

印格致

施普林格·自然集团中国区

中国国家纳米科学中心

黄向阳

中国科学院文献情报中心

**周鹰鹰** 施普林格·自然集团, 自然科研中国区

中国国家纳米科学中心

吴树仙 中国国家纳米科学中心

刘细文 中国科学院文献情报中心

陈启梅 中国科学院文献情报中心

赵亚娟

中国科学院文献情报中心

中国科学院文献情报中心

张博 中国科学院文献情报中心

周泗伟 施普林格·自然集团中国区

**肖娟秀** 施普林格·自然集团中国区



### 国家纳米科学中心

国家纳米科学中心于 2003 年 12 月成立,由中国科学院与教育部共建,定位于纳米科学与技术的基础研究和 应用研究,重点在具有重要应用前景的纳米科学技术基础研究。国家纳米科学中心实行理事会领导下的主任 负责制,目标是建成具有国际先进水平的研究基地、面向国内外开放的纳米科学研究公共技术平台、中国纳 米科技领域国际交流的窗口和人才培养基地。

中心现有3个中国科学院重点实验室,分别是中国科学院纳米生物效应与安全性重点实验室、中国科学 院纳米标准与检测重点实验室和中国科学院纳米系统与多级次制造重点实验室。另外设有纳米技术发展部, 负责公共仪器设备的开放共享和管理运行服务。国家纳米科学中心还与清华大学、北京大学和中国科学院直 属单位等科研院校共建了19个协作实验室。

国家纳米科学中心现有凝聚态物理、物理化学、材料学和纳米科学与技术四个博士生培养点,并设有博 士后流动站。截至 2016 年末,发表第一作者科学论文 1699 篇,申请专利 868 项,授权专利 393 项。在中国 科学院 2014 年组织的国际评估中获得国际同领域专家高度认可,并被认为是"迄今中国最优秀的纳米科学研 究机构"。2016年公布的自然指数表明,国家纳米科学中心进入中国科学院各研究所前十行列。

2015年10月,中国科学院决定成立中国科学院纳米科学卓越创新中心(CAS-CENano),加速建立有 利干重大科研产出的科研活动组织新模式。中心的任务是汇聚和培养纳米领域优秀人才,聚焦纳米科学前沿, 率先在纳米领域的重大科学问题上取得突破,成为国际知名的纳米科学研究机构。

### 中国科学院文献情报中心

中国科学院文献情报中心立足中国科学院、面向全国,主要为自然科学、边缘交叉科学和高技术领域的科技 自主创新提供文献信息保障、战略情报研究服务、公共信息服务平台支撑和科学交流与传播服务,同时通过 国家科技文献平台和开展共建共享为国家创新体系其他领域的科研机构提供信息服务。

该中心现有职工 400 余人,馆藏图书 1,145 余万册(件)。近年来,围绕国家科技发展需求及中科院"率 先行动"计划,积极建设大数据科技知识资源体系,开展普惠的文献信息服务和覆盖研究所创新价值链的情 报服务。在分布式大数据知识资源体系建设以及覆盖创新价值链的科技情报研究与服务体系方面获得了重大 突破,成为了支持我国科技发展的权威的国家科技知识服务中心。

该中心是图书馆学和情报学两个学科的硕士学位和博士学位授予单位,现有在读研究生近 178 人;常年 接收高级访问学者和组织专业继续教育。2012年获批图书馆学、情报学博士后科研流动站。

中国科学院文献情报中心是国际图书馆协会与机构联合会(IFLA)的重要成员。近年来,该中心积极组织、 参与高层次专门化国际学术交流活动,目前已经与美国、德国、韩国、俄罗斯等多个国家的文献情报机构建 立了稳定的合作关系。

### 施普林格•自然

施普林格·自然集团(Springer Nature)致力于出版可靠和有深度的科研成果,支持拓展新的知识领域,促 进思想和信息的全球交流,并引领开放获取,由此推动科研发现。实现这一目标的关键在于我们尽可能为整 个科研共同体提供最佳服务:帮助作者与人分享自己的新发现;帮助科研人员发现、使用和理解他人的工作 成果; 向图书馆和机构提供技术和数据上的创新服务; 向协会提供优质的出版支持。

作为一家学术出版机构,施普林格·自然集团旗下汇聚了一系列深受信赖的品牌,包括施普林格、自然科研、 BMC、帕尔格雷夫·麦克米伦和《科学美国人》。施普林格·自然还是一家领先的教育和专业内容出版机构, 通过一系列创新平台、产品和服务向社会各界提供优质内容。我们的品牌、书籍、期刊和资源每天惠及全球 各地数以百万计的人们。更多信息,请访问 http://springernature.com/







SPRINGER NATURE

natureresearch Nano





## 白春礼

中国科学院院长

米科学是在纳米尺度(从原子、分子到 亚微米尺度之间)上研究物质的相互作 用、组成、特性与制造方法的科学。它 汇聚了现代多学科领域在纳米尺度的焦

点科学问题,促进了多学科交叉融合,孕育着众多的 科技突破和原始创新机会。同时, 纳米科技对高技术 的诞生,对我们的生产、生活也将产生巨大的影响。

从上世纪八十年代开始, 纳米科技引起了人们的 广泛关注。2000年美国率先发布了"国家纳米技术 计划(NNI)"掀起了国际纳米科技研究热潮。中国 高度关注纳米科技发展,与国际同步进行了布局,于 2000年成立了国家纳米科技指导协调委员会,2003 年成立了国家纳米科学中心, 在国家中长期发展规划 中部署了纳米科技研究计划,同时,基金委和中国科 学院也都部署了纳米科技相关研究。这些措施极大地 推动了中国纳米科技的发展。

施普林格•自然集团、国家纳米科学中心、中国 科学院文献情报中心共同合作,编制了中国纳米白皮 书,从高水平文献发表、专利申请、重点发展领域分布、 国际合作网络等视角,运用大数据分析和可视化方法, 综合专家解读和意见,科学详实地揭示出近年来中国 和世界纳米科技的发展态势。文章定性分析与定量分 析相结合, 主观判断与客观数据相印证。该报告, 一 方面,让我们看到了过去二十年,纳米科技在世界范 围得到了很大的发展,对人类社会生活进步产生了巨 大影响; 另一方面, 我们也看到相关领域的变迁和影响。 纳米科学研究和技术应用已经遍布材料与制造、电子 与信息技术、能源与环境、以及医学与健康领域。与 此同时, 纳米技术的迅速发展给社会带来的巨大影响 也带来了伦理和安全问题,潜在风险值得关注和研究。

报告显示,中国在纳米科学领域已成为当今世界 纳米科学与技术进步重要的贡献者,是世界纳米科技 研发大国,部分基础研究跃居国际领先水平。中国纳 米科技应用研究与成果转化的成效也已初具规模。在 专利申请量方面,中国位于世界前列。这些都与中国 在纳米科技领域的持续投入密切相关,同时也展示了 中国纳米科技研究正在实现从量的增加到原创以及质 的转变,并更加关注纳米科技的产业化应用。

展望未来, 纳米科技面临诸多机遇和多方挑战。 我们需要实现对于纳米尺度基础研究的突破,需要加 快填补基础与应用之间的沟壑,更需要满足更多来自 于世界能源、环境与健康领域的重大需求。为此,我 们将进一步加大创新人才的培养, 加快构建和培育价 值链和创新链,开展更加广泛和有效的全球合作。希 望通过我们的共同努力, 纳米科技在基础前沿领域能 实现更多原创性突破,更多应用成果开花结果、落地 生根,服务国家、造福人民,为中国早日建成世界科 技强国作出应有的贡献。 ■

# 从一颗小种子到 参天大树

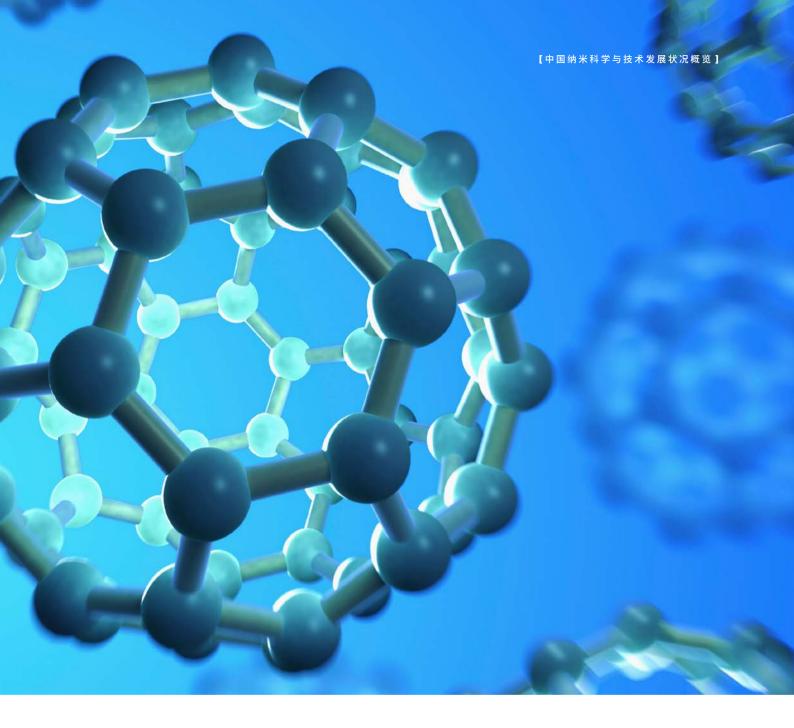
25年前,《自然》在东 京召开了一次会议, 汇集 了当时一个新兴研究领域 的世界顶尖专家。该领域 研究的是从原子尺度上了 解和操纵物质<sup>1</sup>,他们称 之为"纳米技术"。不过, 不是所有人都喜欢这个名 字。Don Eigler 曾利用 单独排放的氙原子在镍表 面上拼出字母"IBM", 这成为该领域最具标志性 的图像之一, 但他对是否 存在纳米技术表示了怀 疑。来自IBM的另一位 代表 Paul Horn 则认为, 尽管他们可使用的工具是 "奇妙的科学工具",但 预计未来 25 年内这不会 对主流电子技术产生任何 影响。

