



石墨烯研发态势监测分析[☆]

王丽^{1*} 邹丽雪¹ 马清扬² 余敏² 吴莹琪²

1 中国科学院文献情报中心 北京 100190

2 美国化学文摘社 哥伦布 43202

*通讯作者 E-mail:wangli@mail.las.ac.cn

[摘要] 该文旨在把握全球石墨烯研发的整体布局和发展趋势。依托美国化学文摘社提供的结构化文献信息数据,利用计量分析及文本挖掘等方法,该文分析了石墨烯科研产出的发展趋势、研究主题布局、主题演进方向、物质性能用途分布、国家/地区分布、潜在竞争机构等,深度揭示全球石墨烯研发的主题布局及研发动向,为科学家、科研决策者、科研管理专家、政策专家、产业专家、企业及投资管理者提供有价值的参考,有助于掌握科研布局和动向。

[关键词] 美国化学文摘 专利分析 文献计量 聚类分析

DOI: 10.15978/j.cnki.1673-5668.201705001

1 引言

在国际视野下,知识与创新的世界版图出现新格局,科技创新活动的全球分布及研发模式正在发生新变化,洞悉全球新兴科研领域的整体布局,把握世界科技发展趋势,是国家决策者、科技政策研究者及科学研究者长期关注的问题。对关键科技领域的发展态势的现状及其变化进行动态监测与跟踪,并进行客观、科学与系统的研究与剖析,是科研管理者长期关注的问题之一。

新材料产业是战略性新兴产业的基础产业。作为新材料界的璀璨明珠,石墨烯^[1]具有优异的电学、热学、光学等性能,在能源、环境、电子、生物等多个领域具有良好的应用潜力,成为主导未来高科技竞争的重要战略材料,引起了全球广泛的关注。世界各国纷纷将石墨烯及其应用技术研发作为长期战略予以重点关注,相继开展了大量石墨烯研发计划和项目并进行差异化研发布局,力争占据关键科技领域的制高点,形成科技、产业

[☆]该文获得中国科学院文献情报中心重点任务专项资助,项目编号:院1641。



和经济的国际竞争优势。

为把握全球石墨烯研发的整体布局和发展趋势,在中国科学院发展规划局的指导下,中国科学院文献情报中心与美国化学文摘社(CAS)合作,依托美国化学文摘社提供的结构化文献信息数据,利用计量分析及文本挖掘等方法,分析了石墨烯科研产出的发展趋势、研究主题布局、主题演进方向、物质性能用途分布、国家/地区分布、潜在竞争机构等,深度揭示全球石墨烯研发的主题布局及研发动向。

2 数据及方法

2.1 数据来源

本文的分析对象为美国化学文摘社提供的石墨烯相关的论文及专利文献,截至2016年4月5日,共获取到78 756篇论文,23 057件专利(指专利申请量)。通过人工辨析解读后,开发数据解析工具将原始数据生成可分析的结构化数据。CAS所提供的出版物标引是本研究报告的基础,报告中利用CAS所提供的主题标引、概念标引、物质标引、商业或政府机构标引、出版来源标引和其他多种标引数据,对不同时间段石墨烯研究及其后续开发相关信息进行了对比研究。

2.2 研究方法

论文在某种程度上代表了基础研究的成果,专利文献更多地体现了产业技术成果。CAS数据对论文和专利的统一标引有利于发现研究成果与产业技术成果中全部的技术主题,并有助于对比分析基础研究与产业技术之间的关系。

