的行为，广泛适用科研安全框架，会削弱科学竞争力所依赖的连接度，却几乎无助于应对确实需要限制的那一小类真正敏感研究。将国际科学交流视为天生具有风险的言论，会阻碍科学发达国家借以保持对分布式全球前沿可见性的合作关系——正如我们的数据所显示的，这些关系是网络自身基于公认的科学价值和互利逻辑，通过优先连接建立起来的

国家保持对分布式全球前沿的可见性——正如我们的数据所显示的，这些关系是网络自身基于公认的科学价值和互利逻辑，通过优先连接建立起来的。

未来研究

本文呈现的发现引出了一个自然的反事实问题，而现有数据和研究设计无法直接回答：如果中国没有融入全球科学网络，或者中国走上了不同的发展轨迹，那么全球科学网络会是什么样子？要严谨地回答这一问题，需要进行节点移除分析，比较现实情形与不包含中国的情形下网络结构属性的差异；或者采用合成控制法，以科学快速增长国家作为可比的供体；又或者根据2001年前的网络条件校准基于主体的模拟，并分别模拟有无中国这样规模的高适应度进入者。每种方法都有各自的假设和局限，尤其涉及中国科学崛起与网络本身之间的内生性，以及在移除一个重要网络参与者的同时保持地缘政治背景不变是不可能的。不过，这类分析或许能够确定：我们记录的结构转型究竟是因中国融入而加速，还是无论如何都会随着网络的正常成熟而发生——这一区别将直接影响政策制定者如何解读这一重组，并据此调整应对措施。

致谢

我们感谢 Andrew Plume 和爱思唯尔的其他同事在数据方面提供的帮助。我们使用 Claude.ai 协助构建论文提纲、检查语法并编制参考文献。我们感谢 MPIWG 莉泽·迈特纳研究组负责人 Anna Lisa Ahlers 协助界定研究范围，也感谢马克斯·普朗克科学史研究所研讨会的参与者就这一主题提出意见并参与交流。

参考文献

Adams, J., & Szomszor, M.（2022）。全球科研体系的趋同。《定量科学研究》，3(3)，553–569。Bornmann, L., Adams, J., & Leydesdorff, L.（2018）。在纳米技术领域引用时偏向本国的负面影响。《Scientometrics》，116(2)，1201–1212。https://doi.org/10.1007/s11192-018-2762-8 Börner, K., Maru, J. T., & Goldstone, R. L.（2004）。作者与论文网络的同步演化。《美国国家科学院院刊》，101（增刊1），5266–5273。Clauset, A., Newman, M. E., & Moore, C.（2004）。在超大型网络中发现社群结构。《物理评论E》，70(6)，066111。https://doi.org/10.1103/PhysRevE.70.066111 Collaco, J., St. Geme, J. S., Abman, S., & Furth, S.（2022）。团队合作成就团队科学的成功：多中心网络中的职业发展。《儿科杂志》，98(3)，227–229。Docampo, D., & Bessoule, J. J.（2019）。分析和评估国家与机构科研产出的一种新方法。《Scientometrics》，119(2)，1207–1225。Eberle, J., Stegmann, K., Barrat, A., Fischer, F., & Lund, K.（2021）。跨职业阶段和学科开展科学合作：基于行为数据的网络分析。《International Journal of Computer-Supported Collaborative Learning》，16(2)，263–294。Flynn, R., Glennon, B., Murciano-Goroff, R., & Xiao, J.（2024）。《为科学筑起一道墙》

:

美国—中国紧张局势对国际科学研究的影响（NBER工作论文第32622号）。美国国家经济研究局。Forchino, M. V., & Torres Salinas, D. (2025). OpenAlex数据库评述：评估其应用、能力与局限。https://doi.org/10.5281/zenodo.17357948 Freeman, L. C. (1977). 一组基于中介中心性的中心性测量指标。《社会计量学》，*40*(1), 35–41。https://doi.org/10.2307/3033543 Frenken, K., Hölzl, W., & Vor, F. (2005). 科研合作的引文影响力：欧洲生物技术与应用微生物学案例（1988年–2002）。《工程与技术管理杂志》，*22*(1–2), 9–30。https://doi.org/10.1016/j.jengtecman.2004.11.002

Frenken, K., Ponds, R., & Van Oort, F. (2010). 以科学为基础的产业中科研合作的引文影响力：空间—制度分析。《区域科学论文集》， *89*(2), 351–371。https://doi.org/10.1111/j.1435-5957.2010.00309.x Gui, Q., Liu, C., & Du, D. (2025). 全球科学合作模式与趋势：对国际合著网络的综合分析。《研究政策》， *54*(2

),

104–118。Gunn, A., & Johansen, J. (2022). 数字时代的国际科研合作：挑战与机遇。《科学与公共政策》， 49(3), 412–428. https://doi.org/10.1093/scipol/scac015 Howells, J. (1990). 研发国际化与全球研究网络的发展。《区域研究》， 24(6), 495–512. https://doi.org/10.1080/00343409012331346174 Hu, A. G. Z. (2020). 公共资助与中国科学的崛起：来自国家自然科学基金委员会的证据。《研究政策》， 49(5), 103944. https://doi.org/10.1016/j.respol.2020.103944 James, A., Flanagan, K. ; Naisbitt, A., Rigby, J. (2025) 欧洲研究安全：威胁视角与政策制定者的应对。曼彻斯特大学。Jefferson, O. A., Kögler, D. F., Cavalli, E., & Aboy, M. (2024). 生物技术领域的国际合作与知识生产：网络分析方法。《技术预测与社会变迁》， 198, 122945. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122945 Jeong, H., Néda, Z., & Barabási, A. L. (2003). 测量演化网络中的优先连接。《欧洲物理快报》， 61(4), 567–572