1992年,全球只有屈指 可数的几个实验室, 主要 是物理或化学实验室, 在 开展纳米尺度的物体研 究——将其描述为纳米科 学,或许要比纳米技术更 合适。当时,并没有专门 针对这个领域的期刊, 而且勉强算起来也只有六 家研究机构在其名称中 使用了"纳米"这个前 缀。如今,在科睿唯安 (Clarivate Analytics) 发布的 2016 年度《期刊 引用报告》中,"纳米科 学与纳米技术"分类下已 有86本期刊。在数码科 研 (Digital Science) 所 维护的全球研究识别符数 据库(Global Research Identifier Database) 当 前收录的研究机构中,已 有192个研究机构明确

在其名称中使用了纳米科 学或纳米技术。

虽然我们掌握的技术 还无法实现在原子尺度上 建构事物,但是事实证明, 该领域许多奠基人所主张 的谨慎是过于悲观的。现 在, 计算机芯片常规制造 尺寸仅有几十个纳米大 小, IBM 最近宣布推出的 商业化量产芯片,其晶体 管大小仅为5纳米。许 多电视机的发光元件采用 了被称为量子点的纳米级 荧光粒子。目前使用了纳 米技术的产品还有涂料、 防晒霜、药物、太阳镜、 污染检测器和基因测序仪 等,林林总总,不胜枚举。

中国早就意识到纳米 科学对其科学、技术和经 济发展的潜在贡献。2003 年,中国科学院和教育部 共同成立了国家纳米科学中心。其成功的关键在于中国最优秀研究机构的代表——清华大学、北京大学和中国科学院都参与其中。过去二十年,在国家纳米科学中心、中国科学院和国内一流大学等机构的共同推动下,中国已成为当今世界纳米科学与技术领域的领先国家。



在这份白皮书中,我 们将首先概述中国纳米科 学与技术的现状。然后, 在第二部分中简要介绍该 学科的发展历史和迄今以 来的里程碑事件。这包括 纳米科学如何改变构成我 们世界的各种材料,如何 改变通讯方式, 如何发展 新能源及提高新能源的使 用效率,以及如何帮助诊 断和治疗疾病等。

在第三部分, 我们将 通过实际的数字来展现纳 米科学这门学科的兴起, 以及中国快速发展成为该 学科领导者的情况。我 们将聚焦于相关的论文 产出,特别是对该领域有 最大影响力的论文。借 助自然科研最新开发的 纳米科学研究平台 Nano

(http://nano.nature. com),我们希望能提供 一些定性的看法,展现中 国在该领域的优势、不足 和新兴的研究领域。我们 还将评述中国相关领域的 专利产出情况。

在第四部分, 我们将 呈现一些业内专家在访谈 中所表达的对于中国纳米 科学发展现状和未来发展

方向的看法,以及研究机 构、资助机构和决策者如 何才能继续推动该领域的 蓬勃发展。■

Garwin, L. & Ball, P. Nanotechnology: Science at the atomic scale. Nature 355, 761-766 (1992); doi: 10.1038/355761a0

# 纳米科学 与技术的 过去、现在 和未来

纳米科学, 简而言之, 主 要研究的是尺度在1到 100 个 10 亿分之 1 米, 即 1-100 纳米之间的极 小物体。在如此小的尺度 上,材料的物理、化学和 生物学特性跟宏观尺度的 物体相比,会大相径庭 —— 通常有巨大的差异。 比如、低强度或脆性合金 会获得高强度、高延展性, 化学活性低的化合物会变 成强力催化剂,不能受激 发光的半导体会变得能够 发射强光。纳米尺度级的 处理能够改变物质属性, 这对大多数的科学、技术、 工程和医学领域都具有实 用意义。

#### 纳米技术发展的 里程碑

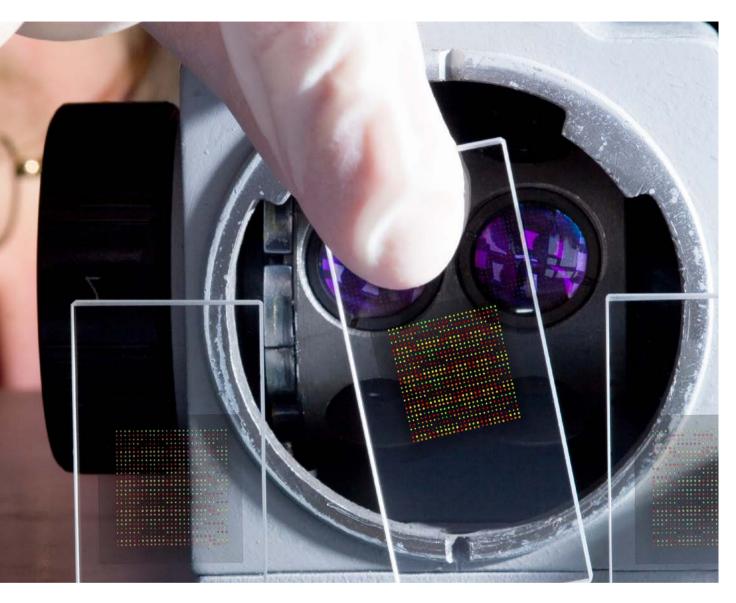
纳米科学和技术作为一 个独立的研究领域,是 最近才发展起来的。大 家通常都老生常谈地引 用费曼 (Richard Feynman) 去世后才出名 的演讲作为该领域的开 端 — 即 1959 年他在加 州理工学院的演讲"(微 观) 之下还有充足的空 间 (There's plenty of room at the bottom)"。费曼在演讲中 指出,如果可以控制单一 原子, 理论上可以在大头 针的针头上写下整套大 英百科全书的内容。但是 这次演讲在随后几十年, 仅有少数几次的引用。

"纳米技术"这个术语直 到 1974年才出现,由谷 口纪男在论文"关于'纳 米技术'的基本概念"里 首次提出,他介绍了如何 运用离子溅射在硬质表 面蚀刻形成纳米结构。



会随着金纳米颗粒的大小 发生变化,并意识到极小 黄金颗粒的存在。

意识到通过控制原子来改造世界的可能性是一回事,如何实现却完全是另一回事。从这个意义上说,开发用于观察和控制物质的工具一直在决定着纳米科学与技术发展的时间表。最先被开发出来的工具是 1931 年由 Ernst Ruska 和 Max Knoll 发



明的电子显微镜——尽管 历经几十年的发展这些设 备才达到原子级别的分辨 率。但真正宣告纳米时代 到来并进入公众视野的 是 1990 年 Don Eigler 及 其同事展示了在镍表面 通过摆放单个氙原子能 够拼写出'IBM'三个字 母,当时他们使用的是 Gerd Binnig 和 Heinrich Rohrer 在九年前发明的 扫描隧道显微镜。

同样在20世纪80 和90年代,科研人员开 始将光学仪器分辨率的 极限推进到纳米领域。 可见光的波长起点大约 在400纳米,按照传统 的理解,可见光并不适 用于观测与纳米技术相 关的100纳米以下的结 构。1928 年,Edward Hutchinson Synge提出 了'近场'显微镜的构 造,用以突破所谓的'阿 贝衍射极限',即制约 传统显微镜分辨约 250 纳米以下结构的限制。 但 直 到 1994 年, Stefan Hell 和 Jan Wichmann才提出第一个可 实施的方案,即超分辨 率荧光显微镜(stimulated-emission-depletion, STED 显微镜), 实现远小于前述 250 纳 米尺寸限制的分子尺度 光学成像。

纳米尺度研究能力 的提升起初让人们发现 了许多天然形成的纳米 结构。1981年、俄国物 理学家 Alexei Ekimov 和 Alexander Efros 在研 究掺杂半导体的玻璃时, 发现了内嵌的纳米级结 晶体,后被称为半导体量 子点。仅仅几年后,贝尔 实验室的 Louis Brus 展 示了在溶液中合成这种 颗粒的方法。

1985年,美国莱斯 大学的 Harold Kroto, Sean O' Brien, Robert Curl 和 Richard Smalley 发现了富勒烯(Cm)—— 这是一种完全由碳原子组 成的、形如足球并且异常 稳定的分子。这打破了碳 只有石墨和金刚石两种同 素异形体的传统认知,并 开启了化学家的想象力, 令他们开始思考合成比之 前设想要大得多的一系列 新型分子结构的可能性。 1991年,饭岛澄男报告 合成了碳纳米管——一种 具有特殊电子、热学、机 械性能的材料,为这种管 状纳米结构的广泛应用铺 平了道路。随后不久, Charles Kresge 及其同 事发明了可过滤分子的介 孔纳米材料 MCM-41 和 MCM-48, 现已广泛应用 干石油炼化、污水处理及 药物输送。1990年代后 半 期, Charles Lieber, Lars Samuelsson 和 Kenji Hiruma 领导的团 队开发了合成晶状半导 体纳米线的技术——为 推动纳米技术进入光子 学和光电学领域又迈出 至关重要的一步。2004 年, Andre Geim 和 Konstantin Novoselov 实现了单层石墨烯的分 离,获得单原子厚度的二 维碳原子结构, 开启了通 向不可限量的未来技术的 大门。超轻、高柔性、高强度、高导电性等特点使得石墨烯被誉为一种新的神奇材料。

1990年代末和本世 纪初,纳米技术更多地投 入应用。1998年电子墨 水的发明就是一例,这 是一种类似纸张的显示技 术,墨水由极小的胶囊 组成,现已广泛应用于 Kindle 等电子阅读器产 品。另一个例子是1988 年 Albert Fert 和 Peter Grünberg 发现的巨磁阻 效应,据此开发的磁性读 出头大幅缩小了电脑硬盘 的尺寸,并提高了存储容 量。Ekimov. Efros. Brus (及其他众人) 发现并开 发的量子点也得到了广泛 的实际应用,这包括平板 电视背光源,以及用于活 体细胞和组织内最小结构 成像的染色剂。

### 纳米技术的社会 影响力

 健康产业。由于具有广泛的社会影响力,纳米技术的快速发展也随之带来伦理和安全问题,需要我们在享用纳米技术预期的成果之前加以解决。

#### 材料和制造

纳米技术的优势主要体现 在通过控制原子级或分子 级的物质所创造的新材料 上。由于具备理想的机械、 化学、电学、热学或光学 性能,这些新型纳米材料 被应用于日常用品及工业 制造之中。

