

文章编号: 1000-2995(2014)04-008-0068

中美在石墨烯领域的研究轨迹及政策建议

胡光元¹, 唐 莉¹, 刘 云²

(1. 上海财经大学公共经济与管理学院, 上海 200431;

2. 北京理工大学管理与经济学院, 北京 100081)

摘要: 本研究以大规模石墨烯科技文献数据库为样本来分析中美两国在该交叉前沿学科领域的总体概况、发展轨迹和驱动力量。通过运用多种数据可视化工具, 研究发现, 中国在石墨烯领域是一个早期进入者而不是一个后发追赶者。中国石墨烯的研究在早期与美国有短暂的时间延迟, 中期迅速赶上, 目前在数量上已超越美国。中美双方在国际石墨烯科研成果中占据首要地位, 互为彼此的最主要合著者。中美两国在石墨烯研究发展轨迹上既有趋同性也有相异之处。从石墨烯项目资助的金额和石墨烯研究成果的发表数量上看, 国家层面的大力扶持对两国的石墨烯研究起到不可忽视的作用。最后, 文章提出了科研管理的相关政策建议。

关键词: 新兴科技; 研究轨迹; 石墨烯; 科技政策; 大规模数据挖掘

中图分类号: F276.6

文献标识码: A

1 引言

1.1 研究意义

在知识经济崛起和全球一体化的今天, 知识创造和扩散正日益成为国家竞争力的关键因素。新兴科技前沿技术对国家的安定与繁荣、对人民福利的提高至关重要而备受重视: 各国政府纷纷出台技术计划以期占领科技高地^[1]。如何使用可靠、全面、实时的微观数据来跟踪我国高新技术领域发展的动态趋势, 不仅对科教兴国战略提供科学论据, 而且对增强自主创新管理、提高我国在国际科学界的地位具有重大指导意义^[2-6]。

石墨烯(graphene)是20世纪末在纳米技术基础上发展起来的一门新兴交叉学科。2010 诺贝尔物理学奖授予了英国曼彻斯特大学的安德烈·海姆(Andre Geim)和康斯坦丁·诺沃肖洛夫(Kostya Novoselov), 表彰二人在2004年通过利用普通胶带剥离出仅有一个碳原子厚迄今为止已知材料中最薄的石墨烯(graphene)。选择石墨烯为该项目的研究对象, 原因有二。首先, 从技术经济角度看, 作为当前世界上极有发展前景的领域之一, 石墨烯的发展将大大拓展和深化人们对客观世界的认识, 促进传统产业的改造与升级, 对人类的经济生活产生重大影响。其次, 从公共政策分析和项目评估的角度看, 认识到这一新兴技术

收稿日期: 2013-06; 修回日期: 2013-12-24.

基金项目: 本研究得到国家自然科学基金“国际科研合作与知识溢出效应的实证研究”(项目编号 71303147, 起止时间: 2014.1-2016.12); 及国家自然科学基金重点项目“国家自主创新体系国际化理论与政策研究”(项目编号 71033001, 起止时间: 2011.1-2014.12)的资助。

作者简介: 胡光元(1975-), 男(汉), 河南信阳人, 上海财经大学公共经济与管理学院讲师, 数据中心执行主任。研究方向: 教育评估, 信息可视化, 政策分析。

唐 莉(1977-), 女(汉), 河南信阳人, 上海财经大学公共经济与管理学院副教授, 985 创新平台博导。研究领域: 科技创新政策、公共政策与项目评估、知识管理。

刘 云(1963-), 男(汉), 安徽合肥人, 北京理工大学管理与经济学院教授、博士生导师。研究方向: 科技评价, 科技政策, 技术创新管理。

在社会和经济的重要性,许多国家地区在石墨烯领域投入巨资,将其列入国家优先发展研究议程。这些因素结合起来,使得研究中美在石墨烯领域的科研进展具有技术和政策的双层重要意义。但遗憾的是国内目前还尚无文献对中美两国在该领域的研究给予关注。因此,以石墨烯为例,本文通过综合运用大数据挖掘的多种可视化工具,对两国在该新兴技术领域的发展现状和动态趋势进行勾勒,并提出相关政策建议。

1.2 文献综述

自从 Price deSolla 的经典著作“小科学,大科学”问世以来^[7],国际上在科研发展、知识管理和科技政策方面的研究有了很大发展,并迅速拓展到不同学科领域。随着科技的迅猛发展和信息技术的广泛渗透,90年代后期逐渐兴起了从科技计量学的角度探讨科研发展趋势和特点的研究^[8-9]。近年来研究热点主要集中在引文时序网络分析和知识图谱方面。各种数据挖掘和可视化软件比如 Gephi, Pajek, Ucinet, VantagePoint 等也相继开发出来描述各国科研动态,代表作有 Chen 2012; Tang & Shapira, 2011, Rafols et al., 2010 等^[10-12]。