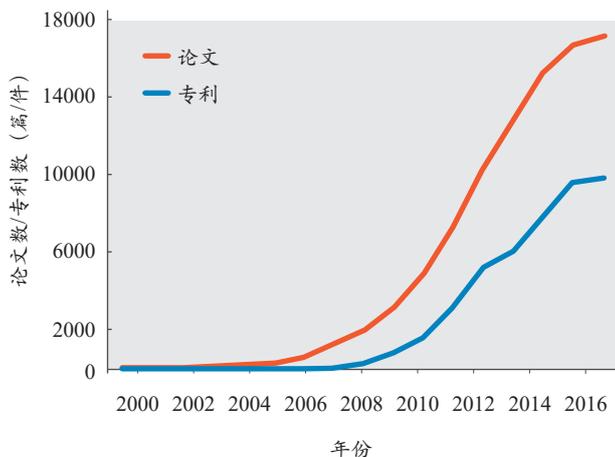


图1 石墨烯相关专利和论文数量年度发展趋势

本文用定量分析方法分析了石墨烯科研产出的发展趋势、研究主题布局、国家/地区分布、潜在竞争机构等。此外,充分利用CAS对专利和论文数据的多维度、多层次共标引特性,采用共词对比分析、文本聚类技术、共词网络分析^[2]、专利分析等方法对石墨烯领域的技术主题进行多维度组合分析。同时结合时间切片,对石墨烯主题演进进行了深度分析和挖掘。

3 石墨烯研发整体态势

2004年,石墨烯的成功分离激发了全球范围内的石墨烯研发热潮(图1),论文及专利量在2005、2006年增长速度加快,2007年开始,论文及专利量快速增多;2010年后石墨烯研发进入快速发展的活跃期。全球50%以上的石墨烯研究论文及专利主要集中在2014年至2016年。近3年以来,论文发表及专利申请仍然保持上升的态势,表明石墨烯的基础研究与技术应用仍在快速发展之中。

从石墨烯论文的国家/地区分布上看(图2),论文产出的前5位国家为中国(数据没有涵盖港澳台地区,下同)、美国、韩国、日本和印度,该5个国家的论文总量占全球论文总量的64.3%。从石墨烯专利申请区域分布上看,专利申请量前5位国家为中国、韩国、美国、日本和德国,5国专利总量占全球专利总量的90%以上。

对5个主要石墨烯专利来源国之间的专利申请流向进行分析(图3,箭头的粗细代表专利比例的高低),石墨烯专利流向美国、中国居多。中国专利申请量虽然高,但在韩国、日本、美国、德国4国的专利布局占比仅有2.3%;而韩国、美国、日本、德国各自在其他4国的专利布局占比分别为27.8%、24.8%、32.3%、45.3%。相对而言,中国专利在其他国家的布局较为薄弱。

对全球石墨烯研究机构进行分析(表1),发现论文产出数量前10的机构中,来自于中国的机构共5个,在数量上占有优势;美国机构有2个,日本和俄罗斯各1个。从论文产出量前10机构的核心技术主题来看,石墨烯及其复合材料的新型制备方法是各国的研究热点。中国机构发表的论文侧重于传感器、电子和光电、电池等应用领域。美国机构发表的论文侧重于光电性能、电子结构、薄膜晶体管、半导体器件等应用领域。新加坡机构发表的论文侧重于电子和光电、电池等应用领域。

