



# 国之神器 始于毫末

中国纳米科学与技术  
发展状况概览

施普林格·自然集团  
中国国家纳米科学中心  
中国科学院文献情报中心



SPRINGER NATURE

印格致

施普林格·自然集团中国区

刘鸣华

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

施普林格·自然集团，  
自然科研中国区

唐智勇

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

王学昭

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所共建了 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点培养点，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名。

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），加速建立有利于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/>



中国科学院文献情报中心  
National Science Library, Chinese Academy of Sciences

SPRINGER NATURE

nature research

Nano



## 白春礼

中国科学院院长

**纳**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，纳米科技对高新技术的诞生，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 and 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 曾利用单独排放的氦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。

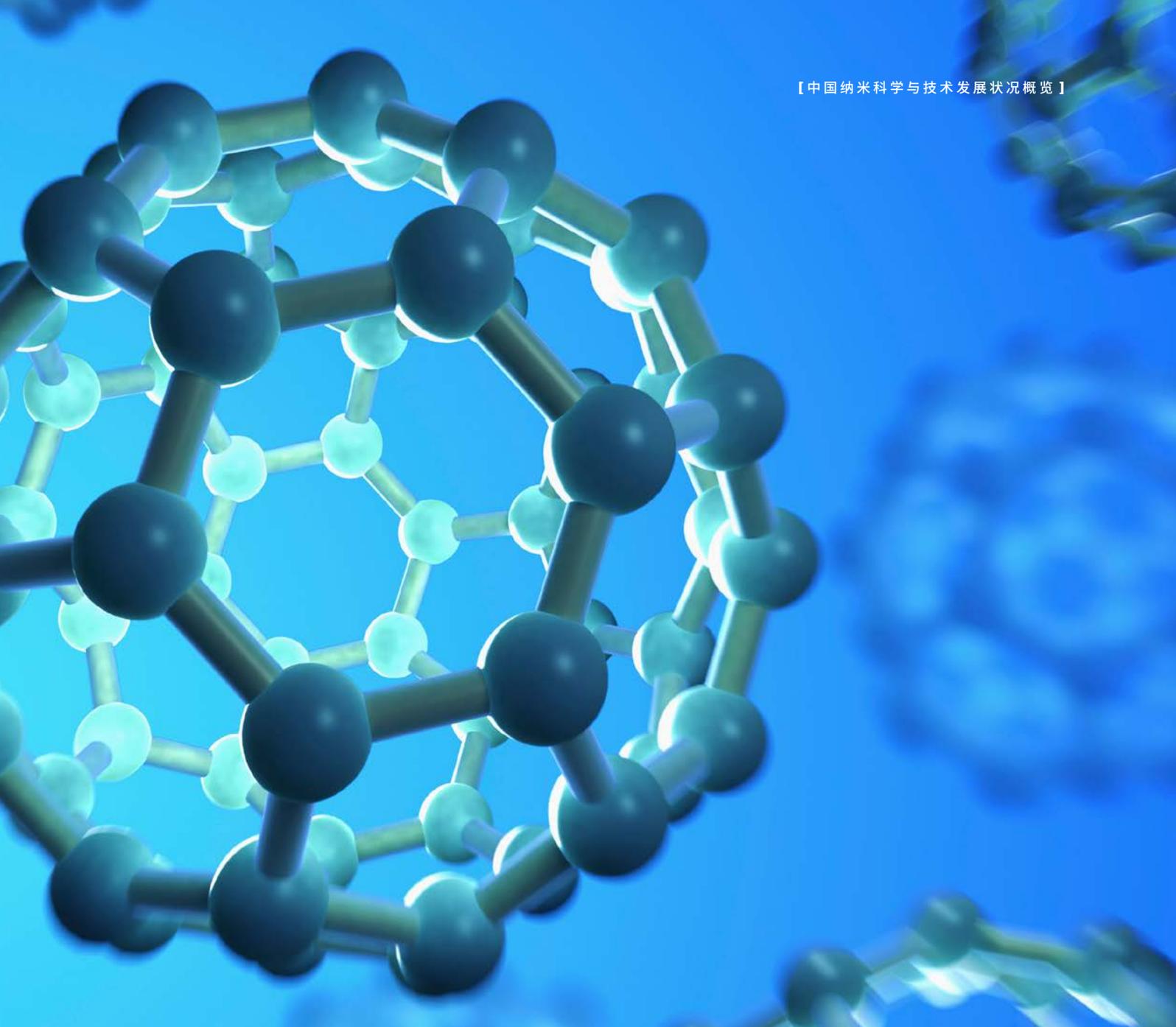
1992 年,全球只有屈指可数的几个实验室,主要是物理或化学实验室,在开展纳米尺度的物体研究——将其描述为纳米科学,或许要比纳米技术更合适。当时,并没有专门针对这个领域的期刊,而且勉强算起来也只有六家研究机构在其名称中使用了“纳米”这个前缀。如今,在科睿唯安 (Clarivate Analytics) 发布的 2016 年度《期刊引用报告》中,“纳米科学与纳米技术”分类下已有 86 本期刊。在数码科研 (Digital Science) 所维护的全球研究识别符数据库 (Global Research Identifier Database) 当前收录的研究机构中,已有 192 个研究机构明确

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、中国科学院科研院所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。 ■

