

我国纳米科学技术发展现状及战略思考

闫金定

科学技术部基础研究管理中心, 北京 100862

E-mail: yanjd@vip.sina.com

2014-10-14 收稿, 2014-11-10 接受, 2014-12-16 网络版发表

摘要 概述了纳米科学技术在我国的发展现状和重要进展, 以及国外纳米科技的发展趋势, 深入分析和探讨了制约我国纳米科技发展的瓶颈问题及其成因. 研究表明总体投入偏低, 领域发展不均衡; 创新链上下游之间缺乏有机互动; 战略布局不够, 原创性重大成果偏少; 标准方面工作滞后等是我国纳米科技发展面临的主要问题. 文章从落实创新驱动发展战略、增强自主创新能力、鼓励跨学科交叉融合和产学研结合、培育产业发展、强化国际合作等战略层面对我国纳米科技的发展提出具体建议.

关键词

纳米科技
瓶颈问题
战略思考

在纳米尺度(通常指1~100 nm)下, 物质具有量子尺寸效应、表面效应和宏观量子隧道效应等特点, 展现出与宏观尺度下物质的物理、化学、光学、力学、生物学等不同或宏观不具备的特性. 纳米科学技术是20世纪80年代末期崛起并正在迅猛发展的新兴交叉学科, 它的基本内涵是在纳米尺度上研究和利用物质的特性(包括原子、分子的操纵)、相互作用和纳米效应. 纳米科技涉及诸多学科领域, 包括物理、化学、生物学、医学、材料科学、信息科学、能源科学、先进制造科学等, 是高度交叉的综合性学科, 也体现了前沿科学和高技术的融合, 对很多基础学科和应用领域都将产生重要的影响.

纳米科技的发展加深了人们对物质构成和性能的认识, 使人类的微观感知和操控能力达到了空前的水平. 通过纳米科技, 人们可以在分子、原子水平上设计并制造具有全新性质和功能材料及器件, 将给材料、制造业、信息、生物和医学等领域带来革命性的变化. 经过多年的发展, 纳米科技已经对世界产生了深远影响, 形成了大量的科技和产业成果, 促使材料、能源、环境、微电子、生物和医药等产业领域发生了重大变革, 推动了传统产业的升级换代和战略性新兴产业的建立. 据美国推测, 2014年世界纳

米科技产业市场规模将达到2.6万亿美元^[1,2].

纳米科技日新月异的发展正在展现其强大的生命力和对社会经济发展的推动作用, 连同其他新兴科技的发展, 正在成为提升国家未来核心竞争力的重要手段和推动世界各国经济发展的主要驱动力.

1 我国纳米科技发展现状

1.1 纳米科技总体布局

我国纳米科技的布局较早, 在纳米科技发展的开始阶段就同国际发展保持同步. “八五”期间, “纳米材料科学”列入国家攀登计划项目. 20世纪90年代以来, 纳米材料的应用研究成果涌现, 地方政府和企业的介入, 使我国纳米材料的研究进入了以基础研究带动应用研究的崭新局面.

2001年7月, 科学技术部会同有关部委成立了“国家纳米科学技术指导协调委员会”, 并与前国家发展计划委员会、中国科学院和国家自然科学基金委员会联合制定了《国家纳米科学技术发展纲要》. 在《国家纳米科学技术发展纲要》框架指导下, 各部门围绕纳米科学技术相关的材料、信息、能源、环境、医学及纳米安全等领域进一步强化了项目部署.

引用格式: 闫金定. 我国纳米科学技术发展现状及战略思考. 科学通报, 2015, 60: 30~37

Yan J D. Strategic consideration of nanotechnology development in China (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 30~37, doi: 10.1360/N972014-01088

2006年国务院发布《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020年)》(以下简称《规划纲要》)^[3],指出“纳米科技是我国有望实现跨越式发展的领域之一”。为贯彻落实《规划纲要》,科学技术部于2006年启动实施了我国纳米科学技术的旗帜性研究计划——纳米研究国家重大科学研究计划,连同国家高技术研究发展计划(863计划)、科技支撑计划,进一步强化了我国纳米科技的投入。

国家自然科学基金委员会也启动了一系列纳米科技及纳米制造基础研究等重大研究计划。中国科学院组织了一批能充分发挥综合优势、多学科系统集成的大型纳米科技项目,2013年7月启动了“变革性纳米产业制造技术聚焦”的战略性先导科技专项,将在纳米绿色印刷、纳米动力锂电池、纳米医药、纳米催化以及能源环境相关的纳米技术等方面进行重点攻关,进一步推动纳米技术的产业化应用。