威尔逊中心曾发起一 个关于新兴的纳米技术的 项目,根据其中的一份制 造商清单估计2,市场上 有 1600 多种基于纳米技 术的消费产品。纳米材料 在健康和健身产品中的应 用最广,例如化妆品、个 人护理用品和服装等。普 通的电吹风或直发器就有 可能使用纳米材料降低重 量或延长使用寿命。防晒 霜已使用了从皮肤表面上 看不到的纳米二氧化钛或 氧化锌等防晒成分。纳米 工程制备的纤维被用于制 造防皱、防沾污的衣物, 不仅质轻, 甚至还可能防 止细菌的滋生。纳米材料 还被应用于各类产品中, 从轻便、刚性好的网球拍、 自行车和箱包, 到汽车零 件和可充电电池等。

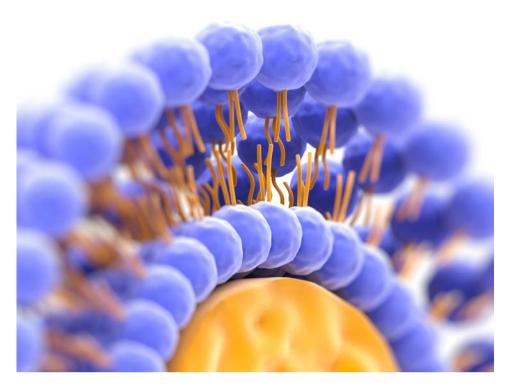
在制造业,纳米结构

的材料被用于机器零件的 表面涂层或润滑剂中,以 减小磨损、延长机器使用 寿命。具有纳米结构的合 金,由于强度高、耐久、 质量轻的特点,是制造飞 机和航天航空零部件的理 想高性能材料。它们被用 干制造机身、过滤材料及 其他零部件, 带来更强的 耐蚀、抗震和防火性能, 以及优良的强度 - 重量比。 金属、氧化物、碳和其他 化合物的纳米颗粒也是很 好的催化剂, 在石油精炼、 生物燃料等领域有着重要 的工业应用。由于出色的 表面积-体积比、高催化活 性及低能耗的特点, 纳米 催化具有多种优势, 如最 优的原料利用率、高能效、 最低限度的化学废料排放, 以及更高的安全性等。

#### 信息技术

纳米技术作为促进信息技术和数码电子行业发展的 关键驱动力,进一步提升 了诸多电子产品的性能, 如电脑、手机和电视等。

英特尔公司的共同创始 人 Gordon Moore 在1965年提出了著名的摩尔定律——集成芯片上的晶体管数量每年就会翻倍(后修改为每两年翻倍)。彼时,纳米技术还在发展的初期。由于纳米技术的进步,集成芯片和晶体管已如摩尔所预测的那样,



变得越来越小, 计算速度 却日趋提高,尽管摩尔定 律近年来正在逐渐失效。 2016年诞生了世界上首 个1纳米的晶体管。该晶 体管由碳纳米管和二硫化 钼,而不是硅制备而成, 展示了进一步缩小电子器 件尺寸的潜力,使得摩尔 定律至少能在一段时间里 继续有效。

人们对纳米材料物理 特性的深入理解推动了量 子器件的发展,其应用遍 及光感应、激光和晶体 管,实现了更低能耗下的 高速数据传输。元器件如 采用了纳米级的半导体量 子点,就可以感应或发射 单个光子,器件在应用到 加密系统中之后,就可以 提升信息系统的性能和安 全性。量子点或无机半导 体纳米晶体的另一个应用 领域是显示屏产业。由于 纳米技术, 电视、计算机 和移动设备的显示屏就可 实现超高清、节能、甚至 可弯曲,并产生更加逼真 的图像。人们在设计新型 透明导电材料时采用了碳 纳米管或银纳米线, 这为 开发各种使用柔性屏幕的 电子设备开启了大门。

#### 能源和环境

纳米技术可促进可替代能 源的发展,提高能源使用 效率,并为环境治理提供 新的解决方案,因此有助 于环境保护事业。在传统 的能源领域,基于纳米技 术的方法或新型催化剂使 得石油和天然气的开采以 及燃料的燃烧变得更加高 效,这减少了发电厂、交 通工具及其他重型设备的 污染和能耗。

多年以来,科研人员 通过在底层材料和结构 上应用纳米工程,来提高 光伏发电设备(将太阳能 转化为电能)的性能并降 低成本。例如,他们在这 些设备里导入量子点,以 吸收更多的阳光。另外, 他们使用低温条件下能 在低成本的衬底材料上 生长的材料,如钙钛矿型 金属 - 有机化合物和导电 聚合物,为包括硅在内的 传统光伏材料提供低成 本的替代物。

除了有助干提高阳光 采集效率, 纳米材料还可 用于废热转化,如将汽车 尾气转化为有用的能量。 再如,人们开发了可将二 氧化碳转化为清洁燃料甲 烷的纳米颗粒, 以及能提 高氢气制备产能的纳米光 催化剂, 这都提升了发展 新的可再生能源的前景。

在能源存储方面,由 于纳米结构的电极材料能 够支持更多不同的电化学 反应, 因此可用来提高可 充电电池的容量和性能。 这不但能增加新一代电池 的存储容量, 还能减轻电 池重量,从而提高电动汽 车这类交通工具的效能和 续航距离。

纳米技术还可用于水 处理和污染物的清理。例 如,二硫化钼(MoS2) 薄膜等纳米材料能以更高 效的过滤性促进盐水淡 化,而多孔质的纳米材料 可以像海绵一样吸收水中 的重金属和浮油等有毒物 质。纳米颗粒还可通过化 学反应清除工业用水中的 污染物。此外, 纳米纤维 能够吸附空气中的微小颗 粒,因此可用作净化空气 的滤网。

纳米技术在环境治理 中的应用还包括空气、水 和土壤中污染物的检测。 由于其独特的化学和物理 特性, 纳米颗粒对化学或 生物试剂的灵敏度更高,

## 「 纳米科学的 ] 【 里程碑事件 】

#### 1974: "纳米技术" -词诞生

谷口纪男创造"纳米技术"一词。

#### 1974: 表面增强 拉曼光谱

Martin Fleischmann、Patrick Hendra和 James McQuillan报告了拉曼散射的异常增 强,随后Richard van Duyne和Alan Creighton将这种现象解释为纳米级金属结 构形成的场增强所造成的。

#### 1974: 分子电子学

Mark Ratner和 Arieh Aviram提 出分子二极管的

想法。

## 1983: 半导体

量子点的生长

Louis Brus报告了胶体半导体量子 点的合成。

1985: 发现富勒烯

Harold Kroto, Sean

O' Brien, Robert Curl

和Richard Smalley发 现了C60富勒烯分子。

#### 1981: 扫描隧道 显微镜

Gerd Binnig和 Heinrich Rohrer发 明扫描隧道显微镜。

#### 1856: 观察到 纳米粒子

Michael Faraday发现制 备的金溶胶中颗粒的大 小不同,就会呈现出不同 颜色的丁达尔散射。



#### 1931: 电子显微镜

1928

Ernst Ruska和Max Knoll展示了第一台电子 显微镜。

1959: (微观)之下

还有充足的空间

Richard Feynman 在加州理工学院举 办的美国物理学会 会议上发表题为 《(微观)底下还有充 足的空间》的演讲, 推测在原子级别上

操控物质的可能性。

1974

1982 1980

1981

1986

1985

1983

1856

#### 1928: 近场光学 显微镜

**Edward Hutchinson** Synge提出以近场扫描光学 显微镜获得超越衍射极限 的图像。

1946

1968

1959

1976: 原子层 沉积

Tuomo Suntola发 明原子层外延薄膜 制备技术。

#### 1980: 观察到 自然形成的量子点

1976

Alexei Ekimov和 Alexander Efros报告了纳 米晶体量子点的存在及其光 学特性。

#### 1946: 分子自组装

1931

1935

Zisman、Bigelow和Pickett 报告了有序单分子层在表面上 的自组装。

#### 1968: 分子束外延

John Arthur Jr和Albert Cho 研发出用于制备高质量单晶薄 膜的分子束外延。

#### 1982: DNA纳米技术

Nadrian Seeman提出 DNA纳米技术的概念。

#### 1986: 原子力显微镜

Gerd Binnig、Calvin Quate和 Christoph Gerber发明了原子力显 微镜。



Irving Langmuir和Katharine Blodgett发明了制备单层分子 薄膜的技术。



1988

#### 1988: 巨磁电阳

Albert Fert和Peter Grünberg在多层膜中发 现了巨磁电阻。

#### 1991: 碳纳米管

饭岛澄男报告了 碳纳米管的生 长。一年之后, Millie Dresselhaus及 同事提出一种可 以准确预测金属 与半导体纳米管 比例的理论。

#### 1994: 受激发射损耗显微技术

Stefan Hell和Jan Wichmann提出受 激发射损耗显微术,打破了光学成像的 衍射极限。

#### 1994: 双稳态分子梭

Fraser Stoddart演示了一个可通过化学方 法切换的双稳态分子梭。

#### 1994: 模板纳米线

Martin Moskovits使用多孔阳极氧化铝作为 模板,制备有序纳米线阵列。

#### 1996: 纳米孔基因测序

John Kasianowicz, Eric Brandin, Daniel Branton和David Deamer将一个DNA单链穿过 脂质双层膜内的纳米孔。