---

1. 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。

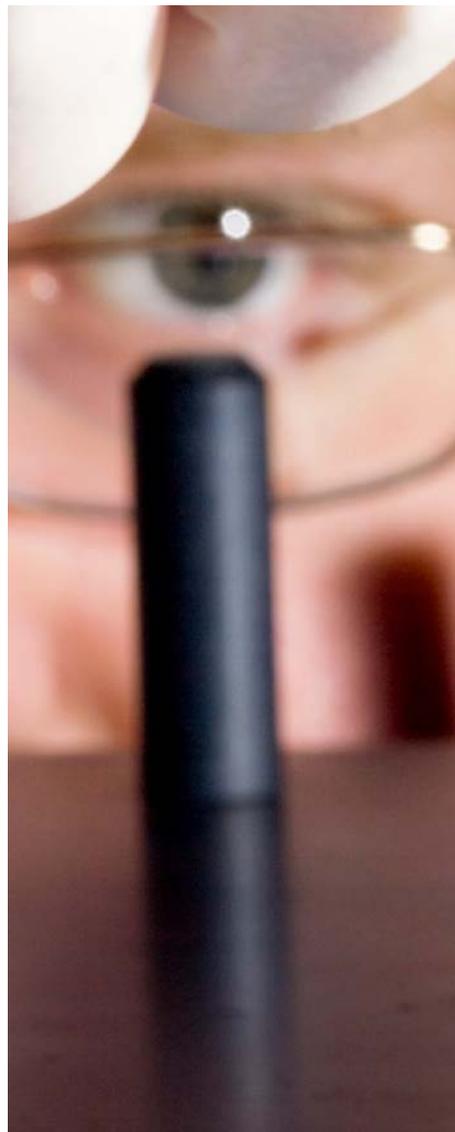
## 纳米技术发展的里程碑

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。

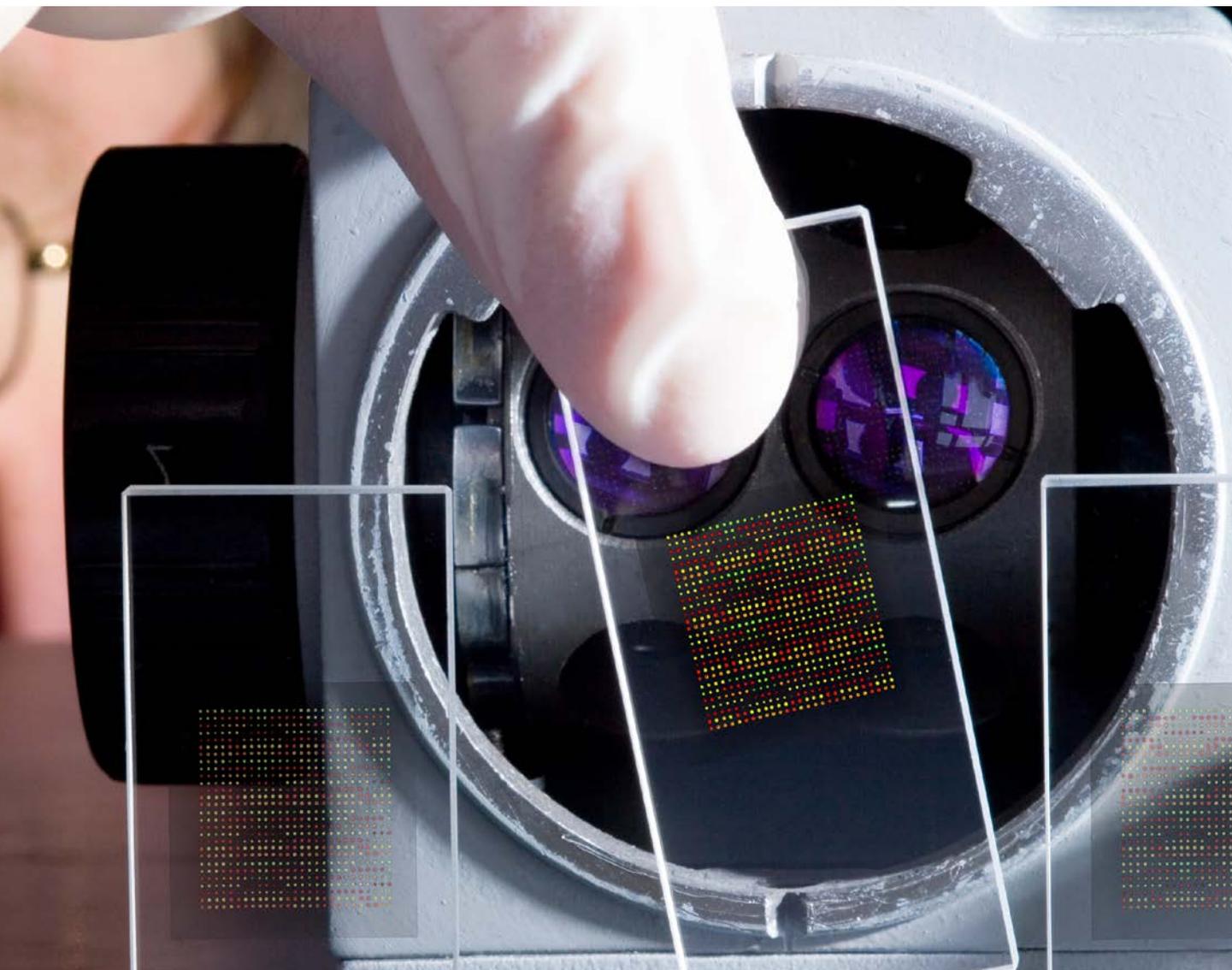
“纳米技术”这个术语直到1974年才出现，由谷口纪男在论文“关于‘纳米技术’的基本概念”里首次提出，他介绍了如何运用离子溅射在硬质表面蚀刻形成纳米结构。