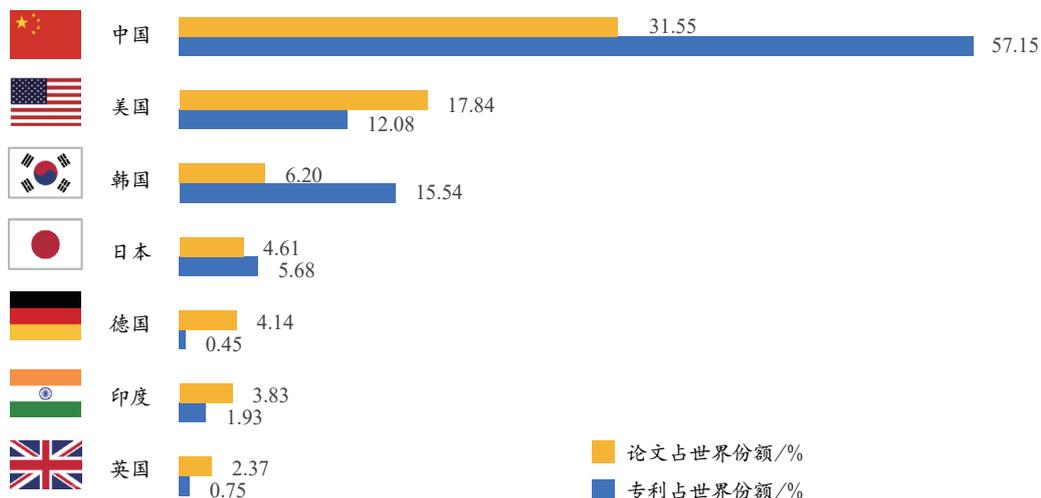


图2 石墨烯相关专利和论文的国家/地区分布

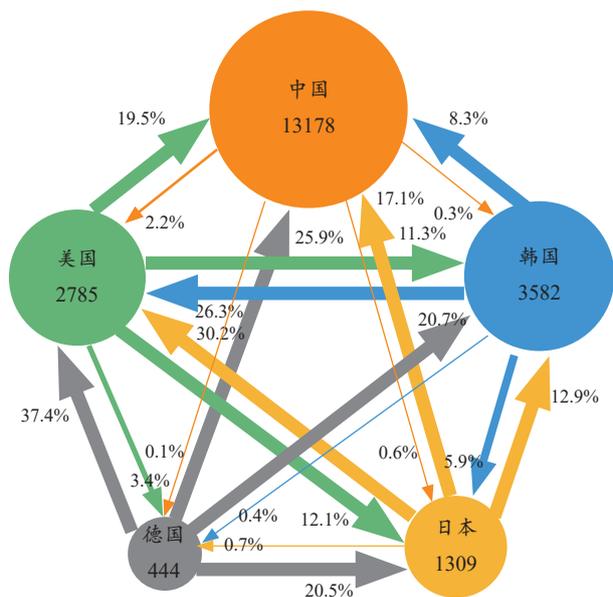


图3 主要国家/地区技术流向

对全球专利申请人进行分析(表2), 专利申请数量排名前10的申请人中, 有6个来自中国, 3个来自韩国, 1个来自美国。从石墨烯专利申请机构的性质上来看, 中国以科研院所主导, 企业在韩国、美国的专利申请中占相对重要的地位。从机构申请专利的技术主题上看, 中国主要研究机构申请的专利多为制备、电池、复合材料等领域。韩国主要机构申请的专利多为半导体器件、电池等领域。美国主要机构申请的专利多为半导体器件等领域。

4 领域、主题分布及演进

利用CAS提供的学科分类, 对石墨烯的总体研究领域布局进行了分析(图4), 石墨烯的研究论文和专利主要分布在电现象、电化学、放射及热能技术、光学、电子、质谱和其他相关属性、表面化学和胶体、硅酸盐、物理化学、生物化学方法、塑料生产与加工、电化学、磁现象等领域。其中, 电化学、放射及热能技术领域, 光学、电子、质谱和其他相关属性领域, 生物化学方法, 塑料生产与加工, 电化学领域近年来研究比重逐年增大。

利用CAS提供的物质性能用途标引数据, 分析全球石墨烯涉及物质的性能用途分布如下: (1) 39.9%的物质为应用研究(USES), 包含技术工程材料(technical or engineered material use, TEM)、改性剂或添加剂(modifier or additive use, MOA)、催化剂(catalyst use, CAT)及其他应用(other use, unclassified, NUU)等; (2) 20.8%的物质为性能(properties, PRP)及纳米材料(nanoscale substances/materials, NAN)等其他方面的研究; (3) 18.6%的物质为工艺研究(process, PROC), 包含物理、工程及化工工艺(physical, engineering or chemical process, PEP)、去除或处理(removal or disposal, REM)等(图5)。

对物质在性能方面的研究自2006年后大幅下降; 对物质在纳米材料、工业生产、反应物、催化剂等方面的



表1 石墨烯技术领域发表论文数量排名前10的机构

机构名称	国家/地区	论文数/篇	机构类型	活动年限	近3年占比	核心主题词	近期主题词
中国科学院	中国	2 973	研究所	1997 - 2016	45%	拉曼光谱 纳米复合材料 表面结构	电解极化 光热治疗 乳腺肿瘤
加利福尼亚大学	美国	1 296	高校	1994 - 2016	26%	能带结构 电导率 拉曼光谱	光学仪器 薄膜晶体管 铁电性
南洋理工大学	新加坡	890	高校	2001 - 2016	38%	拉曼光谱 纳米粒子 表面结构	过渡金属 封装 光致发光
清华大学	中国	739	高校	1998 - 2016	44%	拉曼光谱 电导率 化学气相沉积	孔隙结构 离子传输 介电层
俄罗斯科学院	俄罗斯	738	研究所	1999 - 2016	38%	电导率 态密度 能带结构	伦纳德—琼斯势 声表面波 磁热效应
新加坡国立大学	新加坡	712	高校	2000 - 2016	30%	纳米带 电导率 拉曼光谱	柔性 渗透率 电池电解质
得克萨斯大学	美国	672	高校	2004 - 2016	25%	能带结构 电导率 场效应晶体管	能带偏移 熔点 拉曼光谱
中国科学技术大学	中国	616	高校	2003 - 2016	41%	纳米复合材料 纳米片 电导率	相组成 原子层沉积 光催化剂
北京大学	中国	563	高校	1996 - 2016	44%	拉曼光谱 化学气相沉积 能带结构	超导 半金属 阴极
复旦大学	中国	516	高校	1994 - 2016	43%	纳米复合材料 纳米片 纳米粒子	舒勃尼科夫-德哈斯 效应 计时电流法 晶体取向



