



纳米研究前沿分析报告

中国科学院科技战略咨询研究院
国家纳米科学中心

2017年8月

《纳米研究前沿分析报告》编写组

指导顾问

国家纳米科学中心 刘鸣华

总体设计

中国科学院科技战略咨询研究院 冷伏海 边文越

国家纳米科学中心 吴树仙

各国计划分析

中国科学院科技战略咨询研究院 张超星

研究前沿解读

中国科学院科技战略咨询研究院 王海名（锂电池、太阳能电池、测量表征）

中国科学院科技战略咨询研究院 邢颖（纳米药物、纳米检测、仿生纳米孔、
纳米安全性）

中国科学院科技战略咨询研究院 边文越（纳米发电机、纳米催化）

数据分析与可视化图谱

中国科学院科技战略咨询研究院 李国鹏 王小梅

摘 要	01
一 主要国家纳米研究计划分析	02
二 国际纳米研究前沿分析	04
(一) 数据、方法论及可视化图谱	04
(二) 研究前沿分析解读	06
1 锂电池	06
2 太阳能电池	08
3 纳米发电机	11
4 纳米药物	11
5 纳米检测	13
6 仿生纳米孔	14
7 纳米安全性	15
8 纳米催化	16
9 测量表征	18
三 总 结	20
附录 纳米研究热点前沿和新兴前沿	21

摘要

纳米技术是具有广泛应用前景的战略前沿技术。本研究采用内容分析、文献计量、图谱可视化等分析方法，结合专家和领域情报人员的研究，对美国、英国、法国、德国、俄罗斯、欧盟、日本、韩国、印度、澳大利亚以及我国纳米技术的战略规划和发展布局进行了调研分析；基于高被引论文的共被引关系，形成纳米技术前沿科学图谱，揭示了纳米技术的前沿方向，对比了主要国家的高被引论文数量；并选择了“锂电池”、“太阳能电池”、“纳米发电机”、“纳米药物”、“纳米检测”、“纳米仿生孔”、“纳米安全性”、“纳米催化”和“测量标准”9个前沿研究领域分别进行了分析解读。研究得出以下结论：

1. 通过对比分析主要国家的纳米技术研发计划发现：(1) 各国对纳米技术的信心普遍增强，资金投入和人员投入普遍加大；(2) 各国将纳米技术列入促进国家经济发展和解决重要问题的关键技术领域，能源和生物医药等领域尤其受到重视；(3) 纳米技术研发重心由最初单一的纳米材料制备和功能调控转向纳米材料的应用和商业化；(4) 各国通过公共研发平台、产业园区等方式，促进产学研合作及与其他领域的融合；(5) 各国纷纷开展环境、健康、安全和伦理、限制等方式，社会研究以及国际标准和规范的制定，促进纳米技术相关产业被社会接受；(6) 各国普遍重视纳米技术的基础教育和高等教育。

2. 基于科睿唯安公司 Essential Science Indicators 数据库中的 11814 个研究前沿，筛选出纳米领域研究前沿 1391 个，综合考虑论文的被引用情况和发表时间，遴选出 41 个热点前沿和 37 个新兴前沿。1391 个研究前沿涉及高被引论文 6639 篇，美国和中国的高被引论文数量遥遥领先于其他国家。

3. 美国在“太阳能电池”、“纳米发电机”、“纳米药物”、“纳米检测”、“纳米仿生孔”、“纳米安全性”和“测量标准”7个前沿研究领域中高被引论文数量排名第一，在“锂电池”和“纳米催化”中高被引论文数量排名第二。我国在“锂电池”和“纳米催化”2个研究领域中高被引论文数量排名第一，在“太阳能电池”、“纳米发电机”、“纳米药物”、“纳米检测”、“纳米安全性”5个研究领域中排名第二，在“测量标准”中排名第四，在“纳米仿生孔”方面还有待提高。

4. 我国在纳米科技领域已形成一批达到世界领跑水平的优势研究方向和优秀团队。例如中科院化学所、南开大学、华东理工大学、北京大学等机构在太阳能电池领域，中科院大连化物所、中科院上海高等研究院和上海科技大学等机构在高效合成低碳烯烃领域，均取得突出成果。

综观纳米研究的前沿分布和变化趋势，我们相信：纳米科技正在深入到科技与社会的变革领域，向绿色、健康等国际前沿和国家需求的大方向发展，中国在世界竞争格局中逐渐占据优势地位，并具有改变未来发展秩序的潜力。

由于数据研究和专业水平的限制，本报告可能有些观点有待商榷，恳请各位专家读者批评指正。

《纳米研究前沿分析报告》编写组

2017年7月

北京

一 主要国家纳米研究计划分析

2001年，美国率先制定了《国家纳米技术计划》，英国、德国、俄罗斯、欧盟、中国、日本、韩国、印度、澳大利亚等国家随后也制定了本国或本地区的纳米技术发展计划。进入本世纪第二个十年，各国纷纷对原有计划进行了更新和调整。

纵观各国纳米技术研发计划，既有共性又有各自的特色和侧重。共性之处至少包括以下6点：(1)对纳米技术的信心普遍增强，投资力度普遍加大，核心科研人员数量和相关企业数均大幅增加；(2)将纳米技术列入促进国家经济发展和解决关键问题的关键技术领域，在能源和生物医药等领域尤其受到重视；(3)研发重心由最初单一的纳米材料制备和功能调控转向纳米材料的应用和商业化，纳米技术的研究走向了新的阶段；(4)通过公共研发平台、产业园区等方式，促进产学研合作及与其他领域的融合，缩短从“提案”到“产业化”的时间；(5)开展EHS(环境、健康、安全)和ELSI(伦理、限制、社会课题)研究以及国际标准和规范(ISO、IEC)的制定，促进纳米技术相关产业被社会接受；(6)重视纳米技术的基础教育和高等教育。

在各自特色和侧重方面，首先各国计划的总体方向和实现目标不尽相同。作为纳米创新战略的领先者，美国的纳米战略和研究目标更为具体，近几年先后制定了关于碳纳米管研究、纳米纤维素商业化及纳米技术在水资源的可持续利用等使命导向型的研究计划。同时，其战略规划更致力于通过多学科融合解决一些重大挑战问题，例如2015年发布了《纳米技

术引发的重大挑战：未来计算》项目。日本的战略规划强调利用纳米技术“尖端化”和“融合化”的已有成果，将那些能够应对社会需求的纳米技术进一步体系化，促进课题解决型研究的发展。韩国的战略规划在继续重视战略性纳米技术基础研究的前提下强调促进纳米技术产业化，实现信息技术融合型新兴产业、未来发展动力、整洁便利环境、健康长寿及安全放心的社会5大国家战略技术目标。德国的纳米研究计划将研究重点放在了对现有研究成果的有效转化上，希望借此能提高德国企业的竞争力。欧盟近几年的纳米技术战略计划侧重于石墨烯的研发和应用上，尤其是其在能源领域的应用。澳大利亚的纳米战略计划希望在已有研究实力基础之上实现能源、环境、健康、国家安全及振兴制造业等重大挑战性问题的解决。至于中国，除国家自然科学基金委外，其它相关机构没有设立单独针对纳米科学和技术的全谱规划。国家自然科学基金委的规划更偏重于基础研究，重在纳米制造和测量及机理/机制的研究，部分规划涉及应用领域，如能源、医药、环境等，但多数处于应用研究的最前端，离真正的商业化或者产业化还有较长距离。

其次，各国计划中具体研究方向/领域也存在着显著的区别。本文选取了生物、环境、能源、器件与制造、测量、仪器设备、标准与安全7个领域进行比较分析，发现如下特点。

1) 生物领域：英国偏重于生物纳米技术的产业化，如建立纳米纤维的生产平台，设计纳米工厂等；中国较重视碳纳米材料的生物应用及具有免疫应答的生物医用材料的开发；澳

大利亚偏重于人体仿生纳米器件的研究；印度希望利用纳米粒子开发抗虫害植物品种。俄罗斯、德国、韩国及欧盟等把纳米植入材料作为其重要的研究方向；美国、俄罗斯、澳大利亚、日本及印度等把纳米药物的靶向输送列为重点支持方向；美国、日本、德国等高度重视医学成像。

2) 环境领域：欧盟和德国将 CO₂ 的捕获和利用作为重要的研究方向，英国更为关注纳米材料对环境的毒性研究，日本把放射性物质的去除技术作为其战略方向之一，韩国较为重视空气净化纳米催化剂研究，中国较为重视极端环境材料的研发。美国、俄罗斯、英国、澳大利亚、日本等高度重视纳米材料水处理技术。