不过，纳米材料的使用可追溯到几个世纪前，例如其在陶瓷釉和有色窗玻璃染色剂中的使用。领先费曼控制单一原子的设想大约一个世纪，英国物理学家、电磁学先驱法拉第（Michael Faraday）已阐述了光的波长相关散射（丁达尔现象），其研究对象是通过化学方法制备的金胶体悬浮液。他注意到金的胶体悬浮液颜色



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氦原子能够拼写出‘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 (C<sub>60</sub>) ——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，现已广泛应用于石油炼化、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

纳米级材料的研究规模虽然比较小，但对我们生活方式的潜在影响却很大。全球各地的科学家和工程师们都在对这个微观世界展开新的探索，并将其科学发现转化为新的产品和技术，由此重塑了一系列的产业，主要是材料和制造业、电子和信息技术、能源与环境，以及医疗与

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，我们需要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<sup>2</sup>，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。

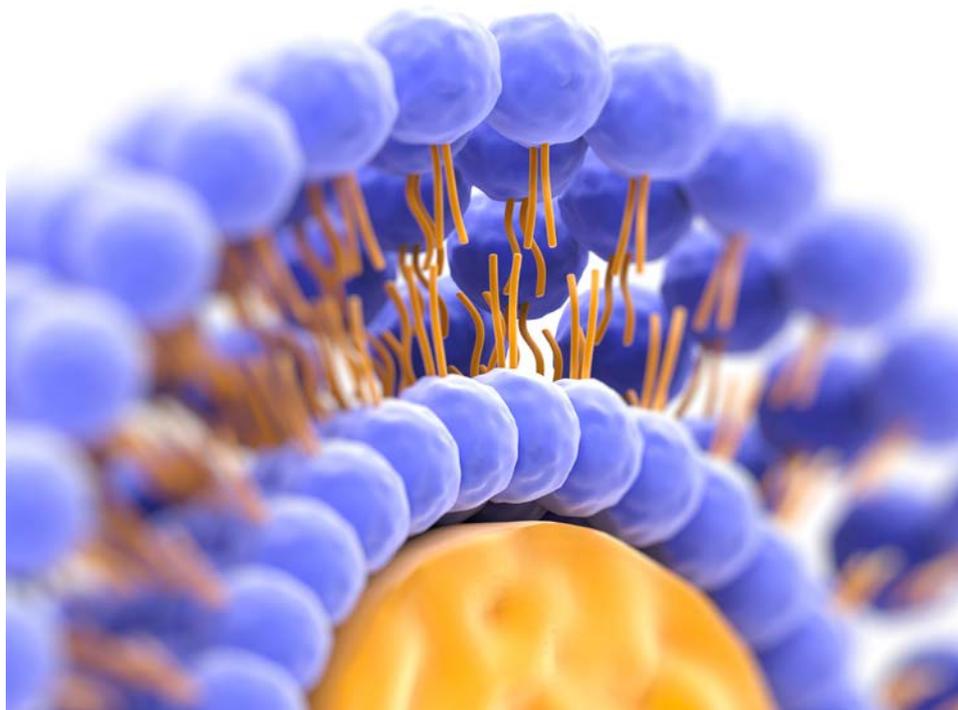
在制造业，纳米结构

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。它们被用于制造机身、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、高效率、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。

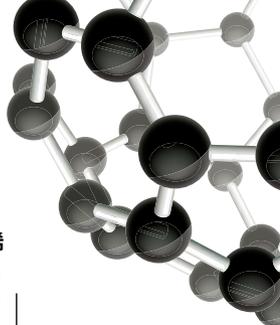
多年以来，科研人员通过在底层材料和结构上应用纳米工程，来提高光伏发电设备（将太阳能转化为电能）的性能并降低成本。例如，他们在这些设备里导入量子点，以吸收更多的阳光。另外，他们使用低温条件下能在低成本的衬底材料上生长的材料，如钙钛矿型金属-有机化合物和导电聚合物，为包括硅在内的传统光伏材料提供低成本的替代物。

除了有助于提高阳光采集效率，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里程。

纳米技术还可用于水处理和污染物的清理。例如，二硫化钼（MoS<sub>2</sub>）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。

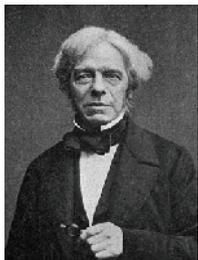
纳米技术在环境治理中的应用还包括空气、水和土壤中污染物的检测。由于其独特的化学和物理特性，纳米颗粒对化学或生物试剂的灵敏度更高，



# 纳米科学的里程碑事件

## 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

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: “纳米技术”一词诞生

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。

## 1985: 发现富勒烯

Harold Kroto, Sean O' Brien, Robert Curl和Richard Smalley发现了C<sub>60</sub>富勒烯分子。

## 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。

## 1981: 扫描隧道显微镜

Gerd Binnig和Heinrich Rohrer发明扫描隧道显微镜。

1928

1856

1931

1935

1946

1959

1968

1974

1976

1980

1981

1982

1983

1985

1986

## 1928: 近场光学显微镜

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

## 1935: 单分子薄膜

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

## 1946: 分子自组装

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。

## 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

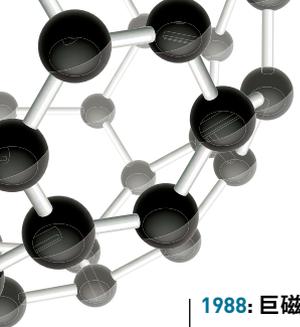
Alexei Ekimov和Alexander Efros报告了纳米晶体量子点的存在及其光学特性。

