

纳米科学与  
技术发展概况

# 前路有光 以微见长

*Produced by Springer Nature and  
supported by National Center for Nanoscience and Technology*



**SPRINGER NATURE**

## [序]



# 白春礼

中国科学院院长

## 格物惟勤 积微成著

纳米科学汇聚了化学、物理、生物、材料等多学科领域在纳米尺度的焦点科学问题，已经逐步成为集交叉性、引领性和支撑性的前沿研究领域。纳米科技的发展深刻影响了现代科学的进程，成为支撑多学科发展的重要引擎；纳米科技在能源环境、生物医药、信息器件和绿色制造等领域的应用日益凸显，成为变革性产业制造技术产生的重要源头。过去近二十年中，世界各国和科学组织相继发布和实施纳米科技研究和发​​展计划，极大推动了纳米科技的全面和快速发展。得益于对纳米科技领域的持续重视，中国正成为推动纳米科技发展的核心力量之一。

由国家纳米科学中心提供专业支持，施普林格·自然集团独立编制的报告《纳米科学与技术：现状与展望 2019》，从高水平研究论文、专利索引、重点学科和技术发展领域、可持续发展问题等视角，使用大数据分析和可视化方法，结合专家观点和解读，全面详细地揭示了近年来世界纳米科技的发展现状。在文献计量和引文分析的基础上，报告充分融合了纳米科技前沿研究领域同行们的专业判断。报告显示：在世界范围内，纳米科技正持续快速地发展，对人类社会生活已经逐步产生了巨大影响；纳米科技对物理、化学、材料、生命科学等基础学科具有重要的引领作用；纳米科技的应用领域和范围不断扩大，对产业技术的支撑作用显著增强；跟其他科学技术一样，纳米科技的飞速发展也有可能带来新的环境、健康、和安全等问题，对于其不确定性和潜在的风险必须给予持续的关注和研究。然而，这也正好是纳米科技发展模式不同于以前科学技术的“先发展后治理”模式的重要之处，纳米科技从发展初期就非常重视其对环境、健康、和安全可能带来的潜在影响，因此，纳米科技有可能成为人类在大规模使用之前就已经高度重视其潜在负面影响并开展系统研究的第一个科技领域。

我们知道：纳米科技的未来取决于其对全球可持续发展的实际贡献。我们需要进一步加强纳米科技领域的基础研究，夯实纳米科技发展的基础；进一步加强对产业技术领域的核心贡献，从而更大程度地满足能源环境、健康安全、先进制造和人工智能等领域的重大迫切需求。为此，我们需要开展更加广泛和有效的全球合作，支持促进纳米技术产业链与价值链的构建和完善。我们衷心希望，通过全球纳米科技工作者的共同努力，纳米科技在基础研究方面实现更多的突破，在产业技术创新方面产生更大范围的影响，并最终全面造福人类社会。■

# 芥子须弥

## 好

东西不在个大。这句谚语用在纳米科学技术领域真是再贴切不过了。纳米科技的尺度在十亿分之一米，比人类的头发丝还细，这种极小尺度上的科技对医学和量子计算等众多领域都有巨大的影响。

“纳米技术”一词最初是由谷口纪男（Norio Taniguchi）在1974年开始使用的。然而，它背后的概念却可以追溯到更早。费曼在其1959年的著名演讲——“底部还有很大空间”中就描述了一个在微观层面控制物质的领域，预见到了纳米技术的前景。而更早之前，中世纪的彩绘玻璃，以及远至公元4世纪的古罗马的卢奇格斯杯也用到了纳米尺度的材料。该领域的突破性时刻是在1981年，当时扫描隧道显微镜的发展让科学家们能看到单个原子。

自此之后，科学家们已经制造出了纳米颗粒、纳米点、纳米管、纳米线、纳米墙和纳米片，甚至是纳米海胆。他们利用这些结构制造了场效应发射器、生物传感器和太阳能电池，也开发出了基于纳米颗粒的癌症疗法，以及用于水净化的纳米结构膜。纳米技

术已经逐渐成为我们日常生活的一部分，包括很多我们意想不到的地方，比如应用于防晒霜、抗皱衣物甚至高尔夫球杆。事实上，预计到2024年，全球纳米技术市场规模将超过1250亿美元<sup>1</sup>。

与此同时，纳米科学日益成为一个跨学科领域。在政府的大力扶持下，纳米科学研究产出不断增长。例如，美国于2001年启动了国家纳米技术计划（NNI），至今已累计投入约270亿美元<sup>2</sup>。类似地，中国也早已意识到发展纳米科学与技术的重要性，并且资助了若干重大纳米研究项目。本报告将以文献数据为支撑，辅以专家访谈，介绍纳米科学和技术的研究现状，并重点关注中国的表现。

在报告的第二章，我们将使用来自Digital Science的Dimensions数据库和施普林格·自然集团的自然指数（NI），进行文献计量分析，展现纳米科学和技术对基础科学的贡献。Dimensions数据库包含有关出版物、经费和临床试验的数据；自然指数则追踪了82本独立评选出的高质量科学期刊所发表的原始研究论文。

在报告的第三章，我们将继续沿着这些思路进行分析，并比较中国、美国、英国、日本、韩国、德国、法国和澳大利亚的纳米技术研究竞争力。

在报告的第四章，我们使用了施普林格·自然集团旗下的Nano——一个全面收集纳米材料数据、专利和文献的数据库，来探索流行的纳米结构和新兴应用。

我们还补充了对纳米合成、纳米表征、纳米医学和诊断、纳米材料的能源应用、纳米技术和环境、以及纳米器件等领域的国内外专家的采访。专家们帮助阐述了这些研究领域的最新发展情况、必须克服的挑战，以及他们对未来的发展展望。

最后，我们对所得发现进行了总结，并讨论了纳米科学和技术在全球可持续发展目标、经济发展和环境保护中发挥的作用。■

1. 参见 <https://www.researchandmarkets.com/reports/4520812/global-nanotechnology-market-by-component-and>  
2. 参见 <https://www.nano.gov/about-nni/what/funding>

# 纳米技术对于基础科学的重要性

作为对纳米尺度物质的研究，纳米科学是一门交叉学科，并已渗透到了化学、物理学、生物学和生命科学等众多领域，在推动基础科学进步中所起的作用越来越大。为了了解纳米科学对基础科学的贡献，我们分析了自然指数追

踪的高质量论文来检验纳米科学在四个主要自然科学领域——化学、材料学、物理科学及生命科学领域的研究产出和增长情况。此外，我们还分析了 Digital Science 的 Dimensions 数据库追踪的出版物数据，以获得更全面的见解。

## 纳米科学领域高质量出版物的增长

自然指数追踪的是在 82 种高质量科学期刊上发表的原始研究论文。利用论文摘要、标题和全文关键字搜索，可以查找到 2012 年至 2018 年间发表的纳米科学和纳米技术相关论文。

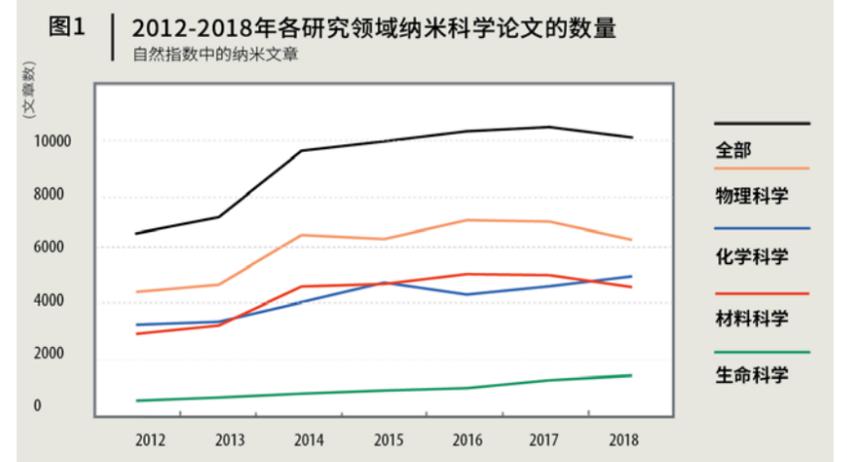
© POBYTOV/GETTY IMAGES

从 2012 年到 2018 年，自然指数中的纳米论文总数从约 6900 篇增加到 10500 篇左右，年复合增长率 (CAGR) 为 7.3% (图 1)，增长速度明显高于自然指数中所有原始研究论文的整体增长水平。同期，后者数量由约 57500 篇增加到 59600 篇左右，增幅仅 3.7%。这表明纳米科学研究论文之所以有此增长，并不是简单地因为自然指数追踪的高质量论文增加了。

在 2012 年至 2018 年间，纳米科学出版物的最大增幅出现在 2014 年，同比增加 33%。自那之后，增速趋于平稳，2018 年略微下降。2014 年同时伴随着石墨烯文章增加 25% 以及纳米管文章增加 22%。在自然指数追踪的期刊中，探讨石墨烯的文章从 2012 年的 1900 篇左右猛增到了 2018 年的 3500 多篇，最大增幅也出现在 2014 年 (图 2)。纳米管文章数量的增速逊色于石墨烯，但从 2012 年到 2018 年稳步增长，也因此使 2014 年 22% 的增速显得尤为突出。

此外，在 2014 年初，一篇报道用黑磷薄晶体制造晶体管的论文发表，获得了大量引用，推动了对包括二维磷烯在内的二维材料的进一步研究<sup>1</sup>。

如第四章所示，根据对 Nano 数据库的分析，2014 年讨论能储的论文同比增长 40%，尤其是讨论太阳能电池的论文同比增加逾 2000 篇，是过去 10 年增幅最大的



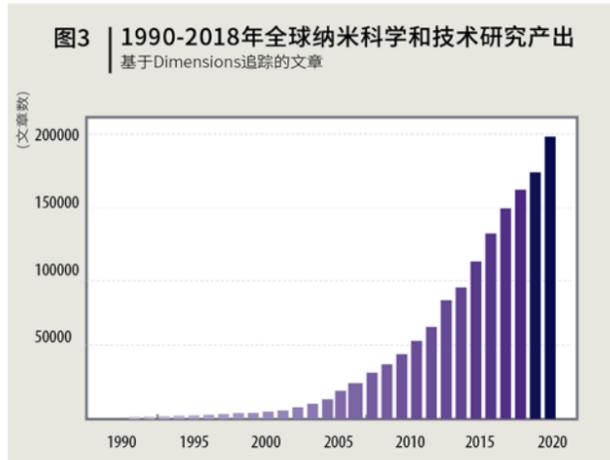
一次。2013 年和 2014 年左右，若干有关钙钛矿太阳能电池的高引论文发表出来，这种电池具有高能量转化率，使钙钛矿材料获得了更多关注，进一步推动了太阳能电池技术的研究。

