

2019年中国重大科学、技术和工程进展

陈广仁, 刘志远, 祝叶华, 徐丽娇

《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2019年中国重大科学、技术、工程进展30项。1) 2019年中国重大科学进展10项:破解硅藻、绿藻捕光新机制;实现快速搜索并建立拓扑材料数据库;发现基于cGAS调控的自身免疫疾病潜在治疗方案;制备“三高”量子纠缠光子对源;在青藏高原发现丹尼索瓦古老型智人活动证据;首次在碲化铋中观测到三维量子霍尔效应;基于“嫦娥四号”探测数据发现月球背面幔源物质初步证据;揭示氮-水化物的多重超离子状态;合成超高能量密度无机介电薄膜;解析非洲猪瘟病毒三维结构并揭示其组装机理。2) 2019年中国重大技术进展10项:揭示600多种植物“癌症”病原机理;室温电化学水汽变换(EWGS)实现常温常压制备高纯度氢气;钨离子对可大幅提升铅碘钙钛矿太阳能电池工作寿命;石墨烯-碳纳米管复合支架可模拟神经网络;首创具有原子级精度的全碳电子器件制备技术;基于材料基因工程方法研制出高温块体金属玻璃;自主研发临床全数字PET/CT装备获准进入市场;开发出全球首款异构融合类脑计算芯片;开创基于自噬选择性降解亨廷顿病致病蛋白的药物研发新路径;光量子计算输出态空间维数提高百亿倍。3) 2019年中国重大工程进展10项:高能同步辐射光源验证装置(HEPS-TF)通过验收;200 t推力固体火箭发动机地面热试车成功;自升式碎石铺设整平船“一航津平2”下水;中国首次固体运载火箭海上发射成功;天宫二号空间实验室阶段全部任务圆满完成;自主研发最大直径泥水平衡盾构机成功始发;“南海深部计划”取得丰硕成果;北斗三号系统核心星座部署完成;长征五号遥三运载火箭发射成功;世界首条智能高铁“京张线”开通运营。

关键词 中国科技成就;重大科学进展;重大技术进展;重大工程进展

《科技导报》自2004年第3期刊登“2003年中国重大科学、技术与工程进展”以来,至今已连续16年遴选发布中国年度重大科学、技术和工程进展^[1-17]。为盘点2019年中国重大科学、技术和工程

收稿日期:2020-01-27;修回日期:2020-02-10

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, 祝叶华, 等. 2019年中国重大科学、技术和工程进展[J]. 科技导报, 2020, 38(3): 7-33; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.03.001

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 2019 年 1 月 1 日至 12 月 31 日间发表、公布或报道的中国科技成果中,遴选、推荐 30 项重大科学进展、40 项重大技术进展、36 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 2019 年中国重大科学进展 10 项、重大技术进展 10 项、重大工程进展 10 项,以下按发表、公布及报道的时间先后逐一介绍。

1 2019 年中国重大科学进展

1.1 破解硅藻、绿藻捕光新机制

光合作用是地球上规模最大、最重要的化学反应。光合生物利用太阳能,将水和二氧化碳合成有机物,并将氧气释放到大气中^[18]。它提供了地球上生物圈循环的驱动力,是地球上几乎一切生命活动的能量和物质来源,为人类繁衍和社会发展提供赖以生存的基础。

硅藻是最重要的浮游植物,它是一种具有色素体的单细胞植物,形态多样、分布极其广泛。硅藻繁殖迅速,光合作用效率高,每年为地球贡献约 20% 的原初生产力,在元素循环和气候变化中扮演了不可或缺的角色。硅藻的岩藻黄素-叶绿素 a/c

蛋白复合体”(fucoxanthin chlorophyll a/c protein, FCP)被称为“捕光天线蛋白”,具有出色的蓝绿光捕获能力和极强的光保护能力,是硅藻细胞快速生长和繁殖的能量保障^[19]。然而,硅藻光合膜蛋白结构如何,怎样高效捕捉和转化光能等问题一直未得到明确解决,限制了科学家破解硅藻光合作用机制的脚步。