表2 石墨烯技术领域专利申请量排名前10的申请人

申请人	国家/地区	专利数/件	机构类型	活动年限	近3年占比	核心主题词	近期主题词
中国科学院	中国	1 299	研究所	2007 - 2015	37%	含氟聚合物 化学汽相淀积 薄膜	三维印刷 热稳定剂 晶体
三星电子有限公司	韩国	515	企业	2007 - 2015	16%	电极 电致发光装置 半导体器件制造	硫属化合物 结合能 一次锂电池
海洋王照明科技股份有限公司	中国	439	企业	2010 - 2013	0%	复合材料 二次电池 含氟聚合物	-
浙江大学	中国	270	高校	2008 - 2015	49%	含氟聚合物 二次电池 纳米复合材料	光电电池电极 电缆和电线 柔性
LG电子有限公司	韩国	258	企业	2009 - 2015	33%	二次电池 电致发光装置 含氟聚合物	芳烃 多环芳烃 石油沥青
哈尔滨工业大学	中国	222	高校	2010 - 2015	61%	复合材料 含氟聚合物 二次电池	锂离子二次电池 气凝胶 直接甲醇燃料电池
清华大学	中国	213	高校	2009 - 2015	36%	二次电池 电极 含氟聚合物	阴极 电子发射 燃料电池阴极
上海交通大学	中国	187	高校	2009 - 2015	41%	复合材料 二次电池 含氟聚合物	电解电容器 电解质 纸
IBM公司	美国	186	企业	2005 - 2015	11%	介电薄膜 场效应晶体管 半导体器件制造	电解质 表面等离子体共振 隧道效应
韩国高等技术研究院	韩国	185	研究所	2008 - 2015	16%	纳米线 纳米结构 纳米粒子	分布式布拉格反射器 能量存储系统 压敏电阻