基于自然指数现有的期刊分组，纳米相关的原始研究论文可以分为三大宽泛研究领域：化学、物理科学和生命科学<sup>2</sup>。此外，自然指数追踪的部分材料科学期刊内的原始研究论文，以及使用研究领域(FoR)代码在自然指数的其它期刊中检索出的部分研究论文被归类为材料科学论文(有关此方法的详细说明，请参见附录)。

在四大研究领域中，物理科学领域的纳米论文数量最多 (图 1)。这是因为几乎所有的材料科学论文和许多化学论文，根据定义都可以归类为物理科学。需注意的是，生命科学领域的纳米论文虽然是四大领域中数量最少的，但从 2012 年的约 610 篇增加到了 2018 年的

1560 篇左右，翻了一倍有余。生命科学是四大研究领域增速最快的，年复合增长率达到 17%，也是唯一一个纳米论文数量持续增长的研究领域。究其原因，这得益于纳米医学和纳米诊断研究的蓬勃发展，如纳米材料在药物递送中的广泛应用。

材料科学领域的纳米论文增速位居第二，从 2012 年至 2018 年，数量增加了 57%，年复合增长率为 7.8%。在 2014 年、2016 年及 2017 年，它超越了化学。材料科学纳米论文的增长曲线和纳米相关的物理科学论文增长曲线非常相似，这表明与纳米科学相关的物理科学论文的增长，在很大程度上受到材料科学论文的影响，因为材料科学是物理科学的一个子学科。如前所述，二维材料(如石墨烯和磷烯)研究的蓬勃发展可能是 2014 年相关论文数量激增背后的原因。此外，从 Nano 数据库中的发表数据可以看出，关于石墨烯量子效应



的研究在 2014 年左右同样出现了增长,这可能是物理科学纳米论文,尤其是讨论电子器件应用的论文同期激增的原因。

化学科学中的纳米科学论文数量与材料科学的相似。这再次印证了纳米科技的跨学科性质。例如,材料化学专注于使用化学方法设计和合成材料,是材料科学的一个关键的子领域,因此这两个领域之间存在明显的重叠。纳米相关的化学科学论文数量从 2012 年的约 3470 篇增加到 2015 年的 5060 篇左右,但在 2016 年出现下降。自那之后再次增长,并在 2018 年以约 5300 篇的数量,超过了材料科学论文。

Digital Science 的 Dimensions 是一个将出版物、经费、专利和其他相关信息整合起来的研究数据平台,在上面可以了解纳米科学研究发展的长期概况。据该数据显示,1990 年纳米科学论文<sup>3</sup>不到 1500 篇,2018 年则增加到

20 多万篇,增长了 130 多倍(图 3)。九十年代是稳定增长时期,这主要得益于纳米科学取得了关键进展。这是碳纳米管和晶体半导体纳米线初步发展的十年,当时首次报道的研究成果包括 STM 技术运用于原子操纵,以及受激发射损耗显微镜技术。随着 2004 年石墨烯的分离和 2006 年 DNA 折纸技术的发展,纳米科学出版物在 21 世纪的前 10 年加速增长,论文数量从 2000 年的略高于 6000 篇增加到 2010 年的近 67000 篇,增长约 10 倍,年复合增长率为 27%,堪称纳米科学研究发展最快的 10 年。

经过这段高速增长期,纳米科学研究产出增速开始放缓,2010 年到 2018 年的年复合增长率为 15%。这在一定程度上得益于纳米科学论文不仅限于材料和化学领域,已进一步扩展到生命科学领域。

### 纳米科学和技术在基础研究中扮演着越来越重要的角色

为了更详细地了解纳米科学和技术在不同研究领域扮演的角色,我们还使用了自然指数数据来计算一个研究领域里所有高质量论文中纳米科学和技术相关论文的比重。

从 2012 年到 2018 年,共有近 67000 篇原始研究论文与纳米科学相关,占同期自然指数期刊出版的所有文章的 16%。这一数字上升迅速,从 2012 年的 12%,增加到 2017 年的 19%,但在 2018 年又有小幅下降(图 4)。下降原因可能与如图 1 所示的 2018 年纳米相关的物理科学研究,或者更具体地说,材料科学纳米论文的减少有关。

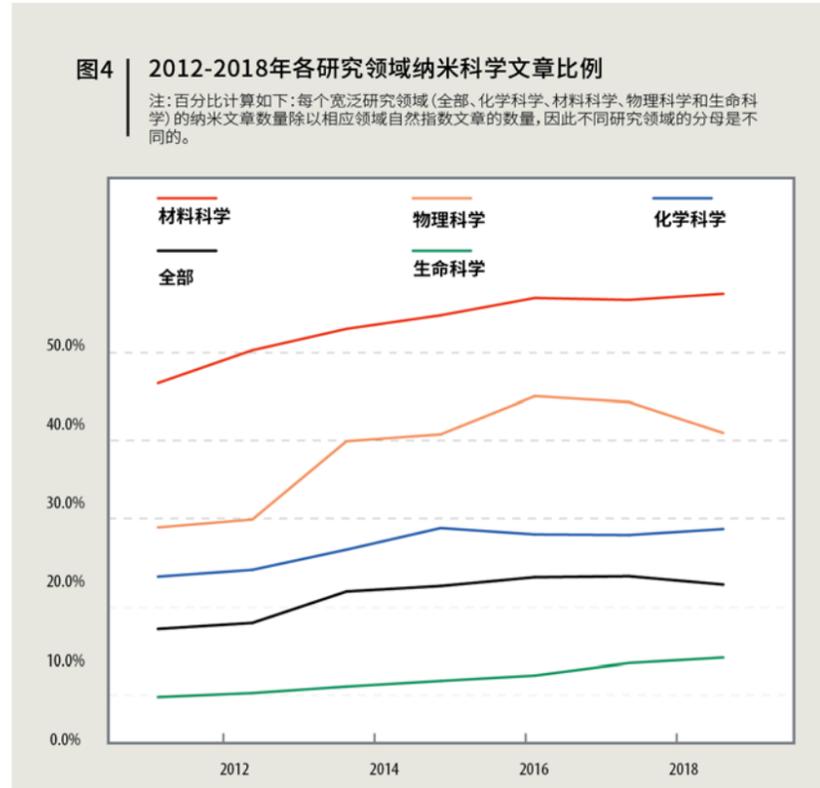
未出所料的是,纳米相关文章的占比在材料科学领域中最高的,其次是物理科学、化学和生命科学领域(图 4)。总体来说,在 2012 年至 2018 年期间发表的高质量材料科学论文中,超过一半(51%)与纳米科学相关。逐年比较可见,

这一数字稳步上升,从 2012 年的 43% 增加到 2018 年的 54%,表明纳米科学和技术在塑造该领域发展方面扮演着越来越重要的角色。

在 2012 年至 2018 年发表的高质量物理科学论文中,超过 1/3 与纳米科学相关,在四大研究领域排名第二。使用了纳米科学和技术的物理科学论文比例从 2012 年的 25%,持续增长到 2016 年的 42%,自那之后有所回落(图 4)。和物理科学论文中纳米相关文章的数量一样,其占比的最大增幅也出现在 2014 年,这可能是因为上文提到的二维材料及纳米器件相关应用的研究增加了。

需注意,物理科学的纳米文章比例低于材料科学领域,而在纳米科学相关文章数量上,物理科学的绝对贡献更大。原因很简单,材料科学在自然指数中是比物理科学小的领域。物理科学覆盖从高能物理到地质力学的广泛学科,包含的文章更多,因此放大了与纳米相关的物理科学论文的数量。

化学科学领域与纳米科学和技术相关的论文比例从 2012 年的 19% 增加到了 2015 年的 25%,自那之后小幅下降。虽然化学领域的纳米相关论文数量和材料科学领域相去无几,但比例远低于材料科学领域。这是因为化学是比材料科学更大的领域,2012 年至 2018 年期间在自然指数期刊中发表的论文更多。纳米科学