国内对科研发展的关注较西方发达国家晚。早期文献主要从科研管理的视角展开,焦点集中在探讨现有体制和组织架构对科研发展的制约,强调改进科研管理制度的必要性和对策。这部分研究多为规范性分析,至今仍占据该领域研究的半壁江山^[13-15]。

随着科学计量学方法在中国引入,尤其是90年代梁立明所著中国科学计量学界“第一部处女书”《科学计量学指标·模型·应用》问世,国内对科研发展和科技政策的实证性研究也逐渐兴起^[16]。对某一具体学科的合作研究,如医学方面(张宏梁等,2010),农业方面(陈倩玉、胡跃高,2012),教育学领域(汤建民,2010)^[17-19]。之后一些学者对国外科学计量学的研究热点与最新前沿方法做了详尽介绍,并涌现出一些高水平的研究成果。如王旻霞(2011)基于知识图谱对国际知识管理研究作了文献计量分析^[20]。钟旭等人(2000)利用灰色预测模型分析了中国社会科学期刊合著率的变化趋势^[21]。基于社会网络分析法,钱振华(2012)对国内科技哲学领域合著者进

行了可视化研究^[22]。孟微和庞景安(2008)介绍了 Pajek 在情报学合著网络可视化研究中的应用^[23]。

但整体来讲,国内学者对科研发展的研究仍局限于进行简单描述性或介绍性研究,对科研发展动态趋势的实证研究还待进一步深入。尽管中美科技发展一直是世界各国关注的重要热门话题,目前学界对两国在科研发展的经验分析还为数不多,对其在高新技术领域的实证研究更是鲜见。为填补这一空白,本研究构建超大型全球石墨烯科技文献库进行深度数据挖掘。从总体概况、发展轨迹、学科前沿发展、及驱动力量的动态趋势多方面描绘中美科学家在该领域的发展现状,据此提出相关对策与建议。

2 研究设计与数据分析

2.1 研究方法

科技文献是科研发展的重要成果指标。通过对大型科技文献库的数据挖掘来探析学科的研究趋势,能对制定科技发展战略提供有价值的参考依据。本文的首要数据源是中美两国 1990 - 2012 的石墨烯科研文献,通过检索美国科学情报研究所 Institute for Scientific Information 出版的 Web of Science 数据库中的社会科学引文网络扩展版 SSCI - E 和科学引文索引网络扩展版 SCI - E(下文简统称为 WoS)来获得。作为目前国际上最具学术权威性的引文信息源数据,从 WoS 下载的数据中包括作者 author、作者单位 author affiliation、题目 title、关键词 key words、发表年 publication year、发表期刊 source、及项目资助 funding acknowledgement 等相关信息。

数据搜索方法如图1所示。我们首先构建了通过 WoS 数据库来检索石墨烯研究的多重过滤器。多重过滤器采取布尔逻辑方式来界定研究主题、时间范围以及所需文本类型。在此过程中剔除了会议摘要 conference abstract、纠错 corrections 等消息类文献以及会议文章 proceedings paper、editorial material 等未经同行匿审的论文。对石墨烯研究领域的界定有多种方法,最常见的可分为三类:1) 石墨烯主流期刊界定法;2) 标题关键字界定法;以及3) 主题