2019 年 2 月 8 日,中国科学院植物研究所沈建仁和匡廷云研究团队在《Science》报道了硅藻捕光天线蛋白捕光的结构基础^[20]。研究人员通过多种手段解析了一种羽纹纲硅藻——三角褐指藻(*Phaeodactylum tricornutum*)的 FCP 1.8 Å 的晶体结构。研究发现,FCP 为二聚体,每个单体结合 7 个叶绿素 a、7 个岩藻黄素、2 个叶绿素 c、1 个硅甲藻黄素和一些脂类及去垢剂分子。该研究首次描绘了 FCP 单体中岩藻黄素分子与光合膜独特的结合方式,阐明其与叶绿素 c 高效地捕获、传递和保存光能的结构基础。

该团队进一步与清华大学隋森芳研究组合作,利用单颗粒冷冻电镜技术对中心纲硅藻 *Chaetoceros gracilis* 的光系统-捕光天线(PSII-FCPII)超级复合体的三维结构进行了解析,分辨率达到 3.0 Å,是国际上首次对硅藻 PSII-FCPII 结构进行的报道(图 1)^[21],该成果于 2019 年 8 月 2 日发表在《Science》

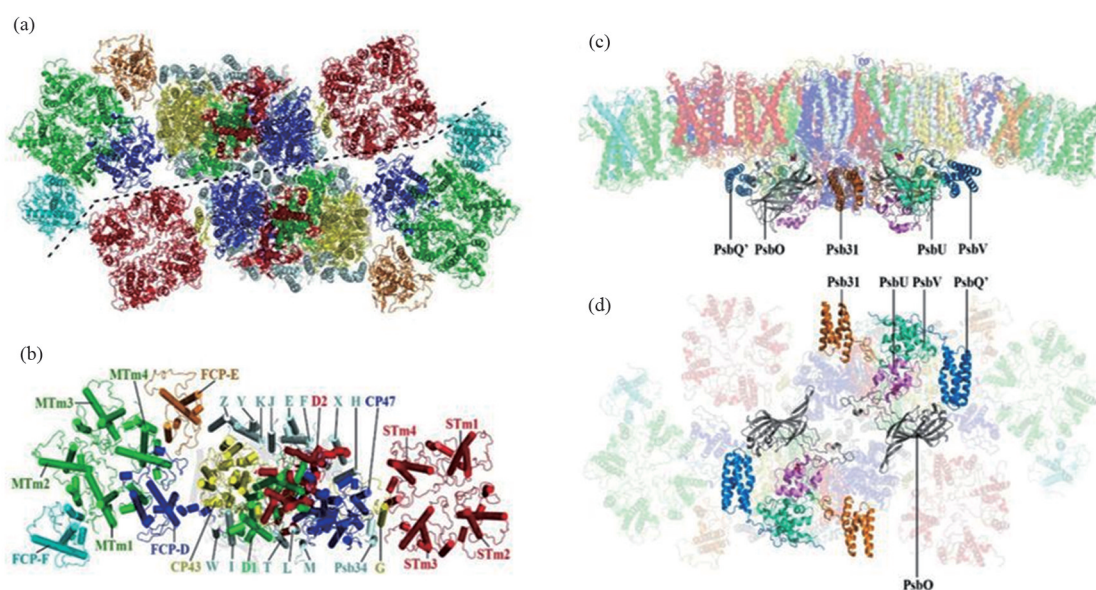


图 1 中心纲硅藻 PSII-FCPII 超级复合物结构(图片来源:《Science》)