3) 能源领域：美国在纳米储能材料领域较为重视锂电池固体聚合物电解质、热自发电电池等的研发，在纳米发电材料领域较为重视多孔固体氧化物燃料电池电解质及光伏发电增强材料的研发。欧盟重视柔性电池、轻型电存储及储氢系统的研发以及发展包括渗透能发电在内的新型可再生能源。俄罗斯较为重视太阳能电池、重型陶瓷磁铁及替代能源材料的研发，英国将研发重点放在了钙钛矿型电池模块化上，日本强调对高温超导输电的研究，韩国主要部署了柔性电极、智能窗户及隔热元件等研究方向，澳大利亚较为重视安全动力电池和太阳能电池的研发，中国较为重视热电材料和长续航动力电池的研究。

4) 器件与制造领域：美国、俄罗斯和欧盟

都将纳米传感器的研发列为其战略研究方向，美国和中国都很重视芯片的研发，欧盟和中国都将柔性智能器件、非易失性存储器列入研究方向。美国较为重视软物质制造技术，俄罗斯较为重视基于忆阻器的电子元件，欧盟较为重视基于石墨烯的集成电路、等离子体光开关及晶体管的研发，中国较为重视极低功耗器件和电路、3D 打印、硅基太赫兹技术等。

5) 测量领域：美国关注异质材料的表征，欧盟重视选择性单分子探测，俄罗斯强调原子分辨率的材料表面成像系统，中国将重点研发具有极限分辨能力的表征和测量技术。

6) 仪器设备领域：欧盟和韩国在柔性显示器方面均有战略部署。美国、德国、欧盟、韩国、澳大利亚等重视功能探测器 / 传感器（如分子探测器、光电探测器、感应传感器）研究。欧盟较为重视利用太赫兹技术的相关器件的研发，德国则较为重视危险物质探测和救援人员防护设备的研发，俄罗斯较为重视对纳米机器人的研究，中国将纳米绿色印刷和纳米刻蚀作为重要的研究方向。

7) 标准与安全领域：美国强调了对石墨烯的监管及其对基因等的影响，德国重视应用纳米技术时的必要保护措施及对食品材料的创新研究，韩国提出要研究感染性生物物质检测与监测，中国更为重视纳米领域应用的重要标准和检测技术。美国、德国、韩国、中国等国关于纳米标准与安全领域的战略部署均涉及纳米材料的生物安全技术研究。

二 国际纳米研究前沿分析

(一) 数据、方法论及可视化图谱

科睿唯安公司 Essential Science Indicators(ESI) 数据库基于高被引论文 (Top 1%) 之间的共被引关系, 聚类形成若干高被引论文簇, 每一簇包括研究主题相同或相近的若干篇高被引论文, 形成一个“研究前沿”。本报告以 ESI 数据库中的 11814 个研究前沿为基础, 通过文献检索、专家遴选等方法筛选出和纳米研究相关的研究前沿 1391 个, 涉及高被引论文 6639 篇。ESI 数据获取时间为 2016 年 1 月, 高被引论文发表时间为 2008-2015 年。

为了可视化展现纳米研究前沿在全领域研究前沿中的分布, 本报告以研究前沿为基本单元, 基于文本向量空间相似性计算了研究前沿间的相似性, 然后用 OpenOrd 布局算法将研究前沿映射到二维空间, 得到基于研究前沿的科学全景图谱 (图 1)。图谱中的每个点代表一个研究前沿, 研究前沿的相似度高则点的距离越近。通过不同颜色区分研究前沿中纳米领域论文比例的高低。本报告发现, 一般比例达到 60% 以上才能归为纳米领域研究前沿。图 1 基本反映了纳米研究前沿在全领域研究前沿中的分布情况。

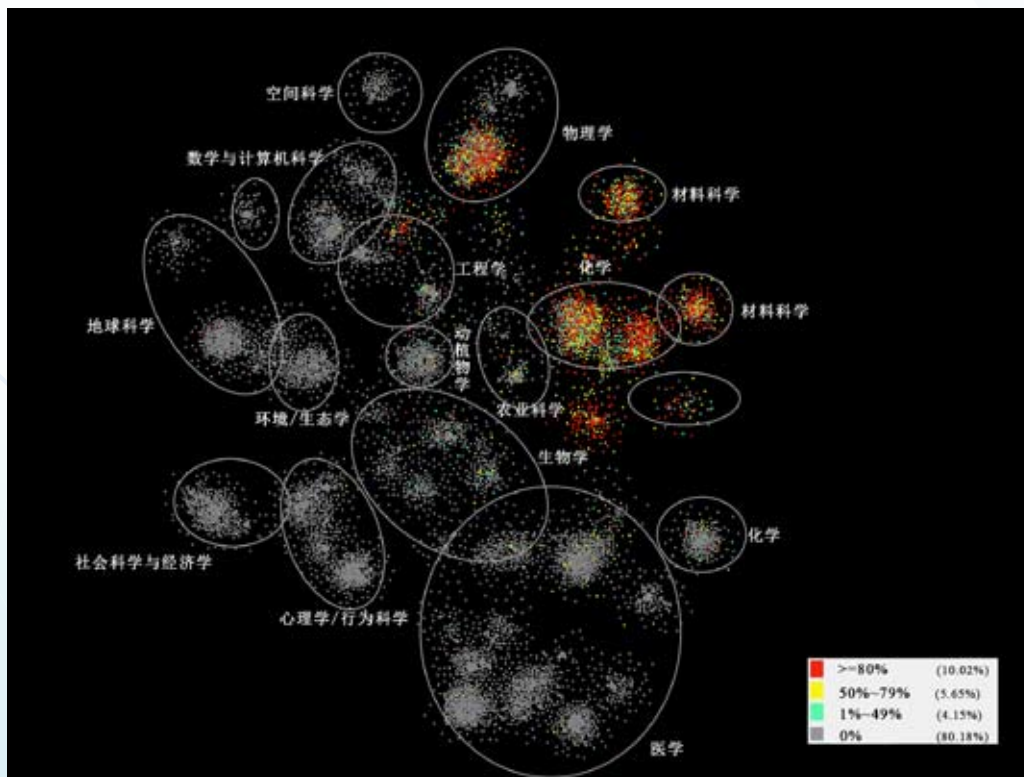


图 1 纳米研究前沿在全领域研究前沿中的分布

本报告对 6639 篇高被引论文的通讯作者国别情况进行了统计, 如表 1 所示, 美国和中国分居前两位, 遥遥领先于其他国家。

表 1 高被引论文通讯作者国别统计 (Top 10 国家)

排名	通讯作者国家	高被引论文 (篇)
1	美国	2243
2	中国	1645
3	德国	330
4	日本	238
5	新加坡	234
6	韩国	220
7	英国	219
8	法国	143
9	加拿大	126
9	伊朗	126

国家纳米科学中心组织专家对 1391 个研究前沿进行了命名。本报告按照“纳米制造”、“纳米能源”、“纳米生物”、“纳米测量”对其进行分类，结果如表 2 所示，可视化图谱如图 2 所示。

表 2 纳米前沿分类

	纳米制造	纳米能源	纳米生物	纳米测量	其他
研究前沿 (个)	657	328	219	48	256
高被引论文 (篇)	3138	1546	968	179	1334

本报告采用文献计量学方法从 1391 个纳米研究前沿中遴选出热点前沿 41 个和新兴前沿 37 个 (详见附录)。热点前沿的遴选主要考虑前沿的施引文献数量。根据表 1 中的分类，对每个类 (包括“其他”类) 中的研究前沿按照施引文献总量进行排序，提取排在前十%的最具引文影响力的研究前沿，再根据高被引论文出版年的平均值重新排序，找出那些“最年轻”的研究前沿。每个类分别选出 10 个热点前沿 (不足 10 个，取全部前十%)，共计 41 个热点前沿。新兴前沿的遴选主要考虑组成前沿的高被引论文的时效性。首先选取高被引论文平均出版年在 2014 年 1 月之后的研究前沿，然后