关键词界定法^①。三种方法的覆盖范围依次递增。哪种方法更准确取决于具体的研究领域^[24, 25]。先前研究表明 科学家们通过反复验证 发现第二类即

标题关键字界定法是最适合石墨烯这一交叉前沿领域^[26]。这也是本研究采用的方法。

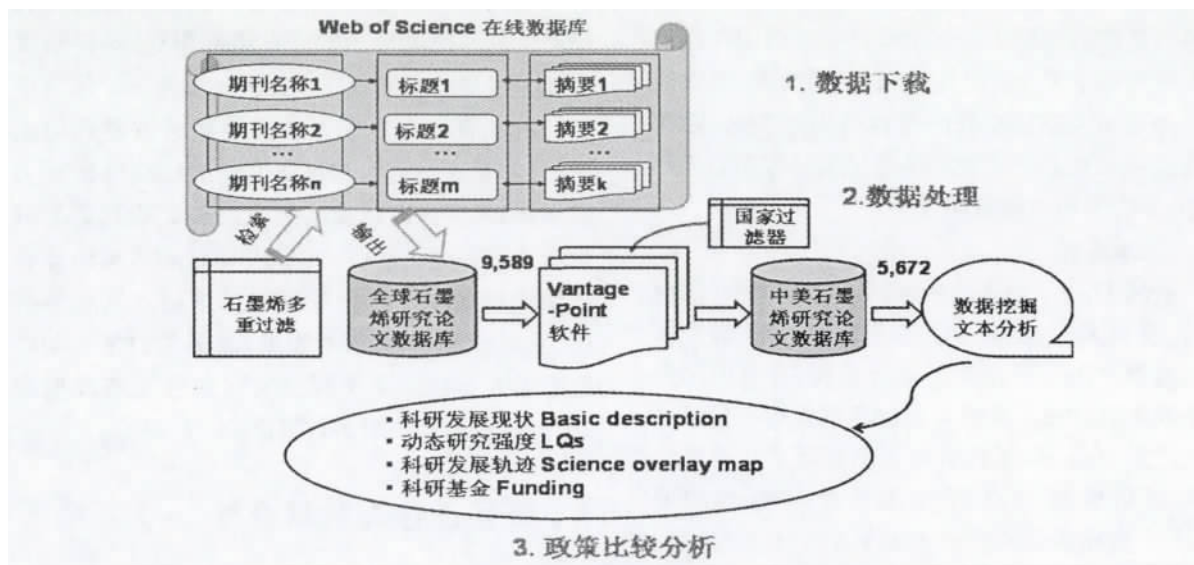


图1 信息检索清理流程图

Figure 1 Flow chart of information retrieval

通过过滤器后的文本数据被输入到美国 Search Technology Inc. 开发的数据分析工具 VantagePoint 软件中进行数据挖掘^② 并通过 Pajek 进行可视化分析。为确保文献的查全率与查准率,所有数据域在进行计量分析前都经过清洗干预。其中包括利用 VantagePoint 的查重(remove duplicates)去除重复的论文 通过国家过滤器对全球石墨烯文献的国家归属进行分类 以及最后的人工检查核对记录^[27]。完成上述文献筛选与清洗工作后,最终选定全球有效石墨烯学术论文共计 9589 条,其中包含 2426 篇美国 和 3600 篇中国石墨烯科技论文^③。

2.2 中美石墨烯研究概况

下载数据分析表明,中美两国是全球石墨烯研究的中坚力量。截止到 2012 年 12 月 31 日,中美两国分列该领域研究发表文献数量的第一、第二名。

在过去的 13 年里(1990–2012),两国共有 5672 篇石墨烯论文被 WoS 收录,占全球石墨烯领域论文总数的将近 60%。紧跟其后的国家有韩国(8.1%)、日本(5.9%)、新加坡(5.1%)和德国(5.0%)^④。

从国际合著的情况看,同纳米技术一样(Tang & Shapira, 2011),中国石墨烯的科研在数量上目前依然是内部驱动。77% 的石墨烯科研成果没有任何国外学者的参与,其国际合著率仅为美国的 1/2。在所有合著的国家中,美国是中国最受青睐的合作伙伴。中国 42% 的国际合著论文是和美国学者合作的。同纳米技术不同的是,美国在石墨烯领域合著最多的国家是中国(40%),显示出中国在全球石墨烯研究水平和质量的优势地位。

从科研文献的区域和机构布局来看,中国石墨

① 包括标题关键字、摘要词组、作者提供的关键词、期刊关键词 以及作者提供参考文献中经过自然语言处理 Natural language processing 提取出来的标题短语。

② www.thevantagepoint.com。

③ 按照惯例,凡作者机构中含有美国 50 个州属地的论文认定是美国论文;凡作者机构中含有中华人民共和国大陆、香港、澳门属地的论文认定是中国论文。数据显示,澳门目前没有参与到石墨烯的研究中。超过 80% 香港的石墨烯研究至少有一位大陆合作单位。考虑到不同的科研管理系统,台湾地区的论文未包括在中国论文的计数之内。

④ 在中美石墨烯论文中,中美合著的文章有 354 篇,故中美文章合计 5672 篇(即 2426 + 3600 - 354)。

烯研究分布地主要集中在北京、上海和沿海城市。中科院一花独秀,贡献了20%的中国石墨烯研究。相反,美国在石墨烯研发上则呈现出机构分布上分散的格局。数量排名第一的莱斯大学(Rice University)的贡献率也仅为5%。中国石墨烯研究在的机构和地域上的集中模式从某种意义上反映出了中美两国的科研管理系统的不同特点。

2.3 中美石墨烯研究强度的动态分析

对科研快速发展的中国而言,石墨烯科研成果的静态描述不足以展现其特点。本研究借用区位商的概念,来勾勒中美两国石墨烯研究强度随着时间的动态变化。区位商 location quotient(简称LQ)是区域经济学中用来衡量地区经济聚合度或某一产业在当地经济专业化程度的一个量化指标。在本研究中,区位商的计算公式为:

$$LQ_{it} = \frac{(\text{石墨烯文献数量}/\text{纳米技术文献数量})_i}{(\text{全球石墨烯文献数量}/\text{全球纳米技术数量})_t}$$