上。研究结果显示,硅藻的PSII-FCPII超级复合体为二聚体,每个单体内部有24个核心亚基,外围有11个天线亚基。PSII-FCPII二聚体的总分子量超过1.4 MDa,包含288个叶绿素分子、146个类胡萝卜素分子,以及锰簇复合物、电子传递体和大量的脂分子等。同时,在硅藻的PSII-FCPII超级复合体中存在多条捕光天线,负责向光合反应中心传递能量,阐明硅藻PSII-FCPII超级复合体具有特殊的捕获、传递和转化光能途径,能够高效地实现光保护。该成果为人工提高作物的捕光和光保护效率、培育新型作物提供了思路。

绿藻也是一种广泛分布的水生植物,它的细胞具有与高等植物相似的细胞核和叶绿体,富含叶绿素a、b等色素,通过光合作用获取养分。假根羽藻是大型绿藻的一种,涨潮时处于水下弱光环境中,为满足自身生长需要,能够高效吸收、传递和转化光能;落潮时暴露在高光强环境中,能够适应环境变化并实现光保护,具有独特的光合作用模式。中国科学院植物研究所匡廷云和沈建仁研究团队与济南大学秦晓春团队、清华大学隋森芳团队合作,利用冷冻电镜技术,解析了假根羽藻(*Bryopsis corticulans*)光系统I-捕光复合物I(PSI-LHCI)超级复合物3.49 Å分辨率的结构^[22]。研究发现,假根羽藻的PSI-LHCI具有13个核心复合物亚基、10个捕光天线复合物,是已知的捕光天线数量最多的植物。假根羽藻的10个捕光天线呈双环形式排布,形成内、外2个环状。内、外环分别分布有4个天线,另外2个天线在与之相反的一侧结合,支持假根羽藻适应较弱光环境的生活模式。结构分析阐明,相对于高等植物,假根羽藻具有更快的激发能传递速率,相关研究成果于2019年3月8日发表在《Nature Plants》上。

中国科学院植物研究所沈建仁、匡廷云研究团队与浙江大学张兴研究团队合作,选用光合作用模式生物莱茵衣藻(*Chlamydomonas reinhardtii*)为研究材料,利用单颗粒冷冻电子显微镜技术,解析了超大PSII-LHCII复合体近原子分辨率(3.37 Å)的三维结构。研究发现,该蛋白复合体是由2个PSII-

LHCII单体按照 C_2 对称性组装而成一个 $C_2S_2M_2N_2$ 型的超分子复合体,总分子量为148 MDa,是目前解析的最大光系统II-捕光天线色素蛋白复合体。研究表明,每个PSII-LHCII单体含有29个蛋白亚基、189个叶绿素分子、53个胡萝卜素分子、2个去镁叶绿素分子和大量的脂分子。外周天线系统包括3个主要捕光天线复合体和2个次要捕光天线亚基(图2^[23])。复合体中有多条光能捕获及传递途径,表明该 $C_2S_2M_2N_2$ -PSII-LHCII超分子复合体拥有更高效的光能捕获与传递功能,这可能有助于绿藻在弱光条件下进行高效的光合作用。该研究结果对进一步揭示光合生物光能高效捕获、传递及其对环境适应的分子机制具有重要意义,相关研究进展于2019年10月15日发表在《PNAS》上^[23]。

