

2016年中国重大科学、技术和工程进展

陈广仁, 刘志远, 田恬, 祝叶华

《科技导报》编辑部, 北京 100081

摘要 本着分门别类、本刊推荐、专家遴选、宁缺毋滥、叙述事实的原则, 从国内外重要科技期刊和科技新闻媒体所报道的中国科技成果中, 按科学、技术、工程3个类别, 由《科技导报》编辑部遴选、推荐候选条目, 经《科技导报》编委、审稿人等专家通信评选, 推选出2016年度中国重大科学、技术、工程进展30项。1) 2016年中国重大科学进展10项: 精子RNA可做为记忆载体将获得性性状跨代遗传; 构建出世界上首个非人类灵长类自闭症模型; 提出基于胆固醇代谢调控的肿瘤免疫治疗新方法; 首次在原子尺度揭示水的核量子效应; 实验证实马约拉纳费米子的存在; 揭示RNA剪接的关键分子机制; PandaX-II实验对暗物质粒子特性给出迄今最强的限制; 揭示水稻产量性杂种优势的分子遗传机制; 在玻色-爱因斯坦凝聚态中实现来自二维自旋-轨道耦合; 揭示胚胎发育过程中关键信号通路的表现遗传调控机理。2) 2016年中国重大技术进展10项: 新型钴基催化剂可将CO₂高效清洁转化为液体燃料; 中国“智造”软件成功解决肿瘤定位难题; 实现零容量信道量子信息的有效传输; 实现煤基合成气一步法高效生产烯烃; 全球首例单分子电子开关器件问世; 中国首次实现卫星“空中加油”; 推力最大固体火箭助推发动机试车成功; 让隐形战机显形的量子雷达研制成功; “神威·太湖之光”问鼎世界超算冠军; 发明病毒直接转化疫苗新技术。3) 2016年中国重大工程进展10项: 全球首座四代核反应压力容器吊装成功; 中国标准动车组完成世界最高速交会试验; 世界首颗量子卫星“墨子号”成功发射, 系列大型科学实验项目启动; 神舟十一号与天宫二号成功实现自动交会对接; 中国万米级载人深潜器科考母船“张謇”号首航成功; 世界最大单口径射电望远镜FAST落成启用; “现代世界七大奇迹”之一的港珠澳大桥贯通; 中国首枚大型运载火箭长征五号首飞成功; 辽宁号航母实弹演习, 歼15舰载战斗机首现身; 世界第一高桥——北盘江大桥建成通车。

关键词 中国; 重大科学进展; 重大技术进展; 重大工程进展

《科技导报》2004年第3期刊登“2003年中国重大科学、技术与工程进展”, 至今已连续13年遴选发布中国年度重大科学、技术和工程进展^[1-14]。为盘点2016年中国重大科学、技术和工程进展, 《科技导报》编辑部从国内外重要科技期刊和科技新闻媒体所报道的中国科技成果中, 遴选、推荐30项重大科学进展、50项重大技术进展、33项重大工程进展候选条目, 由《科技导报》编委、审稿人等专家通信评选, 根据每项进展的得票情况, 推选出2016年度中国重大科学进展10项、重大技术进展10项、重大工程进展10项。遴选出的每项重大进展须为2016年1月1日至2016年12月31日间发表、公布或报道, 各项进展均按发表、公布或报道的时间先后排序。

1 2016年中国重大科学进展 (10项)

1.1 精子RNA可作为记忆载体将获得性性状跨代遗传

越来越多的证据显示, 随着生活环境和饮食结构的巨大改变, 高脂饮食导致的肥胖等代谢性疾病, 可以“记忆”在精子中并遗传给下一代, 导致后代肥胖。这种获得性遗传形式对人类繁衍及后代健康具有深远的影响。精子介导的这种获得性遗传机制涉及DNA序列之外的表现遗传信息在精子中的存储及传递, 破解这类表现遗传信息是本领域的一个主要挑战。

中国科学院动物研究所周琪、段恩奎与中国科学院上海生命科学研究院营养科学研究所翟琦巍合作, 基于高脂肪饮食小鼠模型, 发现精子中一类来源

于tRNA的5'端序列的、大小富集在30~34 nt的小RNA(tsRNAs), 在高脂饮食下发生了表达谱和RNA修饰谱的显著改变(图1)这种tsRNAs可作为父源信息在受精时进入卵子。分离高脂小鼠精子中的tsRNAs片段并注射到正常受精卵内, 可诱导F1子代产生代谢性疾病。高脂小鼠精子的tsRNAs进入受精卵后导致早期胚胎及后代小鼠胰岛中代谢通路基因发生显著改变。

该研究第一次从精子RNA角度为研究获得性性状的跨代遗传现象开拓了全新的视角, 提出精子tsRNAs是一类新的父本表现遗传因子, 可介导获得性代谢疾病的跨代遗传^[15]。相关研究结果发表在2016年1月22日《Science》[351(6271): 397-400]^[16]。

收稿日期: 2017-01-31; 修回日期: 2017-02-06

作者简介: 陈广仁, 编审, 研究方向为科技哲学、科技传播, 电子信箱: chenguangren@cast.org.cn

引用格式: 陈广仁, 刘志远, 田恬, 等. 2016年中国重大科学、技术和工程进展[J]. 科技导报, 2017, 35(3): 13-28. doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.03.001

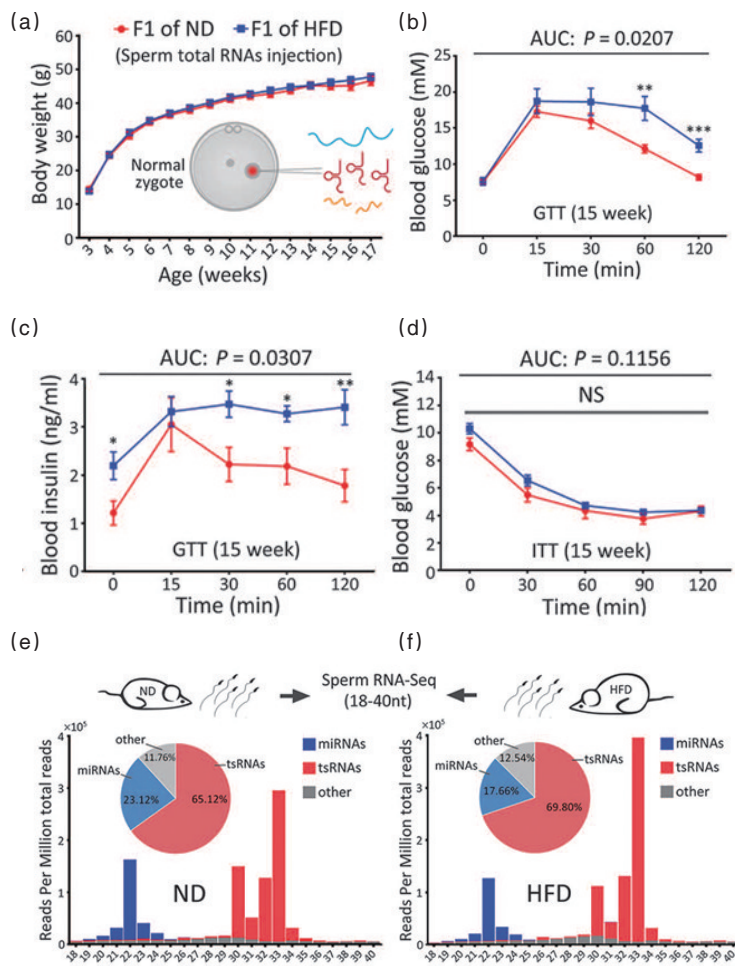


图1 父代获得性代谢紊乱性状通过精子RNA向F1代传递 (图片来源:《Science》)

1.2 构建出世界上首个非人灵长类自闭症模型

自闭症(也称孤独症)是一类多发于青少年的发育性神经系统疾病,患者表现出社交障碍、重复性刻板动作等行为异常,目前尚无有效的药物治疗及干预方法。近年来世界各国均发现自闭症的患病率逐年升高,引起社会各界广泛关注。中国作为人口大国,预计全国自闭症患者近千万。

中国科学院上海神经科学研究所仇子龙研究组与非人灵长类平台孙强团队合作,通过构建携带人类自闭症基因 *MECP2* 的转基因猴模型并对转基因猴进行分子遗传学与行为学分析,发现 *MECP2* 转基因猴表现出类似于人类自闭症的刻板动作与社交障碍等行为。首次在灵长类中成功通过精巢异体移

植的方法加快猴类繁殖周期,历时三年半得到了携带人类 *MECP2* 基因的第二代转基因猴(图2),且发现其在社交行为方面表现出了与亲代相同的自闭症样表型。这是世界上首个自闭症的非人灵长类模型,为深入研究自闭症的病理与探索可能的治疗干预方法做出了重要贡献^[17]。相关研究结果发表在



图2 携带人类自闭症基因 *MECP2* 的转基因猴(图片来源:《Nature》)

2016年2月4日《Nature》[530(7588): 98-102]^[18]。

1.3 提出基于胆固醇代谢调控的肿瘤免疫治疗新方法

T细胞介导的肿瘤免疫治疗是治疗肿瘤最有效的4种武器之一,在临床上已取得了巨大的成功。但现有的基于信号转导调控的肿瘤免疫治疗手段只对部分病人有效,因此急需发展新的方法让更多病人受益。

中国科学院上海生物化学与细胞生物学研究所许琛琦、李伯良与合作者从全新角度研究了T细胞的肿瘤免疫应答反应,认为通过调控T细胞的代谢检查点可改变其代谢状态,使其获得更强的抗肿瘤效应功能。鉴定出胆固醇酯化酶 *ACAT1* 是调控肿瘤免疫应答的代谢检查点,抑制其活性可以增强 $CD8^+$ T细胞的肿瘤杀伤能力,其主要机理是 $CD8^+$ T细胞质膜胆固醇水平明显增加,帮助T细胞抗原受体簇和免疫突触的高效形成(图3)。他们还发现 *ACAT1* 抑制剂 *Avasimibe* (辉瑞公司开发的用于治疗动脉粥样硬化相关疾病的药物,已进行了III期临床试验)具有很好的抗肿瘤效应,并能与现有的临床药物 *PD-1* 抗体联合治疗来获得更好的肿瘤免疫治疗效果。研究开辟了肿