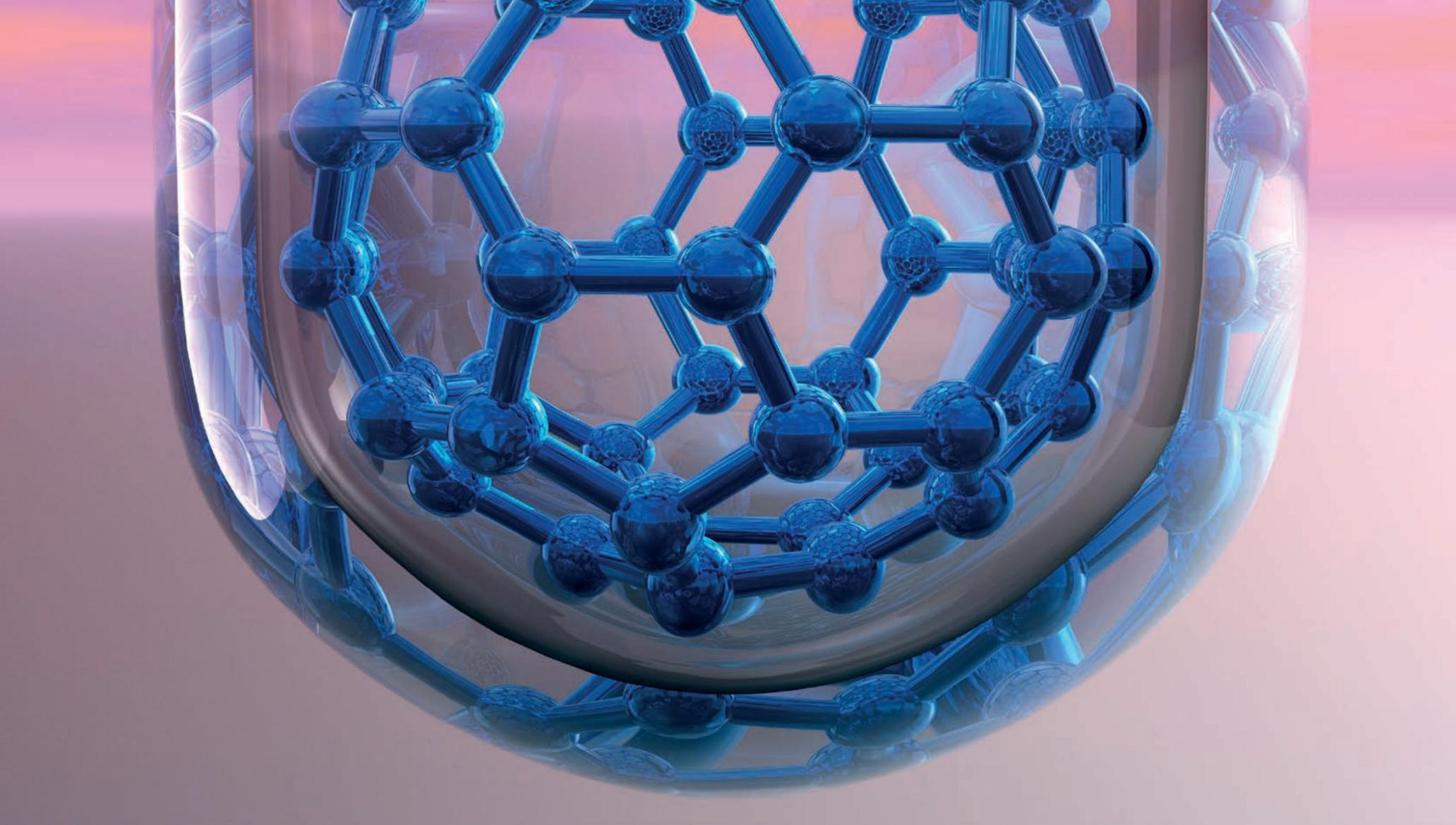
和技术论文占化学科学研究产出的 1/5 以上,对化学领域的贡献仍然很大。

至于 2012 年至 2018 年发表的生命科学论文,与纳米科学和技术相关的比例相对较小,但增长稳定——从 2012 年的 3.5% 增长到 2018 年的 8.4%,表明纳米科学和技术在生命科学领域,尤其是生物医药领域,扮演着越来越重要的角色。

总体来说,作为一个宽泛的研究领域,物理科学在纳米科学研究产出中所占的数量和比例都是最大的。但在考虑到研究领域规模后,我们看到纳米科学和技术在材料科学中占据着主导地位,这一点体

现在使用纳米科学和技术的材料科学论文比例在不断扩大。纳米科学和技术对生命科学研究产出的贡献虽然看起来较小,但增长稳定。这一趋势表明纳米科学的交叉学科性质越来越明显,促进了多重基础科学领域的发展。■

1. 参见 Li, Likai; Yu, Yijun; Jun Ye, Guo; Ge, Qingqin; Ou, Xuedong; Wu, Hua; Zhang, Yuanbo (2014). "Black Phosphorus Field Effect Transistors". *Nature Nanotechnology*. 9 (5): 372–377.
2. 有关各宽泛研究领域的期刊列表,请参阅 <https://www.natureindex.com/faq#subjects>, 或参阅自然指数期刊分组附录。
3. 注意: Dimensions 数据库中的期刊出版物不仅包括原始研究论文,也包括观点、综述和一部分期刊的新闻和评论文章。尽管 Dimensions 中的少量纳米相关文章并非严格意义上的原始研究论文,但所有这些出版物都反映了该领域的发展。



# 纳米科学与技术研究产出的跨国比较

从 20 世纪 90 年代全球每年仅发表几千篇纳米相关论文，到如今的几十万篇论文，各主要科研大国发表的有关纳米科学的研究成果日益增多，这也证明纳米科学与技术正在成为诸多科研大国的研究重点。

为了确定各国纳米科学研究的生长模式，了解他们的竞争优势，我们使用 Dimensions 和自然指数数据进行了跨国比较。同时，我

们还确定对纳米科学研究增长作出主要研究产出贡献的机构。

## 纳米科学研究的跨国纵向比较

我们利用 Digital Science 的 Dimensions 数据库，比较了中国、美国、日本、德国、韩国、英国、法国、澳大利亚等八个纳米科学研究大国在 1990 年到 2018 年间的纳米科学出版物的增长情况。

根据 Dimensions 追踪的论文发表数据，由于纳米科学的蓬勃发

展，从 1990 年到 2018 年，以上八个国家的纳米科学论文发表数量均出现了增长，其中以中国的增长最为明显，中国的纳米科学期刊论文数量从 1990 年的区区 14 篇增加到 2018 年的约 70600 篇，年复合增长率（CAGR）达 36%（图 5）。真正的腾飞则发生在 21 世纪的头十年。从 2010 年到 2018 年，中国的纳米论文数量增加了逾五万八千篇。2011 年，中国的纳米科学研究产出跃居世界第一位，从 2012 年开始大幅超越其他国家。

中国的高速增长可归因于政府的大力支持——研究资助不断增加。早在 20 世纪 90 年代，中国国家自然科学基金委便资助了近 1000 个小型纳米科学项目<sup>1</sup>。2000 年左右，中国科技部资助了一项国家级纳米材料与纳米结构基础研究项目，为该领域的研究提供了稳定的资金支持。凭借持续的研究资助，未来几十年，中国在纳米科学研究领域的领先优势有望继续扩大。

韩国是纳米科学研究产出方面的另一颗新星。韩国发表的纳米科学论文数量从 1990 年的 8 篇增加到 2018 年的逾 10600 篇，年复合增长率达 30%。在 20 世纪 90 年代的大部分时间里，韩国一度在八个国家中排名最后，但在 2012 年超越日本，成为纳米科学研究产出的第四大国，仅次于德国。

在 1990 年至 2018 年的大部分

时间里，澳大利亚的纳米科学研究产出在我们所分析的国家中，徘徊在第七或第八的位置，但是其年复合增长率达 22%，排名第三，这主要是因为其基数较低。类似地，美国的纳米科学研究产出年复合增长率为 18%，在八个国家中排名第四。这一增速未能阻止美国在 2011 年被中国超越，降为纳米科学的第二大贡献者，其这一地位一直维持至今。

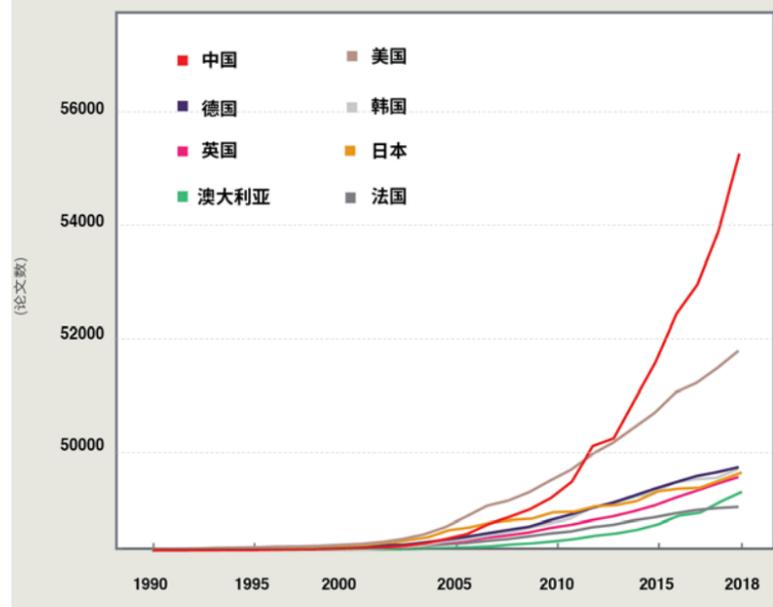
## 高质量纳米科学论文的跨国比较

为了更深入地了解科研大国的高质量纳米科学和技术研究产出的近期增长趋势，我们使用自然指数数据来比较这八个国家从 2012 年到 2018 年发表的纳米相关论文数量。

以发表在高质量期刊上的纳米科学论文计，美国从 2012 年到 2017 年一直保持领先地位（图 6），同期高质量论文数量由 3070 篇增长了 43%，达到近 4400 篇。但在 2018 年，这一数字降至 4000 出头，并首次被中国超越。

虽然 2011 年中国的纳米科学出版物数量就已超越美国，但在高质量纳米科学研究方面，中国在 2012 年至 2017 年期间仍与美国有一定的差距。不过，在这八个国家中，中国的高质量纳米科学研究产出的增长率仍是最高。中国的纳米相关论文数量从 2012 年的约 1300 篇增至 2018 年的逾

图5 | 1990-2018年各国的纳米科学研究产出比较



4100 篇，年复合增长率达 21%。2018 年，中国超越美国，成为高质量纳米科学研究的引领者，未来中国将延续这一领导地位。

中国和美国都遥遥领先于其他国家。德国追随其后，在 2012 年至 2018 年间排名第三。其高质量的纳米科学期刊论文从 2012 年的 885 篇增至 2018 年的约 1350 篇，年复合增长率为 7%。英国紧随其后，位居第四，其增长模式（年复合增长率为 10%）与德国非常相似。他们的增长率（以年复合增长率计算）虽然高于美国，但与中国的相比很平缓。

韩国紧随英国之后，排在第五位。但是自 2016 年以来，韩国的高质量纳米科学论文有所减少，落后于日本。这一结果表明，韩国在提高纳米科学研究产出数量的同时，

也应注重提高研究质量。2012 年至 2018 年间，法国和澳大利亚在纳米科学的高质量研究产出方面，分别保持在第七位和第八位。

由于国际合作中产生的论文可以算作多个国家的研究产出，因此我们还采用分数式计量 (FC) 方式，对纳米科学和技术的高质量研究产出进行了比较。FC 考虑了每篇文章中来自一个机构（或国家）的作者的比例和附属机构（或国家）的数量，而且视所有作者对这篇文章的贡献是平等的。

使用 FC 衡量时，上述八个国家的高质量纳米科学研究大体呈现出与论文计数相似的增长模式。但是，有一些差异值得关注。美国的 FC 峰值出现在 2014 年，而不是 2017 年，并且在 2014 年到 2016 年间，美国的纳米相关研究

产出的 FC 略有下降 (图 7)。这表明美国在这一时期在纳米研究产出方面有更高程度的国际合作。

此外，按照 FC 计算，中国在 2018 年大幅领先于美国，这可能也是美国在那一年国际合作较多的结果。这或许也可以解读为，与美国相比，中国的纳米科学研究产出对内部资源的依赖性更强。