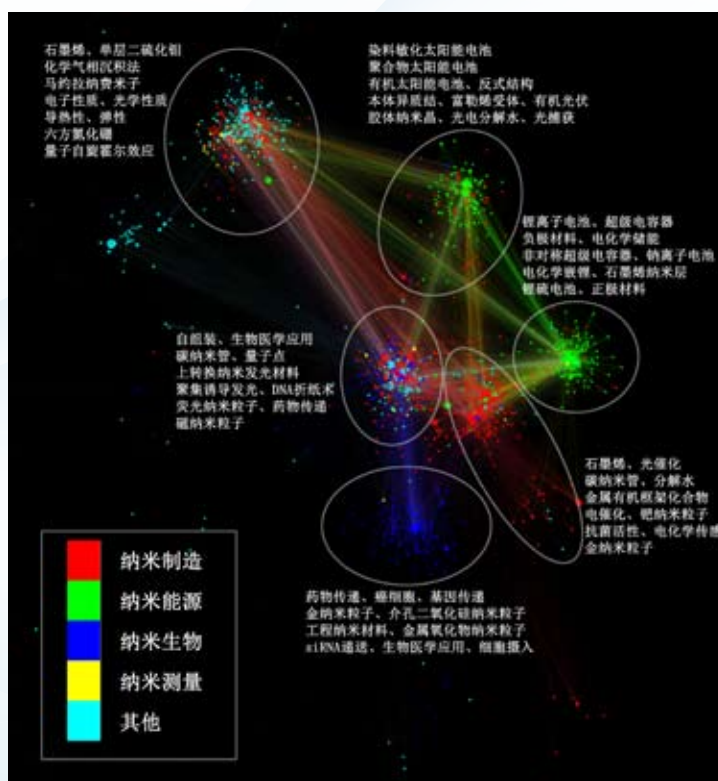


图 2 纳米研究前沿可视化图谱

根据总被引频次从高到低排序，选取被引频次在 60 次以上的研究前沿，共计 37 个新兴前沿。

(二) 研究前沿分析解读

本报告从“纳米能源”、“纳米生物”、“纳米制造”、“纳米测量”四个大类中选择了“锂电池”、“太阳能电池”、“纳米发电机”、“纳米药物”、“纳米检测”、“纳米仿生孔”、“纳米安全性”、“纳米催化”和“测量标准”9个前沿研究领域进行分析解读。每个领域包括若干个研究前沿。

1 锂电池

锂电池领域的研究前沿共涉及高被引论文 413 篇，研究内容主要围绕锂离子电池、聚合物锂电池、锂离子电池表征研究等。如表 3 所示，中国在该领域的高被引论文数量最多，具有显著的优势，美国和新加坡的高被引论文数量分列第 2、3 位。

表 3 锂电池领域研究前沿高被引论文 Top 10 国家

	通讯作者国家	高被引论文 (篇)	所占比例 (%)
1	中国	159	38.5
2	美国	96	23.2
3	新加坡	43	10.4
4	韩国	23	5.6
5	加拿大	21	5.1
6	澳大利亚	18	4.4
7	德国	16	3.9
8	日本	11	2.7
9	法国	8	1.9
10	英国	6	1.5

(1) 锂离子电池

a. 负极材料

硅基材料由于具有高化容量、相对较低的充放电平台及储量丰富等优点，是目前负极材料的研究热点之一。在该研究方向上，斯坦福大学崔毅团队表现突出，设计制备了核壳、空心硅纳米球、中空硅纳米管、硅纳米线阵列等不同结构，进一步优化了其电化学性能。美国西北大学黄嘉兴研究团队的表现也较为抢眼，其研究聚焦在利用石墨烯改进硅基负极材料的相关性能。

常温下，锆拥有比硅更高的电子电导率和锂离子扩散率，因此锆是高功率锂离子电池负极材料强有力的候选者。目前，研究人员尝试制备各种锆纳米结构材料以改进其电极性能。韩国学者 Park 等获得了零维的空心锆纳米颗粒以及三维的多孔锆纳米颗粒，显示出较好的循环性能。

金属锡作为锂离子电池负极材料时的理论容量高达 994 mAh/g，但其容量易迅速衰减、循环性能差。近年来研究人员开发出一系列纳米颗粒、纳米管、纳米片、纳米纤维、多孔结构等多种形貌的锡氧化物的合成与制备方法，显著改善了其循环性能和倍率性能。中国科学院、南京师范

大学、上海交通大学、浙江大学等在该研究方向表现较为突出。

二氧化钛是有望替代石墨电极的锂离子电池理想负极材料。近年来，研究人员围绕不同形貌纳米结构的 TiO_2 负极材料进行了大量的研究工作。新加坡南洋理工大学楼雄文研究团队在该方向表现突出，通过将 TiO_2 和高导电性的石墨烯复合，获得了具有较高的可逆比容量、优异的循环和倍率性能的复合材料。复旦大学、中科院金属所、上海交通大学等均在該方向也取得了若干突破。

氧化铁由于其理论容量高、资源丰富、价格便宜等优势吸引了研究人员的极大关注。新加坡南洋理工大学楼雄文研究团队对 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 应用于锂电池负极材料进行了大量研究，团队制备的 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 纳米管、 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 纳米盘，其中空和多孔的结构一方面增加了储锂空间，提高了嵌锂容量，另一方面对充放电过程中电极材料的体积变化均有缓解作用，从而显示出较优异的电化学性能。

其他获得了较多研究的可用作锂离子电池负极材料的金属氧化物还包括氧化钼、铜氧化物、氧化钴、氧化锰等。研究人员通过制备纳米结构的过渡金属氧化物、与导电聚合物复合、与金属复合等改善电极材料的电化学性能。浙江大学涂江平教授团队、新加坡南洋理工大学楼雄文团队、中科院物理所李泓研究员团队等均发表了多篇高被引研究论文。

石墨烯具有很高的杨氏模量和断裂强度，同时还具有很高的电导率和热导率、优异的电化学性能以及易功能化的表面，这些特点都使石墨烯成为锂离子电池负极材料的首选研究材料。中国在该领域表现突出，主要研究机构有南开大学、复旦大学、中科院化学所、国家纳米科学中心、中科院上海硅酸盐所、上海大学、浙江大学等。国外方面，美国西北大学、新加坡南洋理工大学、澳大利亚卧龙岗大学等也在该研究领域表现活跃。

二维 MoS_2 纳米片作为锂离子电池负极材料时显示了较高的电化学储锂容量和较好的循环性能。中国研究人员在该领域较为活跃，浙江大学陈卫祥教授研究团队通过多种手段制备了 MoS_2 /石墨烯复合材料并用作锂离子电池负极材料，不仅具有较高的可逆容量，而且其循环稳定性和倍率性能也十分优异。

b. 正极材料

最具代表性的正极材料 LiFePO_4 是目前锂离子电池正极材料研究的热点领域，研究人员致力于研究利用碳包覆、导电金属离子包覆、金属离子掺杂和电极材料纳米化等方法提高 LiFePO_4 的性能。改性后 LiFePO_4 的放电容量、高倍率放电性能、循环性能均获得了不同程度的提升。中国科学院、复旦大学、中南大学等国内研究机构在该领域表现活跃。

c. 隔膜材料

该方向的高被引论文集中在系统研究包含二氧化硅、三氧化二铝涂层的聚酰亚胺、聚乙烯、聚丙烯、聚偏氟乙烯等新型锂离子电池隔膜材料对锂离子电池的容量、循环性能和倍率放电性能的影响方面。韩国在该研究方向表现较为突出。

d. 机理研究

随着锂离子电池研究的日益兴起，对锂离子电池电极材料机理的探索也愈发受到关注和重

视。美国桑迪亚国家实验室黄建宇（已经全职加入燕山大学）研究团队在该领域的表现较为突出。浙江大学、中国科学院等在该领域也发表了多篇高被引论文，但多为合作研究。

e. 柔性锂离子电池

中科院金属所、半导体所、中国科技大学、北京大学、中南大学、中山大学等在该方向的研究主要聚焦在利用石墨烯泡沫为集流体装载氧化铁和钛酸锂等材料改进柔性锂离子电池的性能以及开发基于碳纳米管的柔性电极材料等。

(2) 锂硫电池

锂硫电池具有巨大理论容量和能量密度优势，但在实际应用中还存在室温下的电导率极低、充放电过程中正极硫材料容易流失等技术瓶颈。清华大学张强教授研究团队在锂硫电池领域表现最为突出，提出具有自分散特性的石墨烯-碳纳米管杂化物、柱撑石墨烯等纳米碳材料担载活性材料，进而获得高容量的高效正极。加拿大滑铁卢大学 Nazar 团队、斯坦福大学崔毅团队、德克萨斯大学奥斯丁分校 Manthiram 团队较为活跃。

(3) 锂空气电池

锂空气电池的能量密度预计高达 600 Wh/kg，但面临稳定性、效率、实用性和安全性等挑战。麻省理工学院 Yang S. H. 研究团队通过化学气相沉积过程为存储固体氧化锂提供了更多孔隙，因此提升了锂空气电池的能量密度；开发出 Au-Pt 合金纳米催化剂，将锂空气电池的充放电效率提升至 77%。

2 太阳能电池

太阳能电池领域的研究前沿共涉及高被引论文 516 篇，研究内容主要围绕量子点敏化太阳能电池、有机太阳能电池、无机太阳能电池等。如表 4 所示，美国在该领域的高被引论文数量最多，中国位列第二，与美国的差距较小。韩国、英国在高被引论文数量方面处于第二梯队，与美国和中国相比有明显差距。