其中*i*代表中国或者美国,时间*t*=[1990, 2012]。

如果 $LQ_{it} > 1.0$,它表明国家*i*在*t*年的实际石墨烯研究强度大于全球平均水平。相反,一个小于1.0的区位商表明该国家在石墨烯研究强度比例低于全球平均水平。

图2描绘了中美两国(红色代表中国和绿色

代表美国)在1990-2012年期间石墨烯科研强度变化的动态趋势。圆点的大小与中美两国在不同时期石墨烯科技论文数量成正比。从时间轴来看,不断增长的圆点直径显示出中美两国在石墨烯研究中数量不断攀升的趋势。从LQ的走势来看,中美两国石墨烯的研究强度呈现出截然不同的趋势。在图中,我们借助于两条具有历史意义的时间辅助线将观测期分为零星发展(1992-2004)、起步(2005-2010)、和快速发展(2011-2012)三个阶段分别讨论。

第一条黑色辅助线(图2)位于2004年,Novoselov与Andre Geim正是于2004年首次分离出了石墨烯。在此之前,即第一阶段,全球针对石墨烯的原创研究十分零散,每年不超过10篇。首篇收录在WoS的石墨烯研究由美国麻省理工Saito和他的同仁们发表。在1992年的这篇文章,他们提出了石墨烯不同的直径和螺旋形状决定石墨烯管的电子结构和特性的结论^[28]。两年后,复旦大学的学者Fu,Huaxing发表了关于不同几何形状石墨烯微管的光学属性科技论文^[29]。中国成为继美国、日本之后是第三个国家在WoS收录的科技期刊上公开发表石墨烯研究成果。

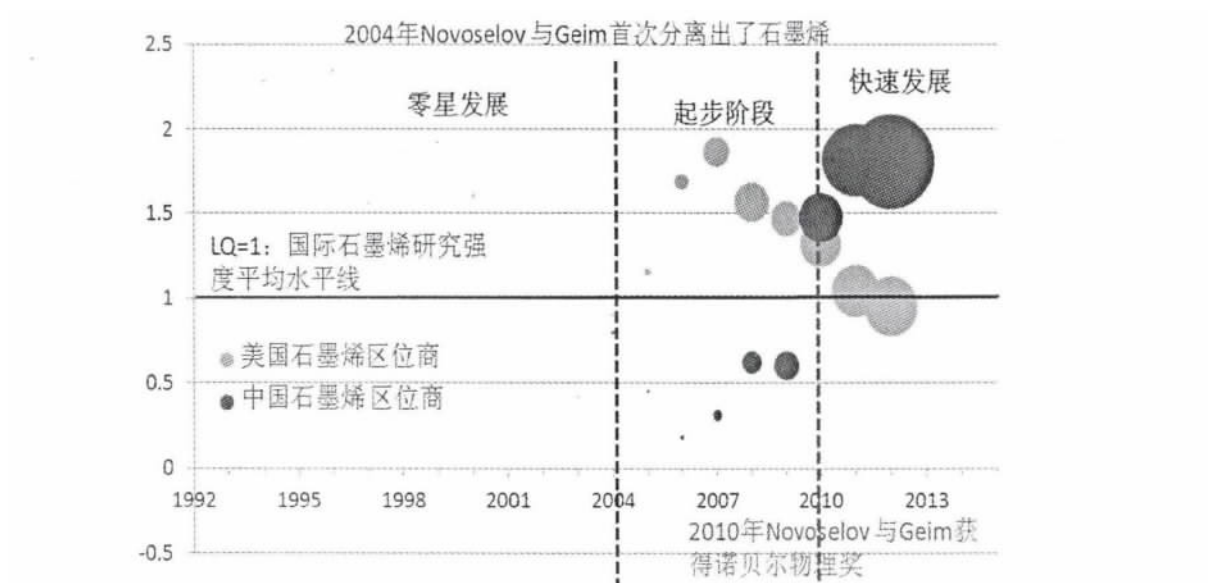


图2 中美石墨烯研究区位商动态变化

Figure 2 Dynamics of LQ in graphene research: China vs. U. S.