#### 1997: 球差校正扫描 隧道显微镜

Ondrej Krivanek校正了扫描 隧道电镜的球差。

#### 1997 1996

1998

1999

2001

### 1999: 分子马达

Ben Feringa和Ross Kelly分别报告了光驱分 子马达和化学驱动分子 马达。

#### 1998: 光异常透射

Ebbesen、Lezec、Ghaemi、Thio和 Wolff观察到了金属薄膜上的亚波长孔 阵的光异常透射现象。

#### 1998: 电子墨水

Comiskey、Albert、Yoshizawa和 Jacobson发明了电子墨水。

#### 1998: 晶态纳米线

Charles Lieber、Lars Samuelsson和 Kenji Hiruma独立开发出制备晶态半 导体纳米线的技术。

#### 2013: 人造核糖体

David Leigh创造了 一个相当于人工核 糖体的分子机器,可 将氨基酸按特定顺 序连接起来。

#### 2006: DNA折纸术

Paul Rothemund展 示了一种将DNA单链 折叠成复杂的二维形 状的方法。

#### 2001: 纳米线激光器

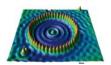
杨培东展示了室温纳米 线激光器。

#### 1993: 量子围栏

1993

1994

Michael Crommie、Christopher Lutz和 Don Eigler报告铁原子在铜表面形成的量 子围栏囚禁了电子。



#### 1992: 分子筛

Charles Kresge发明了介孔分子筛材料 MCM-41和MCM-48。

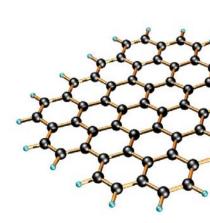
#### 1990: 原子尺度的操控

Don Eigler和Erhard Schweizer使用扫描电子显 微镜操控镍表面上的单个氙 原子,写出字母"IBM"。



#### 2004: 石墨烯的分离

Andre Geim和Konstantin Novoselov发明了一种剥离 单层石墨烯的技术。



因此可用在传感器中鉴别 有毒物质,这要比传统的 现场测试方法更加简单快 捷,甚至能在检测的同时 去除污染物。

#### 医疗和健康

可以说纳米技术最成熟的 形式就是生命本身所表 现出来的形式。从细胞 器一直到底层的核糖体、 DNA、ATP,这些生物系 统为纳米科学家提供了源 源不断的灵感源泉。或者, 正如合成生物学家 Tom Knight 曾说过的那样,

"生物学就是在发挥作用的纳米技术!"正因如此,纳米技术对医疗和健康产业的影响日趋显著,并在药物输送、生物材料、造影、诊断、活性植入及其他医疗应用中得到了稳步发展。

纳米技术在生物医学 方面最引人瞩目的应用或 许是被称为纳米其工的基本的出现。其工每 理是利用电场驱膜光型的和单链穿过薄纳纳纳中 型型为外外,即过过是,即时,记录孔上,以所有,是一个的。 数据,记录别是的。 数据,是一个的。 数是一个的。 是一个的。 是一个。 是一个。

纳米技术另外一个富 有前景的医学应用是药物 输送。纳米技术能让药物 纳米颗粒因其尺寸微 小和特殊的化学性质, 在 医学造影方面也有独特的 应用前景。传统的荧光染 色剂是用有机化合物制备 的,通常寿命短,其光学 性能也很难调制以适应任 意的工作波长。利用无机 量子点,其工作波长可根 据尺寸调制,上述两个不 足都能得到了克服。而且, 设计起来也更加方便,可 以形成在特定组织和肿瘤 位置的积聚,从而实现更 便捷、更准确的诊断,并 提高治疗效果。

纳米科技还应用于生物组织工程。石墨烯、纳米管、二硫化钼等纳米材料可用来制造支架,帮助修复或重塑受损的组织。纳米结构支架能够模仿组织特有的微观环境,促进细胞的附着、繁殖和长成,并诱导正常细胞机能及组织生长。

#### 伦理和安全问题

新技术就像双刃剑一样, 带来利益的同时也可能带 来风险。纳米技术也不例 外。人们在欢呼其快速发 展之际,也应小心它所带 来的意料之外的环境、健 康和社会影响。

当前人们最大的担 忧是纳米颗粒对健康的 威胁,因为纳米颗粒很容 易经肺或皮肤进入人体 系统。例如,人们已发现 碳纳米管内的金属污染 物和柴油的纳米颗粒对 健康有不良影响。生产作 业中暴露干纳米污染物 的工人会有较高的健康 风险, 基于纳米技术的产 品也会让消费者面临风 险。纳米药物虽然前景光 明,但因为尚不清楚其在 人体内是否参与代谢以 及如何代谢, 所以也有可 能带来意料之外的后果。 而且,纳米药物的长期使 用效果仍不明朗。

此外,纳米材料制造过程中所产生的工程中的不生的工程中的水米产品和水产品和水产品和水产品和水产品和水产的人类,也会带来粒活对对。纳米有可能对,有影响。生存构成或产生存构成或产生存构成或产生存构成或产生存构成或产生存构成或产生的人们或是一个人工,并是一个人工,人们的不清楚这人们,有人们的不清楚这人,

带来怎样的经济影响和社 会巨变,这要求我们对该 技术应用的伦理问题进行 审慎的判断。

为应对这些担忧,全 球许多国家都已采取行 动。美国出台了"国家纳 米技术计划 (National Nanotechnology Initiative)",其主要目标之 一是支持以负责任的方式 发展纳米技术。此外,美 国还组织了若干工作组, 探讨和应对纳米技术所带 来的伦理、法律和社会问 题。欧盟也与美国合作, 建立了一个政策制定的平 台,以应对纳米技术发展 过程中所产生的问题。中 国自2001年就已投入资 金研究纳米安全问题,约 有 7% 的纳米技术研究预 算用干有关纳米技术潜在 的环境、健康及安全问题 的科学研究。这些研究也 将支持制定标准的方法, 以量化相关的环境及健康 危害,同时有助于形成监 控和管制纳米污染的指导 方针。

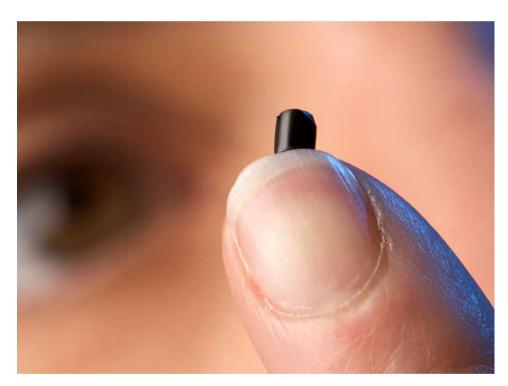
通过仔细考量其潜在的风险,人们将能有效驾驭纳米技术,让我们的生活和环境变得更加美好。 ■

See http://www.nanotechproject.org/cpi/

# 不断崛起的 中国纳米科研

过去二十年,中国的科研 产出实现了人类有史以来 前所未有的增长速度,这 已不是什么秘密。1997 年,中国的科研人员参与 撰写的科研论文约占科 学引文索引(简称 SCI, 现由科睿唯安编制)期刊 全球所发表的论文数量的 2%。目前,中国几乎贡 献了全球四分之一的原创 论文。其中, 最能突出展 现这一发展趋势的研究领 域几乎非纳米科学与技术 莫属了。

为了更好地理解中国 纳米科研的兴起, 我们将 分别从原创科研论文数 量、自然科研最新推出的 Nano 数据库收录的科研 贡献,以及专利产出情况 这几个方面,将中国与世 界其他主要科研国家的科 研产出进行对比。



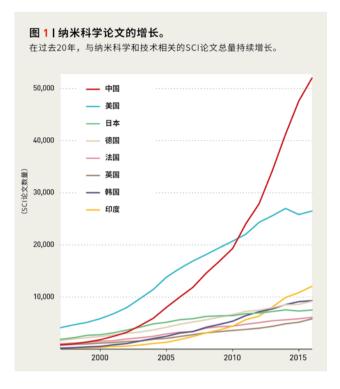
#### 过去二十年的 论文产出

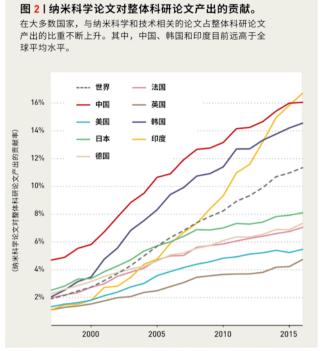
为了开启这个有关中国纳 米研究状况的调查, 我们 根据 SCI 的扩展数据库, 使用与'纳米科学与技术' 相关的关键词进行检索, 由此获得全球主要科研强 国逐年的论文发表数量。 计入的这些论文主题涵盖 了诸如'纳米管'、'量 子点'、'原子力显微镜' 等专业词(详细的研究方 法见附录1)。

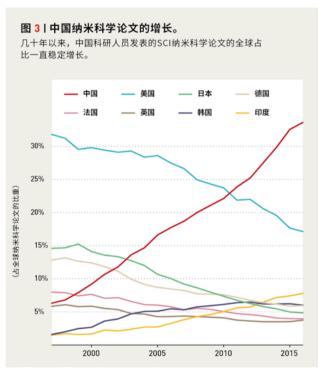
1997年,全球共发表 了约1.3万篇与纳米科学 相关的论文。到 2016年,

已增至15.4万篇,复合年 均增长率达14%,高于所 有领域平均 3.7% 的论文 复合年均增长率, 几乎是 其四倍。同期,中国纳米 方面的论文产出由1997 年的820篇增至2016年 的 5.2 万余篇,复合年均 增长率达 24% (图 1)。

#### 国之大器 始于毫末









毫不令人惊讶,纳米 领域的科研产出占总体科 研产出的比例也有大幅提 升(图2)。20年前, 全球发表的科研论文中, 大约只有2%涉及纳米科 学与技术。如今,这一比例已增至10%以上。在此期间,纳米领域的科研

论文对整体科研产出的贡献率,只有中国和韩国超过了全球平均水平。现在,

印度也加入了这一阵营。 这三个国家的纳米研究占 总体科研产出的比例,几 乎是该领域其它所有领先 国家的两倍左右。

与全球产出进行对 比,中国纳米科研的增长 就更加令人印象深刻了(图 3)。中国对全球纳米科 研的贡献一直保持稳步增 长。1997年,与纳米相关 的 SCI 论文中只有 6% 涉 及中国作者,到2010年, 中国已与美国旗鼓相当。 目前,中国贡献了全球招 过三分之一的纳米科研论 文,几乎是美国的两倍。 在中国飞速增长的背景下, 只有韩国和印度也实现了 增长,而其它多数国家的 纳米科研论文产出的全球 占比,不是增长平缓,就是缓慢下滑。不过,必须强调的是,虽然这些国家的相对贡献在下降,但多数国家纳米科研论文的总产出仍在继续增长(图1)。

#### 中国高影响力纳米 研究的增长

我们分析了 SCI 中与纳米 科学和技术相关的被引频 次在前1%的论文(图4)。

我们发现,与纳米科 研在总体科研产出中纳纳 长比率相似,中国对纳尔 献率也有大幅增长, 基超越了前者。2007年以来 超越在大。2007年以来 一国在纳米更了该领达, 是全球增长,增后等 是全球增长,增倍等 是全球增长产了, 是全球增长产了, 是全球增长产了, 是全球增长产了, 是全球增长产了, 是全球增长产了, 是全球增长产了, 是全球的数倍之多。