Jeong, S., Choi, J. Y., & Kim, J. Y. (2013). 探讨合作照料者与孤立老年痴呆症患者之间的熟悉度、信任与同质性的影响。《技术预测与社会变迁》， 80(8), 1554–1563. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2013.03.003 Jervis, R. (1978). 安全困境下的合作。《世界政治》， 30(2), 167–214. Katz, J. S., & Hicks, D. (1997). 合作的价值有多大？校准文献计量模型。Scientometrics，40(3), 541–554. https://doi.org/10.1007/BF02459299 Kontopoulos, K. M. (1993). 社会结构的逻辑。剑桥大学出版社。Kwiek, M. (2015). 欧洲科研的国际化：从微观层面视角对11个国家体系进行的定量研究。《国际教育研究杂志》， 19(4), 341–359. https://doi.org/10.1177/1028315315572928

Leydesdorff, L., & Wagner, C. S. (2008). 科学国际合作与核心群体的形成。《信息计量学杂志》，*2*(4), 317–325. https://doi.org/10.1016/j.joi.2008.07.003 Leydesdorff, L., Wagner, C. S., Park, H. W., & Adams, J. (2013). 科学国际合作：全球地图与网络。*El Profesional de la Información*，*22*(1), 55– 61. Li, J. T. (2018). 关于中国高被引研究进展的探讨：对高

y

被引数据库。*PLoS ONE*，*13*(8)，e0201764。Lin, W. C., & Chang, C. W. (2022). 中国学者对全球研究的影响。《科学报告》，*12*，18410。https://doi.org/10.1038/s41598-022-23024-z Merton, R. K. (1957). 科学发现中的优先权：科学社会学的一章。《美国社会学评论》，*22*(6)，635–659。https://doi.org/10.2307/2089193 Milojević, S. (2010). 现代科学中的合作模式：超越幂律和优先连接。《美国信息科学与技术学会会刊》，*61*(7)，1410–1423。https://doi.org/10.1002/asi.21331 Milojević, S. (2014a). 网络分析与指标。载于 Y. Ding、R. Rousseau 和 D. Wolfram（编），衡量学术影响力（第 91–114 页）。施普林格。https://doi.org/10.1007/978- 3-319-10377-8 3_Milojević, S. (2014b). 科学研究团队形成与演化的原则。《美国国家科学院院刊》，*111*(11)，3984–3989。https://doi.org/10.1073/pnas.1309723111 Monge, P. R., & Contractor, N. S. (2003). 通信网络理论。牛津大学出版社。美国国家科学院、工程院和医学院。（1999）。联邦研究计划评估：研究与《政府绩效与成果法案》。美国国家科学院出版社。https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK547315/ Ostrom, E. (2000). 集体行动与社会规范的演化。《经济展望杂志》，*14*(3)，137–158。https://doi.org/10.1257/jep.14.3.137 Padgett, J. F., & Powell, W. W. (2012). 组织与市场的兴起。普林斯顿大学出版社。Pan, R. K., Kaski, K., & Fortunato, S. (2012). 世界引用与合作网络：揭示地理因素在科学中的作用。《科学报告》，*2*，902。

Pinheiro, F. L., Santos, F. C., & Pacheco, J. M. (2016). 自适应社会网络中个体行为与集体行为的联系。《物理评论快报》，*116*(12)，128702。https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.128702 Priem, J., Piwowar, H., & Orr, R. (2022). OpenAlex：一个完全开放的学术作品、作者、出版平台、机构和概念索引。*arXiv*。https://arxiv.org/abs/2205.01833 Rosvall, M., & Bergstrom, C. T. (2007). 复杂网络中的随机游走图揭示社群结构。《美国国家科学院院刊》，*105*(4)，1118– 1123。Sá, C., & Sabzalieva, E. (2018). 全球化世界中的科学民族主义。载于 C. Marope、P. J. Wells 和 E. Hazelkorn（编），高等教育排名与问责：用途与误用（第 149–166 页）。联合国教科文组织出版社。Salter, A. J., & Martin, B. R. (2001). 公共资助的基础研究的经济效益：批判性综述。《研究政策》，*30*(3)，509–532。Shu, F., Julien, C.-A., & Larivière, V. (2018). Web of Science 能否准确呈现中国科研表现？*Journal of the Association for Information Science andTechnology*，*69*(10)，1273–1280。Simon, H. A. (1962). 复杂性的架构。《美国哲学会会刊》，*106*(6)，467–482。Tang, L. (2013). “物以类聚”是否重要：中美科学合作纵向研究的证据。《信息计量学杂志》，*7*(3)，577–587。Tang, L., Shapira, P., & Youtie, J. (2015). 中国研究引用量增长背后是否存在俱乐部效应？*Journal of the Association for Information Science and Technology*，*66*(9)，1923–1932。Wagner, C. S., & Leydesdorff, L. (2005). 网络结构、自组织与科学国际合作的增长。《研究政策》，*34*(10)，1608–1618。https://doi.org/10.1016/j.respol.2005.08.002 Wagner, C. S., Park, H. W., & Leydesdorff, L. (2015). 全球研究合作网络持续增长：国家政府面临的难题。*PLoS ONE*，*10*(7)，e0131816。https://doi.org/10.1371/journal.pone.0131816 Wagner, C. S., Brahmakulam, I., Jackson, B., Wong, A., & Yoda, T. (2018). 科学与技术合作：在发展中国家建设能力？兰德公司 Cor