2004 年至 2010 年期间,中美两国尤其是中国的石墨烯研究开始展示强劲的增长势头。中国的科技论文占世界的比例不断上升,从 2005 年的第六位(7%)上升到 2008 年跃居第二位(12%)及 2010 年的榜首位置(33%)。但值得注意的是,中国的石墨烯研究的区位商在此观测期内一直低于全球石墨烯研究的平均强度(在 2010 年之前 LQ 值一直都在图 2 中间黑线以下)。与之相反,美国石墨烯的实际研究强度则远高于中国的研究强度,而且高于世界平均水平的期望值。

在第三阶段中,不同于美国石墨烯研究强度逐年递减的趋势,中国则继续保持着石墨烯研究领先的显著优势,在世界研究出版物数量中排名第一。其区位商 LQ 值自 2010 年始始终高于国际平均水平,并呈现出不断攀升的趋势。这体现出石墨烯研究在中国总体纳米科技发展中的相对优势。

2.4 中美石墨烯研究领域动态分析

石墨烯作为一交叉学科前沿领域,可以通过科学覆盖图(science overlay map)来展示中、美两国在石墨烯领域的科研发展动态模式。

科学覆盖图由背景弧线(灰色和黑色)和覆盖其上的彩色节点两层构成。WoS 数据库(包括 SSCI 和 SCI)共有 225 个学科子类 subject category(简称 SCs)。背景弧线表示在引文基础上构建的这 225 个学科子类 subject category(简称 SCs)之间的相互联系。弧线越粗,说明 SCs 之间的互引次数越多,也就是学科之类之间的联系越紧密。为了便于二维显示,Rafols 通过聚簇 cluster analysis 将其整合为 18 门宏观学科(如方框标签所示)。彩色节点则分别代表了论文所属的一个 WoS 宏观学科。节点的大小与该学科论文的数量成正比。直径越大则代表该学科科技论文的数量越多。该图由文本挖掘软件 Vantagepoint 和网络分析软件 Pajek 来绘制。我们将图 2 中第一第二阶段石墨烯文献合并,以 2010 为界将两国科研成果按时间阶段和国家类别以 2×2 的矩阵方式展示(图 3)。详细绘图过程请参见 Rafols et al., 2010 和 Hu et al. 2012^[12,30]。

图 3 反映了一些有趣的现象。首先,作为一新兴交叉学科,石墨烯研究领域的论文学科分布

较广,涵盖了多项学科门类,具有较强的学科交叉性。其次,纵向时间进行比较可以发现,中美两国的石墨烯研究在规模与种类上都日益扩大。在第一阶段期间(1992–2010),中美科学家在石墨烯技术领域一共出版了 1828 篇文献,覆盖了 7 个宏观学科。从 2011 年到 2012 年,中美对石墨烯的研发进入了一个繁荣期。仅仅两年期间不仅石墨烯科研成果翻番(数量大幅增加到 3844),并且覆盖的学科领域还扩展到了 12 个宏观学科,包括临床医学、传染性疾病和地球科学等。第三,横向国家间进行比较发现,中美两国石墨烯研究领域在特定时期具有趋同性。在第一阶段,石墨烯最突出的科技学科领域均为化学、材料、和物理三门基础宏观学科。在第二阶段,生物和工程学科则异军突起,占据着两国石墨烯研究的主要组成部分。这体现出中美两国在石墨烯的研究内容方面正在发生从基础性学科向应用学科倾斜的结构变化趋势。应有相应的科技管理政策与之对应,促进石墨烯从基础科学向应用型产业化的加速转变。第四,图 3 显示在 2010–2012 年期间,中国石墨烯的研究不仅在数量上超过了同期的美国同行,而且开始在认知科学(cognitive science)和生态科学(ecological science)领域进展。而美国石墨烯的研究在这两项社会科学领域尚无文献发表,凸显出两国在该领域研究的差异性。

2.5 中美两国对石墨烯的基金扶持

研发经费投入是科研工作尤其是新兴前沿科技得以开展取得突破的先决条件。而政府投入研发经费是衡量一个国家科技实力和科研战略的一项重要指标^[31,32]。

从资助方提供的信息来看:据不完全统计,在过去不到 5 年内,1999–2013 年,我国有 586 石墨烯的科研项目得到国家资助,累计金额:21067.6 万元^①。美国国家自然科学基金委数字显示美国联邦政府对石墨烯领域研究资金的注入急剧增加:从最初 1992 年的不到 32 万美元,2000 年为 38 万美元,2007 年为 2 千万美元,2012 年资助金额为 2 千 6 百万美元^②。

这一信息同样在项目得到资助的团体研究成

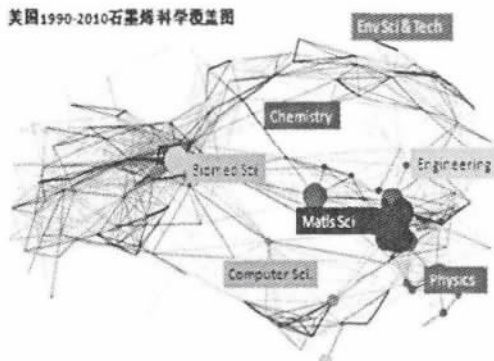
① 数据来源:科学网网站 <http://www.sciencenet.cn/>。在项目名称下检索主题词:石墨烯,检索时间 2013 年 7 月 31 日。