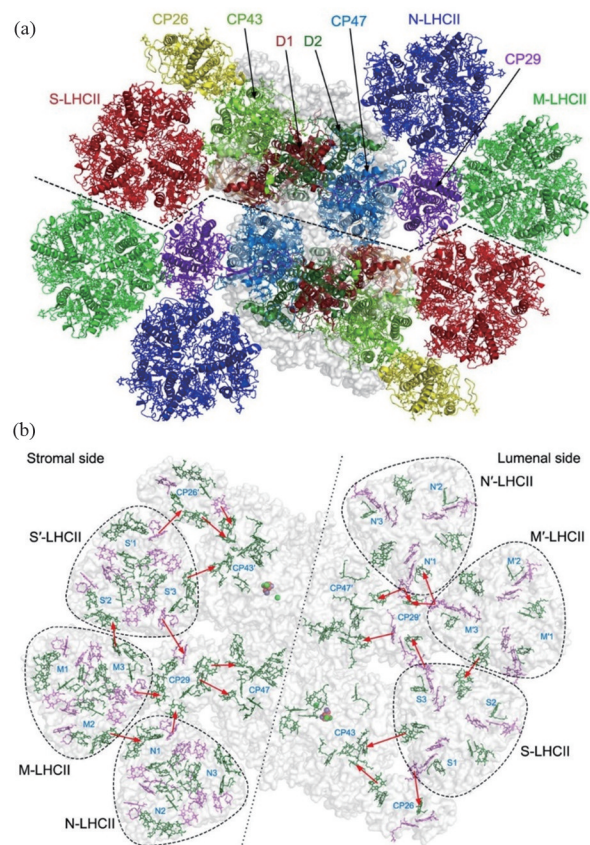


图2 莱茵衣藻 $C_2S_2M_2N_2$ 型光系统II-捕光天线
 $C_2S_2M_2N_2$ -PSI
(图片来源:《PNAS》)

上述研究进展率先破解了硅藻、绿藻光合膜蛋白超分子结构和功能之谜,不仅对揭示自然界光合作用的光能高效转化机理具有重要意义,也为人工模拟光合作用、指导设计新型作物、打造智能化植物工厂提供了新思路和新策略。

1.2 实现快速搜索并建立拓扑材料数据库

拓扑描述的是几何图形或空间在连续改变形状后还能保持不变的性质。20世纪70年代,戴维·索利斯(David Thouless)和迈克尔·科斯德里茨(Michael Kosterlitz)最早将拓扑的概念应用于低温下薄膜材料的相变研究,并且在研究二维材料有限温度下的超流体相变时,发现了“KT相变”。20世纪80年代初,戴维·索利斯等首次将拓扑学原理引入对量子霍尔效应的解释,正式揭示了凝聚态材料的拓扑性质。戴维·索利斯、邓肯·霍尔丹(Duncan Haldane)和迈克尔·科斯德里茨因为在物质拓扑相及相变方面的理论贡献,获得2016年诺贝尔物理学奖^[24]。

近年来,拓扑量子态是物理学和材料科学领域的前沿热点。拓扑材料具有常规材料没有的奇特物性,其拥有拓扑保护的导电边缘态,可用于低能耗的信息传输,还可用于量子信息的编码和操控,因此具有重要的应用前景。拓扑材料的核心属性是具有非零的拓扑不变量。目前,科学家普遍采用

的寻找拓扑材料的方法是计算拓扑不变量,当在理论上发现该不变量不为零后,再进一步实验验证^[25]。然而,在浩如烟海的化合物中观测拓扑性质非常耗时耗力,且效率低下,现阶段已知的拓扑材料数目只有几百种,其中深入研究的只有十几种。因此,亟需建立一种新的方法来快速、高效地寻找有实用价值的目标拓扑材料,以便进行更深入地研究。

2019年,曾屡次受诺贝尔奖青睐的拓扑物理学迎来拓扑材料物种大爆发之年。2019年2月27日出版的《Nature》同时报道了3篇有关拓扑材料理论和设计方法的论文,其中2篇由中国科学家主导完成。中国科学院物理研究所方辰、翁红明团队开发出了一套能够自动获得材料拓扑不变量信息的完整、快速、可以全自动运行的计算流程(图3)^[26]。通过计算材料能带的对称性数据,根据从对称性信息到拓扑不变量的映射关系,可以推导出材料的拓扑不变量的信息,完成自动计算拓扑性质的全流程。基于该算法,研究人员在3.9519万种材料中发现了8056种拓扑材料,并且依据这些拓扑材料的信息建立了数据库。这一成果不仅改变了拓扑量子材料的研究范式,还创造性地将该方向的研究重点从以往繁重的“寻找新材料”推进到了“研究新材料”上。