表 4 太阳能电池领域研究前沿高被引论文 Top 10 国家

	通讯作者国家	高被引论文 (篇)	所占比例 (%)
1	美国	158	30.6
2	中国	119	23.1
3	韩国	31	6.0
4	英国	30	5.8
5	德国	18	3.5
6	瑞士	16	3.1
6	澳大利亚	16	3.1
8	加拿大	14	2.7
9	西班牙	13	2.5
10	日本	12	2.3

太阳能电池按照制作材料和发展历程可以分成三代：第一代太阳能电池主要是单晶硅和多晶硅的硅基太阳能电池；第二代太阳能电池主要是非晶硅和多元化合物的薄膜太阳能电池，如 GaAs、CdS、CdTe、铜铟镓硒等材料；第三代太阳能电池同时具有绿色环保，成本低廉，转化效率高特点，主要包括有机聚合物太阳能电池、染料敏化太阳能电池、量子点敏化太阳能电池和钙钛矿太阳能电池等。

(1) 量子点敏化太阳能电池

量子点敏化太阳能电池 (QDSCs) 因其制备成本低、工艺简单及量子点本身的优异性能 (如尺寸效应、多激子效应) 等优点，近年来受到广泛关注。加拿大多伦多大学 Sargent E. H. 研究小组、美国国家可再生能源实验室 Nozik A. J. 研究小组以及华东理工大学钟新华教授团队在该方面较为突出。2012 年, Sargent 小组实现了迄今为止红外量子点电池的最高能量转化效率 7%。2013 年, 华东理工大学钟新华课题组合成了基于 CdSeTe 的量子点, 获得了高达 6.36% 的光电转换效率。2015 年, 该团队通过对 TiO₂/CdSeTe 表面依次沉积 ZnS 和 SiO₂, 获得 8.21% 的认证效率。

(2) 有机太阳能电池

a. 钙钛矿太阳能电池

2013 年以来, 以钙钛矿相有机金属卤化物 ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$ ($\text{X} = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$)) 作为吸光材料的薄膜太阳能电池 (简称钙钛矿太阳能电池, PSCs) 因其兼具较高的光电转换效率和潜在极低的制备成本等优点引起学术界的高度关注。PSCs 光电转化效率的快速提高使得 PSCs 被 Science 评为 2013 年十大科学突破之一。

瑞士洛桑联邦理工学院 Grätzel M、牛津大学 Snaith, H. J.、韩国成均馆大学 Park N. G. 等研究团队在钙钛矿太阳能电池领域取得了一系列重大成果, 目前在 PSCs 研究领域处于领先地位。2011 年韩国成均馆大学 Park 课题组优化了 TiO₂ 表面和钙钛矿的制作工艺, 将 PSCs 效率提高到 6.5%。2012 年牛津大学 Snaith 课题组提出了“介孔超结构太阳能电池”的概念, 使 PSCs 效率首次达到 10.9%。2013 年, Grätzel 课题组和牛津大学 Snaith 课题组将 PSCs 效率提高到 15% 和 15.4%。年仅 30 余岁的牛津大学青年科学家 Snaith 也因此被 Nature 评为 2013 年十大科学人物之一。和英国、瑞士、韩国等相比, 中国在该研究方向的高被引论文相对较少。

b. 染料敏化太阳能电池

20 世纪 60 年代, 德国科学家 Tributsch 等首次发现了染料吸附在半导体上在一定条件下能产生电流, 成为染料敏化太阳能电池的重要基础。

瑞士洛桑联邦理工学院的 Grätzel M 为染料敏化太阳能电池领域的发展做出了一系列重要贡献。2011 年, Grätzel 等制备出光电效率为 12.3% 的电池; 2014 年, 课题组再次刷新染料敏化太阳能电池效率, 达 13%。除此之外, Grätzel 研究团队在染料光敏化剂、电极等方面也取得了一系列重大成果。中国研究人员在该领域也有突出表现, 代表性的研究团队包括中国海洋大学唐群委团队、中山大学匡代彬团队、中科院长春应化所王鹏团队、大连理工大学马廷丽团队等。唐群委研究团队在导电聚合物方面做了很多有意义的工作, 采用基于高氯酸掺杂的聚苯胺纳米颗粒制

成染料敏化太阳能电池用对电极，获得了大于 7% 的光电转化效率。匡代彬研究团队在特殊形貌 TiO_2 在染料敏化太阳能电池中的应用以及光电极研究方向取得了一系列成果。2009 年，王鹏课题组率先研制出转化效率达 9.8% 的染料敏化太阳能电池。

c. 聚合物太阳能电池

与硅基太阳能电池相比，聚合物太阳能电池具有器件结构简单、重量轻、可低成本大规模制备等突出优点。根据受体情况，聚合物太阳能电池可以划分为基于富勒烯受体的聚合物太阳能电池、基于非富勒烯小分子受体的聚合物太阳能电池、全聚合物太阳能电池等。

基于富勒烯的聚合物太阳能电池的研究主要集中在以受体材料 C_{60} 衍生物 PCBM 和给体材料导电聚合物聚己基噻吩 (P3HT) 混合作为光活性层而形成的体相异质结结构。英国帝国理工学院、美国能源部、加州大学系统、斯坦福大学、中科院化学所李永舫院士等在该研究方向表现活跃。

发展高性能的非富勒烯受体是有机太阳能电池领域的挑战性难题。中国和美国是非富勒烯聚合物电池研究方向的主要研究国家。北京大学肖卫团队率先提出了稠环电子受体的概念，设计合成了一系列高性能有机稠环电子受体材料，取得了一系列重大突破。2015 年，该课题组报道了效率高达 6.8% 的非富勒烯聚合物太阳能电池。2016 年，该团队报道的电池效率达 9.6%，刷新了世界最高效率。中科院化学所侯建辉团队也是该研究方向最为活跃的研究团队之一。2016 年，该研究团队在小面积非富勒烯型聚合物太阳能电池器件 (13 mm^2) 中取得了创纪录的 11.2% 的能量转换效率，使非富勒烯型聚合物太阳能电池效率达到了富勒烯受体的最好水平。

在全聚合物太阳能电池方面，中科院化学所李永舫团队表现活跃。2015 年，该团队将全聚合物太阳能电池的能量转换效率提高到 8.27%。

除上述外，2016 年，南开大学陈永胜研究团队利用寡聚物材料的互补吸光策略构建了一种具有宽光谱吸收特性的叠层有机太阳能电池器件，实现了 12.7% 的光电转化效率，创造了当时文献报道的有机 / 高分子太阳能电池光电转化效率的最高纪录。

(3) 无机太阳能电池

a. 表面等离激元 (surface plasmon) 增强太阳能电池

加州理工学院 Atwater H. A. 研究团队是该研究方向的主要开拓者。2010 年，Atwater H. A. 等指出在保证活性层厚度不增加的情况下等离激元纳米结构存在三种有效提高活性层吸收的光捕获策略。基于上述光捕获策略，表面等离激元太阳能电池已取得了很大进展，短路电流密度、功率转换效率等参数均实现了大幅提升。

b. 化合物薄膜太阳能电池

薄膜太阳能电池的种类较多，主要类型包括碲化镉、砷化镓、铜铟硒 (CIS)、铜铟镓硒 (CIGS)、铜锌锡硫 (CZTS) 等薄膜太阳能电池。2010 年，德国太阳能和氢能研究中心研究的铜铟镓硒 (CIGS) 太阳能电池的光电转化率达到 20.3%。2011 年，美国国家可再生能源实验室研制的小面积 GaAs 薄膜太阳能电池实现了 28.3% 的光电转换效率。在该研究方向，美国的研究实力较为突出，知名研究机构包括加州大学系统、IBM 公司、劳伦斯伯克利国家实验室等；中国科

学院、香港中文大学、华东师范大学等国内机构也表现活跃。

3 纳米发电机

纳米发电机领域的研究前沿共涉及高被引论文有 32 篇，研究内容主要分布在摩擦纳米发电机和压电纳米发电机两个研究方向。如表 5 所示，该领域的高被引论文基本都来自美国，其中 25 篇来自美国佐治亚理工学院教授、中国科学院北京纳米能源与系统研究所所长王中林院士。