② 数据来源:美国国家自科资助项目网站 <http://www.nsf.gov/awards/about.jsp>。在项目名称下检索主题词:石墨烯,检索时间 2013 年 7 月 31 日。

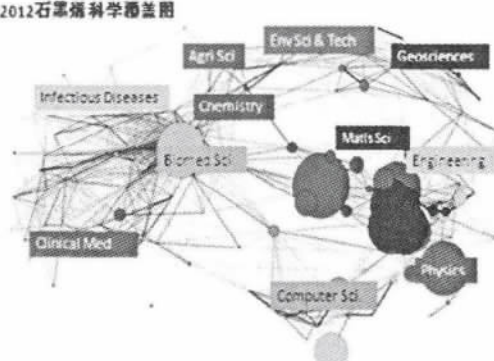
果中也得到验证。WoS 数据库自 2009 年起提供了科技文献的项目资助信息 (funding acknowledgement)。我们的数据表明中国高达 94%、美国 91% 的石墨烯科研成果里明确指出了项目资助信

息。文献的基金资助分布无疑从一个侧面反映我国政府对石墨烯科研项目的科研投入情况以及受重视程度。

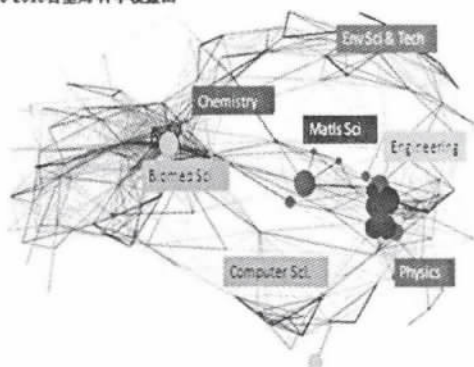
美国1990-2010石墨烯科学覆盖图



美国2011-2012石墨烯科学覆盖图



中国1990-2010石墨烯科学覆盖图



中国2011-2012石墨烯科学覆盖图

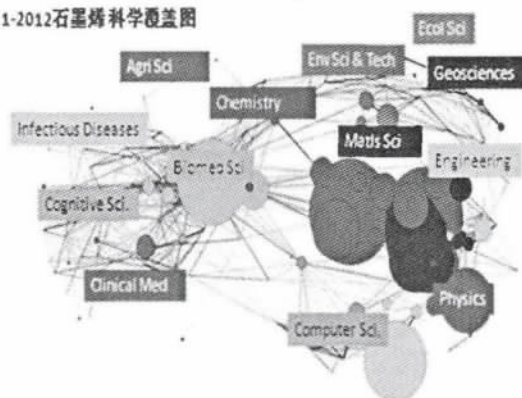


图3 中美石墨烯科学覆盖图

Figure 3 Science overlay maps in graphene research: China vs. U. S.

3 总结与讨论

3.1 小结

本文章通过对中美两国在石墨烯领域的发展现状、研究强度(以区位商作为衡量依据)、动态趋势(科学覆盖图)和项目基金四个方向描绘了中美两国的石墨烯的科研发展路线图的特点。从上述研究,我们可以得出以下结论:

首先,在石墨烯技术领域,中国是一个早期进入者而不是一个后发追赶者。中国石墨烯领域的研究在早期与美国有短暂的时间延迟,中期迅速赶上,目前在数量上已超越美国。中美双方在国际石墨烯科研成果中占据首要地位,互为彼此的主要合著者。其次,中美两国在石墨烯研究总量

和强度随时间而变化,两国在石墨烯研究发展轨迹上既有趋同性也有相异之处。以2010年诺贝尔物理奖授予“石墨烯发现者”为标志性的事件,中美两国该领域研究的产出、研究强度、学科走向都产生显著变化(见图2和图3)。学科领域从传统的化学、材料到物理学科到生物和应用医学的重点领域。第三,国家级项目资助数据库和科技文献项目资助信息的显示石墨烯项目在中美两国均得到政府的高度重视和优先资助。从石墨烯项目资助的金额和石墨烯研究成果的发表数量上看,国家级项目基金和石墨烯研究发展呈现正向相关。将政策举措和研究表现联系起来,不难看出,国家层面的大力扶持对两国的石墨烯研究起到不可忽视的推动作用。