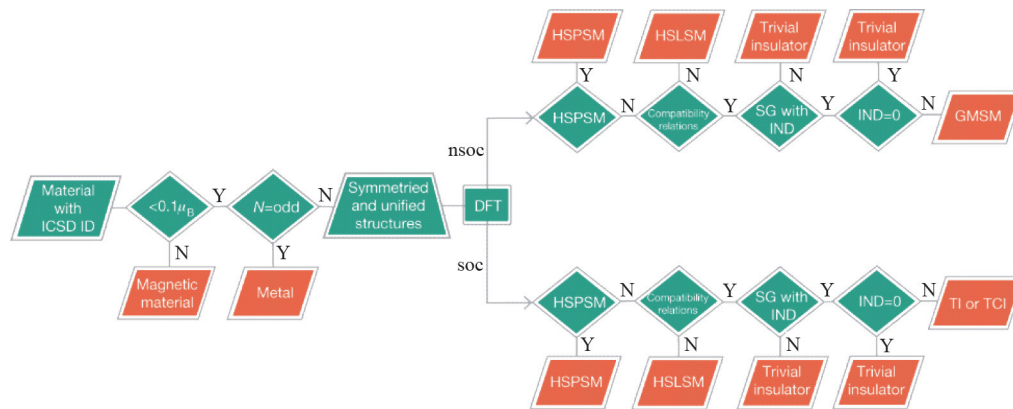


图3 自动诊断算法流程图(图片来源:《Nature》)

南京大学万贤纲团队利用对称性指标,对拓扑材料数据库进行了大规模地全面搜索,并以此为基础设立了拓扑材料基因库^[27]。该数据库公布了

1.0897万种拓扑材料的晶体结构信息及电子能带,供同行参考与研究(图4)。该研究表明,自然界中约24%的材料可能具有拓扑结构,颠覆了传统上认

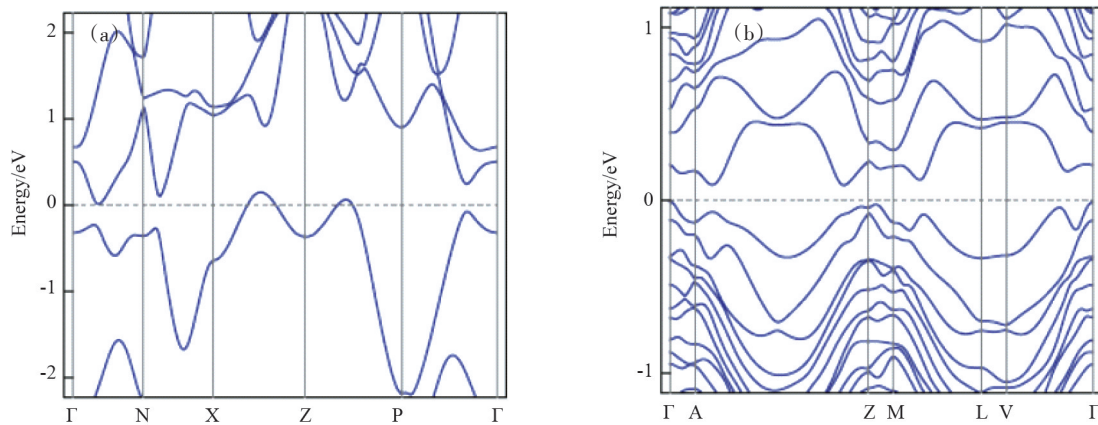


图4 强拓扑绝缘体的能带结构(图片来源:《Nature》)

为拓扑量子材料可能很稀缺的观念,所发展的新方法推动了拓扑材料发现范式的革新,标志着拓扑材料的研究进入了一个全新的时代。拓扑材料基因库将在未来为实验物理学家带来极大便利,这也对其他类型材料的搜索起到了很好的借鉴作用。