## 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。



**1988: 巨磁电阻**

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。

**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**

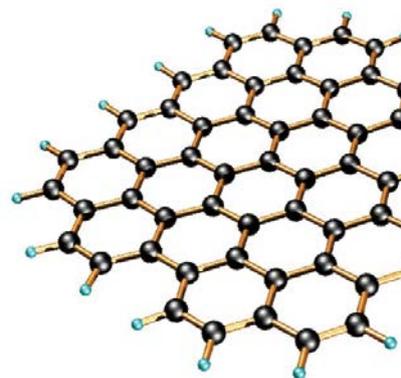
Paul Rothemund展示了一种将DNA单链折叠成复杂的二维形状的方法。

**2001: 纳米线激光器**

杨培东展示了室温纳米线激光器。

**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。



1988

1991

1990

1992

1993

1996

1997

1994

1998

1999

2001

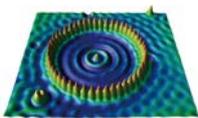
2004

2006

2013

**1993: 量子围栏**

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。

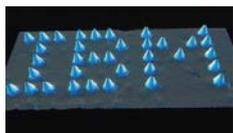


**1992: 分子筛**

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氩原子，写出字母“IBM”。



**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。

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孔基因测序技术的出现。其工作原理是利用电场驱动每个 DNA 单链穿过薄膜上纳米尺寸的孔，即纳米孔。当 DNA 单链通过纳米孔时，记录孔上产生的电流变化，从而识别出单链上的基因编码序列。该技术有望大幅降低基因测序成本并提高测序速度。

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

突破化学、解剖和生理学阻碍，抵达病变组织，提高药物在病灶位置的聚集量，减小对健康组织的损害，较之传统药物具有显著优势。例如，经过精心设计的纳米药物可以经血管渗漏点渗入癌变组织，并在靶点位置积聚，从而提高癌症靶向治疗的精准度。其他的应用还包括用纳米颗粒封装诸如抗体之类的生物活性分子，以促进特定靶向的药物输送。

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。生产作业中暴露于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业排放，以及纳米产品用后的回收，也会带来污染环境的风险。纳米颗粒活性高、尺寸微小，有可能对生态系统产生不利影响，对动植物生存构成威胁。由于纳米技术会给产品生产方式带来翻天覆地的变化，分子制造即是一个例子，并让很多商品的尺寸发生改变，人们尚不清楚这会

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于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。 ■