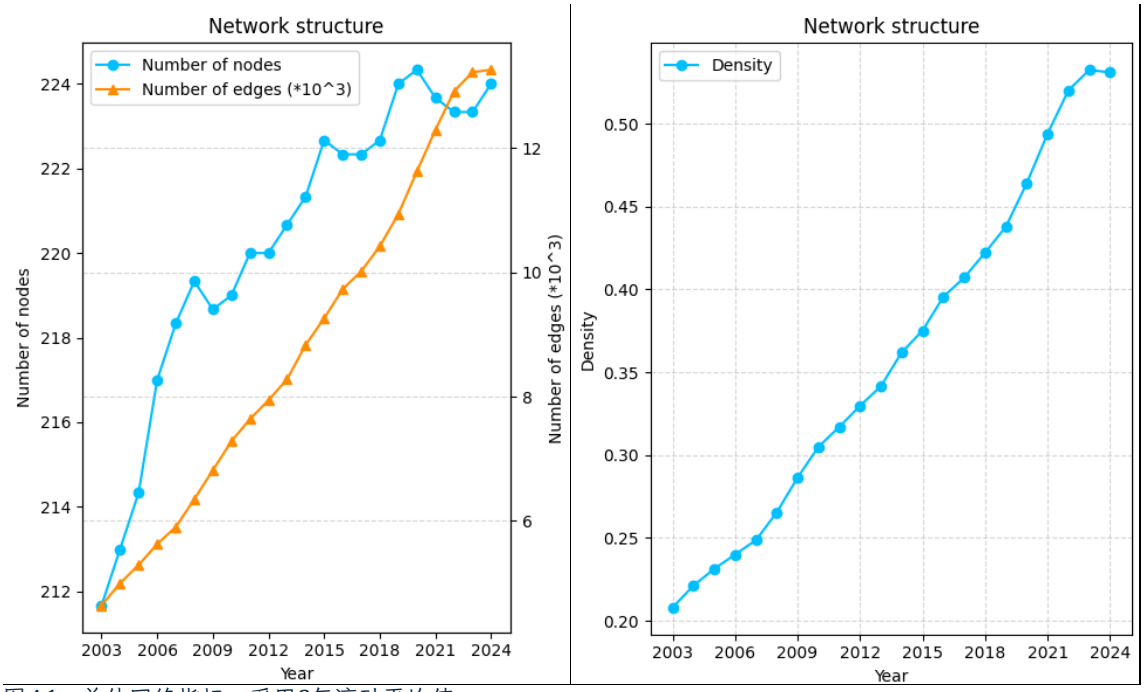
p作。

Wagner, C. S., Whetsell, T. A., & Mukherjee, S. (2019). 国际科研合作：知识重组中的新颖性、常规性与非典型性。《研究政策》,*48*(5), 1260–1270. https://doi.org/10.1016/j.respol.2019.01.002 Wagner, C. S., Zhang, L., & Leydesdorff, L. (2022). 使用引文影响力指标比较中国不同领域的科研表现。*Scientometrics*, *127*(4), 2089–2108. Wu, L., Wang, D., & Evans, J. A. (2019). 大型团队推动科学与技术的发展，小型团队则颠覆科学与技术。*Nature*, *566*(7744), 378–382. https://doi.org/10.1038/s41586-019-0941-9 Xafis, V., Schaefer, G. O., Labude, M. K., Zhu, Y., & Hsu, L. Y. (2021). COVID-19疫情背景下全球卫生研究伙伴关系面临的挑战。*DevelopingWorld Bioethics*, *21*(2), 74–78. https://doi.org/10.1111/dewb.12304 Yin, L., Kretschmer, H., Hanneman, R. A., & Liu, Z. (2006). 科研合作中的联系与分层：对COLLNET网络的分析。*Information Processing &Management*, *42*(6), 1599–1613. Z hang, C., Bu, Y., Ding, Y., & Xu, J. (2018). 理解科学合作：同质性、传递性与优先连接。*Journal of the Association forInformation Science and Technology*, *69*(1), 72–86. https://doi.org/10.1002/asi.23916 Zhu, Y. P., & Park, H. (2022). 中国最高被引学者的概况：他们是谁？他们在多大程度上具有跨学科性？*El Profesional de la Información*, *31*(2), e310213.

技术附录

网络的构建

我们利用发表在期刊上的1.366亿篇论文、札记、来信和综述，评估国际合著模式、知识动态和影响力。我们构建了按年份划分的涵盖所有领域的全球合作网络，以及各个特定领域的网络；网络中的连接表示来自任意两个国家的作者在同一篇出版物中共同署名。采用整数计数法：一篇出版物只要有来自A国和B国的作者，就计为这两个国家之间的一次合作。如图A1所示，整个时期内网络不断扩大，涉及的国家越来越多，国家间的合作连接也随之增加，网络密度不断上升。



图*A1*。总体网络指标。采用*3*年滚动平均值。

由于边权重高度偏斜，且取决于各国的产出水平，因此采用了不同的归一化方法——对数、Salton和Jaccard——来调整边权重。这使得我们能够更稳健地比较网络中关键行动者的加权中介中心性。

$$w_{log} = \log(w + 1)$$

$$w_{salton} = \frac{w}{\sqrt{p_i p_j}}$$

$$w_{jaccard} = \frac{w}{p_i + p_j - w}$$

p_i 和 p_j 分别表示 i 和 j 的产出。

模块度与社群数量

社群数量由 Python 中的 NetworkX 软件包生成。它指的是使用 Clauset-Newman-Moore 贪婪模块度最大化方法得到的贪婪模块度社群数量（Clauset 等人，2004 年）。贪婪模块度最大化从每个节点各自构成一个社群开始，随后合并使模块度增幅最大的两个社群，直到不存在这样的社群对，或达到社群数量上限。