我国还建成了一批国家级纳米科技基地:在北京建立了国家纳米科学中心;在上海建立了纳米技术及应用国家工程研究中心;在天津建立了国家纳米技术与工程研究院;在杭州建立了浙江加州国际纳米技术研究院;在苏州建立了国家纳米技术国际创新园。此外,还相继建立了40余个各具特色的地区性或行业性的纳米研究中心,逐步形成了我国纳米科学技术研发平台体系。

1.2 重要成果

在各方面的共同努力下,我国纳米科学技术得到了较快速的发展,在前沿基础研究、应用技术与成果转化等方面均取得重要进展,跻身世界纳米科技大国,部分研究跃居国际领先水平。

在基础研究方面,目前我国发表纳米科技SCI论文总量和论文总被引用次数已跃居世界第2位,部分研究成果在国际上引起了较大影响,标志性的成果主要包括:中国科学技术大学侯建国领衔的单分子科学团队^[4]在国际上首次实现亚纳米分辨的单分子光学拉曼成像,将具有化学识别能力的空间成像分辨率提高到前所未有的0.5 nm。审稿人盛赞这项工作“是该领域迄今质量最高的顶级工作,开辟了该领域的一片新天地”,研究成果在*Nature*发表。北京大学李彦团队^[5]发展了一类钨基金属高效催化剂,这种纳米催化剂粒子具有非常高的熔点,能够生长出具有特定结构的单壁碳纳米管,并在高温环境下保持其

晶态结构和形貌,相关成果发表在*Nature*。中国科学院大连化学物理研究所包信和团队^[6]基于“纳米限域催化”的新概念,创造性地构建了硅化物晶格限域的单铁中心催化剂,成功地实现了甲烷在无氧条件下选择活化,一步高效生产乙烯、芳烃和氢气等高值化学品,相关成果发表在*Science*。厦门大学郑南峰团队^[7]在铂纳米复合催化剂的制备、表征及催化反应的过程机理方面取得重要研究进展,制备出实用的高活性、高稳定性贵金属纳米催化剂,能在室温下实现CO的100%转化,相关研究成果在*Science*发表。中国科学院金属研究所卢柯研究团队^[8]利用自主设计的表面机械研磨处理技术,在金属镍表层突破晶粒尺寸极限,获得纳米级厚度并具有小角晶界的层片结构。这种纳米层片结构兼具超高硬度和热稳定性,研究成果在*Science*发表。国家纳米科学中心裘晓辉团队^[9]利用改进的非接触原子力显微镜在实空间观测到分子间氢键和配位键的相互作用,在国际上首次实现了对分子间局域作用的直接成像,中国学者首次“看见”氢键引起国际同行高度关注,相关成果发表在*Science*。中国科学院高能物理研究所和国家纳米科学中心赵宇亮团队^[10-19]在国际上较早开展了人造纳米材料的毒理学研究,建立了较为系统的研究方法,尤其是体内纳米颗粒的定量探测方法;系统研究了不同尺寸不同表面的纳米材料的毒理学效应和共性规律,揭示了纳米颗粒穿越生物屏障的能力,提出了将纳米毒理学现象反向应用于肿瘤治疗的新思路。在国际著名学术刊物上连续发表了一系列的研究成果,连续9年入选毒理学和药理学领域的世界顶尖25篇热点论文,在纳米材料健康效应方面形成很强的国际影响力。

在应用技术方面,我国在纳米科技领域发明专利申请数量显著增长,跃居世界第2,部分成果已经走向产业化,取得了良好的社会经济效应。标志性的成果包括:中国科学院化学研究所宋延林团队^[20-23]发明了具有亲(疏)水、亲(疏)油特性的纳米材料绿色印刷制版技术,实现直接制版印刷,从根本上解决了印刷制版行业的环境污染问题并降低了生产成本,为印刷产业实现绿色化、数字化做出了重要贡献。范守善团队^[24-28]领导的、富士康纳米科技中心研发的超顺排透明碳纳米管导电膜,可用于制造碳纳米管触摸屏手机,2012年实现了全球首个碳纳米管触摸屏的产业化,现拥有多个系列品牌,在产业领域产生重

要影响,产品销售海内外.中国科学院福建物质结构研究所洪茂椿团队^[29-33],通过纳米催化技术攻克了用煤代替石油生产乙二醇的难题,可缓解我国目前石油、乙烯和乙二醇供不应求的局面.已建立以煤为原料、采用纳米催化剂的万吨级乙二醇生产装置,相关产品更大规模的生产线在陆续建造中.

我国微电子加工技术近几年实现了质的飞跃.我国学者研制出阻变存储器(RRAM)/相变存储器(PCRAM)/纳米晶的存储单元器件,有效提升了我国在存储器领域的核心竞争力.继45 nm之后,22 nm尺度的集成电路芯片已开始生产,促进了我国半导体产业的发展.