#### 中国科研机构引领 全球

在中国崛起为纳米科研强 国的过程中,中国科学院 发挥了重要的推动作用。 十年前,中科院对该领域 高被引论文的贡献已颇为 可观, 在全球机构中排名 第三, 仅次于加州大学系 统和美国能源部。自那时 起,其地位日益提升,目 前已是全球纳米领域最主 要的高影响力论文产出机 构,并大幅领先其它机构。 目前,中科院在前1%高 被引纳米科研论文的产量 上,已经是位居其后的竞 争者的两倍以上。

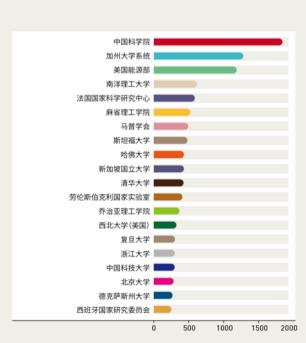
除中科院之外,另有 五家中国机构在前 1% 高 被引纳米科研论文的总产 出方面,位列全球前20,即清华大学、复旦大学、浙江大学、中国科学技术大学和北京大学(图5)。

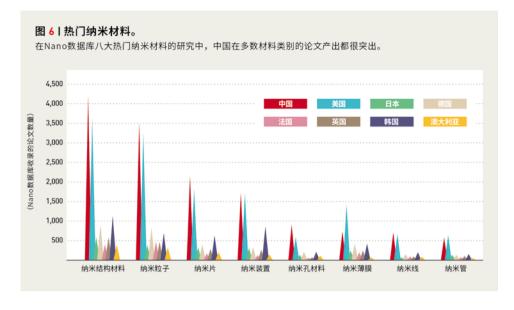
中国纳米科研的飞速 发展,与其对该研究领域 持续和大力的资金支持密 切相关。早在1990年, 国家科学技术委员会,即 中国科学技术部(简称科 技部)的前身,便将纳米 材料科学列入国家"攀 登"项目。大约十年后, 科技部又资助了国家级纳 米材料与纳米结构基础研 究项目,并提供持续的资 助,促进了中国纳米材料 领域的科研产出。1990 年代, 国家自然科学基金 委员会也资助了近千项 小型的纳米科研项目<sup>3</sup>。 在 2006 年初中国国务院 发布的《国家中长期科 学和技术发展规划纲要 (2006 ~ 2020 年)》 中, 纳米科学被列为四项 重点发展的基础研究领域 之一,并是其中获得资助 最多的领域4。

政府有力的资金支持,吸引了越来越多的中国科学家投身于纳米材料的研究。此外,越来越多有海外留学背景的科学。他有助于中国纳米科学家也有助于中国纳米科研的迅速崛起——这一发展趋势有望在可预见的未来继续保持下去。

#### 图 5 | 发表高影响力纳米科学论文的主要机构。

过去十年对前1%高被引纳米科研论文贡献最大的机构。





#### Nano 数据库中 见趋势

为了更详细地了解中国纳 米科学发展的特别优势和 侧重点, 我们将借助于 Nano 数据库。这是自然 科研新近开发的一个综合 平台,旨在帮助研究人员 及时了解最新的纳米科学 与技术发展。该数据库包 括了几千种纳米材料和设 备在性能、应用和制备方 法上的详细信息,这些信 息定期摘选自发表纳米研 究的30本最顶级的期刊, 如《科学》、《自然》、 《先进材料》、《纳米通 讯》等(完整名单见附录 2)。该数据库的建立得 到60余名纳米科研专家 的支持,他们将这些期刊 发表的论文中所包含的信 息进行筛选整理并加以归 类。在人工筛选的同时,

他们的这些知识被用来训练机器学习算法,以实现自动检索,使之能够从167本同行评议期刊所发表的论文中提取详细的约案相关信息。为了编写了编写之 Nano 数据库所用的这型立 Nano 数据库所用的是工整理信息,这些信息,这些信息是从30本纳米科研顶级期刊2014至2016年发表的论文中提取的。

#### 纳米科学的重点研 究方向

通过分析 Nano 数据 库中发表于 2014-2016 年期间的涉及纳米材料的 论文,我们发现中国科学 家对多种纳米材料都有研究,其中最常见的是纳米 结构材料、纳米颗粒、纳 米片、多孔纳米材料和纳 米器件。这与其它纳米研 究强国最热门的纳米材料 类别大同小异(图 6)。 值得注意的是,中国对纳 米多孔材料的研究力度相 对更大,有关纳米器件的 论文在过去三年有快速的 增长。

新兴的纳米结构是指 十大重点研究类别之外 的, 但在2014至2016 年期间有更显著科研产出 增长的纳米结构。在我们 分析研究的八个纳米科研 强国中,超分子化学是最 受关注的新兴纳米结构方 向。除此之外,其他新兴 纳米结构的研究, 如富勒 烯、DNA 折纸术和纳米 凝胶等, 在中国也有快速 增长。而在其它国家,如 美国、德国、韩国和日本, 一个快速发展的研究领域 是纳米囊。

#### 研究的不同应用

纳米结构的研究通常有

纳米医学是 Nano 数据库收录的中国科研论文所专注的第二大应用研究领域,尤其是医疗诊断方面的研究很突出。这或许令一些人感到意外,因为中国的生命科学研究,不论是产出还是影响力,通常都落后于美国和欧洲。这表明纳米医学或有助于中国发挥其化学和材料科学上的优势,在生命科学方面拓展一个重要的特色领域。

与能源相关的应用, 尤其是储能和产能,是中 国纳米科研常常关注的 又一领域。这也是近三年 来中国十大热门纳米材 料应用中,增长最快的领 域。由于面临着应对日益 恶化的环境问题的压力, 中国正在大力投入研发 新能源,以及有助干节 能和环境治理的新技术。 纳米材料所展现的潜力, 让能源纳米技术成为一 个颇具前景的领域,并吸 引中国众多科研人员投 入其中,他们许多人在纳 米材料电池和能源存储 与转化的研究方面已处 于世界领先地位。

与其它科研强国相 比,中国在纳米材料的电 子应用方面还相对较弱。 但机器人和激光已成为中 国新兴的纳米应用研究领 域,即不在十大应用研究 之列, 却在近三年取得研 究产出的快速增长。同时, 中国涉及光子和数据存储 等应用的纳米科研论文也 有显著增长。

#### 基础研究和应用研 究的对比

纳米科学与技术,因其广 泛的应用前景和社会影响 力,从本质上来说具有很 强的应用性。所以,与纳 米技术相关的专利申请数 量很庞大且稳步增长。但 在全球范围, 专利申请的 增长速度却不及SCI论 文。两相对比, 我们会发 现不同的国家各有优势。

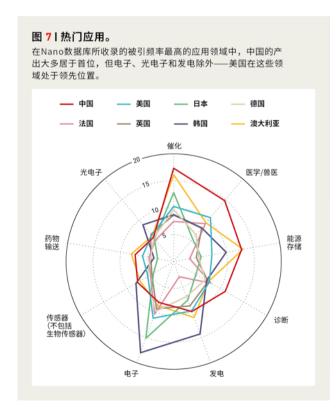
中国专利申请数相较 于 SCI 论文数的比率明显 高干美国和欧洲多数的纳 米科研强国, 这与全球趋 势相反, 但与日本和韩国 的情况相似。在这三个亚 洲国家, 纳米方面的专利 申请量诵常高干 SCI 论文 发表量,而在大多数西方 国家,情况刚好相反。

基于 Nano 数据库的 分析也得到类似的结果。数 据库所收录的论文中,中国 有更多的论文明确提及论文 所描述的纳米结构或材料的 应用,其比例显著高于美国、 德国、英国、日本和法国等 多数科研强国(图8)。 只有韩国和澳大利亚与中国 的情况相似。

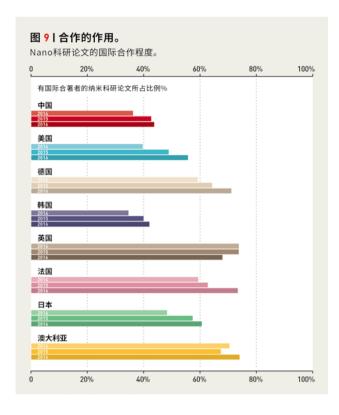
一些受访的中国纳米 科研专家指出,政府的资 助政策和科研评估体系发 挥了重要的导向作用。诵 常,世界各国都很重视科 研的应用价值。在中国, 由于政府对科研的资助力 度很大, 其导向作用容易 被放大。

#### 合作发挥的作用

合作可以吸引来不同的科 研资源、专长和观点,因 此日益成为科学研究的重 要组成部分。纳米研究作 为一个跨学科程度很高的 领域,其合作范围也更为 广泛。与 SCI 论文的整体 产出相比,与纳米相关的 科研产出通常有更高的国 际合作程度。







中国非常重视国际 科研合作, 因此中国涉 及国际合著的论文比例 也在逐年增高。根据 SCI 的数据,中国总体科 研产出中涉及国际合作 的比例自2010年一直在 增长, 2016年已达24% <sup>5</sup>。Nano 数据库收录的 与纳米材料相关的高质 量论文中, 涉及中国与 国际合作的论文比例也 从 2014 年 的 36% 增 至 2016年的44%(图9)。 然而,中国在纳米领域 的国际合作程度虽与韩 国相近,但明显低于西 方国家, 而且合作增长 的速度也不如美国、法 国、德国等国。

美国是中国纳米科

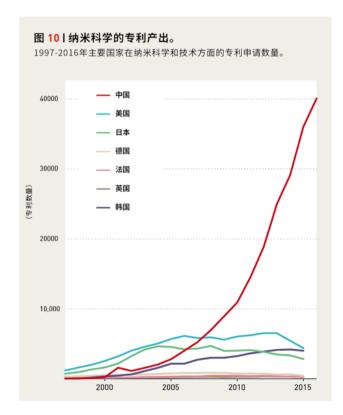
研领域最大的国际合作 国。在 Nano 数据库收 录的 30 本顶级期刊中, 中国发表的纳米方面的 国际合作论文有55%是 与 美 国 合 作 的。2014 至 2016 年, 美国与中 国合作发表了2,123篇 纳米科研论文,占美国 这三年来所发表的高质 量纳米科研论文总数的 21%。接下来,与中国 在纳米领域有高质量科 研合作的国家依次为德 国、澳大利亚和日本。 尤其是,中国是澳大利 亚重要的科研合作国, 双方合作的论文约占该 国在这30本顶级期刊所 发表的纳米科研论文的 三分之一。