1.3 发现基于cGAS调控的自身免疫疾病潜在治疗方案

病毒是一种非细胞型生物,它依靠宿主细胞的营养物质完成生命过程。当病毒入侵宿主细胞时,首先会通过各种方法向细胞核内注射自身的DNA,以便利用宿主细胞环境进行基因组复制和增殖。对外源DNA的免疫识别及应答,是细胞感知和抵御病毒感染的重要手段。这一免疫应答过程在哺乳动物当中普遍存在。高等哺乳动物的天然免疫系统包含多种DNA模式识别受体,用于对外源侵染DNA的识别。2013年,美国德克萨斯大学西南医学中心陈志坚研究组发现cGAS(cyclic GMP-AMP synthase,受体环鸟苷酸-腺苷酸合成酶)是胞内DNA的关键感受器,cGAS会识别外源DNA和细胞自身的双链DNA(如受损的线粒体DNA、微核DNA等),通过一系列复杂的反应上调免疫因子的转录。除了感受病毒入侵以外,cGAS的异常激活还会直接导致一类自身免疫疾病的发生,例如Aicardi-Goutières综合征(AGS)和系统性红斑狼疮等。因此,虽然细胞质中的外源DNA可以通过激活cGAS迅速引发免疫反应,但是也可能导

致机体产生严重的自身免疫问题,不但无法有效治疗疾病,还可能对自身造成严重的损伤。研究cGAS激活的调控机制并发展干预策略,有望为控制病毒感染和自身免疫性疾病治疗带来新的突破。

军事医学研究院国家生物医学分析中心张学敏和李涛研究组揭示了乙酰化修饰是控制cGAS活性的关键分子,而阿司匹林(乙酰水杨酸)可以强制cGAS的乙酰化,并抑制自身DNA诱导的自体免疫过程,相关研究进展于2019年3月7日发表在《Cell》上。研究证明,cGAS乙酰化Lys384,Lys394或Lys414,有助于保持cGAS的无活性状态。阿司匹林可以直接乙酰化cGAS,并有效地抑制cGAS介导的免疫反应。该研究证明阿司匹林可以有效抑制自身DNA诱导的AGS综合症患者细胞和AGS小鼠模型中的自身DNA诱导的自体免疫^[29]。

此前,研究人员鉴定了cGAS的3个关键乙酰化位点(K384、K394和K414),发现其中任何一个位点发生乙酰化修饰,都可以致使cGAS失去活性^[29],相关研究结果于2019年1月发表在《Nature Immunology》上。因此,乙酰化有助于cGAS活性调节,揭示了阿司匹林作用于人体的全新靶点和分子机制,并为DNA介导的自身免疫性疾病提供了潜在的治疗方法(图5)。

1.4 制备“三高”量子纠缠光子对源

量子光源是制备量子信息和量子光电集成芯片必不可少的基本量子器件。自发参量下转换

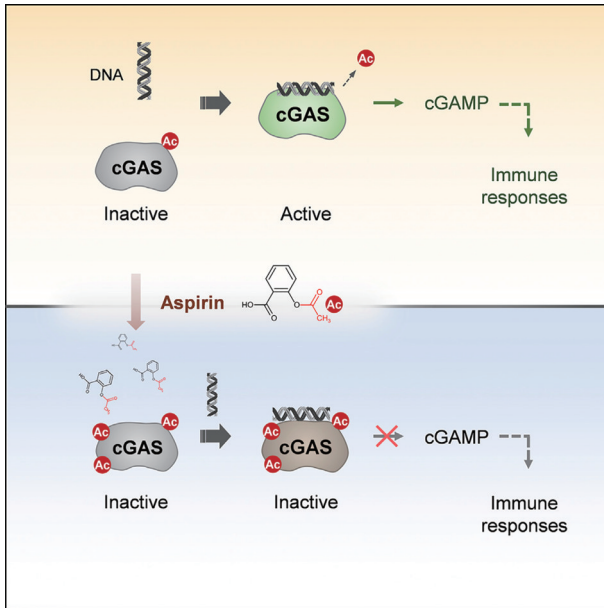
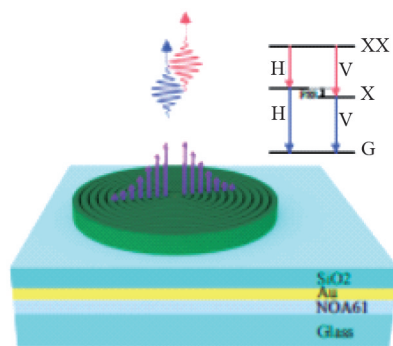