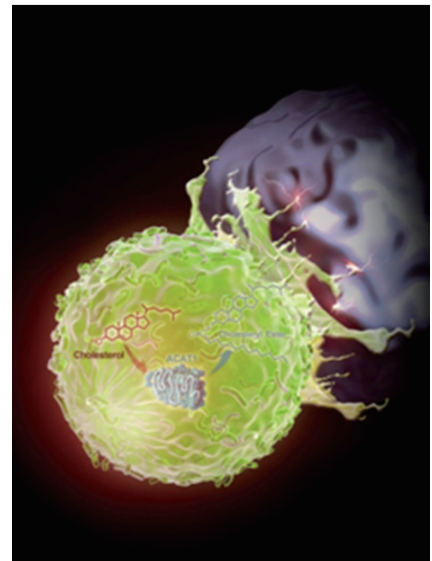


图3 抑制 *ACAT1* 增强 $CD8^+$ T细胞的肿瘤杀伤功能(图片来源:中国科学院上海生命科学研究院生物化学与细胞生物学研究所)

瘤免疫治疗的一个新领域,证明了代谢调控的关键作用;还发现了 ACAT1 这一新的治疗靶点,拓展了 ACAT1 小分子抑制剂的应用前景,为肿瘤免疫治疗提供了新思路与新方法^[19]。相关研究结果发表在 2016 年 3 月 31 日《Nature》[531(7596): 651–655]^[20]。

1.4 首次在原子尺度揭示水的核量子效应

水分子的全量子化效应被认为是揭开水的奥秘所需要解答的关键问题之一,已困扰科学界几十年。它包括电子量子化、核量子化(原子核的质量比电子要大许多,一般情况下原子核的量子效应可以忽略。但氢是 1 号元素,核质量很小,因此氢核的活动不能仅仅用经典力学解释,亦要重视其量子特性——量子隧穿和量子零点运动)及核量子化对电子量子态的影响。过去的研究只局限在电子量子化的层面,而后两部分基本被忽略了。

北京大学物理学院王恩哥和江颖研究组与合作者,在相关实验技术和理论方法上分别取得突破:发展了一套“针尖增强的非弹性电子隧穿谱”技术,获得了单个水分子的高分辨振动谱,并由此测得了单个氢键的强度;开发了基于第一性原理的路径积分分子动力学方法,实现了对电子量子态和原子核量子态的精确描述。基于此,在国际上率先测定了氢键的量子成分,首次在原子尺度揭示了水的核量子效应(图 4)。研究表明,氢键的量子成分可远大于室温的热能,氢核的“非简谐零点运动”会弱化弱氢键,强化强氢键,这个物理图像对于各种氢键体系具有相当的普适性。该工作是对“氢键的量子成分究竟有多大”这一物质科学基本问题的首次定量解答,澄清了学术界长期争论的氢键的量子本质,将有助于理解水和其他氢键体系的很多反常特性^[21]。相关研究结果发表在 2016 年 4 月 15 日《Science》[352(6283): 321–325]^[22]。

1.5 实验证实马约拉纳费米子的存在

马约拉纳费米子是一种与其反粒子完全相同的特殊费米子,它不仅关系到超对称理论和暗物质,而且是拓扑量

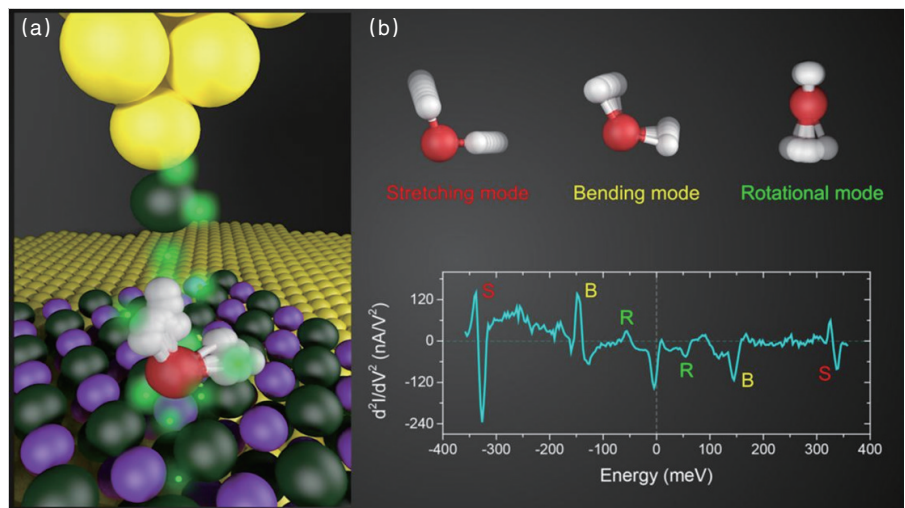


图 4 利用扫描隧道显微镜测量水的量子效应的示意(a)及为单个水分子的非弹性电子隧穿谱(b)(图片来源:北京大学)

子比特的最优载体,在量子计算领域有巨大应用前景,一直是物理学界的研究热点。2012 年,上海交通大学物理与天文系贾金锋研究组首先采用创新的设计和材料生长方法,制备出了自然界中不存在的拓扑超导材料,即马约拉纳费米子的载体。最新的理论预言凝聚态中的马约拉纳零能模(即马约拉纳费米子)可诱导产生自旋选择性 Andreev 反射(SSAR),这种新奇的磁特性可以用来探测马约拉纳零能模。

在前期工作的基础上,贾金锋(图 5)研究组与南京大学物理学院李绍春以及浙江大学物理学系张富春等合作,采用自旋极化扫描隧道显微镜/谱,探

测了人造拓扑超导体 $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{NbSe}_2$ 异质结中由马约拉纳零能模产生的 SSAR。观测结果显示,当扫描隧道显微镜的针尖极化与外部磁场方向一致时,量子涡旋中心隧道微分电导的零能峰要明显高于方向不一致的情况。这种自旋依赖性隧道效应提供了马约拉纳零能模的直接证据,揭示了其零能量模态之外的磁特性。该工作在实验上确定性证实马约拉纳零能模的存在,还提供了一个识别和调控的方法,使马约拉纳零能模在拓扑量子计算方面的应用成为可能^[23]。相关研究结果发表在 2016 年 6 月 24 日《Physical Review Letters》[116(25): 257003]^[24]。



图 5 贾金锋在实验室捕获马约拉纳费米子(图片来源:《中国科学报》)

1.8 揭示水稻产量性状杂种优势的分子遗传机制

不断提高谷物产量以保障全球粮食安全是作物遗传育种的长期目标。杂种优势是指通过杂交后代展现出比父本和母本具有更优势性状的现象,是一种重要的作物育种策略。

为揭示水稻产量性状杂种优势的遗传基础,中国科学院上海生命科学研究院植物生理生态研究所韩斌和黄学辉研究组与中国水稻研究所杨仕华合作,对 17 套代表性杂交水稻品系的 10074 份 F₂ 代材料进行了基因型和表型性状分析(图 8)。系统鉴定了与水稻产量杂种优势相关的遗传位点,并将现代杂交水稻品系鉴定为 3 个群系,代表了不同的杂交育种体系。研究发现,虽然在所有杂交稻中没有完全相同的与杂种优势相关的遗传位点,但在同一群系内,都有少量来自母本的基因位点通过不完全显性的机制对大部分杂种的产量优势有重要贡献。这一发现将有利于进行高效的杂交优化配组,以快速获得具有高产、优质和抗逆的杂交品种^[32]。相关研究结果发表在 2016 年 9 月 29 日《Nature》[537(7622): 629-633]^[33]。

1.9 在玻色-爱因斯坦凝聚态中实现二维自旋-轨道耦合

自旋-轨道耦合是量子物理学中基本的物理效应,它在拓扑绝缘体、拓扑超导体等当前凝聚态物理中最重要的的前沿领域扮演了核心角色。然而在固体材料中做精确的研究受到了复杂环境的限制。超冷原子具有环境干净、高度可控的优势,由激光诱导的自旋-轨道(SO)相互作用的超冷原子提供了一个传统固体之外的理想研究平台,是当前量子模拟领域中的最重要的方向之一。

中国科学技术大学合肥微尺度物质科学国家实验室潘建伟、陈帅等组成的实验小组与北京大学物理学院刘雄军理论小组等合作,理论提出并实验实现了铷-87 玻色爱因斯坦凝聚气体中的二维自旋-轨道耦合,构造了非平凡拓扑能带并测定了其新奇的性质。他

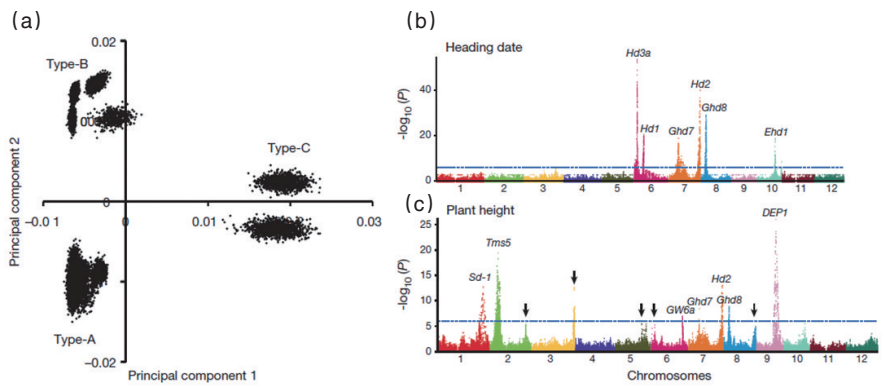


图 8 针对 10074 份 F₂ 代材料进行的大规模测序后的基因分型与遗传 (图片来源:《Nature》)

们利用的全新拉曼光晶格技术具有天然的稳定性,不需要对光学势垒进行锁相或精细的调谐,且体系的加热可被很好地控制。实验中观察到了在二维和一维之间可连续调谐的自旋-轨道耦合,并通过原子云在自旋结构和动量空间的分布观察到了能带的拓扑相变(图 9),该工作将对冷原子和凝聚态物理研究产生重大影响,基于此工作可研究全新的拓扑物理,包括固体系统中难以观察到的玻色子拓扑效应等,为超冷原子量子模拟开辟了一条新道路^[34]。相关研究结果发表在 2016 年 10 月 7 日《Science》[354(6308): 83-88]^[35]。