表 5 纳米发电机领域研究前沿高被引论文 Top 3 国家

	通讯作者国家	高被引论文 (篇)	所占比例 (%)
1	美国	28	87.5
2	中国	2	6.25
3	韩国	2	6.25

发电机原理主要有电磁、压电、热电和静电四种类型。纳米发电机主要采用压电和静电（即摩擦）两条技术路线。在纳米发电机发展过程中，王中林院士做出了重要开创性贡献。2006 年，王中林课题组首次报道了压电纳米发电机，利用压电极化电荷和所产生的随时间变化的电场来驱动电子在电路中的流动。2012 年，王中林课题组首次报道了摩擦纳米发电机，利用两种不同材料接触所产生的表面静电荷所导致的随时间变化的电场来驱动电子的流动。迄今为止，摩擦纳米发电机已发展至四种工作模式（垂直接触 - 分离、水平滑动、单电极、独立层），输出功率密度从每平方米 3.67 毫瓦飙升至 300 多瓦，可将日常环境中的各种机械能转化为电能，作为微纳电源为微小型设备供电，作为自驱动传感器用于健康监测，生物传感，人机交互等。最近，王中林课题组致力于将摩擦纳米发电机用于收集海洋能，并首次用于设备仪器（质谱仪）中。除了应用研究，王中林院士还论证了纳米发电机的理论源头来自于麦克斯韦的位移电流的第二项，并由此推导出压电纳米发电机和摩擦纳米发电机的基本输运方程。

压电纳米发电机虽然发明较早，但过低的输出电流限制了其发展和应用。核心材料从最初的 ZnO 纳米线，正在朝 BaTiO₃、PZT 等钙钛矿型材料、PVDF 聚合物材料、MoS₂ 等二维材料等方向发展，结构既有一维纳米线、纳米纤维，也有二维平面薄膜。

4 纳米药物

纳米药物领域的研究前沿共涉及高被引论文 488 篇，研究内容主要围绕纳米药物载体与药物递送、肿瘤治疗纳米药物、抗菌治疗纳米药物等。如表 6 所示，在高被引论文数量方面，美国最多，中国排名第二，美国和中国的表现明显优于其他国家。

表 6 纳米药物领域研究前沿高被引论文 Top 10 国家

	通讯作者国家	高被引论文 (篇)	所占比例 (%)
1	美国	181	37.1
2	中国	113	23.2
3	德国	32	6.6
4	新加坡	22	4.5
5	印度	19	3.9
6	伊朗	17	3.5
7	韩国	9	1.8
7	加拿大	9	1.8
7	西班牙	9	1.8
10	法国	8	1.6

近年来，纳米材料和纳米技术越来越多地进入到临床应用阶段。经临床实践证实，根据纳米材料对肿瘤细胞和肿瘤组织靶向性的特性设计出的纳米药物能明显改善肿瘤治疗。其中，肿瘤光热治疗技术作为一种新型的治疗策略，已经在肿瘤治疗方面引起了高度关注。早期的光热治疗主要通过高热量来直接破坏、消除肿瘤细胞。近年来很多研究者发现这些纳米材料产生的热除具有直接杀伤肿瘤细胞的作用外，还可通过抑制肿瘤转移、克服化疗耐药从而发挥抗肿瘤作用。目前研究较多的光热材料以金纳米材料为主，研究内容主要围绕金纳米棒、金纳米笼等金纳米材料的肿瘤光热治疗，及光声成像 - 光控释放 - 光热治疗化疗等纳米金多手段多功能的诊疗一体化研究。2008 年，美国佐治亚理工学院 El-Sayed MA 团队利用金纳米棒对小鼠鳞状上皮细胞癌进行等离激元光热治疗，论文被引 521 次。2012 年，国家纳米科学中心陈春英和吴晓春团队把介孔二氧化硅包被的金纳米棒用于肿瘤的成像、化疗和热疗，论文被引 395 次。其他知名机构包括美国德克萨斯大学安德森癌症中心、美国华盛顿大学以及我国东华大学、苏州大学、哈尔滨工程大学和南京大学等。

纳米药物载体与药物递送方向近年发展迅速。主要用于药物载体的纳米材料包括纳米脂质体、聚合物胶束、纳米囊和纳米球、纳米磁性颗粒、氧化石墨烯、介孔二氧化硅纳米粒等。氧化石墨烯具有良好的生物相容性、易于表面功能化，其巨大的比表面使它具有超高载药率。2008 年美国斯坦福大学戴宏杰教授团队率先报道了利用氧化石墨烯作为难溶性含芳香结构抗癌药物的载体，其具有良好的水溶性，可用于难溶性药物的增溶，并可有效杀伤肿瘤细胞。两篇相关论文分别被引用达 1789 和 1533 次。其中介孔二氧化硅因多孔性、比表面积大、便于修饰性、毒性低等特点，得到广泛应用，具有极大的发展前景。相关核心论文主要围绕介孔二氧化硅的合成、特性及癌症治疗等生物医药应用。主要研究团队包括美国加州大学洛杉矶分校 Zink Jeffrey I. 和 Nel Andre E. 团队、美国西北大学 Stoddart J. Fraser 团队、中科院理化所唐芳琼团队、芬兰埃博学术大学 Sahlgren Cecilia 团队、美国新泽西州立大学 Minko Tamara 团队、美国爱荷华州立大学 Vivero-Escoto Juan L. 团队、福州大学杨黄浩团队、新加坡南洋理工大学 Zhang Quan 和 Zhao

Yanli 团队等。其中 Nel Andre E. 团队关于 siRNA 修饰的负载抗癌药物的介孔二氧化硅纳米运输体系以克服肿瘤多重耐药性的研究被引用 455 次。

脂质体近年来也是给药系统研究领域中的研究热点，已经在许多方面显示出其潜在的应用价值，知名研究机构包括美国哈佛大学、美国德州大学奥斯丁分校、澳大利亚哥廷理工大学以及我国南京大学等。

5 纳米检测

纳米生物和医学检测领域的研究前沿共涉及高被引论文 325 篇，研究内容主要围绕量子点、贵金属纳米簇、上转换材料等纳米探针技术以及纳米生物传感器。如表 7 所示，在高被引论文数量方面，美国最多，中国排名第二，美国和中国的表现明显优于其他国家。

表 7 纳米检测领域研究前沿高被引论文 Top 10 国家

	通讯作者国家	高被引论文 (篇)	所占比例 (%)
1	美国	119	36.6
2	中国	107	32.9
3	新加坡	20	6.2
4	德国	15	4.6
5	韩国	14	4.3
6	日本	8	2.5
7	英国	7	2.2
8	加拿大	6	1.8
9	西班牙	4	1.2
9	荷兰	4	1.2

纳米生物和医学检测技术的热点主要集中在用于分子影像诊断的纳米探针技术。纳米探针具有影像信号强度大、靶向效果好、代谢动力学可控等显著的优点。近年来，基于贵金属纳米材料（金、银等纳米颗粒）、量子点、上转换荧光纳米颗粒的荧光纳米探针迅速发展，成为纳米生物医学检测领域的前沿热点。

在贵金属纳米簇纳米探针研究方向上，高被引论文主要研究以核苷酸作为保护模板合成荧光银纳米簇探针，以增加其稳定性，并将其用于核苷酸、汞离子及蛋白等的生物检测。美国佐治亚理工学院 Dickson Robert M. 团队、美国阿拉莫斯国家实验室 Martinez Jennifer S. 团队和中国科学院长春应用化学所汪尔康院士团队在该研究方向较为突出。

在量子点纳米探针研究方向上，美国海军实验室生物分子科学工程中心 Mattoussi Hedi、Medintz Igor L. 团队的高被引论文主要研究量子点共振能量转移，斯坦福大学戴宏杰团队和中科院苏州纳米技术与纳米仿生研究所王强斌团队的高被引论文主要研究 Ag₂S 量子点应用于近红外影像，福州大学池毓务团队的高被引论文主要研究功能化碳量子点，南开大学严秀平团队的高被引论文主要研究 ZnS 量子点。

在纳米生物传感器研究方向上，斯坦福大学鲍哲南团队、加州大学伯克利分校 Javey Ali 团队、首尔大学 Pang Changhyun 团队、中科院苏州纳米技术与纳米仿生研究所张珽团队等主要研究用于电子皮肤压力传感的生物传感器，美国西北太平洋国家实验室林跃河团队、康涅狄格大学 Rusling James F 团队、中国西南大学袁若团队、清华大学李景虹团队、南京大学朱俊杰团队等主要研究免疫生物传感器。

6 仿生纳米孔

仿生纳米孔道领域的研究前沿共涉及高被引论文 45 篇，研究内容主要集中在利用纳米孔进行生物大分子分析识别的基础研究和应用研究。如表 8 所示，美国在该领域具有非常显著的研究优势，高被引论文有 23 篇，超过了总数的一半；英国和德国分别有 8 篇和 4 篇高被引论文，分别 2、3 位；中国只有 1 篇高被引论文。