按照 FC 计算，德国的纳米科学研究产出仍然排在第三位。而在 2012 年至 2017 年，韩国一直排在第四位，直到 2018 年才被英国超越。2014 - 2016 年间，英国的纳米研究产出也低于日本，这表明与日韩这两个亚洲国家相比，英国在纳米研究方面开展了更多的国际合作。

按照 FC 计算，法国和澳大利亚的纳米科学研究产出仍分别保持在第七位和第八位。但由于在高质量纳米科学研究产出方面国际合作水平比较高，它们与其他国家之间的差距略有扩大。

### 领先的纳米科学研究机构

根据自然指数数据，确定了高质量纳米科学研究产出排名前 100 位的机构，其中大多数来自美国和中国这两个纳米科学研究大国。2018 年，按照 FC 计算，在纳米相关研究产出最高的 100 所机构中，有 33 所来自中国，30 所来自美国，7 所来自韩国，6 所来自德国，5 所来自日本。在前 100 所机构中，上述八个国家占了 88%。

图6 | 2012-2018年各国高质量的纳米科学研究产出 (基于论文计数)

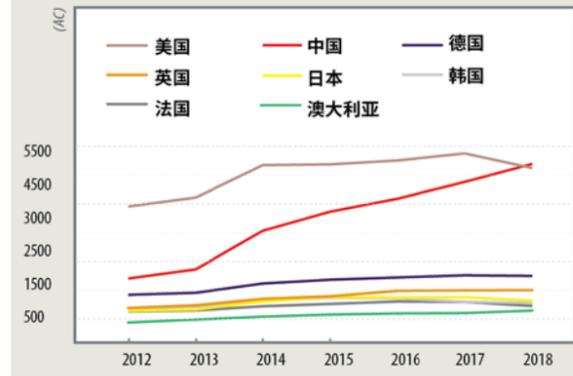


图7 | 2012-2018年各国的高质量纳米科学研究产出 (基于FC)

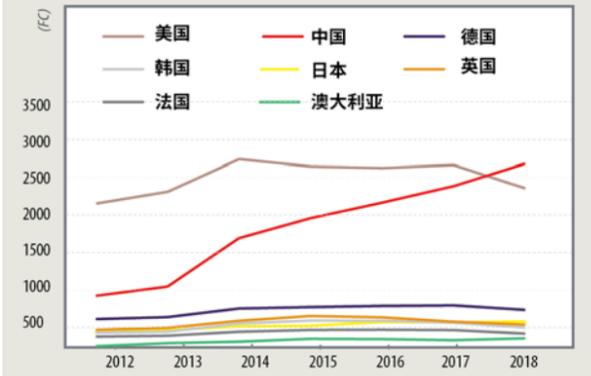
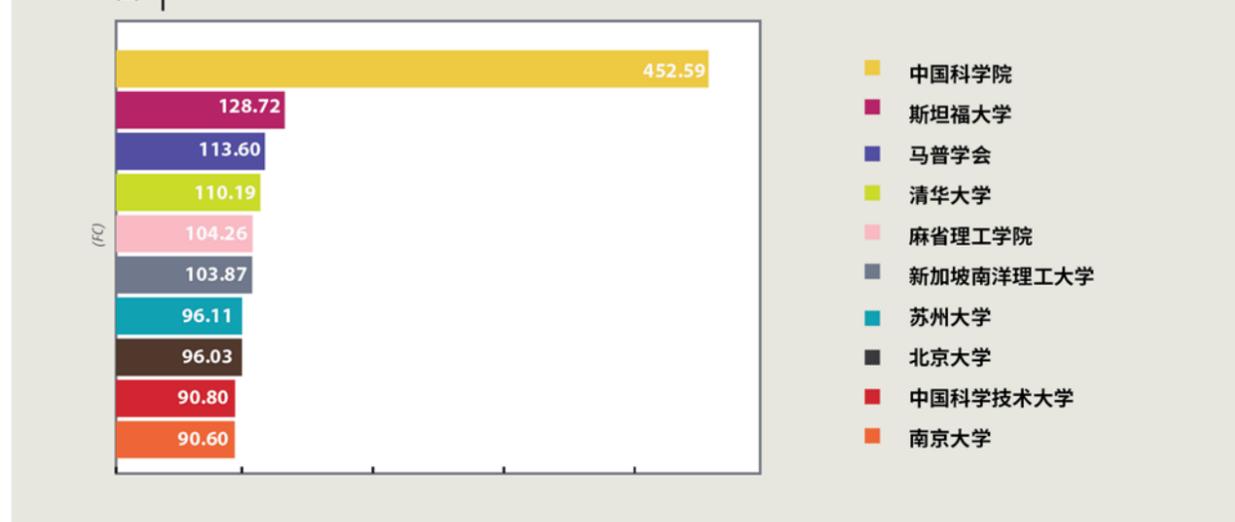


图8 | 2018年纳米科学相关研究产出名列前茅的机构



而在全球排名前十的机构中，中国囊括了其中 6 席，主导地位显而易见 (图 8)。中国科学院 (CAS)，包括其所有的下属研究所和国家重点实验室在内，其纳米相关研究的 FC 排名第一，远远领先于前十大机构中的其他机构。虽然这在一定程度上可能是因为中科院规模庞大，但是它在高质量研究产出方面的排名也确实彰显了自身的实力。

美国斯坦福大学是 2018 年高质

量纳米科学研究产出排名第二的机构。它的 FC 不到中科院的三分之一，考虑到两者的规模差异，这并不奇怪。紧随斯坦福大学之后的是德国的马克斯·普朗克学会 (Max Planck Society)，与中科院一样，该学会也包括了它所有旗下的研究中心和研究所。德国马普学会是唯一进入前十名的欧洲机构。

另一个跻身前十的美国机构是麻省理工学院 (MIT)，其纳米相关

研究产出的 FC 排名第五。紧随其后的是新加坡南洋理工大学。

整体而言，全球比较的结果表明，美国和中国在纳米科学和技术研究领域，包括高质量的研究产出，处于领先地位，而中国的增长尤其明显。■

1. 参见 Bai, Chunli. Ascent of Nanoscience in China. *Science* 2005, 309: 61-63.

# 纳米科学和技术在产业化应用中的优良前景

从纳米片到纳米管，纳米材料有着众多的物理形式与种类，因此也具有各种不同的用途，它们可以用作能源转化中的催化剂，也可以用作电子设备中的纳米器件。这些纳米材料展现出在各种产业领域中的巨大应用潜力，但很多纳米技术的商业化以及纳米材料的大规模生产仍然存在着挑战。

本报告利用 Nano 数据库，获取热门的纳米结构和纳米相关应用信息，评估特定纳米科技领域的发展现状。通过采访中国和国际知名纳米科技专家，进一步增强对特定研究领域的研发趋势的理解，包括值得探寻的新机遇，以及研发中面临的挑战。

## 基于 Nano 数据库的见解

为了识别出经常被研究的热门纳米结构和方兴未艾的新应用，我们将目光转向了 Nano 数据库，这是由施普林格·自然开发的一个综合性数据

平台，用以帮助研究者追踪最新的纳米科技研究成果。这个数据库囊括了数千种纳米材料和器件的详细性质、应用以及合成方法，它们全部来自于经同行评议的纳米科技相关期刊论文。Nano 数据库也包含纳米相关专利信息，这也有助于我们进行分析。

## 热门纳米结构

根据对 2010 年至 2018 年的 Nano 数据库信息的分析，当时最常被研究的纳米结构类型是纳米颗粒。在此期间，有超过 270900 篇期刊论文引用了它们。纳米颗粒相关的论文发表数量从 2010 年的 13000 篇左右增加到 2018 年的近 40000 篇，增长了两倍有余（见图 9）。

另一种热门的纳米材料是石墨烯。直到 2004 年石墨烯被从石墨中首次分离出来后，它才得到了大量关注。2010 年，Nano 数据库只追踪到了 2100 多篇研究石墨烯相关的论文，

但是在 2014 年猛增到 10000 多篇，2018 年更是达到了 21000 多篇，在不到十年的时间里，石墨烯论文的数量增长了近 10 倍（见图 9）。

其他纳米材料，如纳米片、纳米线和纳米晶体，也日益受欢迎。2010 年，Nano 数据库追踪到的纳米片研究论文数量仅略多于 800 篇，但在 2018 年增加到了 11000 篇以上。类似地，研究纳米线和纳米晶体的论文数量出现大幅增长，都从 2010 年的约 3800 篇增加到了 2018 年的略低于 10500 篇（见图 9）。

在专利申请方面，基于 Nano 数据库的分析结果基本与研究产出趋势相符。热门的纳米结构包括纳米颗粒、石墨烯、量子点、纳米线以及

纳米晶体。

和研究产出趋势一样，Nano 数据库中的纳米科技专利以纳米颗粒为主。这主要是因为纳米颗粒技术比其他应用更加成熟，蕴含的机会非常可观。潜在应用包括药物递送、医学成像、健康消费品，甚至包括环境方面的应用，如水处理，以及空气或土壤修复。

纳米颗粒相关的专利数从 2010 年的 30000 件增加到了 2014 年的 36000 多件。这之后的纳米颗粒专利数出现小幅下降，2017 年降到了约 27000 件，2018 年更是继续降低到了仅 14000 件出头（见图 10）。2017 和 2018 年的数量下降，可能是由于专利保密期所导致的数据不完

全带来的假象。因此，我们只着重分析 2010 年至 2016 年的专利数据。

同期，石墨烯相关的专利数也持续保持着高增速，从 2010 年的 5400 多件增加到了 2016 年的近 24000 件（见图 10）。虽然由于数据不完全使得 2017 和 2018 年的专利数有一定下滑，但 2018 年的石墨烯专利数也比同年度的纳米颗粒专利数要多。这在一定程度上是因为研究产出增加，而且石墨烯在产业应用中的潜力得到认可，比如可以增强能源产业中的锂电池，促进电子产业中超级电容器和计算机芯片的发展。