1.10 揭示胚胎发育过程中关键信号通路的表观遗传调控机理

动植物从单细胞受精卵发育成为高度复杂的生物体是一个奇妙的过程。哺乳动物基因组 DNA 中的 5-甲基胞嘧啶(5mC)是一种稳定存在的表观遗传修饰,通过 DNA 甲基转移酶(DNMTs)催化产生。近年来研究发现,TEF 双加氧酶家族蛋白可以氧化 5mC,从而介导 DNA 发生去甲基化。虽然 DNA 甲基化在哺乳动物基因组印记和 X 染色体失活等过程中具有非常重要的作用,但是 DNA 甲基化及其进一步氧化修饰在小鼠胚胎发育过程中的功能意义还

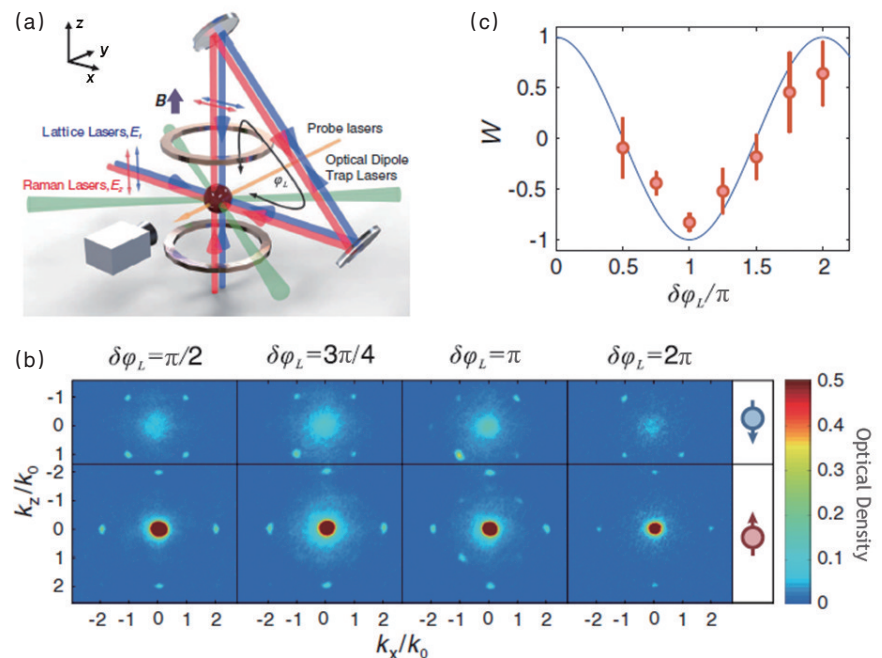


图 9 实验观察到了在二维和一维之间可连续调谐的自旋-轨道耦合 (图片来源:《Science》)

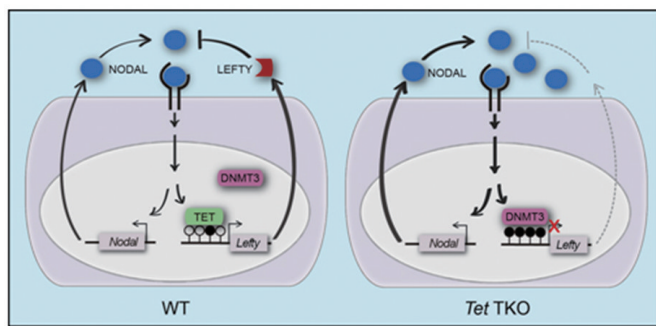


图 10 原肠运动过程中 TET 和 DNMT3 在 Lefty-Nodal 反馈调控环路中的功能示意 (图片来源:中国科学院上海生命科学研究院生物化学与细胞生物学研究所)

知之甚少。

中国科学院生物化学与细胞生物学研究所徐国良研究组与美国威斯康星大学孙欣、北京大学汤富酬等合作,利用生殖系特异性敲除小鼠得到 Tet 基因三敲除胚胎,通过一系列形态发育特征的检测,结合基因功能互补分析,解析了 TET 缺失造成胚胎死亡的机制,发现了 TET 三个成员之间功能上相互协作,介导的 DNA 去甲基化与 DNMT 介导的 DNA 甲基化相互拮抗,通过调控 Lefty-Nodal 信号通路控制胚胎原肠运动(图 10)。该工作从长期困扰发育生物学领域的基本重大问题出发,着眼于人类新生儿出生缺陷的可能机理和防治,第一次系统地揭示了胚胎发育过程中关键信号通路的表现遗传调控机理,为发育生物学的基本原理提供了崭新的认识^[36]。相关研究论文发表在 2016 年 10 月 27 日《Nature》[538(7626): 528-532]^[37]。

2 2016 年中国重大技术进展 (10 项)

2.1 新型钴基电催化剂可将 CO₂ 转化为液体燃料

将 CO₂ 在常温常压下电还原为碳

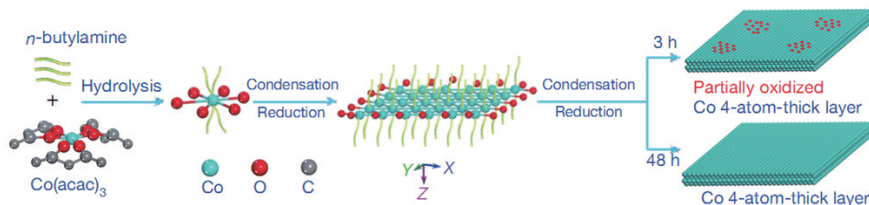


图 11 4 原子厚的钴金属层和钴金属/氧化钴杂化层制备路线图 (图片来源:《Nature》)

氢燃料,是一种潜在的替代化石原料的清洁能源策略,有助于降低 CO₂ 排放对气候造成的不利影响。实现 CO₂ 电催化还原的关键瓶颈问题是将 CO₂ 活化 CO₂⁻ 自由基负离子或其他中间体,这需要异常高的过电位。最近报道显示基于金属

氧化物还原得到的金属比通过其他方法制备的金属催化活性要高,但尚不清楚金属氧化物如何改变金属的电催化活性,这主要是因为界面和缺陷等微结构的存在影响了 CO₂ 还原的活性。

为评估金属和金属氧化物 2 种不同催化位点的作用,中国科学技术大学谢毅和孙永福研究组制备了 4 原子厚的钴金属层和钴金属/氧化钴杂化层,发现在低过电位下,相对于块材表面的钴原子,原子级薄层表面的钴原子具有更高的生成甲酸的本征活性和选择性(图 11)。而部分氧化的原子层进一步提高了它们的本征催化活性,在过电位仅为 0.24 V 实现了 10 mA/cm² 的电流输出超过 40 h,且其甲酸选择性接近 90%,这超过此前报道的金属或金属氧化物电极在同等条件下得到的结果。相关研究结果发表在 2016 年 1 月 7 日《Nature》[529(7584): 68-71]^[38]。

该研究工作有助于让研究者重新思考如何获得高效和稳定的 CO₂ 电还原催化剂,将有助于减少 CO₂ 的排放,缓解全球变暖^[39]。

2.2 中国“智造”软件成功解决肿瘤定位难题

肿瘤精准定位是放疗的关键问题

之一。放疗位置偏差不仅会导致肿瘤细胞不能被有效杀灭,还会增加正常细胞被破坏的风险。目前国产图像引导放疗系统采用单一模式引导,在应用范围和适用病例方面受到较大限制。而国外同类产品价格昂贵,极大地限制了中国精准放射治疗的普及。

2016 年 1 月 17 日报道,中国科学院合肥物质科学研究院核能安全技术研究所成功研发出多模式图像引导精准放射治疗软件系统(ARTS-IGRT,图 12),系统发展了 X 射线影像配准、基于红外信号的实时定位跟踪等方法技术,可以实现亚毫米级的肿瘤定位,比原有系统精度提高了一个量级,达到国际最先进商用产品水平,打破国外产品垄断地位。

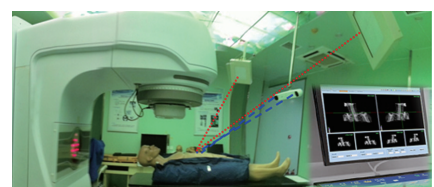


图 12 中国“智造”多模式精准放疗系统 ARTS-IGRT (图片来源:中国科学院合肥物质科学研究院)

ARTS-IGRT 系统具有低成本、方便快捷的外挂方式,因此能够与医院已有放疗设备进行无缝对接,有助于迅速提高现有设备的照射精度和治疗效果,对于提高中国放疗装备的技术水平和在临床机构的普及程度,解决患者看病难、看病贵的问题具有重要作用,目前已获两项国家发明专利^[40-41]。

2.3 实现零容量信道量子信息的有效传输

信道容量是指信道在噪声环境下有效传输信息的能力,是通信领域最基本的问题。量子信道不仅可以传输经典信息,还可以传输私密信息和量子信息,每种情况对应一个信道容量。标准的量子信道理论与经典理论相似,都是假定信道之间是相互独立的,但真实的量子信道并非如此。

中国科学院量子信息重点实验室李传锋、许金时研究组及其合作者,选

择具有极强的相位消相干、原本不能用来有效传输量子信息的保偏光纤进行深入研究,利用量子通信领域最近发展的理论工具来度量光纤的信道容量。首先实验测定一根 120 m 左右长度的保偏光纤的量子容量为零,随后对 2 根相同的保偏光纤进行编码,构成一个量子信道干涉仪,从而把量子容量为零的保偏光纤激活。激活后两 2 个保偏光纤不再独立,而是相互关联起来构成一个无消相干子空间,从而有效地进行量子信息传输。为了提高光纤噪声的关联度,将 2 根光纤缠绕在一起,实验测得 2 根量子容量为零的保偏光纤联合使用时的量子容量大于 0.6(理想的量子信道容量为 1)。量子信道干涉仪内有 2 个输入和 2 个输出,通过改变干涉仪内半波片的设置,可以实现量子

信息在噪声信道中的单向传输或双向传输(图 13~图 14),还进一步验证了量子纠缠在这种装置下传输的可靠性。相关研究成果 2016 年 1 月 8 日发表在《Science Advances》[2(1): e1500672-e1500672]^[42]。

该成果演示了一种在噪声信道中传输量子信息的有效方法,可用于不同量子系统的通信和对接,为构建小型量子纠缠网络提供了新思路,为丰富量子通信理论框架提供了新的物理平台^[43-44]。

2.4 实现煤基合成气一步法高效生产烯烃

烯烃是与人们日常生活息息相关的重要化学品。中国是烯烃消费大国,其传统的生产原料主要依赖石油,这不仅使烯烃的生产成本居高不下,同时也严重危及到了能源安全。20 世纪初,