表 8 仿生纳米孔领域研究前沿高被引论文 Top 5 国家

	通讯作者国家	高被引论文 (篇)	所占比例 (%)
1	美国	23	51.1
2	英国	8	17.8
3	德国	4	8.9
4	荷兰	3	6.7
5	西班牙	2	4.4

上世纪 90 年代，科学家提出了将单链 DNA 拉过蛋白孔，检测碱基穿过时电导的微小改变，进而实现纳米孔 DNA 测序的设想。进入 21 世纪后，越来越多的科研人员致力于该领域研究，让纳米孔测序成为现实，研究成果也逐步向商业实用方向迈进。开发的纳米孔类型主要包括生物纳米孔和固态纳米孔等，测序主要包括核酸测序（主要是 DNA 测序）和蛋白质分析等。

生物纳米孔利用天然生物学通道，如 α -溶血素结构和耻垢分支杆菌孔蛋白 A (MspA) 等。牛津纳米孔技术 (Oxford Nanopore) 公司 Bayley Hagan 团队开发了可商业化的 α -溶血素生物纳米孔。2009 年，该公司发表论文《单分子纳米孔 DNA 连续碱基测序》，实现了碱基连续测定，准确度平均为 99.8%。该文被引用 677 次，是本领域被引频次最高的论文。此后，牛津纳米孔技术公司推出了商业化的纳米孔测序仪——MinION 和 GridION。基于纳米孔的单分子 DNA 读取技术不再需要光学检测和同步的试剂洗脱过程，也被称为第四代测序技术，相比更早的测序技术有着更快的数据读取速度和更大的应用潜能。

2010 年，美国华盛顿大学的 Jens Gundlach 首次证明，耻垢分支杆菌孔蛋白 A 可用于 DNA 测序，并与阿拉巴马大学微生物学家 Michael Niederweis 合作证明 MspA 孔隙结合“棘轮系统”可读取短 DNA 序列。2012 年，该团队又一次利用 MspA 和噬菌体 Phi29 聚合酶相结合，实现单核苷酸的分辨率和 DNA 易位控制，该成果推动了长期以来生物纳米孔遇到的两个主要障碍的解决。同年，美国加州大学圣克鲁兹分校 Mark Akeson 团队也利用 MspA 和 Phi29 聚合酶相结合，使 DNA 正向和反向棘轮以每秒 2.5-40 个核苷酸的速度通过纳米孔实现实时单核苷酸分辨率的检测。

生物纳米孔在稳定性、持久性等方面存在不足，难以满足持续的大规模测序的需求。随着微

加工技术的不断进步，固态纳米孔应运而生。人工制备的固态纳米孔具有孔径稳定、物化性能好、具有低成本、高读长、易集成等的优点，被认为是下一代纳米孔技术。固态纳米孔的材料主要是石墨烯、氮化硅、硅、金属氧化物等。

石墨烯在检测 DNA 上具有出色的潜力。哈佛大学 Jene Golovchenko 团队和美国麻省理工学院的研究人员 2010 年在 nature 上发表论文证实石墨烯可以制成人工膜材料进行 DNA 测序，指引了石墨烯纳米孔 DNA 检测的方向。哈佛大学 Jene Golovchenko 团队制备了与 DNA 分子的直径紧密匹配的石墨烯纳米孔，发现其对 DNA 具有非常好的灵敏度和分辨率。荷兰代尔夫特技术大学科维理纳米科学研究所的 Dekker, C 团队将石墨烯薄片放置在氮化硅膜的微孔上并使用电子束在石墨烯中钻出纳米尺寸的孔来获得纳米孔。在其他仿生纳米孔材料方面，德国慕尼黑工业大学、美国哥伦比亚大学的研究人员利用氮化硅修饰纳米孔，阿根廷拉普拉塔国立大学的研究人员利用聚（4-乙炔基吡啶）大分子构建块修饰固态纳米孔，瑞士洛桑联邦理工学院的研究人员将亚纳米厚度的单层或几层厚的剥离的二硫化钼（MoS₂）固定在氮化硅纳米孔上，均可以改善 DNA 的分析。

同时，纳米孔的检测物范围也不断扩大，从 DNA 发展到 RNA、蛋白质、金纳米颗粒和有毒分子等的分析。如牛津大学 Bayley Hagan 团队、美国加州大学圣克鲁兹分校 Mark Akeson 团队和荷兰代尔夫特技术大学科维理纳米科学研究所的 Dekker, C 团队等利用生物纳米孔开展蛋白检测，研究的重点是蛋白质解折叠和易位问题。此外，美国宾夕法尼亚大学 Drndic, M 和 Wanunu, M 团队利用薄的纳米孔快速检测小 RNA 分子。英国东英吉利大学利用牛津纳米孔技术公司开发的 MinION 纳米孔平台测序鉴定细菌抗生素抗性岛的位置和结构。

7 纳米安全性

纳米安全性领域的研究前沿共涉及高被引论文 157 篇，研究内容主要围绕纳米物质和生物体及环境的相互作用，着重研究纳米物质的物理化学特性等与生物学毒性效应之间的关系。如表 9 所示，美国在该领域的高被引论文数量最多，有 59 篇，明显高于其他国家；中国在该领域的高被引论文数量排在第 2 位，有 25 篇。

表 9 纳米安全性领域研究前沿高被引论文 Top 10 国家

	通讯作者国家	高被引论文（篇）	所占比例（%）
1	美国	59	37.6
2	中国	25	15.9
3	英国	10	6.4
4	德国	9	5.7
5	韩国	7	4.5
6	荷兰	6	3.8
7	印度	4	2.5
7	日本	4	2.5
9	新加坡	3	1.9
9	法国	3	1.9
9	瑞士	3	1.9

碳纳米管、介孔二氧化硅、石墨烯等纳米材料在医学检测、纳米药物递送、纳米治疗等方面开辟了新的应用途径。同时，关于其生物安全性、毒性的研究也逐渐引起关注。该领域研究前沿的高被引论文的主要分为两个研究方向：纳米材料对人体健康的风险研究和纳米材料的环境风险研究。健康风险研究主要围绕肺毒性、皮肤毒性、细胞毒性、生物相容性等，关注的主要纳米物质包括碳纳米管、纳米锌、纳米银、石墨烯、介孔纳米二氧化硅、纳米二氧化钛和纳米金等。环境风险研究主要围绕环境释放、环境归趋、生态毒理学、生物降解、植物吸收等。

纳米银的毒性作用研究包括纳米银颗粒的细胞毒性、遗传毒性、发育毒性、炎症反应及毒性作用机制，纳米银在生物体内的分布动力学，纳米银对癌细胞系增殖和凋亡的影响等。新加坡国立大学 Valiyaveetil S 教授团队 2009 年发表的论文《银纳米粒子对人体细胞的细胞毒性和遗传毒性》被引用 1153 次。此外，韩国环境及商品检测研究所、美国空军研究实验室、荷兰国家公共卫生和环境研究院等研究机构也有高被引论文贡献。

碳纳米管的安全性研究包括单壁 / 多壁碳纳米管的生物相容性、体内分布循环、细胞内吞、慢性毒性、间皮损伤和致癌性、毒性的影响因素（如长度、尺寸依赖性）等。2008 年，苏格兰爱丁堡大学 Donaldson K 团队研究发现石棉状长碳纳米管可能导致小鼠产生一种以往由石棉引起的恶性间皮瘤，该论文被引用 1329 次。此外，美国斯坦福大学、麻省理工大学和美国国家职业安全卫生研究所、德国巴斯夫公司和拜耳公司、我国北京大学等也有高被引论文贡献。

介孔二氧化硅材料的生物安全性研究包括介孔二氧化硅纳米材料的生物相容性、生物分布、细胞毒性和溶血活性的影响因素（如尺寸、形状、表面效应）等，中科院理化所唐芳琼团队表现较为突出。

纳米金颗粒的体内分布研究主要集中在金纳米颗粒在生物体内的分布、累积及粒径和表面电荷等影响因素研究，主要研究机构包括德国环境健康研究中心等。

纳米材料释放进入环境的估算与环境影响评价研究包括纳米材料在环境多介质中的分布、在环境中的排放、归趋建模等，主要研究机构包括瑞士联邦材料科学与技术实验室等。

氧化石墨烯的毒性作用及安全性评价研究集中在氧化石墨烯的毒性作用与生物安全性研究方面，来自中国和美国的科研机构比较活跃。

8 纳米催化

纳米催化领域的研究前沿共涉及高被引论文 303 篇，研究内容围绕纳米催化剂的制备和应用展开。如表 10 所示，我国在该领域的高被引论文数量排名第一，所占份额超过 1/3，反映出我国近年来在纳米催化领域具有较强的研究优势。美国的高被引论文数量排名第二，所占比例接近 1/4。其余国家高被引论文数量相对较少。