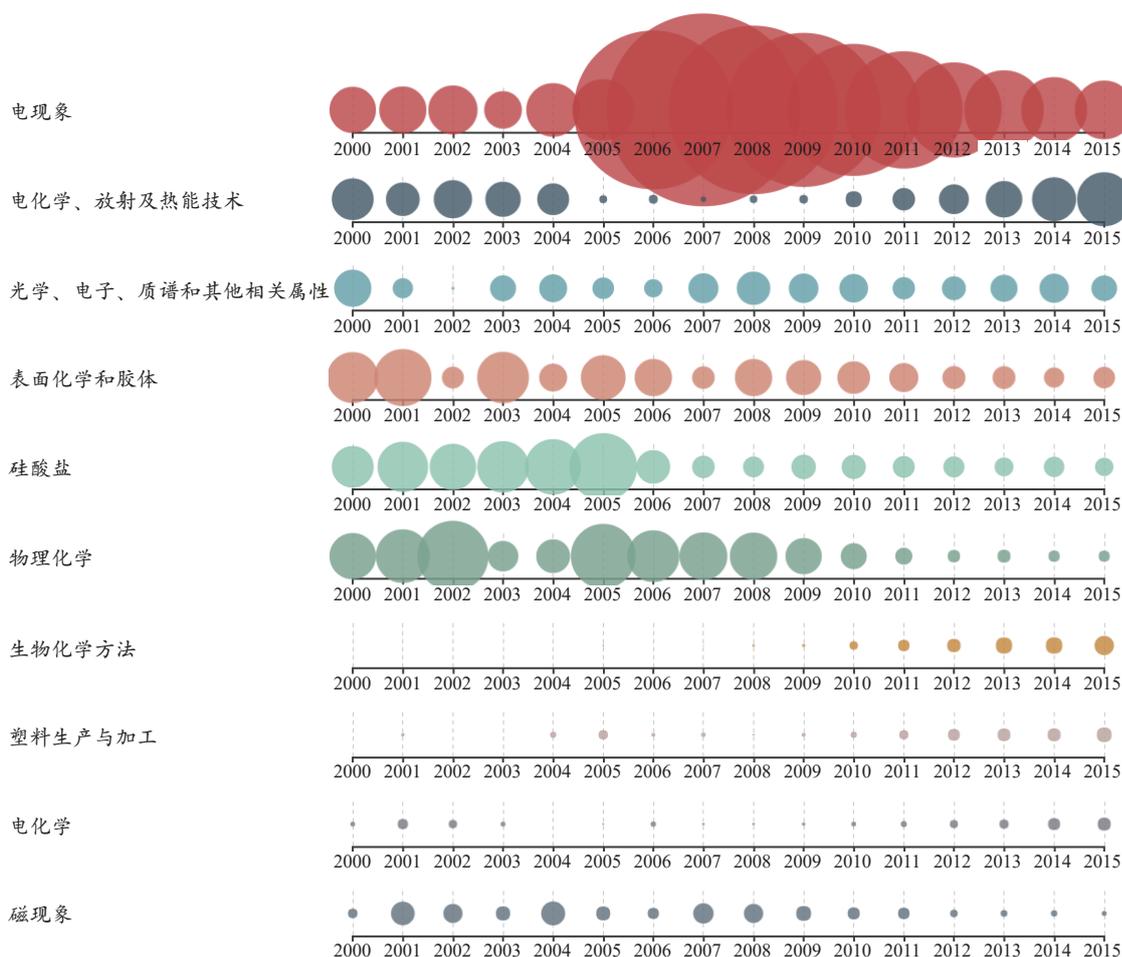


图4 全球石墨烯研究领域发展趋势

研究在2009年后呈下降趋势；对物质在物理、工程及化工工艺方面的研究自2011年后保持平稳发展；对物质在技术工程材料、分析物、生物研究、聚合物材料等方面研究自2012年后呈下降趋势。相反，对物质在生物应用方面的研究自2008年后呈现上升趋势，对物质在改性剂或添加剂、污染物、去除或处理等方面的研究在2012年后呈现上升趋势。石墨烯研究文献中涉及物质的主要性能用途近年来的份额呈下降趋势，作为生物应用、改性剂或添加剂，污染物及去除或处理等方面的研究成为新的关注点。