使用 Python 中的 NetworkX 包计算的模块度得分，用于衡量网络划分为社群的程度。它基于通过贪心模块度最大化生成的社群划分，并量化社群内节点之间的连接紧密程度。换言之，模块度较高意味着社群内的边数量多于随机情况下的预期，表明社群结构较为明显。反之，模块度较低则表示社群间边的比例高于社群内边，说明网络的凝聚程度较低。

中介中心性

中介中心性衡量一个节点位于网络中其他节点之间最短路径上的程度（Freeman, 1977 年）。对于节点 *i*，其中介中心性（BC_i）计算如下：

$$BC(i) = \sum_{s\neq i\neq t,\ s,t\in V} \frac{\sigma_{st}(i)}{\sigma_{st}} \quad (1)$$

其中，V 是网络中所有节点的集合，σ_{st} 是节点 *s* 和 *t* 之间最短路径的总数，而 $\sigma_{st}(i)$ 是这些路径中经过节点 *i* 的路径数量。该指标取决于网络拓扑，且不考虑边权重，因为它只考虑节点之间是否存在连接（二元状态），而不考虑连接的权重。

为了比较不同规模的网络，通常使用标准化介数中心性，即用网络中*n*个节点时可能达到的最大值对标准中介中心性进行标准化：

$$BC_{norm}(i) = \frac{BC(i)}{(n-1)(n-2)/2} \quad (1)$$

其中，(*n*-1)(*n*-2)/2 表示排除 i 后所有有序节点对的总数，也就是在由*n*个节点组成的网络中，一个节点可能中介的潜在路径最大数量。

加权中介中心性是标准中介中心性的扩展，会将网络中的边权重纳入计算。它通过考虑两个节点之间的加权最短路径（该路径使权重倒数之和最小），更真实地衡量节点的重要性。例如，考虑一个边权重为 $w_{AB} = 100$、$w_{BC} = 100$、$w_{AC} = 1$ 的网络，对应的距离为：$d_{AB} = d_{BC} = 1/100$、$d_{AC} = 1$。从 A 到 C 的最短路径是 A-B-C（d = 0.02），优于直接路径 A-C（d=1）。加权中介中心性

因此，B 的中介中心性也考虑了这类中介路径。标准化加权介数中心性采用与无权变体相同的标准化流程，以确保尺度不变性。

一般而言，中介中心性较高的节点通常被视为重要的守门人或桥梁，因为它们能够促进网络不同部分之间的信息、资源或影响力流动。在这里，我们将考察各年份的中介中心性得分，以检验中国在整体网络中以及各领域中的中心性是否有所提升。中心节点很可能对整体网络结构至关重要，因为它们连接着网络中的不同集群或社群。随着时间推移，这些节点的中介中心性变化可能意味着网络结构发生了转变，或出现了新的有影响力节点。

最短路径

在加权网络中，两个节点之间的最短路径定义为总距离最小的路径，其中距离通常为边权重的倒数。例如，考虑一个边权重分别为 $w_{AB} = 100$、$w_{BC} = 100$、$w_{AC} = 1$、$w_{AD} = 2$ 的网络，对应的距离为：$d_{AB} = d_{BC} = \frac{1}{100}$、$d_{AC} = 1$、$d_{AD} = 1/2$。从节点 D 到节点 A、B、C 的最短路径分别为 D-A、D-A-B 和 D-A-B-C，总距离分别为 0.5、0.51 和 0.52。这说明节点 A 对节点 D 至关重要，因为从 D 到网络中其他节点的所有最短路径都经过 A。

特征向量中心性

特征向量中心性通过同时考虑节点自身的连接以及它所连接节点的重要性，来衡量该节点在网络中的影响力。一个节点的中心性得分与其所有邻居的中心性得分之和成正比。其数学表示如下：

$$x_i = \frac{1}{\lambda}\sum_i^n A_{ij}x_j, \text{ or in the matrix form } A\boldsymbol{x} = \lambda\boldsymbol{x}$$

其中，x_i 表示节点 i 的中心性，A_{ij} 表示图 G 的邻接矩阵；λ 是 A 的最大特征值，$\boldsymbol{x}$ 是对应的右特征向量。从本质上说，特征向量中心性衡量一个节点与其他高中心性节点的连接程度，从而反映该节点在网络中的直接和间接影响力。

格兰杰因果关系

格兰杰因果关系是一种统计概念，用于确定一个时间序列是否有助于预测另一个时间序列。需要注意的是，格兰杰因果关系并不意味着真正的因果关系，而是指一种预测性的时间关系。鉴于多个变量呈现趋势性，首先对所有序列进行一阶差分，以降低潜在的非平稳性；不过，由于数据的时间跨度有限，仍可能存在一定程度的残余非平稳性（23.8% 至 43.9%）。