德国科学家费舍尔和拓普希提出了一条由煤经水煤气变换生产烯烃的 Fischer-Tropsch (F-T) 过程,但是,该过程原理上会产生大量的副产物,同时还需要消耗大量的水,严重阻碍了该技术发展和实际应用。

中国科学院大连化学物理研究所包信和和潘秀莲研究团队从纳米催化

的基本原理入手,开发出了一种过渡金属氧化物和有序孔道分子筛复合催化剂,成功实现了煤基合成气一步法高效生产烯烃,C2 到 C4 低碳烯烃单程选择性突破了 F-T 过程的极限,一跃超过 80%。同时,反应过程完全避免了水分子的参与,从源头回答了李克强总理提出的“能不能不用水或者少用水进行煤化工”的诘问。该成果在纳米尺度上实现了对分别控制反应活性和产物选择性的两类催化活性中心的有效分离,使在氧化物催化剂表面生成的碳氢中间体在分子筛的纳米孔道中发生受限偶联反应,成功实现了目标产物随分子筛结构的可控调变(图 15)^[45-46]。相关研究结果发表在 2016 年 3 月 4 日《Science》[351(6277):1065-1068]^[47]。

2.5 研制出首个真实稳定可控的单分子电子开关器件

利用单分子构建电子器件对突破目前半导体器件微小化发展的瓶颈意义重大。实现可控的单分子电子开关功能是验证分子能否作为核心组件应用到电子器件中的关键。自 20 世纪 70 年代以来,设计构筑稳定可控的单分子器件,探索其与微电子工艺的兼容性,并获得真正意义上的分子电子开关,在当代纳米电子学研究中具有重大的科学意义。

北京大学北京分子科学国家实验室郭雪峰研究组原创性地发展了以石墨烯为电极、通过共价键连接的稳定单分子器件的关键制备方法,解决了单分

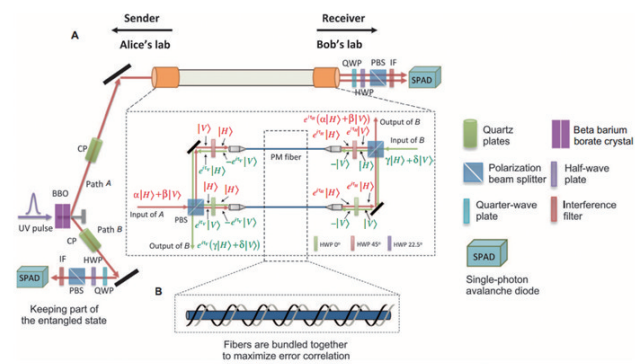


图 13 实验装置(图片来源:《Science Advances》)

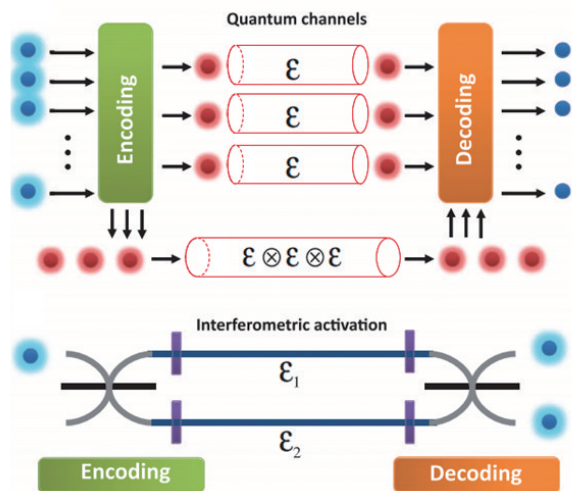


图 14 标准量子信道理论(a)与干涉激活技术(b)的对比(图片来源:《Science Advances》)

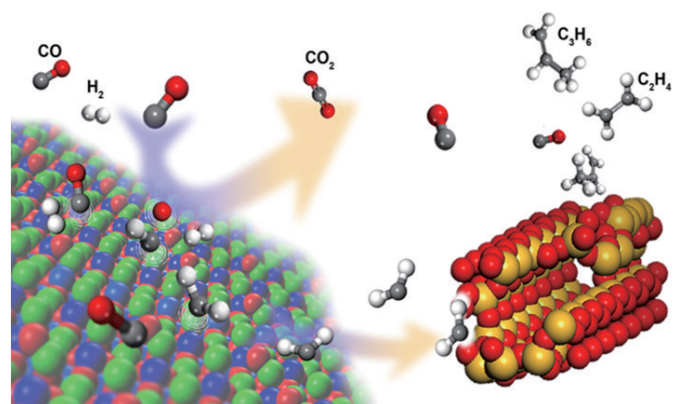


图 15 CO 活化和中间体偶联等 2 种催化活性中心有效分离反应过程示意(图片来源:中国科学院大连化学物理研究所)

子器件制备难、稳定性差的难题。在此基础上,他们与北京大学电子学系徐洪起研究组以及美国宾夕法尼亚大学 Nitzan 等合作,通过功能导向的分子工程学成功地克服了二芳烯分子与石墨烯电极间强耦合作用的核心挑战性问题,从而突破性地构建了一类全可逆的光诱导和电场诱导的双模式单分子光电子器件,世界首例真实稳定可控的单分子电子开关器件在中国诞生(图 16)。石墨烯电极和二芳烯分子稳定的碳骨架以及牢固的分子/电极间共价键链接方式使这些单分子开关器件具有空前的开关精度、稳定性和可重现性,在未来高度集成的信息处理器、分子计算机和精准分子诊断技术等方面具有巨大的应用前景^[48]。相关研究结果发表在 2016 年 6 月 17 日《Science》[352(6292):1443-1445]^[49]。

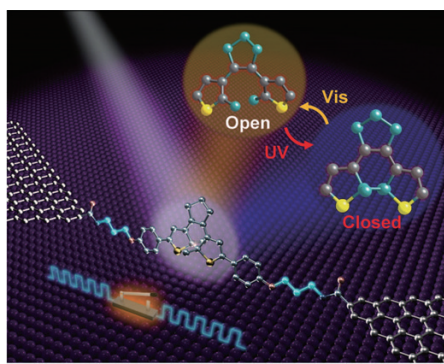


图 16 可逆型石墨烯-二芳烯-石墨烯桥联体结构的单分子光电子开关工作原理示意(图片来源:《Science》)

2.6 中国首次实现卫星“空中加油”

卫星在轨加注类似飞机空中加油,通过直接传输的方式对卫星进行气、液补给,可大幅延长卫星在轨寿命,提高卫星机动能力。据测算,如果给静止轨道上的卫星补给 60 kg 燃料,即可延长卫星寿命 12 个月,创造近亿元的经济价值。因此,卫星在轨加注一直是国际航天领域的研究热点,目前仅有美国等极少数国家开展过此项试验。

2016 年 6 月 25 日 20 时 00 分,由国防科技大学自主设计研制、中国首个卫星加注飞行试验系统——“天源一号”搭载长征 7 号运载火箭(图 17),在文昌



图 17 天源一号随长征七号运载火箭升空(图片来源:新华网)

卫星发射中心发射升空,准确进入预定轨道。随后几天,“天源一号”根据预定计划进行了卫星在轨加注核心关键技术试验与验证,成功完成微重力条件下流体管理与加注、高精度推进剂测量等 9 项在轨试验,获取了 3 种贮箱加注全过程的完整视频和相关试验数据,加注过程稳定,测量与控制精度高,实测结果满足设计指标要求,为中国掌握卫星在轨加注技术奠定了坚实基础。

近年来,国防科技大学联合国内多家优势单位,对“卫星在轨加注技术”进行了深入系统研究,在“微重力条件下流体迁移及稳定性分析”等理论研究方

面取得重要突破,先后攻克卫星可靠对接、管路高效密封、推进剂稳定传输及精确测量等一系列关键技术,研制出 30 余台套地面原理样机,获得发明专利 20 余项,部分技术指标达到国际先进水平^[50]。

2.7 推力最大固体火箭助推发动机试车成功

随着人类和平利用太空步伐的不断加快、深空探测领域的进一步拓展,世界主要航天大国都在致力于加快发展重型运载火箭技术和捆绑固体助推器的大型运载火箭技术。由于固体助推发动机具有结构简单、可靠性高和机动性好等优势,采用固体助推器与液体芯级发动机组合,可以充分发挥固体大推力、液体长时间高比冲的技术优点,从而实现运载火箭动力系统技术性与经济性的完美结合。国外大型运载火箭大都把固体动力作为主要动力之一,而中国在此领域尚属空白,与国际先进水平差距明显。

2016 年 8 月 2 日,由中国航天科技集团四院自主研发的中国直径最大、装药量最大、推力最大的固体火箭发动机——民用航天三米两段大型固体火箭助推发动机地面热试车圆满成功(图 18)。试验的成功,进一步验证了中国大型分段式固体火箭发动机设计方案及其关键技术,标志着中国已经掌握大型固体火箭助推发动机关键技术,也表明中国新一代运载火箭固体助推技术又向前迈进了一大步。



图 18 直径三米两段技术验证发动机(图片来源:央视新闻)

2013年底,民用航天三米两分段大型固体助推技术集成演示验证项目正式获得国家立项。攻克了大直径固体发动机燃烧室分段对接技术、长时间工作喷管热结构设计技术、分段式固体发动机燃烧稳定性技术等多项重大关键技术及40余项技术难点,采用并验证了新工艺10余项,建立了新的测试与试验方法20余项,形成技术专利10多项。未来,三米发动机应用于重型运载火箭固体助推器中,可实现近地轨道运载能力达到100 t以上,满足中国载人登月、深空探索的发展需求^[51]。

2.8 中国首部基于单光子检测的量子雷达研制成功

量子雷达探测技术是近年来国内外的研究热点,在雷达探测与成像识别领域具有重要的军事应用价值。2016年9月12日报道,中国首部基于单光子检测的量子雷达系统研制成功。

该量子雷达系统由中国电子科技集团14所研制,在中国科学技术大学、中国电子科技集团27所及南京大学等协作单位的共同努力下,完成了量子探测机理、目标散射特性研究以及量子探测原理的实验验证,并且在外场完成了真实大气环境下的目标探测试验,获得百公里级探测威力,探测灵敏度极大提高,指标均达到预期效果,取得阶段性重大研究进展与成果。