2. 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）。



图 1 | 纳米科学论文的增长。

在过去20年，与纳米科学和技术相关的SCI论文总量持续增长。

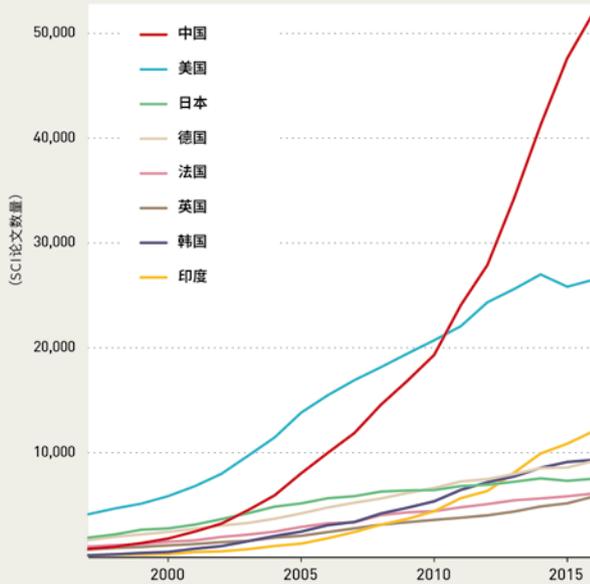


图 2 | 纳米科学论文对整体科研论文产出的贡献。

在大多数国家，与纳米科学和技术相关的论文占整体科研论文产出的比重不断上升。其中，中国、韩国和印度目前远高于全球平均水平。

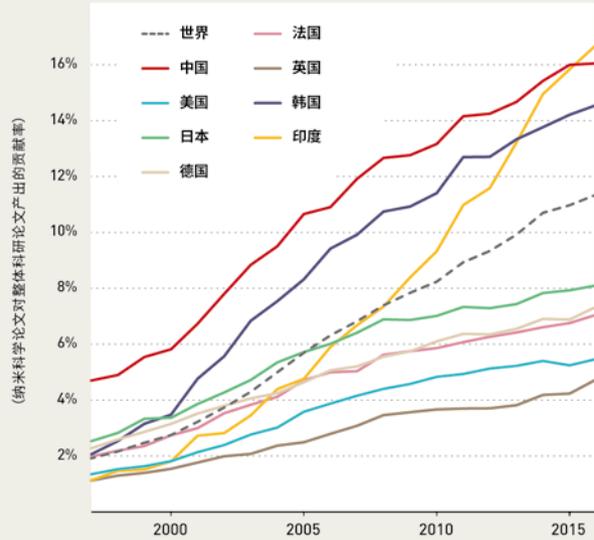


图 3 | 中国纳米科学论文的增长。

几十年来，中国科研人员发表的SCI纳米科学论文的全球占比一直稳定增长。

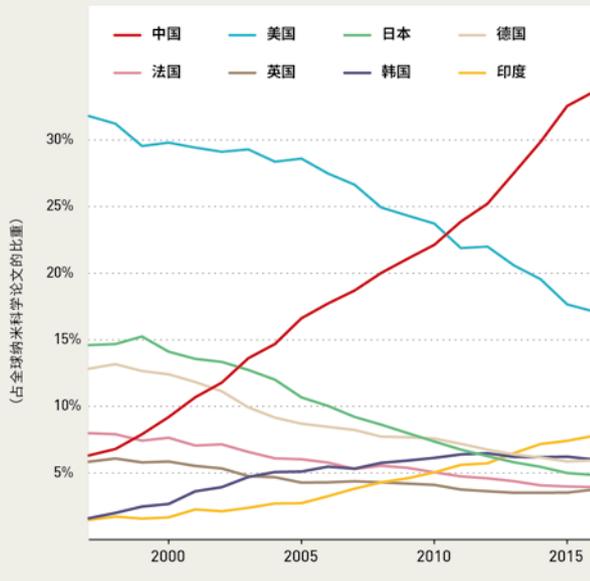
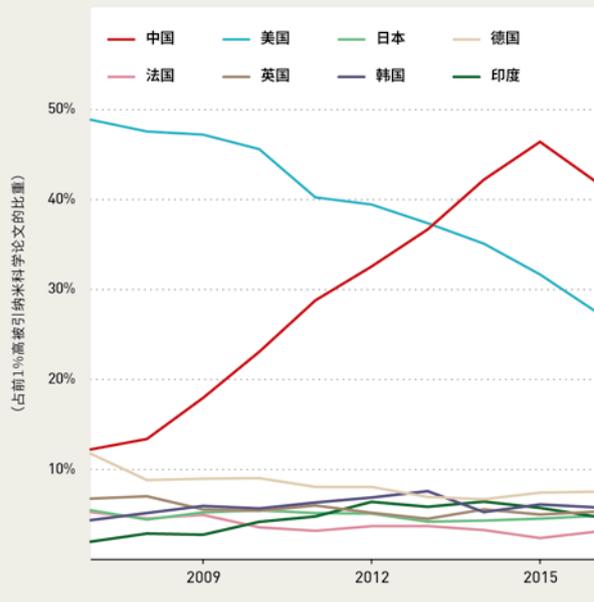


图 4 | 高影响力纳米科学论文的增长。

目前，在前1%高被引纳米科技论文中，中国占比最高。



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。

与全球产出进行比较，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，中国贡献了全球超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

当衡量任何特定科研的影响力时，应该注意单纯的数量并不等同于质量。而且，虽然衡量一个国家或机构科研产出的数量相对直接，但确定产出的质量则更具有挑战性。目前尚无普遍接受的评估科研质量的统一标准。不过，通常用来衡量一项研究影响力的方法之一就是它的被引用次数。为此，

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的增长比率相似，中国对纳米科研领域高被引论文的贡献率也有大幅增长，甚至超越了前者。2007年以来，中国在纳米领域的高被引论文占比更高，逐年增长率甚至超过了该领域总产出占比的增长，达到了22%的复合年均增长率，是全球增长率的三倍多。中国在2014年超过美国，其贡献已是除美国以外其它国家的数倍之多。

## 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。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<sup>4</sup>。

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家在“海归潮”中回国，这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。

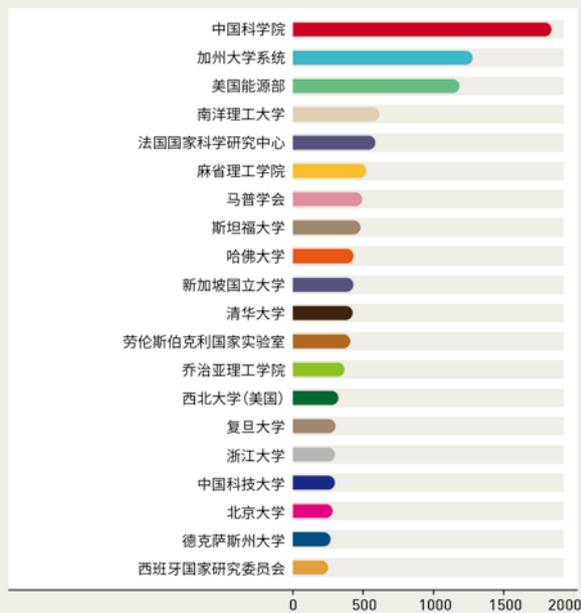
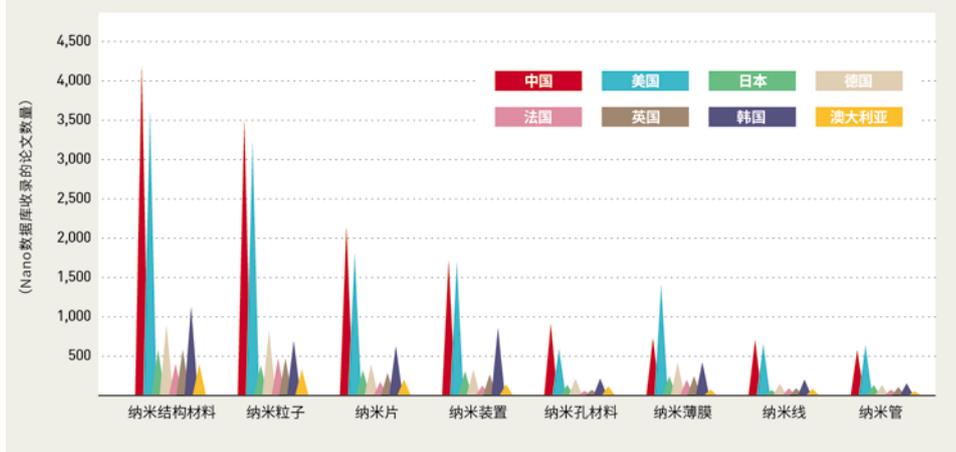