3.2 政策建议

上述研究为中国和美国的科技政策建议提供了实证基础。

学科交叉发展前沿往往就是科学新的生长点,因而在国际上受到各级政府的高度重视。2013年7月国家主席习近平在中科院考察时发表重要讲话,要求扫除影响科技创新能力提高的体制障碍,对新兴前沿交叉领域给予高度关注和重点部署^[33, 34]。因此我国应该充分把握机会,利用国际共享资源,加强交叉学科前沿技术的知识转化,促进高新产业创新和经济可持续增长。

在石墨烯领域,中美在两国彼此对外科技合作的全局中占据首要地位。中美两国既是国际上石墨烯研究的主力军,也是彼此最紧密的伙伴。两国发展模式既有趋同性,也有自己的独特之处。通过相互协作中国和美国将会在该新兴科技交叉领域达到资源共享,实现双赢,从而推动两国石墨烯研究的发展水平和质量。另一方面,国际科技合作有时是一把双刃剑。从中国的角度来看,由与美国同行合作虽然可能推动中国的石墨烯研究向前发展,但也可能使中国学者在研究方向的选择上陷入一定的被动局面。在研究方向上的趋同也会影响到针对中国自身需求的研究与研发投资的有效利用。考虑到中国现有国家创新体系下的基础科学与技术转让联系不紧密、甚至两张皮这一根深蒂固的问题,上述问题显得尤其严峻。

从最初的“十五”石墨烯专项到目前工信部物联网“十二五”发展八项任务之一,中国政府已在石墨烯的研发大量投入,来抢占这一新兴学科科技战略制高点。为培育和发展新材料产业,推动材料工业转型升级,2012年国家工信部发布了《新材料产业“十二五”发展规划》。其中明确提到了加强纳米技术研究,重点突破包括石墨烯在内的纳米材料及制品的制备与应用关键技术,来积极推进纳米材料在新能源、节能减排、环境治理、绿色印刷、功能涂层、电子信息和生物医用等领域的研究应用。毋庸置疑,中国在技术转让产业化方面的发展目前远远落后于西方国家。因此除了保持基础科研的优势地位,如何加快技术转让,使得公共资金在基础科研的投入能在市场上尽快得到有效回报是当前中国政府亟待解决的重要问题。在石墨烯领域,中国政府应该把握好当

前良好机遇,积极参与国际合作与竞争,从而为我国在该前沿领域的发展提供良好的机会与前景。

参考文献:

- [1] 科技部战略发展研究院. 创新型国家建设进程监测与评价研究重大专题调研报告[R]. 2009.
- [2] 中国共产党十八大报告全文[R]. 新华网. 2012年11月19日. 电子版: http://www.xj.xinhuanet.com/2012-11/19/c_113722546.htm.
- [3] 中国共产党十八届三中全会公报[R]. 新华网. 2013年11月12日. 电子版: http://news.xinhuanet.com/house/suzhou/2013-11-12/c_118113773.htm.
- [4] 朱春奎. 财政科技投入与经济增长的动态均衡关系研究[J]. 科学学与科学技术管理, 2004(3): 29-33.
- [5] 余珊珊, 赵自强. 发达国家技术政策调整的分析与启迪[J]. 科技与经济, 2003, 16(5): 27-30.
- [6] Tang, L., & Hu, G. Tracing the footprint of knowledge spill-over: evidence from U. S. - China collaboration in nanotechnology [J]. Journal of the American Society for Information Science and Technology, 2013, 64(9): 1791-1801.
- [7] deSolla Price, D. J. Little Science, Big Science [M]. New York: Columbia University Press, 1963.
- [8] Moed, H. F., & Van Leeuwen, T. N. Improving the accuracy of Institute for Scientific Information's Journal Impact Factor [J]. J. Amer. Soc. Inform. Sci., 1995, 46, 461-46.
- [9] Rinia, E. J., van Leeuwen, T. N., Bruins, E. E. W., van Vuren, H. G., & van Raan, A. F. J. Citation delay in interdisciplinary knowledge exchange [J]. Scientometrics, 2001, 51(1): 293-309.
- [10] Chen, B., Wang, F. and Song, J. Are They Connected? Exploring Academic and Social Networks Among MPA Students at a Chinese University [J]. Journal of Public Affairs Education, 2012, 18(1): 137-156.
- [11] Tang, L., and Philip Shapira. Regional development and interregional collaboration in the growth of nanotechnology research in China [J]. Scientometrics, 2011, 86(2): 299-315.
- [12] Rafols, I., Porter, A. L., & Leydesdorff, L. Science overlay maps: A new tool for research policy and library management [J]. Journal of the American Society for Information Science and Technology, 2010, 61(9): 1871-1887.
- [13] 郑建华. 我国当代科技政策价值取向探析[J]. 改革与开放, 2011(18): 180-181.
- [14] 华锦阳, 汤丹. 科技投入体制的国际比较及对我国科技政策的建议[J]. 科技进步与对策, 2010(5): 25-30.
- [15] 盛建新, 成良斌. 当前中国科技政策研究的现状分析[J]. 中国科技论坛, 2002(2): 35-39.
- [16] 梁立明. 科学计量学—指标、模型、应用[M]. 北京: 科学出版社, 1995.