在分析一个国家对全球科学网络的影响力时，我们可以通过以下方式应用格兰杰因果检验。首先，构建时间序列数据，其中包括中国国际合作产出占全球产出的比例，以及一组全球网络指标——例如平均聚类系数、k-核中的国家数量、k核规模与网络规模之比、社群数量、模块度得分、中介中心势、平均中介中心性和全局效率。这些指标分别针对所有领域合并后的总体以及各个单独领域进行汇总。对于每个数据集，我们检验中国科学产出的变化是否会格兰杰导致全球科学网络特征发生变化。模型采用 1 至 6 阶滞后进行估计，并依据赤池信息准则（AIC）选择最优滞后阶数。然而，鉴于时间序列相对较短（2001–2024），较高阶的滞后期设定会大幅减少有效样本量，因此结果可能对滞后阶数的选择较为敏感。

我们通常会使用向量自回归（VAR）模型，其形式可能如下：

$$Y_t = \alpha + \beta_1 Y_{t-1} + \cdots + \beta_p Y_{t-p} + \gamma_1 X_{t-1} + \cdots \gamma_p X_{p-1} + \varepsilon_t$$

其中，Y_t 表示时间 t 的全球指标；X_t 表示时间 t 的该国指标；p 为纳入的滞后期数。

为考虑不同领域、指标和滞后期设定之间的多重比较，我们使用**Benjamini–Hochberg假发现率（FDR）校正**对p值进行调整。对于每个领域–指标组合，我们报告六种滞后期设定中最小的FDR校正后的p值，以代表观测到的最强滞后期特异性关联。随后，我们考察最佳拟合模型中各系数的p值，低于0.05即表明具有统计学显著性。鉴于多重检验、滞后期选择和时间序列较短等因素，这些结果应被视为探索性发现，可提示潜在的时间关联，而非稳健的预测关系。如果校正后的$p<0.05$，我们将此视为证据，表明该国的科学产出先于全球科学趋势随后发生的变化，并与之存在时间关联。

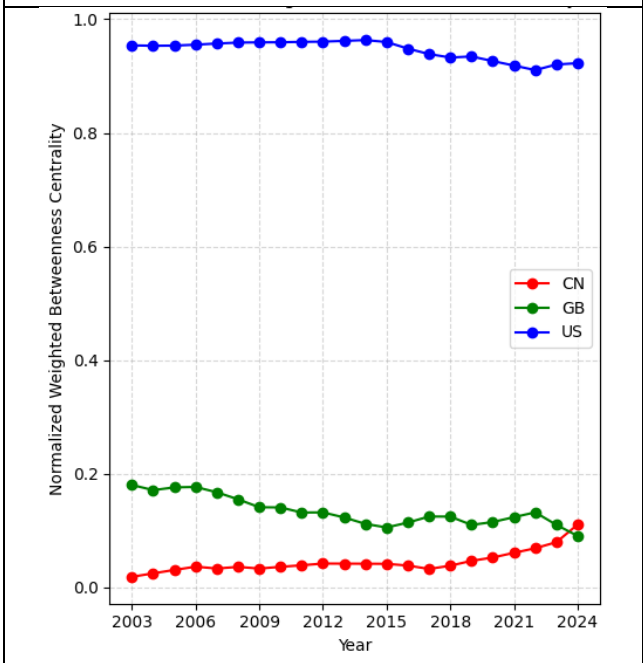
通过应用格兰杰因果检验，我们可以深入了解一个国家的科学产出变化是否倾向于先于全球科学趋势的变化。这或许能为该国在全球科学中的影响力或领导地位提供证据。

Clauset, A., Newman, M. E., & Moore, C. (2004). 在超大型网络中寻找社群结构。《物理评论*E*》, *70*(6), 066111。https://doi.org/10.1103/PhysRevE.70.066111

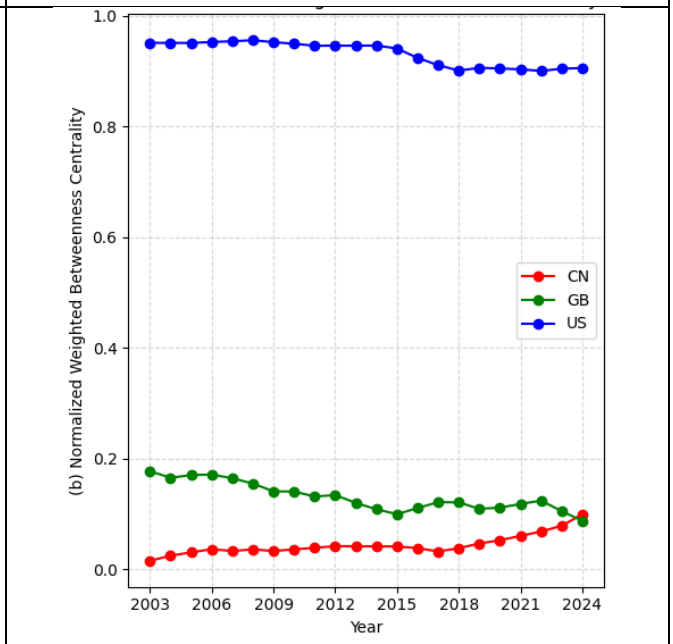
附录

图 *A2.* 采用不同归一化方法计算的归一化中介中心性，*2001—2024*年。*(a)* 原始值：边权重表示国家之间未经调整的合作频次。*(b)* 对数变换：边权重经过对数变换（先加 *1* 以避免零值）。*(c) Salton* 余弦度量（关联强度）：边权重通过除以两个节点合作量乘积的平方根进行归一化。*(d)* 杰卡德指数：边权重通过除以两个节点合作量的非重叠总量进行归一化。采用了 *3*年移动窗口。尽管尺度和变化轨迹有所不同，四种方法的结果均一致显示，美国的相对地位有所下降，而中国则有所上升。