#### 中国的专利产出

尽管专利只是基础 知识转化为商用技术过 程中的一小部分,但它 常是反映科研实所 力的主要指标。科 方的德温特专利数据的 (Derwent Innovation Index) 收集了技术的 手力数据。对中 市大 的专利数据,对中国 纳米科研应用于纳米 术的趋势进行了分析。

以纳米科技相关的 关键词和国际专利分类 代码为检索策略,我们 检索了 1997 至 2016 年 之间(基于最早优先权 年或基本专利申请时间) 申请的与纳米科技相关的 466,884个专利家族,结 果发现纳米技术方面的 专利申请量在全球方面的 体上升趋势。专利申请量 从1997年的2,826件增享 2015年的51,389件6。 中,中国专利申请数已领 中,中国专利申请数已领先 世界。同时,中国纳先 世界。同时,中国纳先 专利申请所涉领域非常广泛, 尽管各领域的增长模式各 有不同。

中国的纳米专利申请量位列世界第一,这与中国纳米科研强国的地位相一致。过去二十年,中国的纳米专利申请量累计达 209,344 件,占全球总量的 45%,是美





国同期累计申请总量的 两倍以上,美国是全球 第二大纳米专利贡献国。 自 2008 年起,中国的年 度专利申请量即已超过 美国,成为世界第一,其 增长速度远高于世界平 均水平(图 10)。

很多对自己的研究 成果或技术充满信心的 中国科研人员还会去申 请国际专利,以求自己的 专利技术能在其他国家 也受到法律保护。中国的 国际专利申请量近年来 在稳步增长,从 2000年 的 10 件 左 右 增 至 2014 年的748件。但是,中 国国际专利的增长远不 及其纳米专利申请总量 的飞速增长。与其它科技 发达的国家相比,中国在 国外申请的纳米专利数 量仍较少,仅占过去20 年累积专利申请总量的 2.61%, 而在美国, 这一 比例高达近50%。一些 欧洲国家,如英国和法国,有超过70%的纳米专利都是非本国专利。

中国有五家机构,即 中国科学院、浙江大学、 清华大学、鸿海精密工业 股份有限公司和天津大 学,位列全球十大纳米专 利的机构申请者。其中, 中科院自 2008 年即位居 全球首位,过去20年总 共申请了 11.218 件纳米 专利。有意思的是,位居 前十的其他机构申请者, 如韩国的三星集团、LG 集团、日本的富士胶片公 司和美国的 IBM 都是商 业公司。而中国在专利申 请中居主导地位的往往 是科研和学术机构。这也 许反映出中国科研人员 很重视研究成果的应用 转化,以及中国科研机 构在研发上的相对优势。 但另一方面,这也凸显出 中国企业在研发上的相 对弱势。

#### 中国纳米技术专利 的覆盖范围

从全球范围来说,纳米专 利申请主要集中在基本电 气元件和电子产品、化学 和冶金、医药卫生、超微 技术和材料等领域。近 二十年来,与医药卫生类 的器件和技术、高分子材 料,以及催化和胶体化学 相关的专利申请呈持续增 长趋势; 而半导体器件相 关的专利,虽然是最常见 的纳米技术专利类别,却 在2012年之后不断下降。 超微技术的专利曾在该段 时间的前15年讯谏增长, 但在 2011 年达到顶峰后 开始下降。

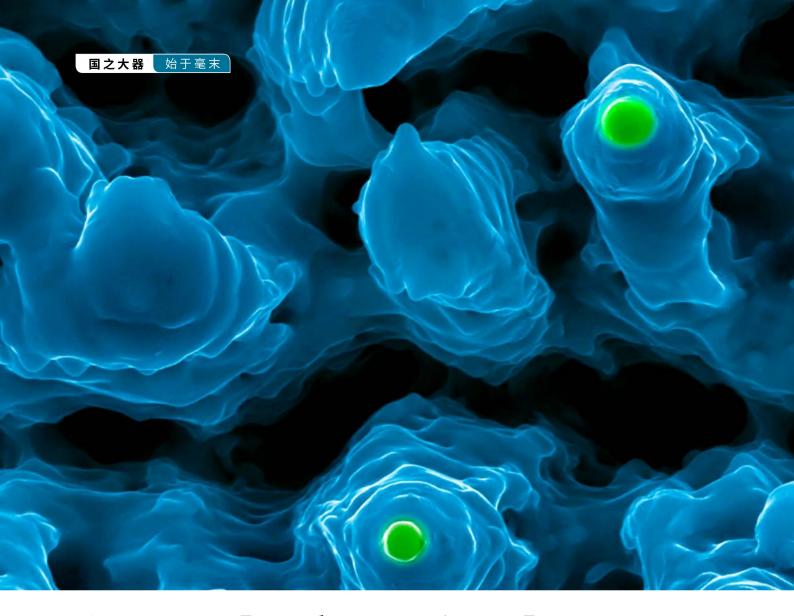
中国在多个热门纳米 技术应用领域都有大量的 专利申请,其中最多的 是高分子合成和超分子 化合物的专利。相比较而 言,美国、日本、韩国主 要申请的是半导体器件和 电子产品的专利,其中美 国半导体器件的专利申请 总量位居全球第一(图 11)。这与 Nano 数据 库中涉及应用的科研论文 的情况基本一致。

<sup>3.</sup> See Bai, Chunli. Ascent of Nanoscience in China Science 2005, 309, 61- 63

<sup>4.</sup> See Weiss, P. S. A Conversation with Dr. Chunli Bai: Champion of Chinese Nanoscience ACS Nano 2008, 2(7), 1336–1340

Nature Index-China 2017 http:// www.nature.com/nature/journal/ v545/n7655\_supp/full/545S39a. html

<sup>6.</sup> 由于专利保密期的要求,2015 和 2016 年的数据不完全。



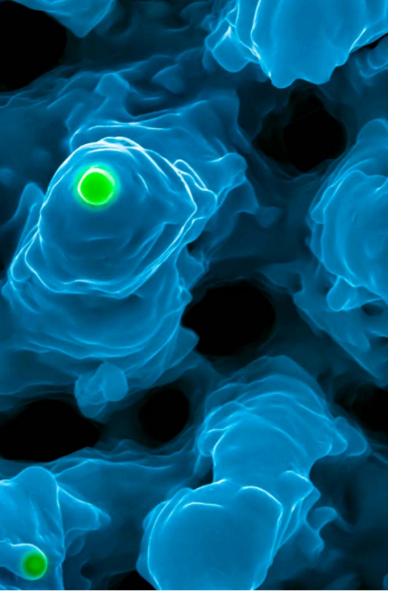
# 行业专家展望中国 纳米科技前景

科研产出和专利申请数量的迅速增长, 都描绘出中国纳米科学发展的美好前景。 不论是传统的强项学科,还是新兴领域, 中国的纳米科学都表现出巨大的潜力。 但是,机遇与挑战并存。为了对此有更 深入的理解,我们采访了中国纳米科研 界不同研究方向的专家。

#### 机遇

在中国经济持续增长,以 及政府大力扶持和倡导科 技创新的前景之下,中国 的科技投入,尤其是对纳 米科学和技术的投入有望 继续增加。

中国政府各部委和相 关机构已制定了科研计 划,为纳米科学和技术提 供持续的经费支持。这 包括了科技部、教育部和



材料的重要原料。他们的 方法突破了煤化工业上 混袭的费托合成的选择性 限制,大幅提成功转化 率,并已经成功现引发化 工企业,共同和开发过现, 时间的性成果实现增的 这一原创性成果实现增增的 发展。中国有望继续保持 该领域的领先优势。 一位专家指出,他强调科 研人员应该思考科研的价 值,让中国纳米催化的发 展更上一层楼。

#### 能源

能源的重要性和发展可再生能源的必要性已被广泛认可,尤其是在中国——日益突出的环境问题已引起了政府的高度重视。中国致力于长期投

如果问我最想看到什么变化,那就是对纳 米技术研发和应用研 究的投入应该更大。••

自然科学基金委员会等中 国主要的科研经费资助机 构。最近五年, 仅教育部 就已为各高校拨付了逾5 亿元人民币的纳米科研预 算资金。中科院也启动了 纳米先导专项,投入了约 10亿元人民币。具体来 说,大量优质资源被投入 纳米材料、表征技术、纳 米器件与制造、纳米催化 技术与纳米生物医药等领 域的基础和应用研究中。 在采访中,专家们指出了 纳米科学几个最具发展前 景的领域。

#### 催化

不少受访专家认为,催化 技术和纳米催化材料是 中国最有发展前景的纳 米科学领域。这一观点并 不出人意料,因为中国的专 该领域已拥有丰富的专业 的催化剂能够加快化工产 业及炼油行业有户国科的 业及炼油行业有中国科的 水量,以纳米结构的学 水量,以纳米结构的,中国科学 家最近研发了一种新以一种新以一种, 下生的合成气直接转型料等

不过, 受访专家也认 为,对纳米结构进行更为 精准的控制仍旧是一项挑 战,这需要能生产出高效 率、高活性、高选择性和 长寿命的催化剂。有些专 家指出,合成一种新的催 化剂并就此发表论文相对 而言并不困难; 我们真正 需要努力的,是寻找新的 合成方法和更好地控制组 装过程。而且,发表更多 的论文并非唯一的目标。 "它们(论文)真那么重 要吗? (合成的催化剂) 真能用于工业生产吗?"