石墨烯相关专利的增长也得益于产能的增长，尤其是在中国。根据中国石墨烯产业技术创新战略联盟

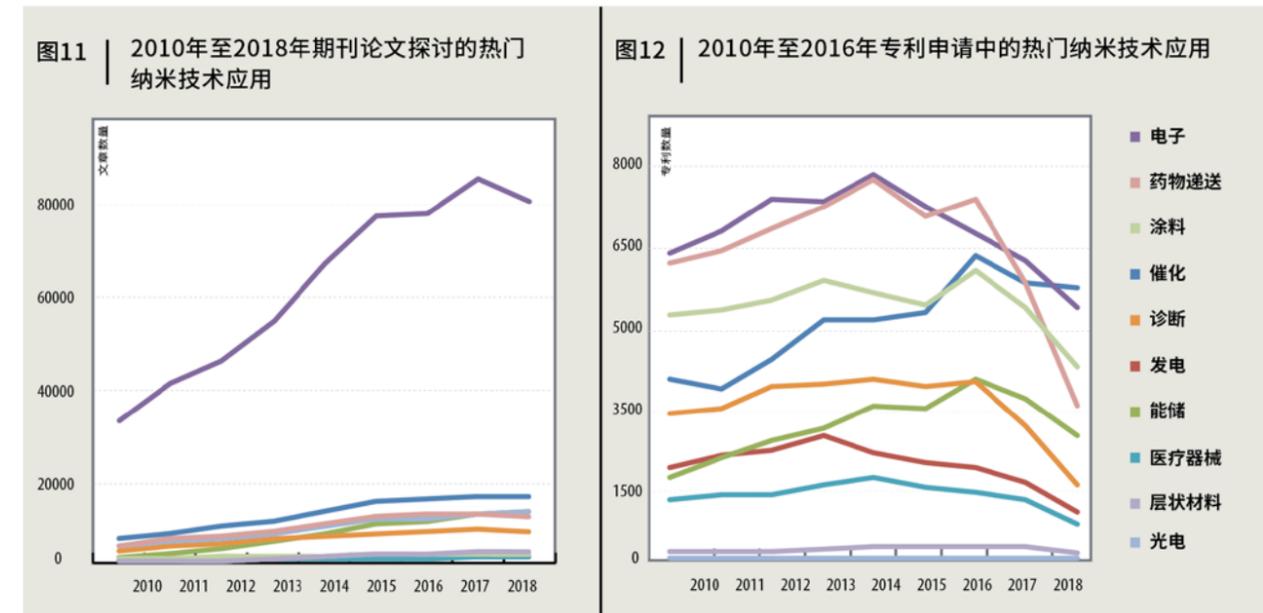
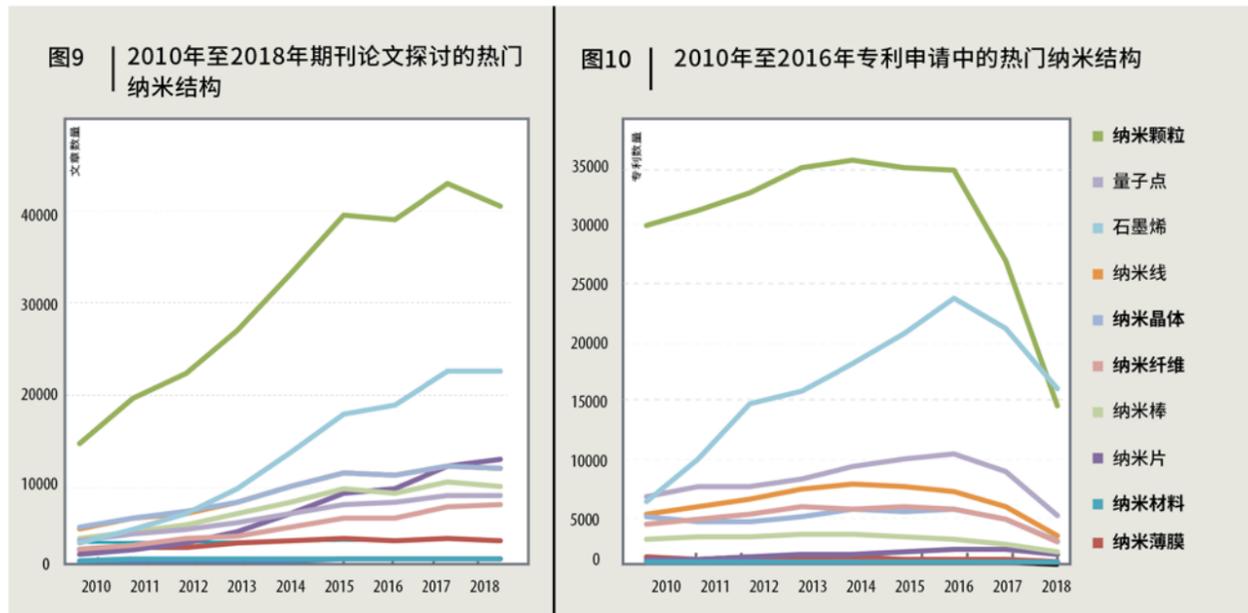
发布的《2017 全球石墨烯产业研究报告》，中国在石墨烯技术的专利申请数上排名第一，同时中国也拥有全球最多的石墨烯生产商<sup>1</sup>。

2012 年至 2016 年，其他富有前景的技术的数量也稳定增长。基于量子点和纳米线的专利数也在快速增长，不过增速不像石墨烯那么快。从 2010 年到 2016 年，量子点专利数增加了 63%，纳米线专利数增加了 48%。纳米片相关的专利数量从 2010 年的不到 300 件增加到了 2016 年的约 1300 件。这与在纳米片论文数量的快速增长趋势基本一致。

## 纳米材料的热门应用

Nano 数据库也追踪研究论文中讨论的各种纳米材料的应用。根据 2010 年到 2018 年所发表的论文，可以发现纳米材料的热门应用包括电子器件、催化、药物递送、光电子器件以及储能。探究电子器件应用的论文数远超过其他的热门应用，相关论文数从 2010 年的不到 31700 篇增加到 2017 年的 86000 篇以上，增长逾 170%（见图 11）。虽然这一数字在 2018 年回落到了 82000 篇以下，但以相关研究产出衡量，电子器件依然是最热门的纳米技术应用。

在 2010 到 2018 年发表的论文中，纳米催化是得到讨论第二多的应用领域。与之相关的研究从 2010 年的约 5000 篇增长到了 2017 年的 15000 多篇，但相关论文数量在 2018 年略微下降到了



15000 以下（见图 11）。

2010 年到 2018 年间，以纳米技术相关的论文数量计算，药物递送是第三热门的应用，从 2010 年的 3700 多篇到 2017 年的 11000 多篇，增长了近 2 倍。2018 年，相关论文数小幅降至 11000 篇以下。基于 2010 年到 2018 年的论文发表总数分析，紧追其后处于第四位的是光电子器件的纳米技术应用（见图 11）。

从增长领域看，2010 年到 2018 年间，与能源应用相关的纳米科技研究产出是所有热门应用中增长最快的。讨论储能的纳米技术论文数量从 2010 年的约 1200 篇增加到了 2018 年的略少于 12000 篇（见图 11）。与层状材料、医疗设备和光电子器件相关的研究产出均出现显著增长，但是不及储能相关论文的增速。

通过分析专利数据，可以发现热门的纳米应用领域包括电子器

件、药物递送、涂料、催化和诊断（见图 12）。虽然与电子器件相关的纳米专利数量和同类的纳米论文数量一样排名第一，但是药物递送和诊断这类生物学相关的纳米专利申请数也十分可观。这体现了对医疗健康领域应用的集中关注，以及生物医疗产业对技术创新的显著需求。

与催化有关的专利数量也很多，但像储能和发电这类能源相关的专利申请数比诊断和涂料的专利数要少。这表明纳米技术在涂料和生物医疗产业中的应用比在能源产业中更加常见。但考虑到讨论纳米技术在储能和发电中应用的论文数量很多，纳米技术在能源应用方面的专利申请潜力也应当很高。

### 专业洞见

通过访谈和文献综述，获得业内专

家的看法，能促进我们对于纳米科技在不同产业中的应用前景的认识。从纳米电子器件和纳米能源材料，到纳米医学和微纳米加工，本报告探讨了各种纳米技术领域内的最新精彩进展，以及这些研究领域中的挑战和机遇。

### 纳米合成

据预测，纳米材料市场将会在 2022 年到达 550 亿美元的规模<sup>2</sup>。为了实现基于纳米技术设备的潜力，科学家和工程师们必须能够在高精度和高可重复性下制造所需的纳米材料。这个领域的一些主要挑战包括可重复性，可控的化学成分、结构以及颗粒尺寸。

合成和 / 或制造过程也必须具有商业可行性。“想要在这个世界上促成一些变化，你需要能在宏观规模上量产纳米材料。”一位研究者解释道。

“室温或者是稍高温度的软化

学方法是最具潜力的规模化生产纳米材料的方法。”一位专家称。其他一些已有眉目的二维材料合成法包括选择性蚀刻和拓扑化学制备法。

如上文计量分析所示，在 2004 年成功分离出具有奇异物理、光学和电学特性的石墨烯之后，二维材料获得了强烈的关注。其他的二维材料包括硫化钼和其他的过渡金属硫族化物、硅烯（类似石墨烯结构的硅单质）、六方氮化硼和 MXene。

MXene 是一种由过渡金属碳化物或氮化物构成的二维薄片。它们由相应的 MAX 相所制成，MAX 指的是可以被化学式  $Mn+1AX_n$  所描述的陶瓷化合物，其中 M 是过渡金属，A 是铝或者硅，而 X 是碳或氮，n 则取 1 到 3 的值。“数十种二维碳化物和硅化物（MXene）的合成是过去十年中最令人激动的进展。”一位科学家称。具有高导电率和高柔性的 MXene 材料在一系列储能和水净

化技术中的应用十分具有吸引力。

中国在 MXene 领域的论文和专利数量都处于领先地位。理论已经预测了超过 200 个稳定的 MXene 相，研究者们期望能够在未来几年内实际合成 100 个以上的这类材料。

科学家们还要改进合成技术，制备出成本更低、效率更高的结构，以满足产业需求，让纳米材料和纳米科技实现更大范围的应用。

### 纳米表征

科学家与工程师们需要能够确认他们所制备的纳米材料具有所期望的尺寸、形状、晶体结构和化学成分。扫描和透射电子显微镜（SEM 和 TEM）依然是最受欢迎的纳米材料表征技术，但它们存在局限性。改良后的纳米表征方法或能推动整个领域发展。