此外,我国学者还发明了荧光聚合物纳米膜传感技术,研制出荧光聚合物纳米膜痕量爆炸物探测器,可检测三硝基甲苯(TNT)、三亚甲基三硝胺(RDX)、奥克托今(HMX)、硝铵和黑火药等多种常见重要炸药,检测下限达到0.1 ppt(1 ppt= 10^{-15} g/mL),分析时间为6.5 s,误报率小于1%,已获市场准入并实现了产业化.产品曾在北京奥运会和上海世博会等场所使用.

2 国外纳米科技发展趋势分析

探索介观世界物质奇异性,发展未来高新技术,纳米科学技术的迅猛发展必将对经济、社会发展及国防安全产生重大影响.纳米科学技术在提升国家未来核心竞争力、培育战略性新兴产业等方面逐渐展现出战略引领带动作用.全球主要经济体纷纷制定纳米科学技术发展规划,加大对纳米科学技术的投入,推进纳米科学技术快速发展.据不完全统计,全球超过50个国家发布了国家级纳米科技发展规划.国际纳米科技发展正呈现出如下趋势.

2.1 纳米科技是全球科技发展的聚焦点

美国国家科技委员会早在2000年就率先制定了“国家纳米技术计划(NNI)”,其宗旨是整合联邦各机构的力量,加强其在开展纳米尺度的科学、工程和技术开发工作方面的协调.参与计划实施的机构包括美国国家科学基金会、美国国防部、美国能源部、美国国立卫生研究院等多部门.为保持美国纳米科技的国际领先地位,NNI计划一直保持高投入,并且不受经济危机影响而持续增加.迄今为止,根据美国政府官方公布的数据,如果包含2014财年的预算在内,

NNI的总投入达到了200亿美元.近3年来,NNI投资显示:基础研究部分保持了最大份额,纳米技术设备与系统、纳米制造、环境、健康和安全研究方面的投入大幅增加^[34,35].

欧盟2006年推出了第7框架计划,纳米科技列为九大研究主题之一,欧盟投入34.75亿欧元以增强纳米科技的国际地位.在欧盟框架计划以外,欧盟各国纷纷制定了本国的纳米科技发展计划.以德国为例,德国政府2011年启动了“纳米技术行动计划2015(Nanotechnology Action Plan 2015)”,并陆续成立了9个全国性的纳米技术研发网,成员来自纳米技术产业链的各个环节,以加强产业链上中下游的动态合作、集约技术、资金优势,加速创新过程和成果转化.德国目前已开始建立在纳米技术领域的经济与科学的五大创新联盟:有机发光二极管、有机光伏电池、创新型纳米碳管、分子成像以及锂离子电池,拟通过联盟的方式推动上述领域的应用市场.

日本政府支持纳米技术起始于2001年,在第2个科学与技术基本计划STBP中提及了纳米领域,并持续保持较高的投入.日本在第3期科技基本计划(2006~2010年)中继续将“纳米技术和材料”作为重点领域给予资助,突出强调了纳米技术在信息技术、生命科学、环境/能源以及基础技术等方面发挥的作用,研发投入达333.16亿日元.

俄罗斯投资2000亿卢布发展纳米技术,使其成为国家“科技战略的火车头”.法国设立了若干科技竞争园区专门研发尖端纳米技术,如最受全球瞩目的Grenoble的Minalogic全球微纳米技术竞争园区,重点研究新一代半导体和生产流程.以色列也已将纳米技术列为国家重点研究领域,并由政府、企业界和学术界联合提出了“以色列国家纳米技术倡议”.

印度联邦政府2007年启动了国家纳米科技计划,并建立了3所纳米技术研究所,更宣称要将印度打造为世界纳米研发中心.伊朗政府组建了“伊朗纳米技术指导委员会”,由政府投入资金支持纳米研究,并多次参加国际纳米技术展览(唯一的伊斯兰国家),展示伊朗纳米技术领域的进展.