资新能源的研究, 这为 中国纳米能源的发展带 来光明前景。该领域的 一位青年专家说:"纳米 技术在能源产业的应用 有着广阔的前景,我们很 可能在接下来的5到10 年里就会有重大突破。" 据其介绍,太阳能产业的 上游在中国,这为做新能 源研发的科研人员带来 丰富资源,有利于他们挖 掘源头。由于中国政府具 有强大的资源调动能力, 因此开发纳米能源技术 和推广可再生能源方面,

中国比美国更有优势。

中国某些领域的纳 米能源研究已引领世界, 尤其是锂离子电池的开 发。最近,一个中国研 究团队发明了一种折叠 式氧化石墨烯薄膜设备, 数为临床研究提供了大量 案例和病人,这有助于促 进纳米医药的转化研究。

纳米材料用于药物传送,以及纳米粒子用来制成治疗药物,其潜力巨大。除此之外,受访科学家们

挑战。"不过,中国政府已对生命科学和生物医学进行大量投入,这些领域的高质量研究产出正在迅速增加。

#### 挑战

## 提升科研的社会影响力

中国政府对纳米科学和技术有大量投入,旨在开发可用来产业化的技术,以促进经济增长。然而,尽管学术论文发表量及专利申请量都很高,中国纳米技术的产业影响力仍旧有限。纳米科学和纳米技术产业化之间仍存在差距。

多数接受采访的纳米 科研人员都认为,政府需 要在应用研究上有更多投 入,以促进纳米科研成果 的转化。"相对来说,我 们国家对基础性纳米科学 研究提供的支持还是很充 裕的。"一名研究者说。

 与进来。"另一位研究者说。"他们(企业)作为纳米技术开发和应用的重要参与者,应受到鼓励在研发上有更大的投入。"

"在我看来,基础研究就是产生新知识、新观念或新想法,而应用研究则侧重于能产生实际影响的应用和新产品。但是现在,许多人游走在两者之间,因此有了许多重复研究。还有很多人只是跟风。我个人认为,我们要更加(重视)应用。"

目前,产业部门在一 定程度上参与了进来。许 多纳米科研人员频繁与企 业开展合作, 也有越来越 多的企业愿意与大学或研 究机构的科学家合作,为 他们提供科研资金并一起 研发新技术或产品。有些 企业还大力投资研发, 建立了自己的研究部门。 但是这还不够。中国纳米 科学的产业合作程度(以 与产业界人士合著的论文 所占比例来看) 虽然在逐 年提高, 但与其他科研大 国相比, 仍旧较低。就像 一位纳米科研人员所说:

"政府需要进一步鼓励企业的研发工作,并优化有利于科技成果产业化的机制。"人们知道,要真正动员企业投入研发,就需要有完善的机制,为科学界和产业界架起一座对话的桥梁,简化科技成果产

66

创新的种类有很多。中国研究者可能善于从1 走到10(的创造发明), 但从0到1的突破仍 十分罕见,这对我们 来说仍是一大挑战。

能利用太阳能淡化盐水,淡化过程中的热量损失被降到最低,效率很高。中国还有许多研究团队正在为开发低成本、高效率的钙钛矿太阳能电池作出重要贡献。

#### 医药

与能源一样,健康和医药 与每个人的日常生活息息 相关,这使纳米医药成为 一个新的充满潜力的领 域。该领域一位专家说:

"纳米医药令人振奋的 地方在于它在诊断和治疗 上的应用。通过运用纳米 技术,我们能够控制药物 释放并更好地实现靶向治 疗。"中国巨大的人口基 还对纳米技术在医疗器械和医学成像上的应用前景寄予厚望。该领域一位专家说: "若将纳米材料用到医用电子设备或可穿戴设备,我们将会得到一些非常有价值的产品。"

33

然而,与西方一些发 达国家相比,中国的基础 生命科学研究和生物医学 研发仍较为薄弱。生物医 学专业知识的缺乏限制了 纳米医药的发展。目前中 国从事纳米医药研究材料 科学背景,但动物模型 和临床研究的经验相对有 限。一位纳米医药专知识, 是我在研究中面临的最大 业化的流程,并保持投资渠道通畅。

"如果问我最想看到什么变化,那就是对纳米技术研发和应用研究的投入应该更大。"

如何加强纳米科研成 果的应用被认为是中国纳 米科学发展所面临的最大 挑战之一。这是一项长期 任务,相关研究者建议产 业化过程需要循序渐进, 并警惕急功近利的行为。 中国政府承诺资金支持纳 米技术的全产业链发展, 这是一大利好。为了扩大 科研的社会影响力,科学 家应在引导经费投资方向 上发挥更大的作用,他们 掌握前沿的科技知识, 因此对颠覆性技术的预见 力,要强于产业领袖或政 策制定者。

#### 平衡应用研究与基 础研究

世界上大多数意义深

远的创新都源于基础科学 的发现。然而,中国在真 正的创新研究方面仍相对 落后。为了实现从零到一, 给真正的创新打好基础, 我们需要有更多高质量的 基础研究。就像一位研究 者所言: "现在有很多针 对应用的讨论, 但是(我们) 同样需要做更多的基础研 究来理解不同纳米材料的 基础结构,并更好地控制 这些结构。"的确,这是 最终推动开发新型催化剂、 高效太阳能电池和创新药 物传送方法的根本。

"创新的种类有很多。 中国研究者可能善于从1 走到10(的创造发明), 但从0到1的突破仍十分 罕见,这对我们来说仍是 一大挑战。"

统计数据显示,和多 数西方国家相比,中国科 研支出总量中通常只有一 小部分用于基础研究。这 似乎与本白皮书中大多数 受访的纳米科研人员的观 点相左。这可能是因为人 们对基础研究和应用研究 有不同的定义造成的。自 然科研在两年前曾做过一 次调查,当时受访的科学 家将纳米科学和技术视为 应用研究, 而认为基础研 究指的是生命科学、物理 科学或地质科学, 因为没 有明确迹象表明它们能立 即投入应用。但是,在目 前这项研究中,大部分纳 从这个意义上来说, 给予科学家充分的空间, 让他们自由探索自己的创 新想法,追随自己真正的 科学兴趣才是关键。过于 追求论文发表数量或专利 申请数量,都会让研究目 的从发现新知识偏离到成 为一种生产论文和专利的 手段。

"加强研究的应用性 非常重要,但是当科研评 估过分强调(衡量)应用 (价值)的定量指标时, 专利申请能带来的实际意 义往往会被削弱,"

"研究就像高斯曲线——很糟糕的研究不多,但是具有深远影响力的研究也很少。仅仅依靠引用次数并不是判断研究重要性的好方法。"

66

加强研究的应用性非常重要,但是当科研评估过分强调 (衡量)应用(价值)的定量指标时,专利申请能带来的实际意义往往会被削弱。

#### 鼓励国际合作

在政府的大力支持下,越 来越多有海外经历的中国 科学家回到国内工作。因 此,受访的纳米科研人员 相信,中国与其他国家的 科研合作将会增加,国际 合作网络也会扩展。数位 们就可以取长补短。"

此外,基于中国在纳 米科学一些领域的技术 专长,中国在越来越多的 国际合作项目中正在发 挥重要的领导作用。"我 们已经在能量转换和存 储研究中处于领导地位, 多不同的传统学科,如化 学、物理、工程学、生物 和医学等。从下一代计算 机芯片到未来的癌症治 疗,所有这些领域的发展 进步都取决于我们对这个 世界如何在纳米尺度上运 转的理解。但是,即使是 然科学基金委,还是按照 传统学科分类来划分资助 项目,这其实不利于支持 像纳米科学这类跨学科领 域的发展。"他说道。

但是,大部分受访科 研人员对这种按传统学科 划分经费资助项目的做法 并不十分介意,因为多数 纳米科学研究者是化学 家,他们只要申请化学 类资助项目就可以了。此 外, 自然科学基金委还有 一些针对纳米科学的专门 项目,科技部也是一样。 然而,有些研究人员提出, 跨学科研究如囿于有限的 范围内, 就会阻碍纳米科 学的多样化发展。多数时 候,合作仅限干材料科学 家或化学家,尽管也涉及 某些不同的子学科方向。 一个鼓励化学家与生命科 学家、环境科学家, 甚至 是地质科学家开展更广泛 的跨学科合作的机制,尚 有待建立。

"目前,纳米科学领域的跨学科合作范围仍旧很窄。打个比方,大多数(研究纳米科学)的人都是学化学或材料背景的,而有物理学或医学背景的却不多。从这点来看,更高义上的跨领域交流的真正意义上的跨领域交流的管坛,还要学习彼此的语言,才好展开相互理解的对话。"

纳米科学非常广泛,其本质就是 跨学科的,这符合不同科学领域 一体化的全球趋势。因此,我们 需要更多的跨学科合作。

年轻的研究者介绍说,他们经常与海外的前同事、导师或同行开展合作,因为他们相互间已建立起密切的联系。

十多年之前,中国的 国际合作主要为了学习国 外先进的专业知识或技 术,而现在的国际合作则 有所不同, 更多是为了寻 求知识和技能的互补。"不 同国家的研究者有不同的 背景,也有自己的专业领 域。"一位纳米科学专家 说。"比如,我们最近与 日本合作进行一个针对治 疗胰腺癌的基因表达干预 项目。我们擅长处理纳米 材料,而日本研究者有扎 实的医学背景,以及动物 模型方面的丰富经验。我 并在几项新能源电池的合作项目中扮演重要角色。"一位专攻纳米能源的研究者说。

就像一位资深研究者 所说的,我们应该进一步 鼓励基于项目的合作,业 便集中互补性的专事。 管私人关等要想使的关系 管私人关等要想使有作。 管私人关于要想使有作。 有一些有关重要的 在一些可等的 在一些可等的

### 加强学科间的合作

如前所述,纳米科学本质 上是跨学科的,它涉及许 来自相近学科的研究者, 比如物理和化学,他们往 往用截然不同的语言描述 自己眼中的世界。打破传 统学科之间的界限,建立 真正跨学科的研究方法, 对于促进纳米科学和技术 的发展至关重要。

"纳米科学非常广 泛,其本质就是跨学科 的,这符合不同科学领域 一体化的全球趋势。因 此,我们需要更多的跨学 科合作。"

跟随全球趋势,目前 许多中国大学和研究机构 都十分重视跨学科研究。 然而,就像一位研究者所 指出的,中国在跨学科研 究上仍相对薄弱。"大多 数科研资助机构,比如自

#### 培养年轻科学家

中国政府已为年轻科 学家提供大量支持,启动 了多项针对年轻科学家的 高端资助项目。比如,自 然科学基金委的国家杰出 青年科学基金,中央组织 部的青年千人计划,还有 中科院的百人计划。这些 项目并不限定特定的学 科,让入选的青年科学家 能自由探索自己感兴趣的 领域。接受采访的纳米科 学专家中有几位在美国工 作,他们说中国年轻的纳 米科学家从中国政府获得 的经费支持超过了美国或 其他发达国家的同行。