液体池透射电镜技术可以在液体中进行表征，这种环境在纳米颗

粒的溶液生长过程中很常见。高分辨率透射电镜可以对纳米结构的内部结构进行成像，而电子断层扫描术可以获得纳米结构的三维图像。2017 年诺贝尔化学奖的获奖技术——冷冻电镜技术也可以用来对纳米结构生长过程进行成像。

2013 年，一种被称为微晶体电子衍射（MicroED）的冷冻电镜技术被开发出来。它可以快速准确地测定有机小分子，已被用来研究蛋白质晶体结构，成为了结构生物学的又一件利器<sup>3</sup>。由于电子衍射对电荷和化学键敏感，因此有望直接用来揭示蛋白质结构的关键特征。2018 年，微晶体电子衍射被用来获得分辨率不到一埃的纳米晶结构信息。为进一步促进该技术的发展，可能需要改进样本制备，亦即将脆弱的蛋白质晶体的生物特征考虑在内，保留其结构细节<sup>4</sup>。

纳米尺度表征的最新进展也体现

在原位 (in-situ) 表征和动态现场原位 (in-operando) 表征。它们通常用于研究催化材料和活性，前者可以获得高时空分辨率，后者在实际反应条件 (原位) 下同时进行表征和测量催化活性与选择性。因此，研究人员得以同时确定材料结构并理解其性能，这有助于阐明材料的结构 - 功能关系。X 射线吸收光谱和扫描隧道显微镜等技术的进步，将加深我们对催化反应的理解，促进改进实验设计。

由于特定用途的纳米结构对于细节和控制的要求越来越高，因此对表征技术所能提供的信息细节的要求也随之增长。只有表征细节达到所需的程度，才能保证制备的材料统一、可重复并具有合格的质量，这对于商业化应用来说尤其重要。随着纳米材料表征变得可重复、可靠，表征结果的解读以及对纳米材料结构 - 功能关系的控制得到改进，预计纳米技术将转化为更加现实的应用。

### 纳米器件与信息技术

正如前文数据分析所示，纳米材料在电子器件中的应用十分热门。这得益于它们尺寸极小，具有独特的电、光、磁学以及其他一些特性。从纳米晶体管到等离子显示技术，乃至量子计算机，纳米材料有望在提升计算能力的同时，降低设备的重量和能耗。

一位纳米电子学专家称，信息产业面临的一大挑战是满足日益增长

的对高性能计算的需求。随着硅芯片开始接近极限，诸如石墨烯和碳纳米管这样的碳纳米材料使摩尔定律得以延续。碳纳米材料耗能更低，产热更少，因而可以实现比硅材料更高的元件密度。这意味着一块芯片上可以容纳更多的晶体管，从而使集成电路速度更快，能耗效率更高。与此同时，成本也能降低。

这位专家称，最近一项令人振奋的进展是在碳纳米管上实现的三维芯片，它整合了数据存储和数据处

## “信息产业面临的一大挑战是满足日益增长的对高性能计算的需求”

理。这位专家还说：“与现有的硅基芯片相比，多层结构芯片有潜力将芯片性能提高数百乃至数千倍。”除了芯片设计外，碳纳米管的独特结构和高敏感度还能让它们成为绝佳的传感器材料，并在物联网中具有可期的应用。最新进展包括将机器学习技术和碳纳米材料结合起来，获取高敏感度、高选择性以及更高的传感器准确度。一个新出现的应用机遇是脑机接口 (BMI)，人工智能和纳米科技的融合有望实现可以学习并适应需求变化的脑机接口<sup>8</sup>。

虽然潜力无穷，但碳纳米材料目前仅应用于少量的电子元件和传感器中。由于硅基器件仍然可以满足未来数年内的需求，因此替换它们的愿望并不迫切。另一方面，很多

实验室成果和专利距离商业化还很遥远。为了进一步加速商业化，“需要长期的人力投入和更多的资金来推动碳纳米材料实现更广泛的应用。”一位受访专家说。

由于中国对基础科学进行了大规模的投资，碳纳米材料在电子器件应用方面的科研产出不断增长。一位专家表示，虽然中国已经在纳米科技论文的发表中占据了领导地位，但中国依然需要在碳纳米材料科研突破向革命性技术转化这一领域缩小与他国的差距。这位专家还说：“建设基于碳纳米材料的产业还有待时

日，而且也需要国家的支持。”这并不只是对中国如此，对纳米科学的其他研究大国来说也一样成立。虽然应用研究或许需要引导和规划，但这并不意味着基础研究也需要政府的干预。“基础研究应当是由好奇心推动的，应该鼓励研究者基于他们的兴趣自由探索，”一位科学家说，“基础研究与应用研究的目的不同，对两者的评价应该分开。”

展望纳米电子学的未来，纳米材料的应用可能将不只局限于电子元件领域，而是还会扩展到机器人或是仿生系统领域，访谈的一位专家称。新兴的基于纳米材料的智能皮肤技术就是一个例子，这种自供能

智能皮肤可以帮助人们感知环境。纳米技术和人工智能技术的结合，或许可以在未来开发出能感知周围世界并且能做出相应决策的系统

### 纳米医学和纳米诊断

依据 Nano 数据库对论文和专利数据进行分析后发现，纳米医学是另一个热门的纳米技术应用领域。作为新兴的跨学科领域，纳米医学在近几年不断发展。受到药物发现、再生医学、诊断和医学成像的带动，纳米医学已经渗透到生物医疗产业的各个领域，具有广阔的应用前景。Nano 数据库揭示的常见纳米医学应用包括：纳米给药系统和疾病诊断用纳米传感器，以及一些已经进入临床的抗肿瘤纳米药物。

受访专家们提到的一个重要发现是近来有关精准给药和药物缓释纳米机器人的研发。这种全新的智能给药系统将药物装入经过编程并折叠好的 DNA，让其通过血液循环运输。一旦抵达目标肿瘤，DNA 就会展开并释放一种能导致血栓的蛋白质，从而使得癌细胞死亡。

“通过结合纳米技术和分子生物学，这一突破将开创纳米医学的全新领域。”该研究第一作者、一位纳米专家说道。这种经过编程的 DNA 技术已经在小鼠身上进行了测试，在对抗乳腺癌细胞方面具有积极作用。

在纳米诊断领域，最新进展包括应用柔性电子传感器来监测神经活动 13；高速纳米孔 DNA 测序技术；

基于微纳传感器液体活检技术的癌症早期诊断；以及将诊断和医疗功能相结合，用于成像造影和纳米药物疗效监测的纳米颗粒。所有这些领域都充满了发展机遇。

受访专家们表示，纳米药物稳定性和安全性需要更为深入的研究。由于尺寸小，结构复杂，一般基于自组装纳米颗粒的纳米药物可以具有很高的活性。相比于传统药物，它们将来或能减少传统药物对人体器官的伤害，但也有很多未知数，尤其是它们的潜在毒性和免疫原性。一位专家说，为了让纳米药物在安全范围内发展，“我们应当帮助公众理解纳米医学，一方面强调纳米药物并不总是有毒的，另一方面也要表明纳米药物并非无所不能。”

“纳米医学不是魔法，不能完全取代常规医学，”另一位专家说，“二者应当共同发展，互相补充。”

和在纳米科学的其他领域中一样，中国在纳米医学领域也发展迅速。尤其是在纳米毒理学和生物安全性，以及纳米酶颗粒和智能纳米机器人方面，中国开展了许多高质量研究。然而，这其中也有很多低水平的重复工作，中国需要更系统性的规划来更有效地配置科研资源。一名纳米医学专家还表示，在科研成果的转化和临床应用方面，中国与其他国家之间依然存在一定的差距。

纳米医学要取得进一步的发展，

就需要有更完善的理论框架体系，需要纳米技术与生物医学研究更紧密地结合起来。“应当以临床需求指引我们的研究，”一位纳米医学专家说，“我们需要更多地与生物和生物医学的研究者，乃至与临床医师们开展合作。”

除此之外，有必要构建一种体系来推动纳米医学研究和技术的革新；同时提升技术，实现产业规模的纳米药物生产，以降低纳米医疗

## ““纳米医学将是实现智慧医疗的核心技术。”

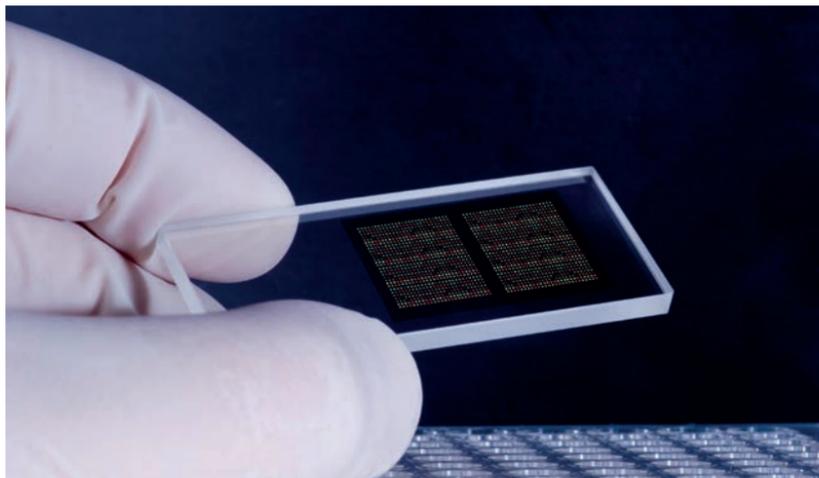
的成本。

“我希望纳米医学能尽快在早期诊断和重大疾病的治疗中得到应用。”一位专家对该领域的前景如此评论道。“或许纳米医学能将癌症转变为一种慢性病，从而极大地提高患者的生活质量，”另一位补充说，“纳米医学将会成为智能医疗得以实现的核心技术。”纳米医学与人工智能技术的结合也十分具有前景。”

### 纳米技术与能源

一位专家称表示，具有颠覆性的分散式纳米技术，拥有像智能手机改变通讯产业那样颠覆能源产业的潜力。

从上述 Nano 数据库中的论文发表



数据来看，能源是纳米技术研究的一个热门领域。据市场调研报告预测，纳米技术在能源产业应用中的全球市场规模将从 2018 年的 57 亿美元增长至 2023 年的 100 亿美元<sup>8</sup>。

专家认为纳米技术在能源领域内的主要挑战包括稳定性、成本、可持续性和规模化能力。一位专家表示，能源设备必须“便宜、耐用并且具有全循环可持续性。”