- [17] 张宏梁,田玲,马凌飞. 从论文合著看医学研究的合作[J]. 生命科学, 2010(12): 1281-1287.
- [18] 陈倩玉,胡跃高. 中加燕麦科研合作现状发展对策[J]. 南方农业学报, 2012, 43(9): 1429-1432.
- [19] 汤建民. 国内教育学科论文合著情况研究—1998—2007 CSSCI 文献计量和作者合作图谱分析[J]. 浙江树人大学学报(人文社会科学版), 2010, 10(5): 55-60.
- [20] 王昱霞. 基于知识图谱的国际知识管理研究可视化分析[J]. 科技管理研究, 2011, 31(20): 175-178.
- [21] 钟旭,黄晖,薛健. 中国社会科学期刊论文合著率指标现状及发展趋势研究[J]. 情报学报, 2000, 19(3): 280-288.
- [22] 钱振华. 国内科技哲学领域合著者派系分析与可视化研究—基于社会网络分析法[J]. 北京科技大学学报(社会科学版), 2012, 27(4): 78-85.
- [23] 孟微,庞景安. Pajek 在情报学合著网络可视化研究中的应用[J]. 情报理论与实践, 2008, 31(4): 573-575.
- [24] Porter, A. L., Youtie, J., Shapira, P., & Schoneneck, D. Refining search terms for nanotechnology [J]. J. Nanopart. Res., 2008, 10: 715-728.
- [25] Youtie, J., Porter, A., Shapira, P., Tang, L., & Benn, T. The use of environmental, health and safety research in nanotechnology research [J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2011, 11(1): 158-166.
- [26] Shapira, P., Youtie, J., & Arora, S. Early patterns of commercial activity in graphene [J]. Journal of Nanoparticle Research, 2012, 14(4): 1-15.
- [27] Tang, L. Does "Birds of a Feather Flock Together" Matter: Evidence from a Longitudinal Study on the US-China Scientific Collaboration [J]. Journal of Informetrics, 2013, 7(2), 330-344.
- [28] Saito, R.; Fujita, M.; Dresselhaus, G.; Dresselhaus, M. S.. Electronic - structure of chiral graphene tubules [J]. Appl. Phys. Lett., 1992, 60, 2204-2206.
- [29] Fu, Hx; Ling, Y; Xide, X.. Optical - Properties for graphene microtubules of different geometries [J]. Solid State Communications, 1994, 91(3): 191-194.
- [30] Hu, G. Y., Carley, S. & Tang, L. Visualizing Nanotechnology Research in Canada: Evidence from Publication Activities, 1990-2009 [J]. Journal of Technology Transfer 2012, 37(4): 550-562.
- [31] 叶选挺,刘云. 基于SCI合著论文的中美纳米科技合作分析[J]. 商业时代, 2011(34): 20-22.
- [32] 赵红蕾,王树恩. 试论美、德、日纳米技术政策的特点及启示[J]. 科学管理研究, 2007, 25(5): 109-112.
- [33] 重视新兴的交叉领域—四论学习习近平在中科院考察时重要讲话精神[R]. 中国科学报 2013-07-30 第1版要闻. 网页: <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2013/7/280538.shtm>.
- [34] 郑晓瑛. 交叉学科的重要性及其发展[J]. 北京大学学报(哲学社会科学版), 2007, 44(3): 141-147.

Patterns, dynamics and policy suggestions of graphene research in China and the U. S.

Hu Guangyuan¹, Tang Li¹, Liu Yun²

(1. Shanghai University of Finance & Economics, Shanghai 200433, China;

2. School of Management and Economics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Utilizing a uniquely constructed global publication database of graphene, this research aims to profile the patterns and dynamics of China's graphene research and compare it against that of the US. Multiple instruments of data visualization are applied in this research. Our analysis highlights China's relatively early entry and dramatic growth in the emerging field of graphene. We found that China and the U.S. are dominant players in this domain. They are most favorite collaborators of each other. Public funding plays important roles in stimulating graphene research. Evidence supports research convergence between China and the U.S., but we also note that each country demonstrated different development path. Policy implications are discussed in the end.

Keywords: emerging technology; research trajectory; graphene; S&T policy; large-scale data mining