图 6 | 热门纳米材料。

在Nano数据库八大热门纳米材料的研究中，中国在多数材料类别的论文产出都很突出。



## 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纳米相关信息。为了编写这份白皮书，我们采用了建立 Nano 数据库所用的人工整理信息，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

助于功能材料的开发。Nano 数据库中收录的论文在报告各种纳米材料的时候，也会讨论材料的应用前景。在我们调查的八个纳米科研强国中，与催化、电子产品、医药和能源相关的应用是最普遍的应用研究领域，但国与国之间会有差别。例如，中国催化研究方面的论文最多，美国则以用于电子产品的纳米材料研究领先全球（图 7）。

中国的催化研究有明显的领先优势，大部分高质量的纳米科研论文都出自催化研究领域。一些受访的中国纳米科研专家指出，中国的催化研究有传统优势，中国以前发展化工工业或许对此有带动作用。中国很多颇有建树的化学家都专注于催化材料研究，并为该领域培养出一批年轻科学家，推动了纳米催化研究的持续发展。

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，以及有助于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于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通常高于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、日本和法国等大多数科研强国（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。通常，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。

图 7 | 热门应用。

在Nano数据库所收录的被引频率最高的应用领域中，中国的产出大多居于首位，但电子、光电子和发电除外——美国在这些领域处于领先地位。

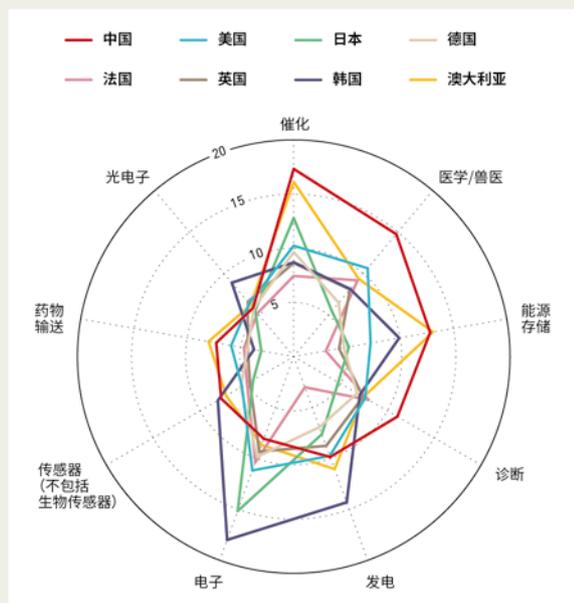


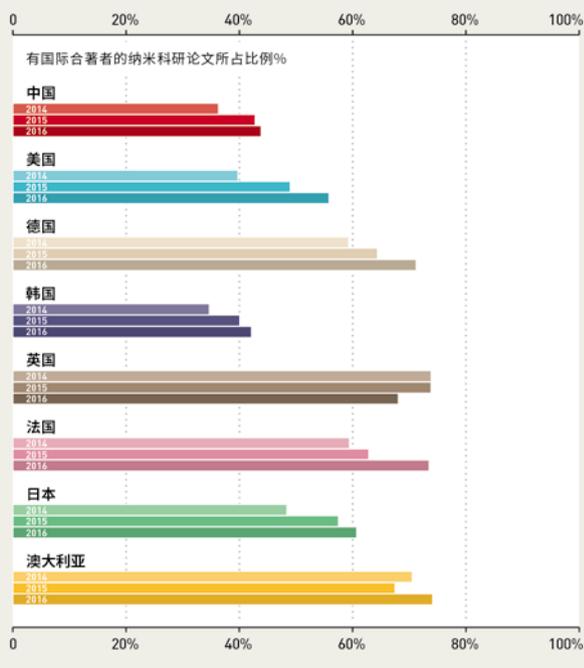
图 8 | 应用研究与纯理论研究的比较。

Nano数据库2014-2016年收录的论文中，来自中国的论文最可能引用具体的研究应用。



图 9 | 合作的作用。

Nano 科研论文的国际合作程度。



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，但它通常是反映科研实际影响力的主要指标。科睿唯安的德温特专利数据库 (Derwent Innovation Index) 收集了近二十年来纳米科学与技术方面的专利申请数据。我们利用这些专利数据，对中国纳米科研应用于纳米技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号为检索策略，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呈总体上升趋势。专利申请量从 1997 年的 2,826 件增至 2015 年的 51,389 件<sup>6</sup>。其中，中国专利申请数量的增长尤为迅速，现已领先世界。同时，中国纳米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