表 10 纳米催化领域研究前沿高被引论文 Top 10 国家

	通讯作者国家	高被引论文 (篇)	所占比例 (%)
1	中国	111	36.6
2	美国	72	23.8
3	日本	17	5.6
4	德国	14	4.6
5	韩国	13	4.3
5	澳大利亚	13	4.3
7	西班牙	10	3.3
8	马来西亚	9	3.0
8	新加坡	9	3.0
10	加拿大	7	2.3

纳米催化剂通常由活性组分和载体两部分组成。常见的活性组分包括金属（及其化合物）、半导体、碳基材料（石墨烯、碳纳米管、石墨相 C_3N_4 等）等。尺寸、形貌、结构、组成等是影响活性组分催化活性的重要因素。出于成本考虑，活性组分的总体研究趋势是在保证活性的前提下，尽量减少贵金属的使用，用储量丰富、价格低廉的普通金属或者非金属材料替代贵金属。常用的载体包括氧化物（ SiO_2 、 TiO_2 、 Fe_3O_4 等）、碳基材料（石墨烯、碳纳米管、石墨相 C_3N_4 等）、多孔材料（沸石、介孔材料、金属有机框架化合物等）等。载体不仅为活性组分高度分散提供了表面，而且还可以参与催化过程，例如促进光生电荷分离等。对于多孔载体，孔道的限域可以起到择形催化作用。由于易于分离回收，磁性可回收载体近年发展迅速。

纳米催化的特点介于均相催化和非均相催化之间。中科院大连化物所张涛院士团队首次发现单原子催化剂具有与均相催化剂相当的活性，从实验上证明单原子可能成为沟通均相催化与多相催化的桥梁。

纳米催化的反应类型大致分为传统催化、电催化和光催化三类。在传统催化中，C1 化学占据重要位置，包括费托合成、甲烷转化、CO 氧化、 CO_2 还原、甲醇氧化等。近年来，我国 C1 化学取得一系列重大突破。中科院大连化物所包信和院士团队构建了硅化物晶格限域的单中心铁催化剂，成功地实现了甲烷在无氧条件下选择活化，一步高效生产乙烯、芳烃和氢气等高价化学品。包信和院士团队还利用自主研发的新型复合催化剂，创造性地将煤气化产生的合成气高选择性地直接转化为低碳烯烃，乙烯、丙烯和丁烯的选择性大于 80%，突破了费托合成低碳烯烃选择性最高 58% 的极限。中国科学院上海高等研究院和上海科技大学联合科研团队自主研发了暴露面为 {101} 和 {020} 晶面的 Co_2C 纳米平行六面体结构催化剂，实现了温和条件下（ $250^\circ C$ 、1~5 个大气压）合成气高选择性直接制备烯烃，低碳烯烃选择性可达 60%，总烯烃选择性高达 80% 以上，烯/烷比可高达 30 以上。

在电催化中，燃料电池和金属-空气电池的阴极氧还原反应是研究重点之一。铂是重要的氧还原反应电催化剂。受铂成本高等缺点影响，催化剂一方面朝着减少铂的用量方向发展，采用二

元或三元合金的形式，例如 Pt-Fe、Pt-Co、Pt-Fe-Cu 等。另一方面朝着非铂催化剂方向发展，例如钨及其合金，以及氮掺杂的碳材料（石墨烯、碳纳米管）等。电解水是另一类重要的电催化反应，新型析氢催化剂包括硫化钼化合物（MoS₂、MoS₃ 等）、氮掺杂的碳纳米管封装的金属催化剂等，新型析氧催化剂包括氮掺杂的石墨烯等。美国斯坦福大学戴宏杰团队制备的 Co₃O₄/ 氮掺杂石墨烯电催化剂同时具有很高的氧还原和析氧活性，文章被引次数超过 1900 次。二氧化碳的转化也是研究热点，中国科学技术大学谢毅院士团队采用新型钴基电催化剂，将二氧化碳高效清洁转化为液体燃料，得到国际同行高度评价。

在光催化中，水和空气中污染物的降解是研究重点之一，常用的催化剂包括 TiO₂ 等半导体、BiOX（X = Cl, Br, I）、Ag/AgX（X = Cl, Br, I）、石墨相 C₃N₄ 等。二氧化碳还原制甲烷、甲醇等碳氢燃料正处于研究热点，在减少温室气体的同时还可提供替代能源，常用催化剂包括 TiO₂ 等半导体、Ag/AgX（X = Cl, Br, I）、金属有机框架化合物、石墨烯、石墨相 C₃N₄ 等。光解水一直是光催化研究的重要课题，国家纳米科学中心宫建茹研究员和武汉理工大学余家国教授合作制备的石墨烯负载 CdS 光解水制氢催化剂很受关注，文章被引次数超过 1000 次。

9 测量表征

纳米测量表征技术主要是指纳米尺度和精度的测量技术。近十几年来，随着测量技术的飞速发展，至今已经出现了多种可以实现纳米测量的技术和仪器。近期纳米级测量技术主要有两个发展方向，即光干涉测量技术和扫描显微测量技术。

纳米测量表征领域的研究前沿共涉及高被引论文 153 篇，研究内容包括光谱测量研究、电子显微测量研究以及利用多种表征手段研究纳米材料的表面 / 界面等。如表 11 所示，美国在该领域的高被引论文数量最多，德国和英国分列第 2、3 位，中国在高被引论述数量方面与美国相比有明显差距。

表 11 测量表征领域研究前沿高被引论文 Top 10 国家

	通讯作者国家	高被引论文（篇）	所占比例（%）
1	美国	86	56.2
2	德国	18	11.8
3	英国	10	6.5
4	中国	8	5.2
4	西班牙	8	5.2
6	瑞士	6	3.9
7	荷兰	3	2.0
8	澳大利亚	2	1.3
9	韩国	1	0.7
9	新加坡	1	0.7

(1) 光谱测量研究

a. 超分辨成像

近年来随着超分辨荧光显微术的兴起，研究人员研制了多种突破衍射极限的超分辨光学显微镜，分辨率可达约 20 nm 左右，某些情况下甚至可小于 2 nm。这些超分辨显微镜主要分为两类：一类以 Stefan W. Hell 发明的受激辐射耗尽 (STED) 显微镜为代表，通过调制光照明方式来实现超分辨；另一类是基于单分子定位的超分辨显微镜，通过对具有光开关功能的荧光基团进行单分子成像和定位而实现，光活化定位显微术 (PALM) 技术、随机光学重构显微术 (STORM) 技术、荧光活化定位显微术 (fPALM) 技术均是这一技术方向的研究热点。2014 年诺贝尔化学奖授予发展超分辨率荧光显微成像技术的 3 位科学家，分别是美国霍华德·休斯医学研究所教授 Eric Betzig (PALM 技术)、德国马克斯普朗克生物物理化学研究所教授 Stefan W. Hell (STED 技术) 和美国斯坦福大学教授 William E. Moerner。

b. 纳米尺度磁共振研究

当前通用的磁共振谱仪受制于探测方式，其成像分辨率仅为毫米级。纳米尺度弱磁探测技术将磁共振技术的研究对象推进到单分子，成像分辨率提升至纳米级。

2008 年，德国斯图加特大学 Wrachtrup 团队和美国哈佛大学 Lukin 团队首次报道了利用金刚石中的氮-空位色心 (NV) 进行纳米尺度弱磁探测的工作，开创了纳米测磁研究方向。此外，哈佛大学 Yacoby 研究团队、Walsworth 研究团队，中国科技大学杜江峰研究团队均是该方向中最为活跃的研究团队。2008 年以来，杜江峰研究团队陆续取得了微波场的百纳米级分辨率矢量重构、绘制世界首张单个生物分子的磁共振谱等重大研究突破。

c. 表面等离子激元共振 (SPR)

光 (或电磁波) 与金属纳米粒子相互作用能够在纳米尺度范围聚焦很强的电磁能量，突破传统光学中的衍射极限，即表面等离子激元共振 (SPR) 现象。该方向的研究主要集中在氧化钨、硫化铜、硒化铜、金纳米颗粒、多种胶体纳米颗粒的表面等离子激元共振和局域表面等离子激元共振性质研究以及基于表面等离子激元光镊系统对金属纳米颗粒和生物分子的稳定捕获和动态操控能力研究等。

d. 表面增强拉曼光谱 (SERS)

当分子接近或吸附在贵金属纳米材料表面时，其拉曼信号能被放大大多个数量级，因此近年来表面增强拉曼光谱 (SERS) 作为一种快速、灵敏的检测技术已获得广泛认可。该方向的研究主要聚焦在基于纳米材料 (主要是金纳米粒子) 的拉曼基底的研发以及 SERS 在生物检测领域的应用。美国杜克大学和西班牙维戈大学在该方向研究较为活跃。