鉴于量子态传播所具有的特性,量子雷达利用量子态作为信息的载体,从而有效降低系统的功耗,可以应用于多种轻型平台;其次,以量子态作为接收对象,利用量子态特性,可以丰富目标的探测手段,提高对低可见目标的探测性能。利用量子态具有的高阶相关性,可以通过量子态关联抑制杂波干扰,同时在现阶段复杂电磁环境下具有较强的可靠性、保密性。总之,利用量子态所具有的特性,可以解决传统雷达在低可见目标的检测、电子战条件下的生存、平台载荷限制等诸多方面的瓶颈问题,从而全方面提升雷达的各项性能指标(图19)^[52]。

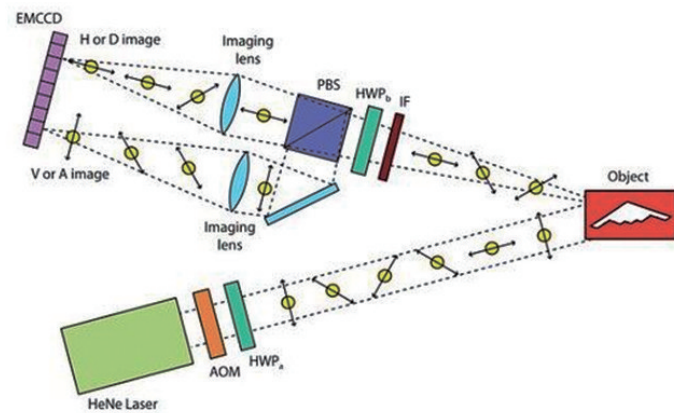


图19 量子雷达的技术优势(图片来源:观察者网)

2.9 “神威·太湖之光”问鼎世界超算冠军

在2016年6月20日德国法兰克福国际超算大会(ISC)公布的全球超级计算机500强榜单中,国家并行计算机工程技术研究中心研制、使用中国自主芯片制造的“神威·太湖之光”(图20~图21)以超第2名近3倍的运算速度夺得第一,取代“天河二号”登上榜首,中国超算上榜总数量也有史以来首次超过美国名列第1^[53]。

2016年11月14日,新一期全球超级计算机TOP500榜单公布,“神威·太湖之光”以较大的运算速度优势蝉联冠军。算上此前“天河二号”的六连冠,中国已连续4年占据全球超算排行榜的最高席位^[54]。

2016年11月18日,在美国盐湖城举行的2016年全球超级计算大会上,由中国科学院软件研究所、清华大学、北京师范大学、国家并行计算工程技术研究中心和国家超级计算无锡中心和

完成称的应用成果“千万核可扩展全球大气动力学全隐式模拟”一举获得国际高性能计算应用领域最高奖——戈登贝尔奖(ACM Gordon Bell Prize),实现了中国高性能计算应用在此奖项上零的突破,成为中国高性能计算应用发展的一个新的里程碑。

“千万核可扩展全球大气动力学全隐式模拟”应用团队设计并开发了一种新的用于大气动力框架的高可扩展全隐式求解器,世界上首次在大规模异构系统上实现了高效和千万核可扩展的全隐式求解,并将模拟分辨率提升至500 m以内,未来有望应用于全球高分辨率气候模拟和高精细数值天气预报。

该课题在应用与算法两个层面实现了重大突破。在应用层面,大气动力过程的模拟速度较美国地球物理流体力学实验室(GFDL)开发的美国下一代大气模拟系统AM3的计算效率提升近1个数量级,全隐式求解方法是未来超高分辨率大气模式构建的一种新选择;

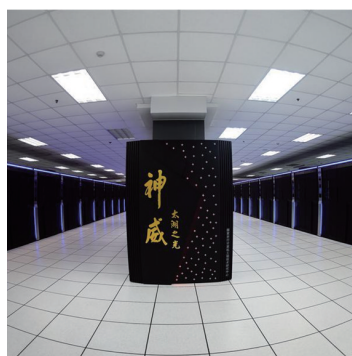


图20 “神威·太湖之光”超级计算机(图片来源:新华网)

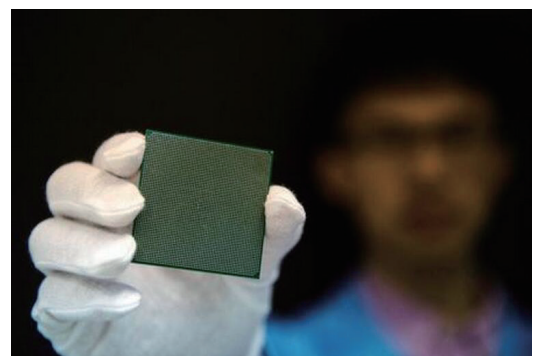


图21 “神威·太湖之光”所使用的“申威26010”众核处理器(图片来源:新华网)

在算法层面,实现了目前世界上第一个可扩展到千万核、峰值效率超过6%的隐式求解器,较2015年戈登贝尔奖获奖工作在并行度和峰值效率上均提升一个数量级^[55]。

2.10 发明病毒直接转化疫苗新技术

流感、艾滋病、SARS和埃博拉出血热等致命性传染病及其周期性爆发,时刻危害着人类健康和社会稳定,其幕后黑手是结构多样、功能复杂且变异快速的病毒,而疫苗是预防病毒感染的有效手段。当前临床使用的疫苗或因病毒灭活致免疫原性和安全性差,或因制备工艺复杂而不通用,或因病毒突变致免疫逃逸失效,从而使人们往往谈病毒色变。

北京大学药学院天然药物及仿生药物国家重点实验室周德敏、张礼和团队以流感病毒为模型,发明了人工控制病毒复制从而将病毒直接转化为疫苗的技术(图22),该技术在保留病毒完整结构和感染力的情况下,仅突变病毒基因组的一个三联码,使流感病毒由致命性传染源变为了预防性疫苗,再突变3个以上三联码,病毒由预防性疫苗变为治疗病毒感染的药物。并且随着三联码数目的增加而药效增强,该技术不仅使疫苗研发不再复杂,而且摆脱了对病毒生物学知识获得的依赖,并适用于几乎所有病毒。这一发现颠覆了病毒疫苗研发的理念,成就了活病毒疫苗的重大突破^[56]。相关研究成果2016年12月2日发表在《Science》[354(6316):1170-1173]^[57]。

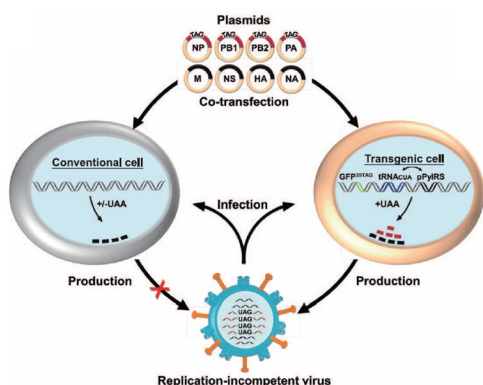


图22 重组病毒流程
(图片来源:《Science》)

3 2016年中国重大工程进展(10项)

3.1 全球首座四代核反压力容器吊装成功

2016年3月20日,由中国华能集团公司、中国核工业建设集团公司和清华大学合资建设的全球首座高温气冷堆示范工程压力容器在华能石岛湾核电厂吊装成功(图23),标志着中国在高温气冷堆示范工程建设和核电装备制造方面均取得重大突破。

高温气冷堆示范工程是国家科技重大专项之一,是世界上第一座具有第四代核能系统安全特性的核电机组,具有模块化建造、固有安全性、发电效率高、商业化应用前景广阔等技术优势,是中国建设创新型国家的标志性工程,工程于2012年底开工建设,计划于2017年底投产发电^[58]。

反应堆压力容器是核电站的核心部件之一,是保证反应堆安全运行的重要屏障。华能山东石岛湾核电厂规划建设建设的20万kW高温气冷堆核电机组,是中国拥有自主知识产权的第一座高温气冷堆示范电站,也是世界上第一座具有第四代核能系统安全特性的高温气冷堆商用规模示范电站。

而本次吊装的压力容器高约25m,重约610t,是目前世界上制造难度最大、尺寸最大、重量最重的核电站压力容器。示范电站使用的压力容器由上海电气核电设备有限公司自主研发制造,填补了中国核电设备制造的一项空白,标志着中国核电装备制造能力取

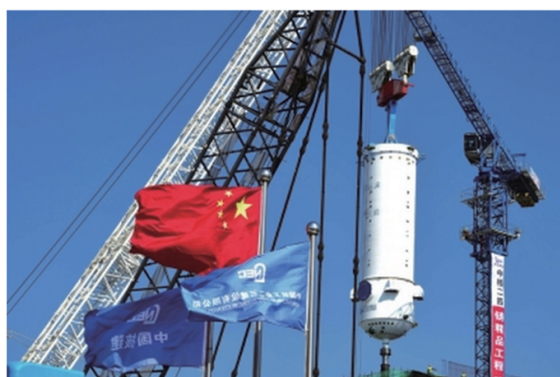


图23 华能山东石岛湾核电厂,反应堆压力容器在吊装中(图片来源:新华社)

得了新的重大突破,也为高温气冷堆商业化推广提供了坚实保障。

3.2 中国标准动车组完成世界最高速交会试验

2016年7月15日,2列自主研发的中国标准动车组“金凤凰”和“海豚蓝”在郑(州)徐(州)线上,分别以420 km/h的时速交会而行(图24)。这是世界最高速的动车组交会试验,这是拟运营高铁动车组列车世界上首次实现420 km/h交会和重联运行。试验的成功标志着中国已全面掌握高速铁路核心技术,高铁动车组技术实现全面自主化。试验的成功对于打造中国标准动车组品牌,助力中国高铁“走出去”,具有重要意义。

自2012年开始,中国铁路总公司主导集合国内有关企业、高校科研单位,开展了中国标准动车组研制工作。2015年6月中国标准动车组研制成功下线以来,2列动车组相继开展多项试验和运用考核。

近年来,中国高速铁路快速发展,高速动车组技术也取得长足进步。截至2016年底,中国铁路运营里程达到12.4万km,其中高铁运营里程2.2万km,而截至2016年7月,中国铁路投入运营的动车组已有2395余组,居世界首位,安全运行里程超过37.4亿km。

此次试验进一步验证了中国标准动车组整体技术性能,特别是首次实现了动车组牵引、制动、网络控制系统的全面自主化,表明中国具备设计制造满足世界各国不同需求动车组的能力^[59]。