纵观全球各国近10年来的纳米科技投入和研发现状,国际纳米科技的发展已呈现出“突出重点、集中资源、培育产业、引领带动”的发展态势.发达国家希望通过纳米科技整合其基础研究、应用研究和产业化开发,抢占未来科技发展的制高点和优先权,引

领下一次产业革命。发展中国家希望通过纳米技术在新一轮的科技和产业革命中获得更多的话语权。

2.2 纳米科技的发展呈现交叉融合趋势

纳米科技是新兴交叉学科技术,涉及物理、化学、材料、信息、生物和医药等几乎所有领域,是当今前沿科技领域的代表,纳米科技的进展直接反映了全球科技发展的最新态势。纳米科技的发展正呈现交叉融合趋势,纳米技术与生物技术、信息技术的联系更趋紧密,生物技术和信息技术的研究将汇聚在纳米尺度上,其进一步发展有赖于纳米科技的不断突破^[1]。

从信息技术发展来看,微电子技术发展已进入了纳米尺度,集成电路芯片的最小电路尺寸正从22 nm向16 nm尺度延伸。在微电子小型化自上而下发展的同时,纳米科学家也在探索自下而上的新方法,利用原子、分子组装来构建纳电子器件和系统。纳米器件、电路和系统的新发展,为信息产业快速发展提供了重大机遇,孕育着重大突破。

纳米科技与生物学、医药学和信息学的结合,将会对未来生物技术和医药产业产生重大影响。利用纳米科技,可望在细胞、分子和基因水平上真正认识和理解病变机理,研制纳米级微型探测器对人体内细胞、组织的健康状态和病变信息实现实时检测,大幅度提高医学诊断和疾病检测的精度,实现重大疾病的早期诊断,最终实现集成纳米技术和生物技术的基因治疗、靶向分子治疗和病变组织与器官再生等。因此,发展人类医疗健康用纳米技术具有重要科学和临床意义。

新能源、节能减排和环境保护与治理对纳米技术的需求日益凸显。发展纳米催化材料可实现传统能源(石油、天然气、煤炭等)的高效利用,减少排放;基于纳米材料技术,可开发出新型高效储能和能量转换器件,解决新能源的规模化利用问题。环境保护方面,利用纳米粒子吸附和催化效应可处理污水中重金属和有机污染物,治理空气污染,开发绿色环保材料等。钢铁冶金、化工轻纺、建筑材料等是传统支柱制造产业,利用纳米技术可以有效提升原有产品的品质、降低制造能耗和减少污染物排放,实现产业的全面升级。

美国、欧盟、日本等发达国家制定的纳米科学技术发展战略集中体现了纳米技术与信息技术、生物技

术、能源技术等交叉融合趋势。这种交叉融合的趋势必将催生新的科学和技术领域,推动不同领域、不同学科的科学家携手并进,开拓提升人类认识世界、改造世界的能力。

2.3 社会资本介入纳米技术研发

基于纳米科技展示的巨大商业前景,一些国际化的大跨国公司,已将未来的产品竞争定位在纳米科技产品上,纷纷投入巨资开发纳米技术,其投入远远大于政府对纳米科技的投资。

美国的一些大公司正在积极探索利用纳米技术改进其产品和工艺的潜力。英特尔、IBM、惠普等一些IT公司已经在近期取得突破,并生产出商业化产品。英特尔公司展望未来半导体制造工艺时提出“2022年达到4 nm”^[1]。

欧盟第七框架计划纳米主题设置了诸多鼓励企业充分参与的纳米技术研发课题,涉及领域十分广泛,主要针对研究密集型企业,每个项目都需要至少15%~30%的欧盟资助投入企业。欧盟委员会鼓励企业从项目立项开始参与,发挥积极作用。德国企业界也投入巨资进行相关研发。2006年起,巴斯夫公司开始投入巨额经费用于纳米技术研究,巴斯夫公司也是德国第一家定期举行纳米科技对话论坛的企业。

日本企业界也加强了对纳米技术的投入。关西地区已有近百家企业与16所大学及国立科研机构联合,建立了“关西纳米技术推进会议”,以大力促进本地区纳米技术的研发和产业化进程;东丽、三菱、富士通等大公司更是纷纷斥巨资建立纳米技术研究所,试图将纳米技术融进自己的优势产业中。

为促进纳米技术的产业化,俄罗斯还设立了专项基金,制定了优惠信贷政策,其中仅外经银行的专项贷款额度就超过了100亿美元。2007年夏,俄罗斯成立了纳米技术集团,目的是为了落实国家在纳米技术领域的政策。集团的项目主要分布在医学、金属加工、新材料、太阳能、光学电子和纳米电子领域。

3 我国纳米科技发展面临的瓶颈问题

(1) 总体投入偏低,领域发展不均衡。我国纳米科学技术方面的总体投入远低于发达国家的投入比例,稳定性支持不够,平台建设(仪器、装备和相关实验材料及消耗的总称)方面,与发达国家还有很大

差距。而且,我国纳米科学技术的投入大部分研究集中在纳米材料领域,领域发展也不够均衡,存在着条块分割、低水平重复和分散等问题。如纳米材料是我国的强项,其中碳纳米管发展迅猛,已经在手机触摸屏、锂离子电池导电浆料等领域实现产业化;但在生物医药领域,虽然与国外研究同时起步,但目前产业明显滞后;由于缺少工业基础的有效支撑,与未来技术密切相关的纳米加工、纳米器件、新能源等相对薄弱。总体上看,尽管在基础科学研究方面,我国纳米科学领域处于世界前列,但是,我国纳米技术整体水平和主要发达国家相比差距还很大,而且,这种差距有进一步拉大的危险。