图 10 | 纳米科学的专利产出。

1997-2016 年主要国家在纳米科学与技术方面的专利申请数量。

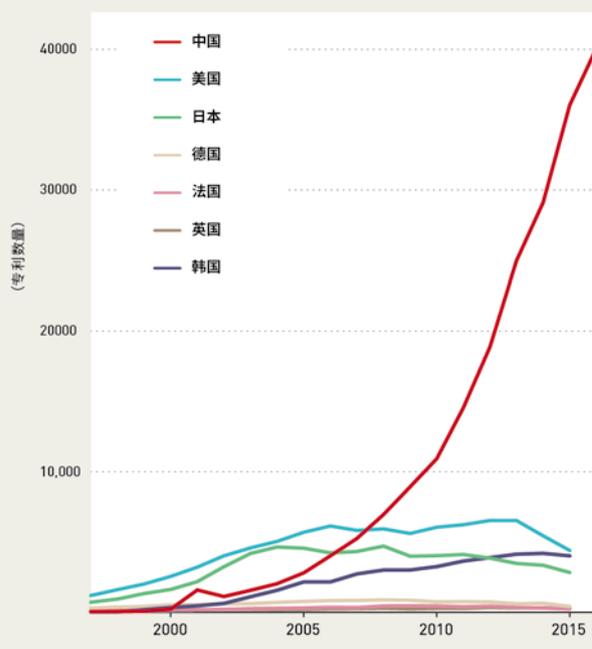


图 11 | 按产业应用划分的专利产出。

1997-2016年,根据联合专利分类(CPC)体系统计的纳米科学和技术方面的专利总量。



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年迅速增长,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。

从专利增长趋势上来看,高分子合成和超分子化合物是中国纳米专利申请量增长最快的领域。这包括了涂料、打印墨水、染料、粘合剂、纤维材料和纺织品加工处理技术等。此外,催化等促成物理或化学过程的技术或装置的专利申请,在中国的增速也很快。■

3. See Bai, Chunli. Ascent of Nanoscience in China Science 2005, 309, 61- 63
4. See Weiss, P. S. A Conversation with Dr. Chunli Bai: Champion of Chinese Nanoscience ACS Nano 2008, 2(7), 1336- 1340
5. Nature Index-China 2017 [http://www.nature.com/nature/journal/v545/n7655\\_supp/full/545539a.html](http://www.nature.com/nature/journal/v545/n7655_supp/full/545539a.html)
6. 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

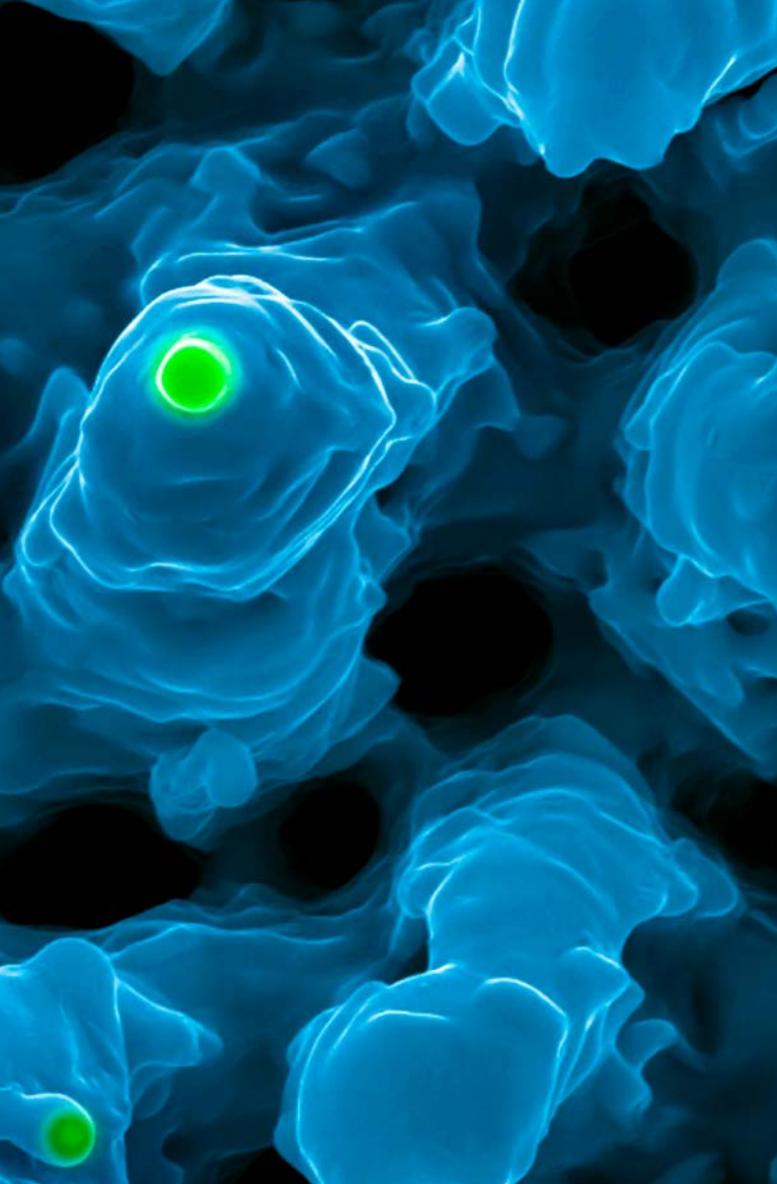
科研产出和专利申请数量的迅速增长，都描绘出中国纳米科学发展的美好前景。不论是传统的强项学科，还是新兴领域，中国的纳米科学都表现出巨大的潜力。但是，机遇与挑战并存。为了对此有更深入的理解，我们采访了中国纳米科研界不同研究方向的专家。