(2) 电子显微测量研究

原位透射电子显微镜 (in situ TEM) 技术实现了对物质在外部激励下的微结构响应行为的动态、原位实时观测。该方向的研究聚焦在利用原位透射电子显微镜技术对纳米电极材料的锂化和退锂化过程进行原位表征。美国能源部桑迪亚国家实验室黄建宇 (已经全职加入燕山大学) 研究团队在该研究方向非常活跃。黄建宇等人首次实现了在透射电子显微镜下搭建锂离子电池体系，研究纳米线在锂化过程中的形貌变化和作为锂离子电池电极的锂化机理。此外，桑迪亚国家实验室 Liu Xiao Hua 团队、佐治亚理工朱廷研究团队等也是该领域中的重要研究队伍。

三 总 结

本报告通过纳米领域各国发展规划调研和文献计量分析，结合领域情报人员的研究，得出以下发现。

1. 通过对比分析美国、英国、法国、德国、俄罗斯、欧盟、日本、韩国、印度、澳大利亚以及我国的纳米技术研发计划，发现各国规划具有以下共同之处：(1)对纳米技术的信心普遍增强，投资力度普遍加大，核心科研人员数量和相关企业数均大幅增加；(2)将纳米技术列入促进国家经济发展和解决关键问题的关键技术领域，在能源和生物医药等领域尤其受到重视；(3)研发重心由最初单一的纳米材料制备和功能调控转向纳米材料的应用和商业化，纳米技术的研究走向了新的阶段；(4)通过公共研发平台、产业园区等方式，促进产学研合作及与其他领域的融合，缩短从“提案”到“产业化”的时间；(5)开展 EHS（环境、健康、安全）和 ELSI（伦理、限制、社会课题）研究以及国际标准和规范（ISO、IEC）的制定，促进纳米技术相关产业被社会接受；(6)重视纳米技术的基础教育和高等教育。

2. 基于科睿唯安公司 Essential Science Indicators(ESI) 数据库中的 11814 个研究前沿，通过文献检索、专家遴选等方法筛选出和纳米研究相关的研究前沿 1391 个，涉及高被引论文 6639 篇（2008-2015 年）。在高被引论文数量方面，美国和中国分居前两位，遥遥领先于其他国家。综合考虑论文的被引用情况和发表时间，从 1391 个纳米研究前沿中遴选出 41 个热点前沿和 37 个新兴前沿。

3. 选择了“锂电池”、“太阳能电池”、“纳米发电机”、“纳米药物”、“纳米检测”、“纳米仿生孔”、“纳米安全性”、“纳米催化”和“测量标准”9 个前沿研究领域进行分析解读（每个研究领域包括若干研究前沿）。在高被引论文数量方面，美国在“太阳能电池”、“纳米发电机”、“纳米药物”、“纳米检测”、“纳米仿生孔”、“纳米安全性”和“测量标准”7 个研究领域中排名第一，在“锂电池”和“纳米催化”中排名第二。我国在“锂电池”和“纳米催化”2 个研究领域中排名第一，在“太阳能电池”、“纳米发电机”、“纳米药物”、“纳米检测”、“纳米安全性”5 个研究领域中排名第二，在“测量标准”中排名第四，在“纳米仿生孔”中未进入前五。

4. 我国在纳米科技领域已形成一批达到世界领跑水平的优势研究方向和优秀团队。例如，(1) 太阳能电池：中科院化学所侯建辉研究员团队 2016 年在小面积非富勒烯型聚合物太阳能电池器件中取得了创纪录的 11.2% 的能量转换效率，使非富勒烯型聚合物太阳能电池效率达到了富勒烯受体的最好水平；南开大学陈永胜教授团队 2016 年创造了文献报道的有机 / 高分子太阳能电池光电转化效率的最高纪录 12.7%；华东理工大学钟新华教授团队 2016 年创造了量子点太阳能电池 11.6% 的效率纪录；此外北京大学占肖卫教授团队、中科院化学所李永舫院士团队等也非常突出；(2) C1 化学：中科院大连化物所包信和院士团队成功实现了甲烷在无氧条件下选择活化，一步高效生产乙烯、芳烃和氢气等 high 价值化学品；包信和院士团队还将煤气化产生的合成气高选择性地直接转化为低碳烯烃；中科院上海高等研究院和上海科技大学联合科研团队实现了温和条件下合成气高选择性直接制备烯烃。

附录 纳米研究热点前沿和新兴前沿

附表 1 热点纳米研究前沿

	研究前沿名称
1	少层黑磷场效应晶体管
2	非富勒烯有机太阳能电池小分子电子受体材料
3	纳米磁流体中自然对流换热研究
4	三维拓扑狄拉克半金属
5	摩擦型纳米发电机
6	钙钛矿太阳能电池
7	红光染料有机纳米颗粒
8	用于光线操控的等离子体超表面
9	硫化镉纳米线还原氧化石墨烯复合材料
10	硅烯的生长和晶体管研究
11	碳材料（活性炭、碳纳米管）吸附去除水中污染物（染料、重金属离子）
12	反自旋霍尔效应和巨自旋霍尔效应
13	双掺杂介孔石墨电极的氧化还原反应
14	基于石墨烯的电极和传感器的制备
15	超分子胶囊的主客体相互作用
16	多组分超分子凝胶
17	超快可逆锂存储的锂离子电池及其负极材料
18	量子等离子体激元研究
19	钴酸镍介孔纳米结构
20	调节氧还原反应活性
21	基于石墨烯超材料的太赫兹波可控调节
22	磁可回收催化剂
23	镧系元素掺杂的上转换发光纳米晶
24	小分子体异质结太阳能电池的研究
25	纳米孔在生物检测中的应用
26	纳米颗粒蛋白质冠状物的研究
27	用于电子皮肤的压力传感器的研究
28	高性能非对称超级电容器
29	细菌还原氧化石墨烯
30	量子反常霍尔效应
31	光子晶体
32	纳米尺度下的核磁共振成像和探测
33	具有过氧化物酶活性的纳米材料
34	聚集诱导发光及生物探针应用
35	磷酸铁锂纳米颗粒应用于电极材料
36	BN 衬底上石墨烯电子性质的 STM 研究
37	硫 / 碳复合及高硫含量正极材料的可充电锂 / 锂硫电池
38	荧光贵金属纳米簇
39	介孔二氧化硅纳米材料的生物安全性研究
40	碳酸钙仿生研究
41	高分辨三维纳米成像

附表 2 新兴纳米研究前沿

	研究前沿名称
1	过渡金属硫属化合物基的纳米复合材料研究
2	高性能钙钛矿太阳能电池 / 发光二极管
3	金属纳米笼的精细自组装
4	医用纳米材料氧化铁与二氧化硅的毒理学研究
5	CH ₃ NH ₃ PbI ₃ 钙钛矿太阳能电池稳定性研究
6	碳纳米点及应用
7	枝状大分子聚合物作为药物或基因递送载体在抗肿瘤中的应用
8	可溶液加工的钙钛矿光探测器
9	过渡金属磁性纳米粒子催化剂
10	柱芳烃超分子的晶体结构
11	少层黑磷性质研究
12	化学掺杂碳酸氢氧化钴用于高性能超级电容器
13	锰氧化物对水氧化反应的催化作用研究
14	Cu ₂ ZnSnS ₄ -Au 异质纳米结构用于光催化分解水和污染物降解
15	锂硫电池的独立纸电极
16	高性能锂硫电池及碳纳米纤维的应用
17	高性能可充电锂硫电池
18	新型贵金属纳米簇荧光探针
19	无支撑 MoS ₂ 压电特性研究
20	金属有机骨架分子筛薄膜及在气体分离中的应用
21	在 MHD 信道不对称蠕动流的金属纳米颗粒分析
22	基于二氧化钛纳米管阵列的高效率染料敏化太阳能电池
23	钴嵌入含氮碳纳米管催化析氢反应
24	超分子聚合化学
25	范德瓦尔斯异质结构制备及其性质研究
26	高能量转换效率量子点敏化太阳能电池
27	阴离子超分子受体化学
28	纳米复合物水凝胶及医药应用
29	单分子光谱对肺细胞成像
30	锰镍氧化物做正极材料
31	高导电性硫化钴镍阵列用作非对称性超级电容器电极材料
32	宽能隙的自旋霍尔绝缘体研究
33	高效量子热电效应研究
34	三维石墨烯微结构
35	单层过渡金属硫化物中激子研究和带边弯曲
36	基于 G-C ₃ N ₄ 纳米材料的光催化特性
37	钒酸锂 / 石墨烯纳米材料用于锂离子电池