(2) 创新链上下游之间缺乏有机互动。产学研结合不够在纳米科技创新体系中依然存在,纳米创新链互动关系的内在动力不足,纳米科学技术创新链上下游之间还没有形成有机互动。一方面,对纳米科学技术中基础问题的深入系统分析总结不够充分,这也影响到我国纳米科学技术的持续稳定发展和产业化应用。另一方面,我国企业的早期介入不够,导致以应用为导向发展纳米科学技术的力度不够,成果转化较为缓慢。企业还未成为纳米技术产业创新链中的主角。缺乏从基础研究到产业化的无缝连接机制,纳米技术成果还不能顺利转化。虽然国内已建立了几十条纳米材料和技术的生产线,但是产品主要集中在技术门槛较低的纳米粉体制备及其应用方面,且呈现低水平的扩张之势,日益膨胀的产能在市场作用下瞬间就可能成为不良资产。

(3) 战略布局不够,原创性重大成果偏少。从源头讲,我国纳米科技的发展没有从发展战略方面考虑研究布局。从政府投入来看,纳米研究国家重大科学研究计划、国家重点基础研究发展计划(973计划)、国家高技术研究发展计划(863计划)、国家自然科学基金以及各省市和各部门都在不断强化项目资助,但各计划、各部门之间缺乏有效沟通和协调机制,经费投入领域涉及面非常广泛,研究方向太过分散,不同机构之间的跟踪研究、重复研究普遍存在。

由于缺乏有深度的、有引领性、有原创性的战略布局,导致科技资源分散,使得科研人员多头重复申请项目、并不得不频繁地接受各种检查、评估,较少有人能够潜下心来做探索性强、风险高、周期长的研究课题,导致了创新性不足。除目前的“急功近利”和注重“短期效应”的评价体系外,从深层次分析,我国

的科研环境包括体制和机制中,缺乏真正鼓励创新和容许失败的科学思想和科学文化。这就导致了我国虽已拥有全球最多的纳米科技人力资源,基础研究成果众多,但原创性重大成果明显偏少。

(4) 标准方面工作滞后。随着经济全球化进程的不断深入,标准在国际竞争中的作用日益凸显,继产品竞争、品牌竞争之后,标准竞争成为一种层次更深、水平更高、影响更大的竞争形式。因此,国际上越来越重视标准化工作,纷纷将标准化工作提高到国家发展战略的高度。

尽管我国是国际上率先制定纳米技术标准的国家之一,但已制定的纳米标准所涉及的产业面十分狭窄,现有纳米技术标准也主要以基础研究单位提出的文本标准为主,缺乏应有的实用性和市场适应性。亟需加强对各类纳米技术和产品标准的研究和制定,包括基础标准、产品标准、工艺标准、检测试验方法标准,及安全、卫生、环保标准等。形成企业标准、行业标准、国家标准和国际标准分级体系,充分发挥标准化在提高自主创新能力、保障产品质量、维护公平竞争、促进国际贸易和提升我国综合竞争力的重大作用。

(5) 宣传不够,社会公众对纳米科学技术内涵理解片面。我们必须清醒地认识到,纳米科学技术的科学内涵并没有在社会上取得普遍的共识。纳米不仅仅是一种尺度,更重要的是性能的突变,是量变到质变。目前,很多媒体和一些不负责任的工作者在纳米技术改性的传统产品命名、产品性能的宣传上有夸大或误导消费的倾向,甚至有人商业性炒作纳米技术,产品宣传不符合科学,产生了消极的社会影响,致使人们缺少对纳米科学技术支持和推动的热情。这也是需要我们直面和解决的问题。

4 相关建议

(1) 落实创新驱动发展战略是纳米科技发展的出发点。党的十八大提出实施创新驱动发展战略,强调科技创新是提高社会生产力和综合国力的战略支撑,为我们推动发展更多依靠创新驱动指明了方向。纳米科技的迅猛发展,与生物技术、信息技术等领域的交叉融合蕴育着新一轮的科技革命和产业变革,与我国加快转变经济发展方式形成历史性交汇,为实施创新驱动发展战略提供了难得的重大机遇和历史条件。

落实创新驱动发展战略, 关乎我国纳米科技发展全局和长远. 应把落实创新驱动发展战略作为纳米科技发展的出发点, 进一步强化顶层设计, 针对我国国情和优势力量, 进一步明确我国纳米科学技术发展战略和重点发展领域, 坚持“有所为有所不为”, 充分发挥“国家纳米科技指导协调委员会”的作用, 加强纳米科技与产业的总体设计、统筹协调、整体推进和督促落实; 以有限的资金聚焦重点, 提升效率; 以科技发展和重大产业需求为牵引, 引导纳米科技的研究方向.