## 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一直沿袭的费托合成的选择性限制，大幅提高了转化效率，并已经成功吸引了多家化工企业，共同开发催化剂制备和工艺过程，将这一原创性成果实现产业化。工业需求的不断增长会继续推动纳米催化剂的发展。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，因为中国在该领域已拥有丰富的专业知识。以纳米结构为基础的催化剂能够加快化学反应，因此在化学或化工产业及炼油行业有广阔的应用前景。例如，中国科学家最近研发了一种新的双功能催化剂，能将煤气化产生的合成气直接转化为低碳烯烃——生产塑料等

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，一个中国研发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

“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：“纳米医药令人兴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。”

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的科学家大多拥有化学或材料科学背景，但动物模型和临床研究的经验相对有限。一位纳米医药专家说：“缺乏生物学和医学知识，是我在研究中面临的最大

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。

“但是对应用研究的投入还是不够。”他所说的应用研究是指以产品商业化为目标的研发工作。在一些研究人员看来，这类应用研究要比基础性纳米研究耗费更多的资金，一项产品或技术的产业化，或生产规模的相应提高可能需要数十亿元人民币。“企业在产品研发和商业化方面占有优势，他们应该参

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

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

实现科技成果转化和产生积极的社会影响是纳米技术发展的目标，但是基础研究仍是应用的立足点与推动力。对大多数供职于大学或科研机构的科学家来说，他们的研究活动还是应该由科学上的好奇心所驱动。因此，当强调以应用为重心的科技创新时，保持基础研究和应用研究之间的平衡就尤为重要。

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

米科研人员所认为的应用研究是转化研究，也就是将实验室的研究结果转化为市场上的产品。然而，就像一些研究者所建议的，或许商业公司应该在缩小产业化与科研之间的差距上发挥领导作用，而“教授的主要职责范围应该仍旧集中于科学研究。”或者，如另一位研究者所说的：“只要你在做好的研究，不必太在意它是基础研究还是应用研究。”

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。”

“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，合作仅限于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，真正意义上的跨领域交流还不够……我们需要组织更多的跨领域交流的论坛，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，以便集中互补性的专业知识，提升研究的效率。尽管私人关系对合作非常重要，但“要想使合作研究真正可持续发展，培养合作的文化至关重要。”他表示，随着人们日益意识到改善研究评估体系的必要性，一些可喜的变化正在慢慢发生。

## 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

我们在采访纳米领域专家的时候，大家都会谈到一个话题：寄望下一代研究者能有更多了不起的想法和灵感，推动纳米科学的创新（所有学科都是如此）。利用好这一珍贵的人才资源，并不仅仅是确保中国的年轻研究者有足够的研究经费，还要为他们的事业发展提供支持，或许更重要的是，让他们能够发出自己的声音并倾听他们的声音。

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在变得日益激烈，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果。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士研究生。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

“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

题。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

起，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。 ■

# 展望未来

50年前，实现对材料世界的纳米级操控似乎还只是幻想。25年前，正在研发工具将这个幻想变为现实的人们甚至也不相信这些工具会在不久的将来催生纳米技术的商业化。如今，机器已能将DNA分子链穿过纳米级宽的孔来进行基因组测序，防晒霜里已有纳米陶瓷粒子阻挡有害紫外线，制造计算机芯片的晶体管也只有10纳米大小，这一切都是很平常的事。

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。

虽然纳米科学由物理学家和化学家创立，但它已逐渐演化成一种在本质上具有跨学科、广泛性、合作性特点的科学领域。其发展速度取决于是否能够吸取各个不同学科的专业知识，也就是取决于物理学家、化学家、生物学家、材料科学家、临床研究者和工程师是否能建立一种共同语言。这意味着研究机构、政策制定者和科研资助机构需要建立并

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库索引。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	<i>Science</i>	Nature Research	<i>Nature Materials</i>
ACS	<i>ACS Nano</i>	Nature Research	<i>Nature Medicine</i>
ACS	<i>Chemistry of Materials</i>	Nature Research	<i>Nature Nanotechnology</i>
ACS	<i>Journal of the American Chemical Society</i>	Nature Research	<i>Nature Photonics</i>
ACS	<i>Nano Letters</i>	Nature Research	<i>Nature Physics</i>
APS	<i>Physical Review Letters</i>	PNAS	<i>PNAS</i>
Elsevier	<i>Biomaterials</i>	RSC	<i>Nanoscale</i>
Elsevier	<i>Materials Today</i>	Springer	<i>Journal of Nanoparticle Research</i>
Elsevier	<i>Nano Energy</i>	Taylor & Francis	<i>Nanotoxicology</i>
Elsevier	<i>Nano Today</i>	Wiley	<i>Advanced Energy Materials</i>
Elsevier	<i>Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine</i>	Wiley	<i>Advanced Functional Materials</i>
Nature Research	<i>Nature</i>	Wiley	<i>Advanced Healthcare Materials</i>
Nature Research	<i>Nature Chemistry</i>	Wiley	<i>Advanced Materials</i>
Nature Research	<i>Nature Communications</i>	Wiley	<i>Angewandte Chemie International Edition</i>
Nature Research	<i>Nature Energy</i>	Wiley	<i>Small</i>



2017年8月



[english.nanocr.cas.cn](http://english.nanocr.cas.cn)

 中国科学院文献情报中心  
National Science Library, Chinese Academy of Sciences

[english.las.cas.cn](http://english.las.cas.cn)

**SPRINGER NATURE**

[www.springernature.com](http://www.springernature.com)