利用美国化学文摘社提供的深度标引，对1985年至2016年间10万余篇石墨烯相关的研究论文和专利的进行主题聚类分析，当前石墨烯材料和应用技术形成了相

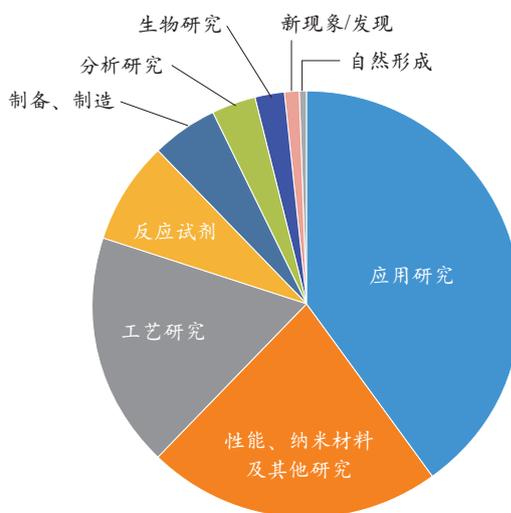


图5 全球石墨烯研究文献中涉及物质的主要性能及用途分布

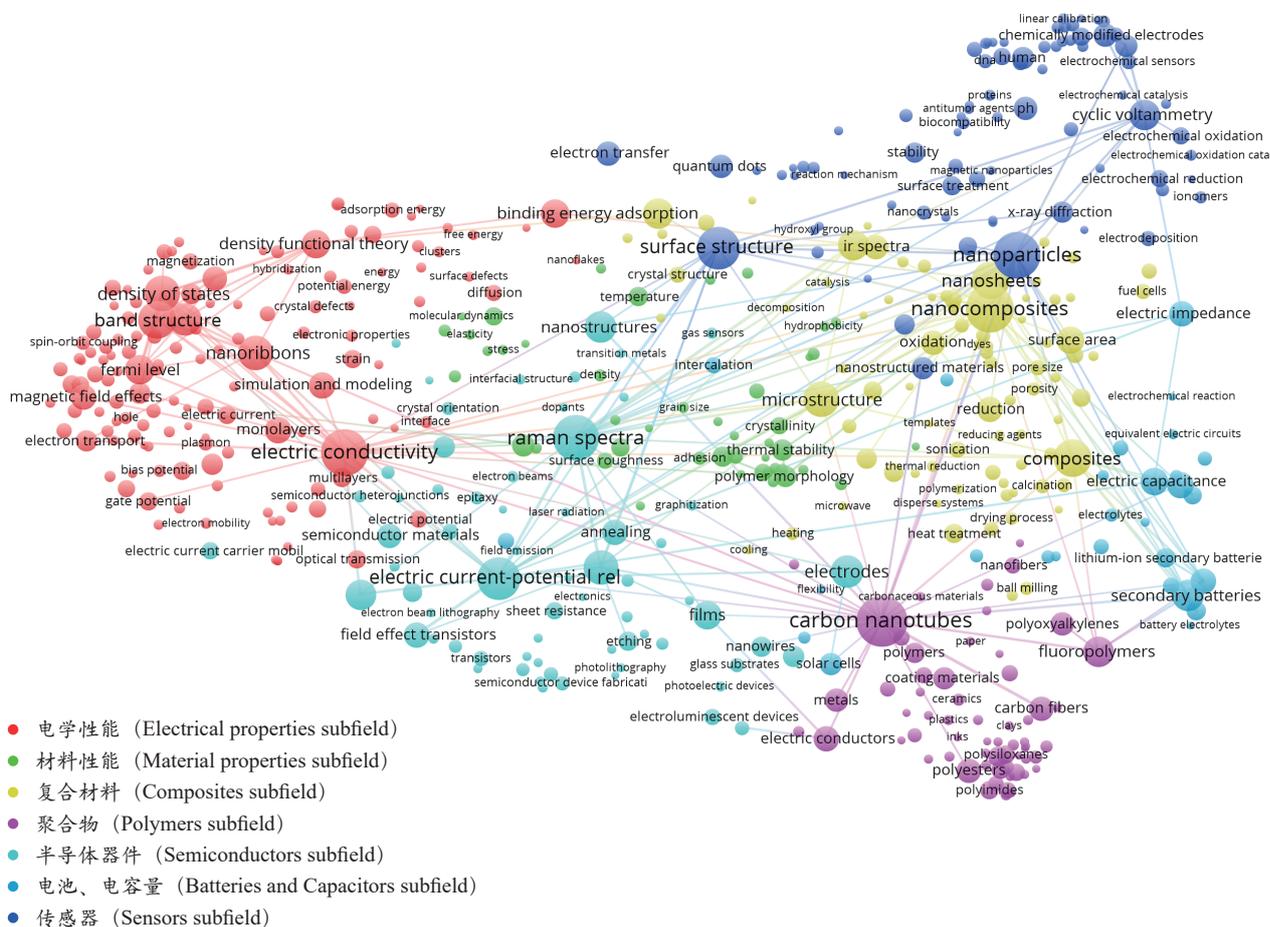


图6 全球石墨烯研究热点主题分布

对固定的领域布局，主要分布在电学性能研究、石墨烯复合材料、材料性能与制备、聚合物、传感器、半导体器件、电池、电容器等领域（图6）。石墨烯研发的主题词在不断扩展，涵盖的范围更宽。2010-2011年间，新出

现的主题词占45.7%，石墨烯研究不断向器件方向演进；2012-2013年间新出现的研究主题词占比38.9%；2014年至今新出现的研究主题词占比29.0%，新兴主题词所占比例逐渐减少，石墨烯“破茧”之势渐缓（图7）。