3.3 世界首颗量子卫星“墨子号”成功发射,系列大型科学实验项目启动

2016年8月16日,由中国科学院国家空间科学中心抓总负责的中国科学院空间科学先导专项首批科学实验卫星之一的量子卫星“墨子号”,在酒泉卫星发射中心发射升空(图25)^[60]。这是世界首颗量子科学



图24 2辆中国标准动车组在郑徐高铁上以超过420 km/h的时速交会(图片来源:新华社)



图25 世界首颗量子卫星“墨子号”发射升空(图片来源:新华网)

实验卫星。量子科学实验卫星的成功发射,标志着中国空间科学研究迈出了重要一步,对于抢占战略制高点、保障国家信息安全具有重要意义^[61]。

量子卫星的主要科学目标是借助卫星平台,进行星地高速量子密钥分发实验,并在此基础上进行广域量子密钥网络实验,以期在空间量子通信实用化方面取得重大突破;同时在空间尺度进行量子纠缠分发和量子隐形传态实验,开展空间尺度量子力学完备性检验的实验研究^[60]。

中国发射的量子卫星突破了一系列高新技术,包括同时瞄准2个地面站的高精度星地光路对准、星地偏振态保持与基矢校正、星载量子纠缠源等工程级关键技术等,卫星设计寿命为2年^[60]。

2016年,包括“墨子号”在内,中国系列大型科学实验项目启动:4月6日发射、4月18日顺利回收的“实践探索十号卫星”,用于开展微重力科学和空间生命科学实验项目^[62-63];4月27日,成功发射的“鲲鹏-1B”探空火箭,开展了多项科学探测与技术试验任务,首次成功获得电离层顶的原位探测数据,并获得多项技术试验的圆满成功^[64];11月10日,脉冲星试验卫星发射升空。该星主要用于验证脉冲星探测器性能指标和空间环境适应性,积累在轨试验数据,为脉冲星探测体制验证奠定技术基础^[65-66];11月12日,云海一号01星发射升空。云海一号01星主要用于大气海洋环境要素探测、空间环境探测、防

灾减灾和科学试验等领域^[67];12月22日,中国发射首颗“嗅碳”卫星,用于开展全球CO₂监测科学实验^[68]。

3.4 神舟十一号与天宫二号成功实现自动交会对接

2016年10月19日,“神舟十一号”载人飞船与“天宫二号”空间实验室成功实现自动交会对接(图26)^[69]。“神舟十一号”载人飞船上的2名宇航员在“天宫二号”上开展各项科学实验。

2016年9月15日,长征二号F T2运载火箭搭载着中国航天科技集团抓总研制的中国首个真正意义上空间实验室“天宫二号”,从酒泉卫星发射中心成功发射升空。“天宫二号”是中国载人航天工程进入空间站阶段前的重要一步,也是中国载人航天工程“三步走”战略中第二步第二阶段^[70]。

“天宫二号”空间实验室全长10.4 m,最大直径3.35 m,太阳翼展宽约18.4 m,重8.6 t,采用实验舱和资源舱两舱构型,设计在轨寿命不小于2年,主要任务是接受载人飞船和货运飞船访问,开展空间科学实验和相关技术试验,验证空间空间站建造和运营相关关键技术。“天宫

二号”担负着与“神舟十一号”载人飞船交会对接完成两名航天员进行30天中期驻留,与货运飞船交会对接进行推进剂补加,在航天员驻留期间开展维修性技术试验及舱内其他实验项目,以及搭载14个科学实验开展空间技术应用等4项主要任务^[70]。

2016年10月17日,为了更好地掌握空间交会对接技术,开展地球观测和空间地球系统科学、空间应用新技术、空间技术和航天医学等领域的应用和试验,“神舟十一号”载人飞船在中国酒泉卫星发射中心成功发射升空。它由“长征二号”F运载火箭发射,搭乘景海鹏和陈冬2名男性航天员^[71]。

在完成交会后,2016年11月18日,“神舟十一号”飞船返回舱在内蒙古中部预定区域成功着陆,“天宫二号”与

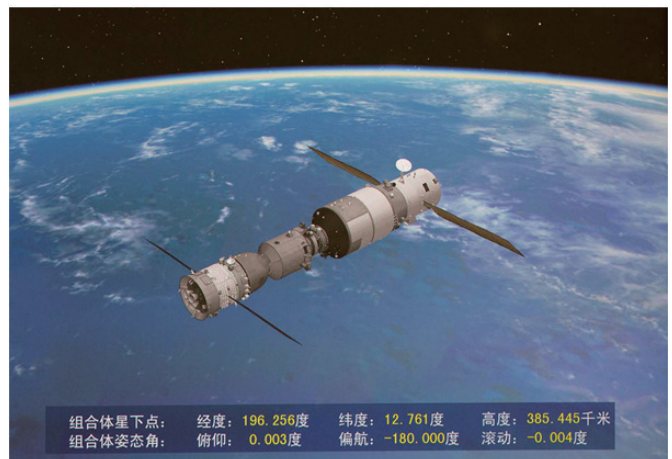


图26 神舟十一号飞船与天宫二号组合体飞行模拟画面(图片来源:新华社)



图 27 中国万米级载人深潜器科考母船“张謇”号(图片来源:人民网)

“神舟十一号”载人飞行任务取得圆满成功。这标志着中国载人航天工程空间实验室阶段任务取得具有决定性意义的重要成果,为后续空间站建造运营奠定了更加坚实的基础^[72-73]。

3.5 中国万米级载人深潜器科考母船“张謇”号首航成功

2016年9月21号,在历经72天,超过9000海里的航行后,由泰和海洋科技集团与上海彩虹鱼海洋科技股份有限公司共同投资建造的,中国万米级载人深潜器科考母船“张謇”号(图27)抵达上海芦潮港客运码头,标志着“张謇”号首航暨探访海上丝绸之路活动圆满结束,彩虹鱼建设万米级深渊科学流动实验室走出重要一步^[74]。

2016年3月24日,中国11000 m载人深潜器“彩虹鱼”的母船“张謇”号在



图 28 世界最大单口径射电望远镜FAST(图片来源:中国科学院)

浙江温岭举行了上水仪式^[75]。2016年7月11日,“张謇”号从上海启程开始首航之旅,首航分为2个航段,第一航段从上海开赴南中国海,在西沙群岛海域进行为期5天的科考设备浅海测试,于7月23日抵达深圳。第二航段于2016年7月24日

从深圳出发,经拉包尔港入境巴布亚新几内亚海域,与当地矿业公司合作,在2座金矿附近海域的开展海洋环境调查,并在深度超过8000 m的新不列颠海沟进行了多项深海设备的试验。2016年9月5日完成所有的科学考察任务,启程回国,并于9月21日回到上海^[77]。

此次首航很好地实现了出发前制定的3大目标,暨测试船的远洋航行和科考设备可靠性,检验开展深渊综合考察的能力,以海洋环境调查为契机探索产学研全方位科学考察运作方式^[74]。

以“彩虹鱼”载人和无人潜水器为核心的作业平台将是世界上第一个全海深的“深渊科学技术流动实验室”,它可以为中外海洋科学家持续、系统地开展深渊科学研究搭建一个公共平台。可对全球26条6500 m深度以下的深

渊海沟,进行系统性科学普查,获取珍贵样本,建立深渊生物DNA数据库,带动一系列深渊生命科学研究的开展,探索生命的起源,为人类探索海洋作出贡献^[75]。

3.6 世界最大单口径射电望远镜FAST落成启用

2016年9月25日,由中国科学院

国家天文台自主设计建造的500 m口径球面射电望远镜(FAST)在贵州省黔南州平塘县大窝凼竣工落成(图28),标志着FAST正式进入试运行和早期科学观测阶段。

FAST是具有中国自主知识产权的大科学装置,由中国科学家创新设计、研发制造、组织施工,被形象地称为“中国天眼”。利用贵州天然的喀斯特洼坑作为台址,并在洼坑内铺设数千块单元组成500 m球冠状主动反射面,球冠反射面在射电电源方向形成300 m口径瞬时抛物面,同时采用轻型索拖动机构和并联机器人,以实现接收机的高精度定位,这些都是FAST在设计和建造中实现的自主创新内容^[76]。

按计划,FAST将和中国其他5座射电望远镜组成“天眼”群,并主导国际射电领域的低频测量网,从而更好地获取天体超精细结构^[77]。2016年9月17日,FAST接收到一组来自遥远宇宙的高质量脉冲星信号。这是其迄今为止接收到信噪比最高的电磁波信号。从获取的频率相位图中,科研人员计算出这颗脉冲星与地球相距1351光年^[77-78]。

FAST打破了世界上射电望远镜的百米极限,将为人类发现脉冲星、探索暗物质和黑洞、研究宇宙起源和地外文明等提供独特手段,为基础研究重大发现和突破、战略高技术发展和开展国际科技合作提供一流创新平台^[76]。

3.7 “现代世界七大奇迹”之一的港珠澳大桥贯通

2016年9月27日,世界最长的跨海大桥——港珠澳大桥主体工程桥梁工程实现全线贯通(图29)。港珠澳大桥建成通车后,将大大缩短香港到珠海、澳门三地的时空距离,从香港到珠海澳门驱车仅需30 min^[79]。

港珠澳大桥东接香港特别行政区,西接广东省(珠海市)和澳门特别行政区,是国家高速公路网规划中珠江三角洲地区环线的组成部分和跨越伶仃洋海域的关键性工程,将形成连接珠江东西两岸新的公路运输通道。

港珠澳大桥拥有世界上最长的沉管海底隧道,是中国建设史上里程最



图29 “现代世界七大奇迹”之一的港珠澳大桥
(图片来源:百度图库)

长、施工难度最大的跨海桥梁。大桥总长 55 km,工程包括 3 项内容:海中桥隧主体工程,以及香港、珠海、澳门三地口岸和连接线。海中桥隧主体工程(粤港分界线至珠海和澳门口岸段,下同)由粤港澳三地共同建设;海中桥隧工程香港段(起自香港石散石湾,止于粤港分界线,下同)、三地口岸和连接线由三地各自建设。

港珠澳大桥主体工程采用桥隧结合方案,穿越伶仃西航道和铜鼓航道段约 6.7 km 采用隧道方案,其余路段约 22.9 km 采用桥梁方案。为实现桥隧转换和设置通风井,主体工程隧道两端各设置一个海中人工岛,东人工岛东边缘距粤港分界线约 150 m,西人工岛东边缘距伶仃西航道约 1800 m,两人工岛最近边缘间距约 5250 m^[79]。