(2) 增强自主创新能力是纳米科技发展的核心. 国际金融危机加快了全球产业结构调整, 一批战略性新兴产业快速崛起, 科技与产业竞争日趋激烈, 以市场、资源换取技术的发展模式将遇到困难. 当前全球主要国家都在对纳米科技创新进行提前部署. 近年来我国纳米科学技术实力显著增强, 从研发投入和产出规模看, 已经成为世界研发大国. 但我国还不是研发强国, 面对激烈的国际竞争, 我国的自主创新将会面临更大困难, 依靠跟踪模仿难以实现纳米科学技术的跨越式发展.

我们必须把增强自主创新能力作为纳米科学技术发展的核心, 把增强自主创新能力贯穿到纳米科学技术的基础研究、应用基础研究和产业化等方面, 提升研发活动产出规模与质量, 确立更高发展目标. 把原始性创新能力作为评价的重要指标, 评价成果要紧紧扣住解决相关问题的深度、以及由此可能产生的实际贡献和社会效益. 要充分利用现有基础, 努力掌握一批拥有自主知识产权的核心技术和关键技术.

(3) 鼓励跨学科交叉融合, 鼓励产学研结合. 促进学科交叉和渗透已经成为当今科学研究取得重要进展的必要条件. 面对越来越复杂的系统, 也需要多学科的综合研究. 例如纳米制造, 不仅需要数理化学科的交叉, 同样需要材料、能源和环境的交叉, 需要人文、社科和法理的交叉. 因此, 纳米科学技术的创新活动需要不同学科的交叉、集成和融合.

在鼓励跨学科交叉研究的同时, 我们需要加强产学研结合, 促进纳米技术在信息、能源、制造、健康和环境等领域的应用等, 引领和支撑国家战略产业的发展. 建设以企业为主体、市场为导向的产学研结合的创新体系迫在眉睫. 要使企业真正成为研发投入主体、创新活动的成果主体、创新成果应用的主体, 加强纳米科学技术产学研结合的创新链建设, 通

过创新链实现我国纳米科技发展的前瞻性、基础性、战略性、把技术化、成果转化、产业化有机结合起来, 使我国在新一轮的科技变革中占领制高点.

(4) 增加经费投入, 培育产业发展, 助推纳米科技在“转方式、调结构”中有更大作为. 在“十一五”、“十二五”纳米科技取得的成果和经验的基础上, 以市场、应用和国家重大战略需求为导向, 以面向和促进产业化为重点, 针对国际纳米技术发展趋势, 并结合我国国情, 增加经费投入, 围绕节能环保、新一代信息技术、生物、高端装备制造、新能源、新材料、新能源汽车等战略性新兴产业重点培育相关产业技术, 努力实现产业化.

当前中国的经济发展面临着“转方式、调结构”的突出问题. 纳米科技作为一门普适性基础技术, 在转变经济增长方式, 调整经济结构方面应发挥基础性作用. 一方面, 催生高新技术, 促进战略性新兴产业的发展; 另一方面, 提升传统产业的技术含量, 增加附加值, 实现节能减排目标, 促进传统产业升级换代. 以上2个作用正适合“转方式、调结构”的目标显现, 所以应高度重视纳米技术产业化发展, 助推纳米科技在“转方式、调结构”中有更大作为.

(5) 加快标准化、安全性等研究, 为产业发展保驾护航. 伴随着纳米技术的快速发展, 关于纳米技术的伦理学和社会冲击的问题也变得越发重要. 由于小尺寸效应、量子效应和巨大比表面积等, 纳米材料具有特殊的物理化学性质. 在进入生命体后, 它们与生命体相互作用所产生的化学特性和生物活性与化学成分相同的常规物质有很大不同. 因此, 纳米技术和纳米材料的生物安全性和对环境健康的影响既是科学界面临的挑战, 也成为各国政府前沿科技发展战略与健康安全的国家需求.

美国与欧盟各国, 以及世界经济合作与发展组织(OECD), 联合国(UN), 国际标准化组织(ISO)等机构相继组织科学界、政府管理部门开展纳米毒理学研究, 抢占先机, 制定纳米安全检测方法、测试体系和评估流程. 我国正在成为纳米材料研究和纳米产品生产的大国, 我国应加强纳米安全性和伦理学的研究, 保障纳米科技在我国的健康发展, 保障我国高科技产品的国际竞争力, 为我国纳米技术产业的可持续发展保驾护航.