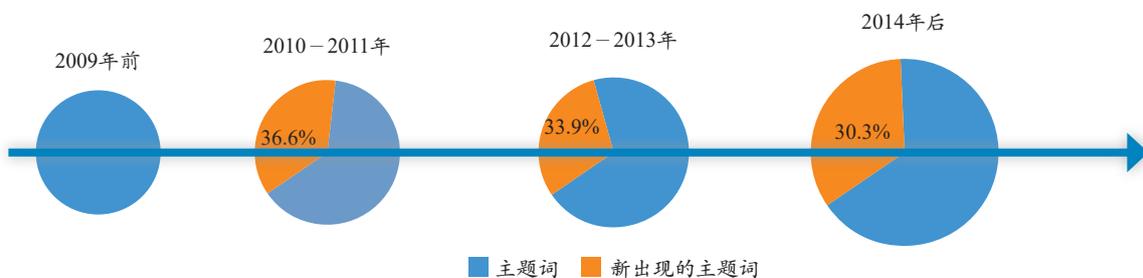


图7 全球石墨烯研究主题词演进



5 结论与展望

石墨烯作为新材料界的新星，自2004年正式面世到现在，在短短的十余年间，获得了广泛的关注，并取得了飞速的发展。全球石墨烯研发竞争日趋激烈，中国、美国、韩国、日本等主要的技术原创国家已逐渐形成技术优势和竞争格局。石墨烯相关研究从材料力学及电子学性能的基础研究延伸至电池、电容器、半导体、传感器、高分子纳米复合材料等应用领域，未来应用领域还将不断拓展，市场发展前景可期。

在能源应用领域，石墨烯作为新型储能材料，电极材料、导热/散热材料，展现出了良好的应用前景。在生物应用领域，石墨烯材料的生物传感器、复合功能材料在医学领域有着广阔的应用前景。在电子学应用领域，石墨烯在新型光电领域、智能电子领域具有很高的应用价值，同时石墨烯给现有的半导体工业注入新的活力。石墨烯的研发已呈现出良好的应用前景，但尚需在制备方法和工艺上进行新的突破，以实现石墨烯的应用与产业化，引领多领域新材料新时代的变革。

石墨烯在能源、生物学、电子学、和其他材料制成的纳米复合材料等诸多领域的广泛应用对石墨烯的低成本绿色制备、高质量精细结构调控以及多级次多功能组装与集成提出了越来越高的要求。制备工艺将呈现出多元化发展趋势，对制备方法和技术进行研发、改进和优化成为研究的热点，以提高并最大限度地发挥石墨烯各方面的优异性能。

石墨烯的研发已呈现出良好的应用前景，但尚需在制备方法和工艺上进行新的突破，以实现石墨烯的应用与产业化，引领多领域新材料新时代的变革。

致谢

对中科院文献情报中心刘细文副主任、美国化学文摘社高级副总裁Matthew Toussant在项目规划及实施方面的指导，对美国化学文摘社（Cynthia Liu、Todd Chamberlain等）的数据支撑，对石墨烯领域各方专家的解读支持，对石墨烯分析团队（张迪、陈小莉、陈欣、李宜展、李东巧、杨雨寒等）的分析工作，致以诚挚的感谢！

参考文献

[1] K. S. Novoselov¹, A. K. Geim. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films [J]. *Science*, 2004, 306(5696):666-669.

[2] Nees Jan van Eck, Ludo Waltman. How to Normalize Cooccurrence Data? An Analysis of Some Well-Known Similarity Measures [J]. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 2009, 60(8):1635-1651.

Graphene Research & Development Trends Report

Li Wang¹*, Lixue Zou¹, Caroline Ma², Sunny Yu², Yingqi Wu²

1 National Science Library, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2 Chemical Abstracts Service, Columbus, OH 43202, USA

*Corresponding Author, E-mail:wangli@mail.las.ac.cn

[Abstract] In order to grasp the landscape and development trends in graphene research around the world, we used structured literature information and data from CAS and applied quantitative analysis and text mining methods. This analysis focused on the overall trends, research topic distribution and evolution, distribution of substance properties and applications, country/regional distribution, potential competitive organizations, and other aspects of the global graphene research. These results will be a valuable reference for scientists, decision makers, scientific research management experts, policy experts and industrial experts to understand the landscape and trends of science and technology.

[Keywords] chemical abstracts service, patent analysis, bibliometric, cluster analysis