纳米技术有望解决所有这些挑战。例如，为了提高可再生能源的商业可行性，可以利用诸如量子点和钙钛矿一类的纳米结构材料来提升太阳能电池的效率。类似地，碳纳米管可以用作热电池中的电极，并以此利用废热发电。

纳米材料也能被用于提高可充电电池的性能和容量。一位专家称，作为下一代高能电池技术的组成，纳米材料尤其具有前景。相关的例子包括下一代高能锂电池中具有纳米结构的锂金属和硅阳极以及硫阴极。

它们还能用于催化剂，提升反应

速率。现有的生产氢气这类清洁能源的技术要么耗能巨大，要么依赖于昂贵的铂催化剂。因此，为了使这些技术具有商业可行性，纳米结构催化剂是必不可少的。

一位专家表示，纳米催化的一项重大进展是不含金属的异质催化。这其中包括碳催化——像石墨烯类的共价结合碳结构可以发挥和酶一样的催化功能，并且能在各种溶剂和温度环境下起效。这些碳催化剂不仅可能被用于化学催化，还可能被用于光催化和电催化。

展望更遥远的未来，专家们预计本领域内的主要挑战包括电动车的安全移动储能系统，需要同时具备高能量密度、长循环寿命和快速充电特性；电网规模的季节性储能系统；将二氧化碳转化为有用产物的技术；以及有效地收集并利用废热。纳米技术可以用来克服这些挑战，推动新能源产业的发展。

得益于过去二十年来的所取得的长足进展和持续的政府支持与经费投入，加之“美国科研资助文化的衰退”，

中国成为了纳米科技与能源交叉领域的领导者之一。一位专家称：“从成果数量以及一部分的质量上来说，中国是第一。”另一位专家补充道，“在能源技术的各个领域，都有很多来自中国科学家的杰出成果。”

### 绿色纳米技术

纳米技术可以被用来减少潜在的健康和环境威胁，以应对可持续发展的挑战。相关的例子包括利用纳米孔做水处理，开发将阳光转化为电能的太阳能电池。“绿色纳米技术也意味着合成无毒无害的纳米材料，并最大程度地降低纳米材料制备过程中可能造成的环境损害。”一位受访专家说。

以绿色催化剂为例，绿色催化剂是绿色化工的支柱之一。很多常规催化剂都含有像汞这样有害的污染物。但是研究发现，氮掺杂碳纳米管在乙炔氯化反应中具有催化活性。这提供了一条有效又无毒的聚氯乙烯合成新途径。聚氯乙烯是一种广泛用于建筑、医疗保健和电子等行业的硬塑料。

在印刷产业中，纳米材料也被用于镀层，以避免产生化学废物。这种化学废物主要是由用于处理印刷板的有毒光敏材料产生的。绿色印刷技术能改变传统印刷工艺，并催生出由聚合物自组装实现的高分辨率印刷。这种技术也能被用于印刷电路板、织物染色和 3D 打印技术，为各种产业提供环保的解决方案。

纳米技术和纳米材料的应用不断

扩大，也引发了一些担忧。一个紧迫的问题是纳米颗粒所带来的健康威胁。纳米颗粒已经被用于防晒霜和涂料这一类的消费品中，并且能被人体吸入或是通过皮肤吸收。碳纳米管中被污染的金属也可能损害健康。

“有关纳米材料和纳米技术大规模应用的长期环境影响仍然不清楚，并且产生了争议，”一位受访专家称，“如果我们想大规模地广泛应用纳米技术，就需要开展更多的研究来探索它们的长期影响。”

一位专家指出，中国在纳米科学领域做了大规模的投资，研究产出十分可观，但是针对纳米技术的环

## “或许需要独立的第三方机构来评估潜在的副作用，并系统性地开展研究来阐明如何将技术从实验室带到市场，以及如何安全地利用这些技术”

境影响的研究却十分匮乏，尤其是相比于其他重要的纳米技术研究贡献国而言。中国并不缺乏利用纳米技术来解决环境污染问题或是开发绿色纳米材料的研究。在纳米水处理技术、绿色催化和绿色印刷技术中，中国走在了世界前列。不过，一位专家敦促道，中国需要有更多的安全性研究，尤其是纵向研究来评估长期大规模利用纳米技术的潜在影响。

诸如此类的影响评估对于促进纳米技术的工业化应用和提高公众对

纳米技术的接受度都十分重要。

在纳米尺度上进一步研究并揭示新的机理，开展纳米结构和性质之间关系的基础研究或许能帮助我们提高对纳米材料的环境和健康影响的认识。为了促进工业化应用，“或许需要独立的第三方机构来评估潜在的副作用，并系统性地开展研究来阐明如何将技术从实验室带到市场，以及如何安全地利用这些技术，”一位专家说，“我们需要一个协作系统来实现学术界、产业界、市场以及政府之间的密切交流。”绿色纳米技术真正的开发和推广需要所有这些相关方的协作和参

与。

总体来说，纳米材料和纳米技术的应用规模正在不断壮大。根据美国专利商标局（USPTO）的数据，2017 年公布的专利数量为 20187，同比增长 3.2%<sup>9</sup>。其中，9145 为授权专利。在美国专利商标局和欧洲专利局（EPO）注册的所有商标中，2017 年的纳米技术专利数占全部专利数的 2.5% 左右<sup>10</sup>。中国的纳米技术专利数占其在美国专利商标局和欧洲专利局注册专利总数的 3.4%，

这一比例看似不高，但全球纳米技术市场规模在 2016 年达到 392 亿美元，2016-2021 年的年复合增长率为 18%<sup>11</sup>，这些数字预示了纳米技术广阔的产业应用前景，纳米科学在许多产业领域掀起的科技革命也将继续推进。■

1. 参见 [https://www.reportlinker.com/p04539093/Global-and-China-Graphene-Industry-Report.html?utm\\_source=PRN](https://www.reportlinker.com/p04539093/Global-and-China-Graphene-Industry-Report.html?utm_source=PRN) and [http://www.chinadaily.com.cn/cndy/2018-02/01/content\\_35623375.htm](http://www.chinadaily.com.cn/cndy/2018-02/01/content_35623375.htm)
2. 参见 <https://www.alliedmarketresearch.com/nano-materials-market> (produced 2016)
3. 参见 Brent L. Nannenga, Guanhong Bu and Dan Shi. The Evolution and the Advantages of MicroED. *Front. Mol. Biosci.*, 12 December 2018.
4. 参见 Duyvesteyn et. al. Machining protein microcrystals for structure determination by electron diffraction. *PNAS*, 115 (38): 9569-9573(2018)
5. 参见 Gabriel A. Silva. A new frontier: The convergence of nanotechnology, brain machine interfaces, and artificial intelligence. *Front. Neurosci.*, 16 November 2018. <https://doi.org/10.3389/fnins.2018.00843>
6. 参见 Li et. Al. A DNA nanorobot functions as a cancer therapeutic in response to a molecular trigger in vivo. *Nature Biotechnology*, 36, 258-264 (2018)
7. 参见 <https://www.nature.com/articles/nmeth.3969>
8. 参见 <https://www.bccresearch.com/market-research/nanotechnology/nanotechnology-in-energy-applications.html>
9. 参见 <https://statnano.com/news/62082>
10. 参见 <https://statnano.com/report/s140>
11. 参见 <https://www.bccresearch.com/market-research/nanotechnology/nanotechnology-market-products-applications-report.html>

# 未来可期

联合国的 17 项可持续发展目标 (SDG) 旨在到 2030 年实现更美好、更可持续的未来。根据《全球可持续发展报告 (2016)》<sup>1</sup>，纳米技术在促进能源、水、化学医药和制药领域的可持续发展方面具有巨大的潜力。

联合国 t 亚洲及太平洋经济社会委员会亚太技术转移中心主任榎本道子<sup>2</sup>表示，纳米科学技术有助于实现可持续发展目标中以下几个方面的目标：安全饮用水、加强粮食安全、健康、环保、能源储存 / 生产与转化以及制造业。

《全球可持续发展报告 (2016)》中提到的一些技术和有机与无机纳米材料，如纳米结构太阳能电池、石墨烯、碳纳米管等，本报告均进行了详细的讨论。

我们带您开启一场纳米文献统计分析之旅，从这个领域的发端说起，向您展现业内专家对于该领域未来的展望。

根据 Dimensions 的数据，纳米科学的研究产出在过去 30 年中增长了 130 倍。受到该领域重要突破的推动，如结晶半导体纳米线、电子墨的发明以及石墨烯片层分离，该领域增长最快的时期是 2000 年至 2010 年，年复合增长率 (CAGR) 达到 27%。

出版物数据同时还表明，纳米科学的跨学科性质正变得越来越显著。纳米科学产出对诸多领域的出版物都有贡献，不仅限于化学和材料学等物质科学领域。根据自然指数的数据，纳米科学产出在生命科学研究产出的占比一直都在增长。

根据 Dimensions 的数据，在 一项跨国比较中，我们发现从 1990 年到 2018 年，中国是纳米技术研究产出增长最快的国家，年复合增长率为 36%。根据自然指数的数据，2018 年中国超越了美国，不仅成为世界上最大的纳米技术研究产出国，也成为最大的高质量纳米技术研究产出国。根据自然指数的统计，高质量纳米技术研究产量最高的前十所机构中，有一半都来自中国。中国科学院 (CAS) 是产出高质量纳米技术文章最多的机构。

我们通过施普林格·自然集团旗下的 Nano 数据库对纳米材料进行了更深入的研究，从 2010 年到 2018 年的研究文章数量来看，纳米结构研究中最受欢迎的是纳米颗粒。同期专利申请中流

行的纳米结构包括纳米颗粒、石墨烯、量子点、纳米线和纳米晶体。2010 年至 2018 年的研究论文集中于以下纳米材料的应用：电子、催化、药物递送、光电子和能量存储。根据专利数据，这些也多为颇受欢迎的应用。

我们采访了很多专家，询问了他们所在领域的现状和需要克服的挑战。他们的目标包括：制造能满足日益增长的高性能计算和数据存储需求的纳米器件；发展绿色纳米材料；实现纳米材料的商业化生产；将废弃二氧化碳转化为有用产品；研究纳米药物的毒性，并向公众传播相关知识。更广泛地说，专家们认为需要加强控制可重复性、结构、粒径、稳定性、成本、可持续性和可扩展性，并将研究成果转化为应用。