(6) 加强政府引导, 强化国际合作, 注重科普工作. 随着经济全球化的不断发展, 加入国际科技合

作的大家庭是任何一个寻求快速发展的国家的必然选择。目前,我国已成为继美国之后的全球第二大经济体,随着我国经济实力的不断提升,政府对科研投入的力度越来越大,可以说我国已具备了开展大规模国际科学合作的经济实力。

全球纳米科技的发展呈现交叉融合趋势,国际合作是促进我国纳米科技发展的重要渠道。笔者认为,政府有必要在鼓励国际科学合作活动发展的同时,注重大规模国际科学合作的发展。为此,各相关部门应进一步加大我国参与大科学研究计划的宏观协调力度,建立对大科学研究项目国际合作的管理

与评估机制,确保必要和稳定的政府投入,鼓励我国科学家和科研机构牵头组织国际和区域性的大科学计划和大科学工程,完成从交流型合作、研究型合作向战略型合作的过渡。在加强与发达国家合作的同时,也应注重与欠发达国家的合作。

应注重科普工作,加大前沿科学发现的宣传力度。在科普宣传内容和形式上探索创新,可依托国内纳米领域优势研究机构,建立科普基地,促使纳米科技知识快速向整个社会传播和企业转化,使大众对纳米科技有一个正确的、科学的认识,避免过分“炒作”或误导。

参考文献

- 1 Roco M C, Mirkin C A, Hersam M C. Nanotechnology Research Directions for Societal Needs in 2020: Retrospective and Outlook. Berlin: Springer, 2010. 610
- 2 Roco M C. The long view of nanotechnology development: The national nanotechnology initiative at 10 years. J Nanopart Res, 2011, 13: 427–445
- 3 The State Council of the People's Republic of China. National Outline for Medium and Long Term S&T Development (2006–2020)(in Chinese), 2006 [中华人民共和国国务院. 国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006–2020年), 2006]
- 4 Zhang R, Zhang Y, Dong Z C, et al. Chemical mapping of a single molecule by plasmon-enhanced Raman scattering. Nature, 2013, 498: 82–86
- 5 Yang F, Wang X, Zhang D Q, et al. Chirality-specific growth of single-walled carbon nanotubes on solid alloy catalysts. Nature, 2014, 510: 522–524
- 6 Guo X G, Fang G Z, Li G, et al. Direct, nonoxidative conversion of methane to ethylene, aromatics, and hydrogen. Science, 2014, 344: 616–619
- 7 Chen G X, Zhao Y, Fu G, et al. Interfacial effects in iron-nickel hydroxide-platinum nanoparticles enhance catalytic oxidation. Science, 2014, 344: 495–499
- 8 Liu X C, Zhang H W, Lu K. Strain-induced ultrahard and ultrastable nanolaminated structure in nickel. Science, 2013, 342: 337–340
- 9 Zhang J, Chen P C, Yuan B K, et al. Real-space identification of intermolecular bonding with atomic force microscopy. Science, 2013, 342: 611–614
- 10 Chen C Y, Li Y F, Qu Y, et al. Advanced nuclear analytical and related techniques for the growing challenges in nanotoxicology. Chem Soc Rev, 2013, 42: 8266–8303
- 11 Zhu M T, Nie G J, Meng H, et al. Physicochemical properties determine nanomaterial cellular uptake, transport, and fate. Accounts Chem Res, 2013, 46: 622–631
- 12 Wang B, He X, Zhang Z Y, et al. Metabolism of nanomaterials *in vivo*: Blood circulation and organ clearance. Accounts Chem Res, 2013, 46: 761–769
- 13 Liu Y, Zhao Y L, Sun B Y, et al. Understanding the toxicity of carbon nanotubes. Accounts Chem Res, 2013, 46: 702–713
- 14 Kang S G, Zhou G Q, Yang P, et al. Molecular mechanism of pancreatic tumor metastasis inhibition by Gd@C₈₂(OH)₂₂ and its implication for de novo design of nanomedicine. Proc Natl Acad Sci USA, 2012, 109: 15431–15436
- 15 Ge C C, Du J F, Zhao L N, et al. Binding of blood proteins to carbon nanotubes reduces cytotoxicity. Proc Natl Acad Sci USA, 2011, 108: 16968–16973
- 16 Liang X J, Meng H, Wang Y Z, et al. Metallofullerene nanoparticles circumvent tumor resistance to cisplatin by reactivating endocytosis. Proc Natl Acad Sci USA, 2010, 107: 7449–7454
- 17 Zhao Y L, Xing G M, Chai Z F. Nanotoxicology: Are carbon nanotubes safe? Nat Nanotechnol, 2008, 3: 191–192
- 18 Zhang Z J, Wang J, Nie X, et al. Near infrared laser induced targeted cancer therapy using thermo-responsive polymer encapsulated gold nanorods. J Am Chem Soc, 2014, 136: 7317–7326
- 19 Wang L M, Li J Y, Pan J, et al. Revealing the binding structure of the protein corona on gold nanorods using synchrotron radiation-based techniques: Understanding the reduced damage in cell membranes. J Am Chem Soc, 2013, 135: 17359–17368