但是经费申请的竞争 正变得日益激烈,因为越 来越多的青年科学家进入 这个领域,或从国外归来。 虽然太过激烈的竞争可能 会妨碍创新,但是大部分 受访青年科学家并不十分 担心经费的竞争,而是更 强调软环境的重要性。他们希望能有渠道来表达自己的建议或创新的想法。

"在中国科研圈里, 新陈代谢的速度要比美 国和其他发达国家较慢。 我们需要更加努力地推 动这个领域的研究更 新……这不仅包括提供 硬件设施或经费支持,软 环境同样很重要。为了 鼓励新想法不断冒出来, 应该支持年轻科学家有 更多的话语权。"

而且,当前许多面向 年轻人的经费项目都是基 于申请人已取得的科研成 就。目前的评估体系也偏 题,因此人才选拔机制需要加以改进。

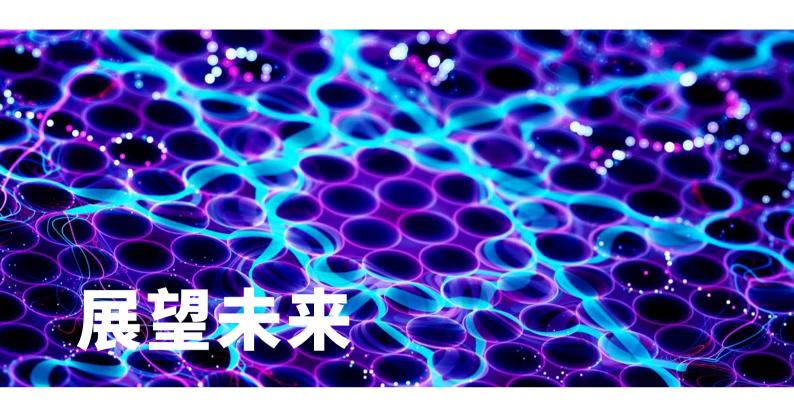
培养人才应从优化 教育开始。要发展纳米科 学, 使之成为可持续发 展的科学学科,提升其 跨学科合作的程度,并 提高研究质量,都离不 开有针对性的教育项目。 过去几十年, 随着纳米 技术的高速发展,许多 世界知名大学建立了纳 米科学和纳米技术专业, 培养这方面的硕士和博 十研究生。2010年,苏 州大学与苏州工业园区、 加拿大滑铁卢大学合作, 成立了中国首个纳米科 起,是中国建立跨学科纳 米科学教育的首次尝试。

为了满足人们对纳米 专业人才不断增长的需 求,中国科学院也决定在 中科院大学建立一所纳 米科学技术学院。这所新 学院由国家纳米科学和技 术中心牵头,着重把纳米 科学研究融入本科和硕博 教育,旨在成为世界一流 的培养具有纳米科学和技 术能力的跨学科人才的基 地。国家纳米中心主任指 出, 生物医学、能源和信 息技术等不同产业的发 展,都需要有掌握纳米知 识的跨学科人才。纳米科

66

在中国科研圈里,新陈代谢的速度要比美国和其他发达国家较慢。我们需要更加努力地推动这个领域的研究更新.....这不仅包括提供硬件设施或经费支持,软环境同样很重要。为了鼓励新想法不断冒出来,应该支持年轻科学家有更多的话语权。

向于重视过往成就或海外 经验。这让一些有才华的 青年研究者可能永远也得 不到所需经费,一展宏图。 如何在事前选择有潜力的 研究者,这仍旧是一个难 学技术学院。为了培养纳 米科学领域的专业人才, 该学院首创了连贯式的 本科、硕士和博士课程, 将教学、科研和纳米科学 与技术的应用结合在一 学技术学院还有助于建立 一个新的知识框架,融合 多个学科,促进人们对纳 米科学的理解,并使之成 为学术系统中一个新的跨 学科领域。■



中国纳米科学和技术 取得引人瞩目的发展速 度,这只有中国科技的发 展是与之同步的。无论 是科研产出总量还是影响 力的科研产出,中国都是 当今世界纳米研究的主要 贡献者,并遥遥领先。这 一成就主要是建立在化学 和材料科学的传统优势之 上。同时,中国也在纳米 科学应用于生物技术方面 逐渐发展新的优势。但如 此快速的发展也不可避免 地面临着挑战。

 扩大有利于跨学科合作的 项目,并避免简单地按物 理学、化学、生物学和其 他传统学科来对研究项目 进行分类。

第一个用来全面描述 该学科的词语是纳米技 术,而不是纳米科学,这 并非巧合。虽然这个词 在几十年就被创造出来, 早于纳米科学工具的商业 使用,但这个领域的指导 原则一直都是利用这些工 具,帮助我们建设一个更 美好的世界。这并不是说 不应当继续去大力支持那 些好奇心驱使的研究—— 尤其是这类研究常常能够 带来意想不到的、改变世 界的发现。但是,我们白 皮书访谈中的专家们都一 致认为,必须进一步缩小 基础科学和应用科学之间,以及应用科学到实际 解决方案的距离。

最后,我们与专家交 谈得最多的话题——也是 对中国纳米科学的未来有 最重要意义的话题,就是 他们期待中国下一代的纳 米科学家能成为该领域科 研创新的最有力源泉。自 然科学基金委等科研资助 机构对此并不会感到惊 讶,因为他们已率先设立 了面向青年科学家的资助 项目。但是充足的经费并 不能解决全部问题。教育 同样重要。国家纳米中心 等其他的中国机构已为 此开发专门的课程,帮助 学生掌握传统的物理学、 化学或生物学之外的广 泛技能。■

## [附录]

#### 附录 1 | 数据收集和研究方法

这项研究采用了定量和定性的方法来分析中国纳米科学和技术的发展趋势,并揭示其所面临的机遇与挑战。定量分析借助自然科研开发的 Nano 数据库,以及科睿唯安的引文数据库和德温特专利数据库,来分析和纳米相关的科研论文产出与专利申请情况。

具体来说,我们利用科学引文索引 (SCI) 数据库的主题检索功能,用与纳米科学和技术相关的关键词做检索,从 1997 年到 2016 年间出版的论文中,搜索到 1,372,510 篇符合标准的论文。数据检索的截止日期为 2017 年 6 月 16 日。检索中使用的关键词包括一系列以"纳米"为前缀的词、自组装、原子模拟、分子电子学、量子点、原子力显微镜、扫描式隧道显微镜等等。我们分析了全球,尤其是纳米科研论文的主要产出国,在 1997 年到 2016 年间纳米科研论文的年度产出变化。

以纳米科技相关的关键词和国际专利分类代码为检索策略,我们也对德温特专利数据库做了类似的关键词检索,该数据库包括了来自全世界 40 多个专利发放权威机构的专利信息。我们总共检索了 1997-2016 年之间(按其最早优先权年)申请的纳米科技发明专利家族,计 466.884 个。数据检索的截止日期为 2017 年 6 月 9 日。

对科学引文数据库和德温特专利数据库的分析由中国科学院文献情报中心完成,对 Nano 数据库的分析则由自然科研的相关工作人员完成。

本项研究所用的定性数据取自我们与中国在职纳米科学专家的一次圆桌会议和数次单独访谈。会议与访谈的主题是中国纳米科学和技术发展中所面临的机遇和挑战。圆桌讨论举办于 2017 年 5 月底召开的第十二届中美华人纳米论坛,并获得国家纳米科学中心的大力支持。单独访谈由自然科研的工作人员在 2017 年 6 月初通过电话进行。

#### 附录 2 | Nano 数据库简介

Nano.nature.com 简称 Nano,是自然科研旗下的一个非期刊平台,于2016年6月正式推出。它旨在提供索引完善、结构完整、易于搜索的有关纳米科学和技术的信息,包括对几千种不同纳米材料和纳米设备的详细描述,诸如它们的物理、化学和生物属性,潜在用途,以及构成和制备方法等。这些数据来自实行同行评议的期刊所发表的文章。研究人员从许多不同的来源将这些信息汇总,并经人工整理为有关纳米材料和设备的档案。在这里,纳米材料被定义为在三维空间中至少有一维处于1到100 nm 的材料。同时,利用机器学习算法,对超过167种期刊的信息进行定期扫描,生成关于纳米材料与技术的数据索引。人工智能检索的信息来自于施普林格·自然(主要包括自然科研、BMC 和施普林格等品牌)旗下的主要期刊,以及 AAAS,Elsevier 及 Wiley 等出版机构旗下的期刊。

在本白皮书中,涵盖纳米材料属性、合成和应用信息的摘要主要是由纳米技术专家从 30 本期刊(请看以下完整列表)中人工提炼和汇编而成,这些期刊是纳米科学研究领域公认的高影响力期刊。这些人工汇总的数据取自 2014-2016 年期间发表在这 30 本期刊上的论文,其分析结果呈现在这份白皮书中,为我们展现了纳米技术发展的趋势。

#### 数据分析所涵盖的期刊名称列表

出版商	期刊名称	出版商	期刊名称
AAAS	Science	Nature Research	Nature Materials
ACS	ACS Nano	Nature Research	Nature Medicine
ACS	Chemistry of Materials	Nature Research	Nature Nanotechnology
ACS	Journal of the American Chemical Society	Nature Research	Nature Photonics
ACS	Nano Letters	Nature Research	Nature Physics
APS	Physical Review Letters	PNAS	PNAS
Elsevier	Biomaterials	RSC	Nanoscale
Elsevier	Materials Today	Springer	Journal of Nanoparticle Research
Elsevier	Nano Energy	Taylor & Francis	Nanotoxicology
Elsevier	Nano Today	Wiley	Advanced Energy Materials
Elsevier	Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine	Wiley	Advanced Functional Materials
Nature Research	Nature	Wiley	Advanced Healthcare Materials
Nature Research	Nature Chemistry	Wiley	Advanced Materials
Nature Research	Nature Communications	Wiley	Angewandte Chemie International Edition
Nature Research	Nature Energy	Wiley	Small



2017年8月



english.nanoctr.cas.cn



#### **SPRINGER NATURE**

www.springernature.com