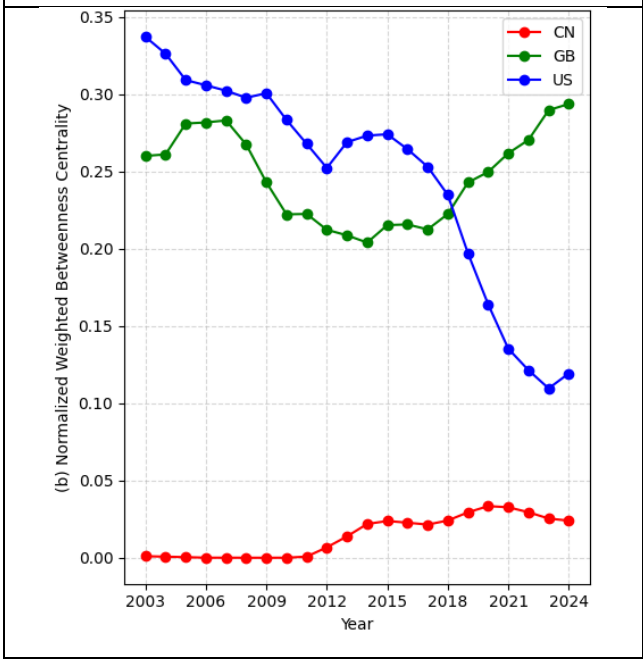
(a) 原始值



(b) 对数



(c) Salton



(4) Jaccard

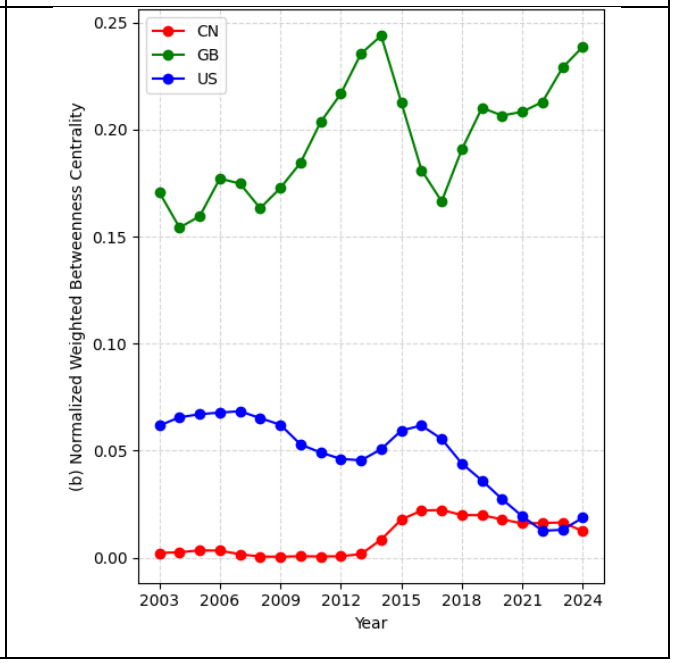


图 *A3.* 中国、英国和美国的特征向量中心性，*2001—2024*年。采用了*3*年移动窗口。三个国家的趋势表明，尽管近年来略有下降，中国在全球网络中的作用仍稳步上升。相比之下，美国和英国均呈现持续下降趋势，其中美国的降幅尤为明显。这些相反的趋势显示出一种趋同现象，凸显了中国日益增强的网络参与对其他国家的影响力。

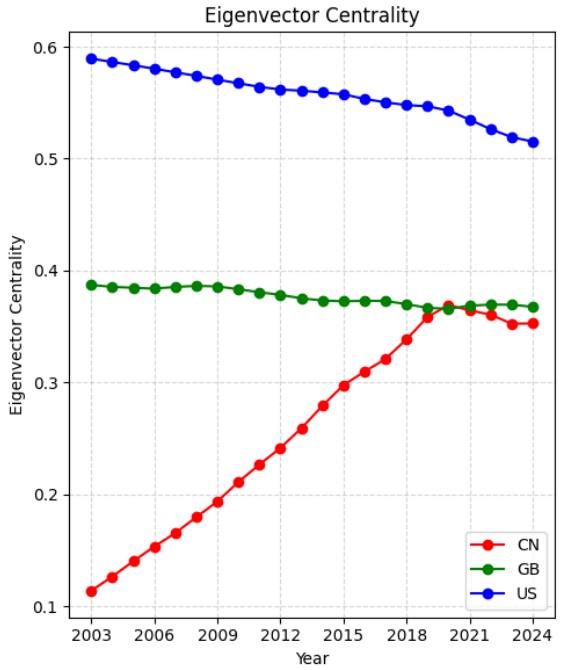
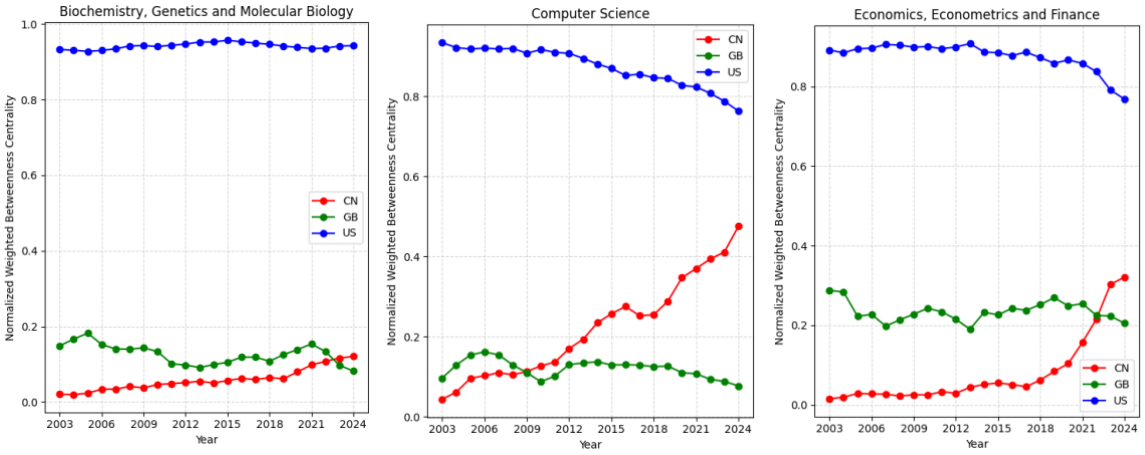