- 20 Tian D L, Song Y L, Jiang L. Patterning of controllable surface wettability for printing techniques. *Chem Soc Rev*, 2013, 42: 5184–5209
- 21 He M, Zhang Q L, Zeng X P, et al. Hierarchical porous surface for efficiently controlling microdroplets self-removal. *Adv Mater*, 2013, 25: 2291–2295
- 22 Zhang Y F, Lu T, Zeng X P, et al. Surface-mediated buckling of core-shell spheres for the formation of oriented anisotropic particles with tunable morphologies. *Soft Matter*, 2013, 9: 2589–2592
- 23 Xin Z Q, Su B, Wang J J, et al. Continuous microwire patterns dominated by controllable rupture of liquid films. *Small*, 2013, 9: 722–726
- 24 Jiang K L, Li Q Q, Fan S S. Nanotechnology: Spinning continuous carbon nanotube yarns—Carbon nanotubes weave their way into a range of imaginative macroscopic applications. *Nature*, 2002, 419: 801
- 25 Fan S S, Chapline M, Franklin N, et al. Self-oriented regular arrays of carbon nanotubes and their field emission properties. *Science*, 1999, 283: 512–514
- 26 Li P, Jiang K L, Liu M, et al. Polarized incandescent light emission from carbon nanotubes. *Appl Phys Lett*, 2003, 82: 1763–1765
- 27 Liu C H, Huang H, Wu Y, et al. Thermal conductivity improvement of silicone elastomer with carbon nanotube loading. *Appl Phys Lett*, 2004, 8: 4248–4250
- 28 Huang H, Liu C H, Wu Y, et al. Aligned carbon nanotube composite films for thermal management. *Adv Mater*, 2005, 17: 1652–1656
- 29 Chen L, Jiang F L, Lin Z Z, et al. A basket tetradevacandate cluster with blue luminescence. *J Am Chem Soc*, 2005, 127: 8588–8589
- 30 Zhou Y F, Jiang F L, Yuan D Q, et al. Copper complex cation templated gadolinium(III)-isophthalate frameworks. *Angew Chem Int Ed*, 2004, 43: 5665–5668
- 31 Hong M C, Zhao Y J, Su W P, et al. A nanometer-sized metallocupramolecular cube with O-h symmetry. *J Am Chem Soc*, 2000, 122: 4819–4820
- 32 Hong M C, Zhao Y J, Su W P, et al. A silver(I) coordination polymer chain containing nanometer-sized tubes with anionic and solvent molecule guests. *Angew Chem Int Ed*, 2000, 39: 2468–2470
- 33 Su W P, Hong M C, Weng J B, et al. A semiconducting lamellar polymer $[Ag(C_5H_4NS)]_n$ with graphite-like array of silver(I) and its analogue with layered structure. *Angew Chem Int Ed*, 2000, 39: 2911–2914
- 34 NSTC, CoT, NSET. National Nanotechnology Initiative Strategic Planning, 2014
- 35 US Food and Drug Administration. 2013 Nanotechnology Regulatory Science Research Plan, 2014

Strategic consideration of nanotechnology development in China

YAN JinDing

Management Center of Basic Research, Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China, Beijing 100862, China

This article outlines recent advances in the fields of nanoscience and nanotechnology in China and highlights representative research outcomes of Chinese researchers in the last decade. The author also summarizes the trend of research into nanotechnology worldwide and analyze restrictive factors (and their origins) leading to bottlenecks in the development of nanotechnology in China. The interactions of the following issues may be the main factors restricting the sustainable development of nanotechnology in China: total investment in nanotechnology is relatively low (insufficient), the levels of development in the different subtopics of nanotechnology fields are disproportion, there remains a lack of efficient pathways among innovation chains, no strategic framework has been well established, the research outcomes of original innovation are still few, and the standardization of industrial nanotechnology is lagging. The author also discusses the strategy of nanotechnology development in terms of how to implement the strategy of innovation development, boost independent innovation, encourage cross-disciplinary research, build efficient collaborations among industry-academy-educations, foster nano-industrial sectors, and strengthen international collaborations.

nanotechnology, strategic consideration, development bottleneck

doi: 10.1360/N972014-01088