3.8 中国首枚大型运载火箭长征五号首飞成功

2016 年 11 月 3 日,由中国航天科技集团公司所属中国运载火箭技术研究院抓总研制的中国首枚大型运载火箭长征五号在中国文昌航天发射场点火升空(图 30)。

此次发射成功,标志着中国运载火箭实现升级换代,运载能力进入国际先进行列,是中国由航天大国迈向航天强国的重要标志^[80]。

长征五号运载火箭实现了中国液体运载火箭直径由 3.35 m 至 5 m 的跨越,采用 5 m 直径芯级,捆绑 4 枚 3.35 m 直径助推器,全长约 57 m,起飞重量约 870 t;具备近地轨道 25 吨级、地球同步转移轨道 14 t 级的运载能力,比现役火箭地球同步转移轨道运载能力提升 2.5 倍以上^[80]。

长征五号是中国运载火箭升级换代的里程碑工程,填补了中国大推力无毒无污染液体火箭发动机的空白,代表了中国运载火箭科技创新的最高水平,为中国新一代运载火箭系列化、型谱化发展奠定了坚实的技术基础。首次采

用芯一级 2 台 50 t 级氢氧发动机与 4 枚助推器各 2 台 120 吨级液氧煤油发动机的组合起飞方案,10 台发动机同时点火,起飞推力达 1060 t,实现了中国异型发动机起飞技术的重大突破^[80]。

长征五号是实现未来探月工程三期、载人空间站、首次火星探测任务等国家重大科技专项和重大工程的重要基础和前提保障。按计划,2017 年嫦娥五号落月采样返回、2018 年发射空间站核心舱、2020 年发射火星探测器等任务都将依靠长征五号实现^[80]。

3.9 辽宁号航母实弹演习,歼-15 战斗机首现身

2016 年 12 月 15 日,中国海军组织实施了航母编队实际使用武器演习(图 31)。此次中国海军组织航母编队实际使用武器演习,是根据航母试验和训练整体计划统一安排的目的,目的是检验武器装备性能和部队训练水平。

这是辽宁舰科研训练又一阶段性训练成果,意味着航母编队具备了既能有效防御也能有效进攻的能力。演习中,辽宁舰与数艘驱护舰组成编队,先后开展了建立侦察预警体系、空中拦截、对海突击和防空反导等科目演练,多批次歼-15 战斗机挂载实弹,飞赴演习海空域实施打击行动^[81]。

歼-15 战斗机为重型舰载战斗机(图 32),是中国目前装备辽宁舰航母的主力舰载机,是中国从乌克兰取得苏-33 战斗机原型机中的一架(T-10K-



图 30 中国首枚大型运载火箭长征五号在中国文昌航天发射场点火升空(图片来源:新华网)



图 31 航行中的辽宁舰(图片来源:澎湃新闻)



图32 歼-15战斗机带弹起飞(图片来源:当代海军)

3)为基础进而研制生产的第四代战斗机,研制由沈阳飞机工业集团承担。歼-15战斗机融合了歼-11B的技术,装配鸭翼、折叠式机翼,机尾装有着舰尾钩等舰载机特征,起落架强度高。自我攻防能力突出,飞行速度快,能轻易避开敌方雷达,数秒内探测、发现并摧毁敌方海上移动目标。

歼-15战斗机只是中国舰载机发展的开端,主要任务是为中国未来10年内建立一支随时可用的舰载机作战力量,同时培养出中国成熟的航母舰载机飞行员。随着歼20隐形战斗机的发展,未来比歼-15更小、性能更好的歼-31歼击机也可能加入到舰载机行列中来,以应对隐形歼击机时代的来临。

3.10 世界第一高桥——北盘江大桥建成通车

2016年12月29日,由贵州、云南两省合作共建的世界第一高桥——杭瑞高速贵州省毕节至都格(黔滇界)高速公路北盘江大桥建成通车(图33)。北盘江大桥是杭瑞高速毕都段的控制性工程,位于云南省和贵州省交界处,

桥面至江面高差达565 m,大桥主桥为钢桁梁斜拉桥,主跨720 m,在同类型桥梁主跨的跨径中排名第2^[82]。

北盘江大桥横跨贵州省六盘水市都格镇和云南省宣威市普立乡腊龙村交界处的北盘江,全长1341.4 m,桥面到谷底垂直高度565 m,为目前世界第一高桥^[82]。



图33 北盘江大桥(图片来源:新华网)

桥梁设计结合了边跨顶推和中跨悬臂拼装的施工工艺,同时在顶推过程中做了创新改进,将顶推过程中的水平力转换成社会自身的内力,确保以后结构的受力安全。此外还增加荷载转换装置,确保钢桁梁和墩身的受力安全。

毕都高速建成后,东北接遵毕高速达遵义,北接毕生高速达四川泸州,西北接毕威高速达威宁,西接普宣高速达云南曲靖,东接织纳高速达省会贵阳,南接水盘高速达兴义,可将黔川滇三省交界区域快速融入全国高速公路网,为实现国家“一带一路”战略具有重要意义而大桥通车后,云南宣威城区至贵州六盘水的车程将从此前的5 h左右,缩短为1 h左右^[82]。

致谢 本次遴选“重大科学进展”的30项候选条目,是从科学技术部基础研究管理中心主办,《中国基础科学》、《科技导报》、《中国科学院院刊》、《中国科学基金》、《科学通报》协办的2016年度“中国科学十大进展”候选条目中产生的,特此感谢!

参考文献(References)

- [1] 本刊编辑部. 2003年中国重大科学、技术与工程进展[J]. 科技导报, 2004, 22(3): 59-61.
- [2] 本刊编辑部. 2004年中国重大科学、技术与工程进展[J]. 科技导报, 2005, 23(2): 58-62.
- [3] 苏青. 2005年中国重大科学、技术与工程进展[J]. 科技导报, 2006, 24(1): 5-10.
- [4] 苏青. 2006年中国重大科学进展[J]. 科技导报, 2007, 25(1): 5-10.
- [5] 苏青. 2006年中国重大技术与工程进展[J]. 科技导报, 2007, 25(2): 5-13.
- [6] 苏青. 2007年中国重大科学、技术与工程进展[J]. 科技导报, 2008, 26(1): 19-27.
- [7] 苏青, 代丽, 岳臣. 2008年中国重大科学、技术与工程进展[J]. 科技导报, 2009, 27(1): 19-29.
- [8] 苏青, 朱宇, 代丽, 等. 2009年中国重大科学、技术与工程进展[J]. 科技导报, 2010, 28(1): 19-29.