图 *A4.* 归一化　选定领域的加权中介中心性，*2001—2024*年。采用了*3*年移动窗口　　.



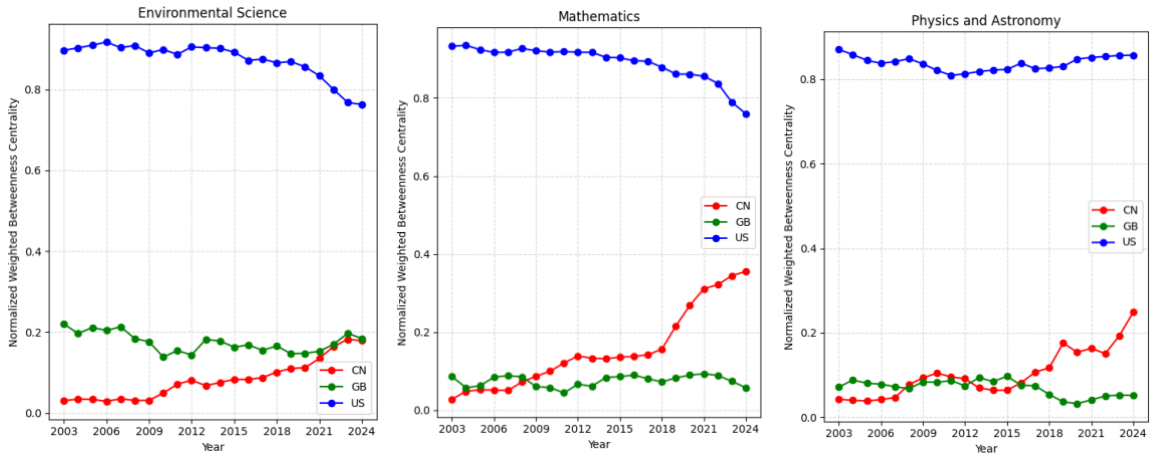
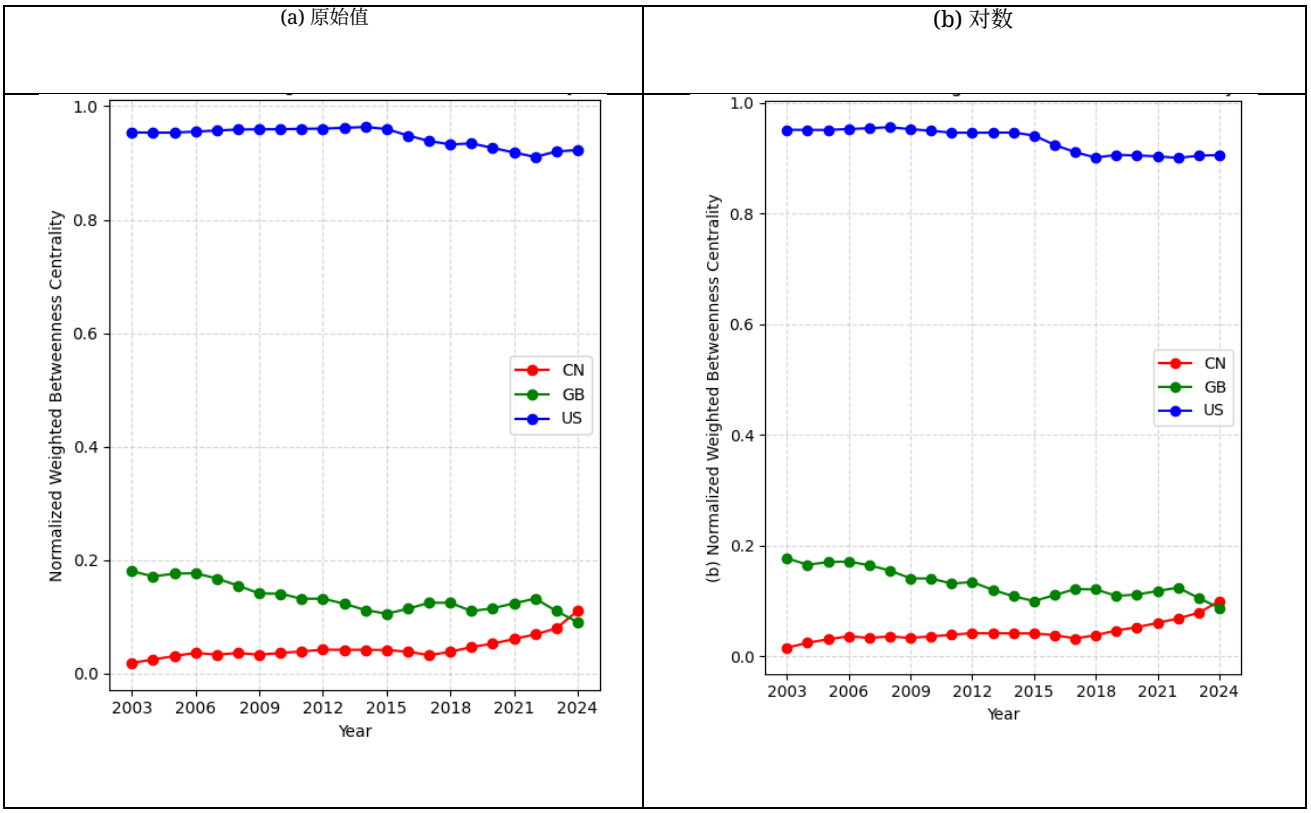