专家还指出，需要开展更多的研究来评估纳米材料和技术对环境的长期影响。他们敦促工业界、市场和政府部门共同努力，促进绿色纳米技术发展。除此之外，还需要制定适当的法律法规，与时俱进，跟上技术的发展步伐，例如智能纳米医学技术。

得益于政府的战略性规划和持续增长的资金支持，中国已成为纳米技术的领导者，而且在未来无疑将成为一个举足轻重的贡献者。受访专家几乎一致认为，无论是纳米材料合成、纳米电子设备器件、能源转化和储存纳米材料、纳米医学，抑或是绿色纳米材料的使用，中国已成为纳米技术研究产出的主要贡献者。如何把这些研究成果转化为颠覆性的产业应用技术，将是中国未

来纳米技术发展的重要课题。

预计到 2024 年，纳米技术对世界经济的贡献将超过 1250 亿美元<sup>3</sup>。有了人工智能的助力，纳米技术将释放更多潜力，或在可持续农业、智慧城市、数字化生活等方面起到越来越重要的作用。坚持审慎的发展道路，纳米技术必将打造出更加美好的生活和环境。■

1. 参见 [https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/10789Chapter3\\_GSDR2016.pdf](https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/10789Chapter3_GSDR2016.pdf)
2. 参见她的演讲幻灯片 <http://apctt.org/sites/default/files/Ms.%20Michiko%20Enomoto.pdf>
3. 参见 <https://www.researchandmarkets.com/reports/4520812/global-nanotechnology-market-by-component-and>

## 附录 | 研究方法与自然指数数据

本报告采用定量与定性分析相结合的方式,描绘了纳米科学和技术的发展现状,强调了纳米科技对于发展基础科学和产业应用的重要性。

定量分析的数据来源为 Digital Science 和施普林格·自然开发的 Dimensions、自然指数和 Nano 数据库。具体而言,为了解纳米科技对于基础科学的贡献,本报告以“nano”为关键词,搜索了自然指数追踪的 82 本高质量科学期刊在 2012 年至 2018 年间发表的原始研究论文。最终,共计检索得到 66,991 篇纳米相关论文,即摘要、标题或正文包含“nano”的论文。

自然指数所追踪的期刊由活跃科学家组成的专家委员会选出,独立于自然科研。所选期刊涵盖了自然科学类期刊论文数量的约 5%,但是占自然科学类期刊总引用量的近 30%。自然指数将期刊划分为四大研究领域:化学、物质科学、生命科学以及地球和环境科学。

本报告据此将原始研究论文划分为化学、物理科学和生命科学几类,覆盖的期刊如下表所示。此外, *Nature Materials*、*Advanced Materials*、*Advanced Functional Materials* 和 *Macromolecules* 期刊中的所有原始研究论文,以及利用研究领域 (FoR) 代码在自然指数追踪的其它期刊中所选出的部分论文被定义为材料科学论文。请注意,部分论文可能同时属于多个研究领域。

纳米科学研究产出的跨国比较采用了自然指数的论文计数 (AC) 和分数式计量 (FC)。不论一篇文章有一个还是多个作者,每位作者所在的国家或机构都获得 1 个 AC 分值;FC 考虑的是每位论文作者的相对贡献。一篇文章的 FC 总分为 1,在假定每人的贡献是相同的情况下,该分值由所有作者平等共享。

此外,定性数据来自于对国内外纳米科学专家的采访,采访通过电话或电子邮件形式进行。专家们在访谈中谈论了纳米科学和技术发展所面临的挑战和机遇。

学科	科学期刊
化学	<i>Advanced Materials</i> ; <i>Analytical Chemistry</i> ; <i>Angewandte Chemie International Edition</i> ; <i>Chemical Communications</i> ; <i>Chemical Science</i> ; <i>Inorganic Chemistry</i> ; <i>Journal of the American Chemical Society</i> ; <i>Macromolecules</i> ; <i>Nano Letters</i> ; <i>Nature</i> (only articles classified in this subject area); <i>Nature Chemical Biology</i> ; <i>Nature Chemistry</i> ; <i>Nature Communications</i> (only articles classified in this subject area); <i>Nature Materials</i> ; <i>Nature Nanotechnology</i> ; <i>Organic Letters</i> ; <i>PNAS</i> (only articles classified in this subject area); <i>Science</i> (only articles classified in this subject area); <i>Science Advances</i> (only articles classified in this subject area); <i>The Journal of Physical Chemistry Letters</i> .
物理科学	<i>ACS Nano</i> ; <i>Advanced Functional Materials</i> ; <i>Advanced Materials</i> ; <i>Applied Physics Letters</i> ; <i>Astronomy &amp; Astrophysics</i> ; <i>European Physical Journal C</i> ; <i>Journal of High Energy Physics</i> ; <i>Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters</i> ; <i>Nano Letters</i> ; <i>Nature</i> (only articles classified in this subject area); <i>Nature Communications</i> (only articles classified in this subject area); <i>Nature Materials</i> ; <i>Nature Nanotechnology</i> ; <i>Nature Photonics</i> ; <i>Nature Physics</i> ; <i>Physical Review A</i> ; <i>Physical Review B</i> ; <i>Physical Review D</i> ; <i>Physical Review Letters</i> ; <i>Physical Review X</i> ; <i>PNAS</i> (only articles classified in this subject area); <i>Science</i> (only articles classified in this subject area); <i>Science Advances</i> (only articles classified in this subject area); <i>The Astrophysical Journal Letters</i> .
生命科学	<i>Life Sciences</i> ; <i>American Journal of Human Genetics</i> ; <i>Cancer Cell</i> ; <i>Cancer Research</i> ; <i>Cell</i> ; <i>Cell Host &amp; Microbe</i> ; <i>Cell Metabolism</i> ; <i>Cell Stem Cell</i> ; <i>Current Biology</i> ; <i>Developmental Cell</i> ; <i>Ecology Letters</i> ; <i>eLife</i> ; <i>Genes &amp; Development</i> ; <i>Genome Research</i> ; <i>Immunity</i> ; <i>Journal of Biological Chemistry</i> ; <i>Journal of Cell Biology</i> ; <i>Journal of Clinical Investigation</i> ; <i>Journal of Experimental Medicine</i> ; <i>Journal of Neuroscience</i> ; <i>Molecular Cell</i> ; <i>Molecular Psychiatry</i> ; <i>Nature</i> (only articles classified in this subject area); <i>Nature Biotechnology</i> ; <i>Nature Cell Biology</i> ; <i>Nature Chemical Biology</i> ; <i>Nature Communications</i> (only articles classified in this subject area); <i>Nature Genetics</i> ; <i>Nature Immunology</i> ; <i>Nature Medicine</i> ; <i>Nature Methods</i> ; <i>Nature Neuroscience</i> ; <i>Nature Structural &amp; Molecular Biology</i> ; <i>Neuron</i> ; <i>PLOS Biology</i> ; <i>PLOS Genetics</i> ; <i>PNAS</i> (only articles classified in this subject area); <i>Proceedings of the Royal Society B</i> ; <i>Science</i> (only articles classified in this subject area); <i>Science Advances</i> (only articles classified in this subject area); <i>Science Translational Medicine</i> ; <i>The EMBO Journal</i> ; <i>The ISME Journal: Multidisciplinary Journal of Microbial Ecology</i> ; <i>The Plant Cell</i> .

## 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。另外设有理论室、纳米加工实验室和纳米技术发展部。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 2018 年底,发表第一单位科学论文 2299 篇,申请专利 1230 项,授权专利 568 项。在中国科学院组织的国际评估中获得过国际同领域专家高度认可,并被认为是“中国最优秀的纳米科学研究机构”。2018 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机构前五行列。

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。

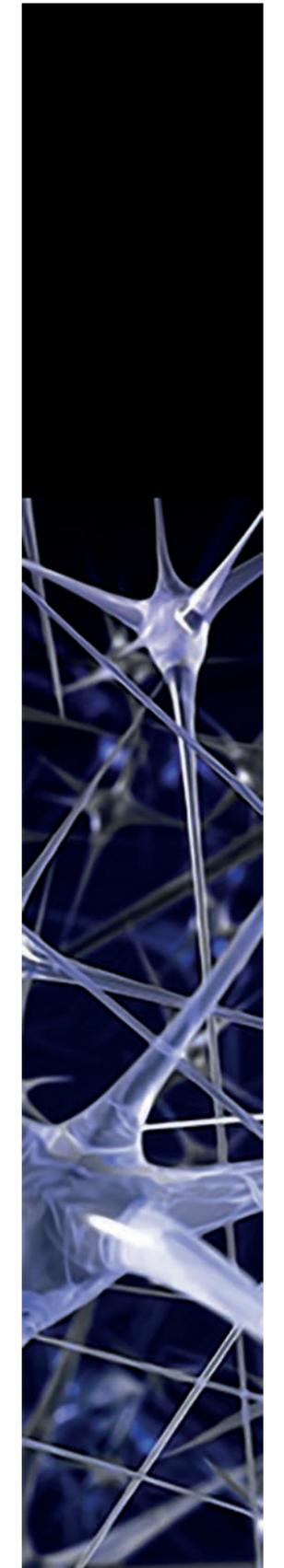
## 施普林格·自然

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。

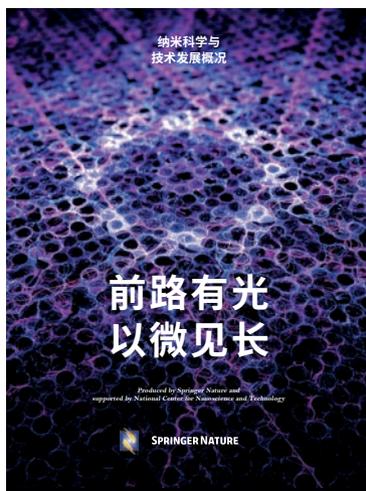
作为一家学术出版机构,施普林格·自然集团旗下汇聚了一系列深受信赖的品牌,包括施普林格、自然科研、BMC、帕尔格雷夫·麦克米伦和《科学美国人》。施普林格·自然还是一家领先的教育和专业内容出版机构,通过一系列创新平台、产品和服务向社会各界提供优质内容。我们的品牌、书籍、期刊和资源每天惠及全球各地数以百万计的人们。更多信息,请访问 <http://springernature.com/>



SPRINGER NATURE



© SIMFO/GETTY IMAGES



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

**SPRINGER NATURE**

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