- [9] 苏青, 朱宇, 陈广仁, 等. 2010年中国重大科学、技术和工程进展[J]. 科技导报, 2011, 29(3): 19-29.
- [10] 朱宇, 苏青, 陈广仁, 等. 2011年中国重大科学、技术和工程进展[J]. 科技导报, 2012, 30(3): 15-25.
- [11] 朱宇, 陈广仁, 苏青, 等. 2012年中国重大科学、技术和工程进展[J]. 科技导报, 2013, 31(3): 15-27.
- [12] 朱宇, 陈广仁, 史永超, 等. 2013年中国重大科学、技术和工程进展[J]. 科技导报, 2014, 32(3): 15-24.
- [13] 陈广仁, 吴晓丽, 刘志远, 等. 2014年中国重大科学、技术和工程进展[J]. 科技导报, 2015, 33(2): 15-28.
- [14] 陈广仁, 吴晓丽, 刘志远, 等. 2015年中国重大科学、技术和工程进展[J]. 科技导报, 2016, 34(3): 13-29.
- [15] 黄辛. 《科学》: 精子RNA可将获得性性状跨代遗传[N]. 中国科学报, 2016-01-05.
- [16] Chen Q, Yan M, Cao Z, et al. Sperm tsRNAs contribute to intergenerational inheritance of an acquired metabolic disorder[J]. *Science*, 2016, 351(6271): 397-400.
- [17] 黄辛, 倪思. 洁中国科学家全球首建自闭症猴模型[N]. 中国科学报, 2016-01-26.
- [18] Liu Z, Li X, Zhang J T, et al. Autism-like behaviours and germline transmission in transgenic monkeys overexpressing MeCP2[J]. *Nature*, 2016, 530(7588): 98-102.
- [19] 姜泓冰. 中国科学家发现肿瘤免疫治疗新方法[EB/OL]. (2016-03-17). <http://sh.people.com.cn/n2/2016/0317/c134768-27959428.html>.
- [20] Yang W, Bai Y, Xiong Y, et al. Potentiating the antitumour response of CD8⁺ T cells by modulating cholesterol metabolism[J]. *Nature*, 2016, 531(7596): 651-655.
- [21] 水之舞——物理学院“水的核量子效应”系列课题研究纪实[EB/OL]. [2017-01-17]. http://pkunews.pku.edu.cn/xwzh/2017-01/17/content_296607.htm.
- [22] Guo J, Lü J T, Feng Y, et al. Nuclear quantum effects of hydrogen bonds probed by tip-enhanced inelastic electron tunneling[J]. *Science*, 2016, 352(6283): 321-325.
- [23] 上海交大科研团队“捕获”马约拉纳费米子[EB/OL]. (2016-06-22)[2017-02-05]. http://news.xinhuanet.com/politics/2016-06/22/c_129082665.htm.
- [24] Sun H H, Zhang K W, Hu L H, et al. Majorana zero mode detected with spin selective Andreev reflection in the vortex of a topological superconductor[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(25): 257003.
- [25] 施一公. 基因组报道酵母剪接体催化第二步剪接反应激活状态的三维结构[EB/OL]. (2016-12-17). http://www.tsinghua.edu.cn/publish/thunews/10303/2016/20161217100356411421537/20161217100356411421537_.html.
- [26] Wan R, Yan C, Bai R, et al. The 3.8 Å structure of the U4/U6, U5 tri-snRNP: Insights into spliceosome assembly and catalysis[J]. *Science*, 2016, 351(6272): 466-475.
- [27] Wan R, Yan C, Bai R, et al. Structure of a yeast catalytic step I spliceosome at 3.4 Å resolution[J]. *Science*, 2016, 353(6302): 895-904.
- [28] Yan C, Wan R, Bai R, et al. Structure of a yeast activated spliceosome at 3.5 Å resolution[J]. *Science*, 2016, 353(6302): 904-911.
- [29] Yan C, Wan R, Bai R, et al. Structure of a yeast step II catalytically activated spliceosome[J]. *Science*, 2016, 355(6321): 149-155.
- [30] 上海交大主持的PandaX-II实验首个暗物质探测结果在《物理学评论快报》以封面文章发表[EB/OL]. 2016-09-17. <http://www.physics.sjtu.edu.cn/node/1994>.
- [31] Tan A, Xiao M, Cui X, et al. Dark matter results from first 98.7 days of data from the PandaX-II experiment[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(12): 121303.
- [32] 黄辛. 科学家揭示水稻杂种优势遗传机制[N]. 中国科学报, 2016-09-13.
- [33] Huang X, Yang S, Gong J, et al. Genomic architecture of heterosis for yield traits in rice[J]. *Nature*, 2016, 537(7622): 629-633.
- [34] 李大庆. 我率先实现超冷原子二维人工自旋轨道耦合[N]. 科技日报, 2016-10-12.
- [35] Wu Z, Zhang L, Sun W, et al. Realization of two-dimensional spin-orbit coupling for Bose-Einstein condensates[J]. *Science*, 2016, 354(6308): 83-88.
- [36] 徐国良. 基因组揭示胚胎发育过程中关键信号通路的表现遗传调控机理[EB/OL]. [2017-02-05]. <http://www.sibcb.ac.cn/cpRecentRes-1.asp?id=4006>.
- [37] Dai H Q, Wang B A, Yang L, et al. TET-mediated DNA demethylation controls gastrulation by regulating Lefty - Nodal signalling[J]. *Nature*, 2016, 538(7626): 528-532.
- [38] Gao S, Lin Y, Jiao X, et al. Partially oxidized atomic cobalt layers for carbon dioxide electroreduction to liquid fuel[J]. *Nature*, 2016, 529(7584): 68-71.
- [39] 詹婷婷. 中国科学家研制新型催化剂 能将二氧化碳转化为液体燃料[EB/OL]. (2016-01-07)[2017-02-04]. http://news.xinhuanet.com/tech/2016-01/07/c_1117701645.htm.
- [40] 核安全所研发出多模式图像引导精准放射治疗系统 可解决肿瘤跟踪定位难题[EB/OL]. (2016-01-15)[2017-02-05]. http://www.hfca.ac.cn/xwzx/jqyw/201601/t20160114_4518412.html.
- [41] 蔡敏. 中国“智造”软件成功解决肿瘤定位难题[N]. 科技日报, 2016-01-18.
- [42] Xu J S, Yung M H, Xu X Y, et al. Robust bidirectional links for photonic quantum networks[J]. *Science Advances*, 2016, 2(1): e1500672-e1500672.
- [43] 中国科大实现零容量量子信道的量子信息有效传输[EB/OL]. (2016-01-14)[2017-02-06]. http://news.ustc.edu.cn/xwbl/201601/t20160114_235347.html.
- [44] 吴长锋, 杨保国. 我实现零容量信道量子信息有效传输[N]. 科技日报, 2016-01-16.
- [45] 我所煤气化直接制烯烃研究获重大突破[EB/OL]. (2016-03-04)[2017-02-05]. http://www.dicp.cas.cn/xwzx/kjdt/201603/t20160304_4542725.html.
- [46] 付丽丽. 煤制烯烃将告别高水耗高能耗[N]. 科技日报, 2016-03-05.
- [47] Jiao F, Li J, Pan X, et al. Selective conversion of syngas to light olefins[J]. *Science*, 2016, 351(6277): 1065-1068.
- [48] 彭科峰. 全球首例单分子电子开关器件在我国问世[N]. 中国科学报, 2016-06-22.
- [49] Jia C, Migliore A, Xin N, et al. Covalently bonded single-molecule junctions with stable and reversible photoswitched conductivity[J]. *Science*, 2016, 352(6292): 1443-1445.
- [50] 王握文, 唐先武. 我国首次实现卫星“空中加油”[N]. 科技日报, 2016-07-01.
- [51] 赵竹青, 荣元昭. 推力最大固体火箭发动机试车成功[EB/OL]. (2016-08-02)[2017-02-05]. <http://scitech.people.com.cn/n1/2016/0802/c1007-28605268.html>.
- [52] 贾婧. 让隐形战机显形的量子雷达来了[N]. 科技日报, 2016-09-13.
- [53] “神威太湖之光”成为全球最快超算[EB/OL]. (2016-06-20)[2017-02-05]. http://news.xinhuanet.com/info/2016-06/20/c_135451303.htm.
- [54] 林小春. 中国“神威·太湖之光”再次问鼎世界超算冠军[EB/OL]. (2016-11-15)[2017-02-05]. http://news.xinhuanet.com/tech/2016-11/14/c_129363588.htm.

- [55] 赵广立. 神威摘戈登贝尔奖:中国超算应用正匹配中国速度[EB/OL]. (2016-11-21)[2017-02-05]. <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2016/11/361575.shtm>.
- [56] 崔雪芹, 付东红. 我国科学家发明病毒直接转化疫苗新技术[EB/OL]. (2016-12-02)[2017-02-05]. <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2016/12/362454.shtm>.
- [57] Si L, Xu H, Zhou X, et al. Generation of influenza A viruses as live but replication-incompetent virus vaccines.[J]. *Science*, 2016, 354(6316): 1170-1173.
- [58] 全球首座四代核反压力容器吊装成功[EB/OL]. (2016-03-21)[2016-12-29]. http://news.xinhuanet.com/energy/2016-03/21/c_128817617.htm.
- [59] 樊曦. 一秒117米:动车组进行世界最高速交会试验[EB/OL]. (2016-07-15)[2016-12-25]. <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2016/7/351304.shtm>.
- [60] 李瑜, 赵金龙. 世界首颗量子卫星“墨子号”发射圆满成功[EB/OL]. (2016-08-16)[2016-12-30]. <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2016/8/353746.shtm>.
- [61] 推动量子科学实现跨越发展[N]. 人民日报, 2016-08-17.
- [62] 倪思洁, 许京木. 实践十号卫星发射成功[N]. 中国科学报, 2016-04-06.
- [63] 李瑜, 赵金龙. 实践十号返回式科学实验卫星成功回收[EB/OL]. (2016-04-18)[2016-12-20]. <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2016/4/343726.shtm>.
- [64] 丁佳. 中科院发射探空火箭取得圆满成功[EB/OL]. (2016-04-27) [2016-12-29]. <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2016/4/344477.shtm>
- [65] 李国利, 邓孟. 我国成功发射脉冲星试验卫星[EB/OL]. (2016-11-10)[2016-12-22]. <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2016/11/360652.shtm>.
- [66] 潘珊珊. 我国成功发射脉冲星试验卫星[EB/OL]. 京华时报, 2016-11-11.
- [67] 李国利, 李潇帆. 我国成功发射云海一号01星[EB/OL]. (2016-11-13)[2016-12-29]. <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2016/11/360851.shtm>.
- [68] 李晨阳. 我国首颗“嗅碳”卫星发射升空[EB/OL]. (2016-12-22)[2016-12-30]. <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2016/12/364045.shtm>.
- [69] 田兆运, 蔡琳琳. 神舟十一号与天宫二号成功实现自动交会对接[EB/OL]. (2016-10-19)[2016-12-25]. <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2016/10/358636.shtm>.
- [70] 王佳雯. 天宫二号发射成功[EB/OL]. (2016-09-15) [2016-12-25]. <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2016/9/356380.shtm>.
- [71] 王佳雯. 神舟十一号载人飞船发射圆满成功[EB/OL]. (2016-10-17) [2016-12-20]. <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2016/10/358419.shtm>.
- [72] 郭心冰, 肖建军. 神舟十一号返回舱顺利着陆[EB/OL]. (2016-11-18) [2016-12-20]. <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2016/11/361383.shtm>.
- [73] “神舟十一号”上天:深度解读它的主要任务与技术革新[EB/OL]. (2016-10-17) [2016-12-20]. <http://tech.sina.com.cn/d/s/2016-10-17/doc-ifx-wvpar8218104.shtml>.
- [74] 黄辛. 完成三大目标“张謇”号首航成功[EB/OL]. (2016-09-23) [2016-12-27]. <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2016/9/356952.shtm>.
- [75] 王春. 万米级深渊科考母船“张謇”号试水[N]. 科技日报, 2016-03-25.
- [76] 王超. “中国天眼”落成启用 聚集世界目光[EB/OL]. (2016-09-25)[2017-01-03]. <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2016/9/357089.shtm>.
- [77] 付毅飞, 刘志强. 500米口径球面射电望远镜落成启用[N]. 科技日报, 2016-09-25.
- [78] 超级天眼收到1351光年外脉冲星信号[N]. 重庆日报, 2016-09-26.
- [79] 吴春燕. 港珠澳大桥:“超级工程”背后有何“超级创新”[N]. 光明日报, 2016-10-02.
- [80] 白国龙, 周慧敏. 我国首枚大型运载火箭长征五号首飞成功[EB/OL]. (2016-11-03)[2016-12-29]. <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2016/11/360173.shtm>.
- [81] 官方首次公开辽宁舰实弹演练:出动多批歼15实施打击[EB/OL]. (2016-12-16) [2016-12-20]. <http://mil.news.sina.com.cn/china/2016-12-16/doc-ifxytqav9436137.shtml?cre=milpagepc&mod={&loc=1&r=9&doct=0&rfunc=83>.
- [82] 崔晨韬. 世界第一高桥在贵州通车 相当于200层楼高[EB/OL]. [2016-12-29]. <http://news.sina.com.cn/c/nd/2016-12-29/doc-ifzcczsu6080292.shtml>.

Top advances of science, technology and engineering from China in 2016

CHEN Guangren, LIU Zhiyuan, TIAN Tian, ZHU Yehua

Editorial Department of *Science & Technology Review*, Beijing 100081, China

Abstract Based on the event every year for selecting the annual top advances in science, technology and engineering held by Editorial Department of *Science & Technology Review*, top 10 scientific achievements, top 10 technological achievements and top 10 engineering achievements from China in 2016 during January 1 to December 31, are selected respectively from a lot of scientific researches published in influential academic journals and scientific newspapers. The selection procedure involved screening and recommending candidate internally, followed by appraisal from experts including editorial board members and external reviewers. These achievements are introduced as the time sequence of publishing.

Keywords China; major advance of science; major advance of technology; major advance of engineering

(责任编辑 刘志远)