图 *A2.* 采用不同归一化方法计算的归一化中介中心性，*2001—2024*年。*(a)* 原始值：边权重表示国家之间未经调整的合作频次。*(b)* 对数变换：边权重经过对数变换（先加 *1* 以避免零值）。*(c) Salton* 余弦度量（关联强度）：边权重通过除以两个节点合作量乘积的平方根进行归一化。*(d)* 杰卡德指数：边权重通过除以两个节点合作的非重叠总量进行归一化。采用了 *3*年移动窗口。尽管尺度和变化轨迹有所不同，四种方法的结果一致显示，美国相对衰退，而中国上升。



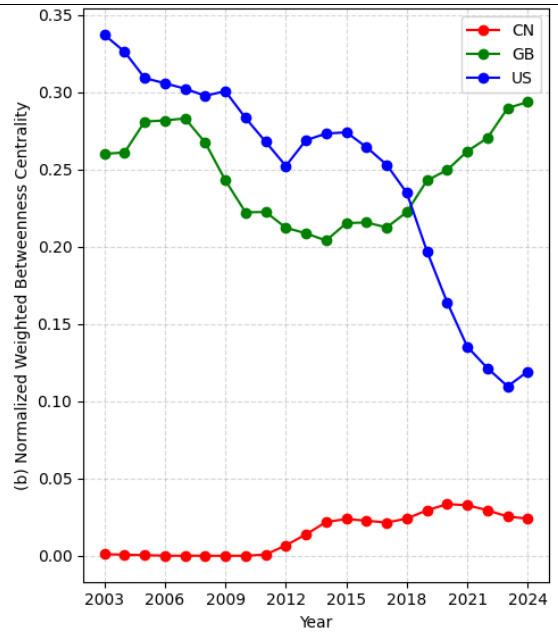
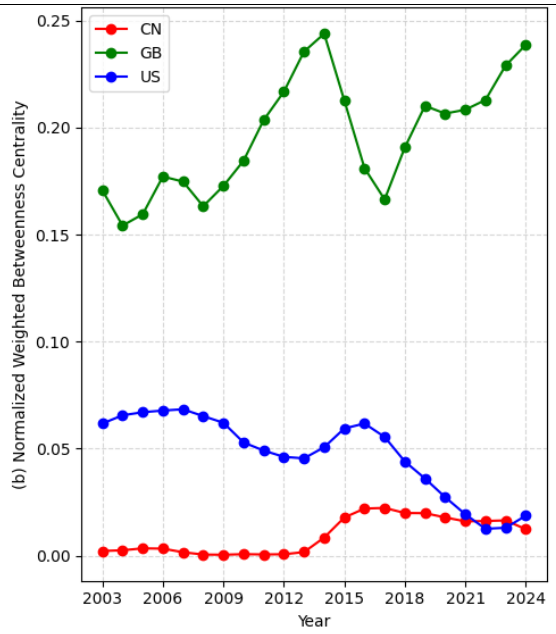
(c) Salton	(4) Jaccard
	

图 *A3.* 中国、英国和美国的特征向量中心性，*2001—2024*年。采用了*3*年移动窗口。三个国家的趋势表明，尽管近年略有下降，中国在全球网络中的作用稳步上升。相比之下，美国和英国均呈持续下降趋势，其中美国的降幅尤为明显。这些截然不同的趋势显示出一种趋同态势，凸显了中国日益参与网络对其他国家的影响力。

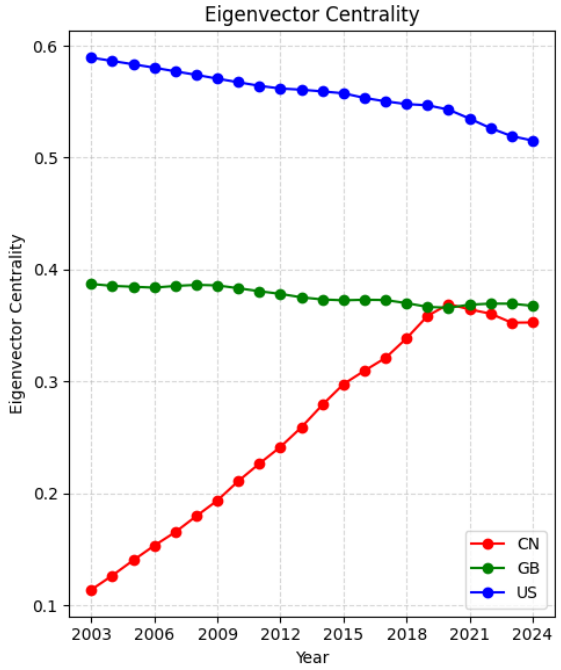


图 *A4.* 标准化加权中间中心性 所选领域，*2001—2024*年。采用了 *3*年移动窗口 .