图5 阿司匹林诱导的乙酰化限制先天免疫反应
(图片来源:《Cell》)

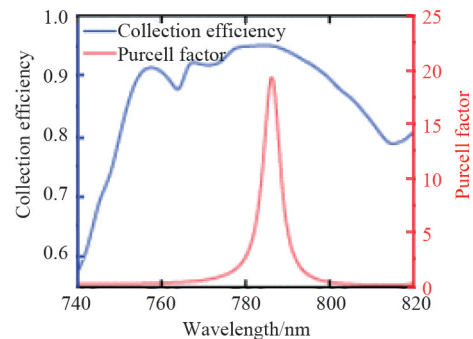
(SPDC)一直是产生量子光源的主要传统方法,由于该方法具有效率低、可重复性低等缺点,成为限

制量子光源研究的瓶颈^[30]。由外部电脉冲或光脉冲触发产生确定性的单光子或纠缠光子对的量子光源也存在纠缠保真度和不可区分性相对较低的问题,故实现高效率的纠缠光子源极端困难,导致国际上量子纠缠光子源的研究一直进展缓慢。制备符合高亮度、高纠缠保真度和高不可区分性“三高”要求的量子光子源是量子信息科学研究领域的一大难题。2017年,中山大学物理学院王雪华课题组首次在单量子辐射子水平上实现了激子与等离激元的强相互作用,该研究在常温常压下实现了1.38个激子(统计平均意义上的激子数)与单个纳米颗粒表面等离激元的强耦合相互作用,为最终实现确定性单激子与单个等离激元模式的强耦合作用迈出了关键性的一步^[31]。

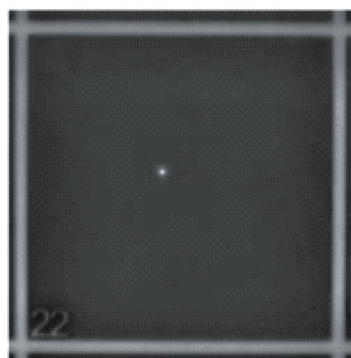
王雪华团队基于量子光辐射控制理论,提出了一种新型微纳“射灯”结构(图6),相关研究进展于2019年4月22日发表在《Nature Nanotechnology》上^[32]。该新型光源可以避免光子侧向和背向泄露,



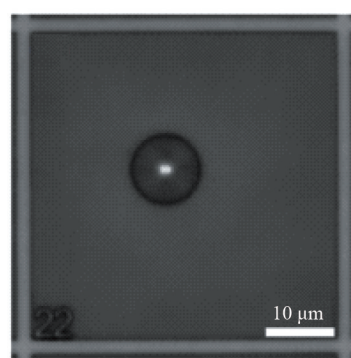
(a)



(b)



(c)



(d)

图6 产生极化纠缠光子对的量子点光源(图片来源:《Nature Nanotechnology》)

极大地提高了光子前向出射的效率。当带宽较大时,其单光子理论收集效率达到90%~95%。经过5年多持续不懈的探索,研究人员实现了3大核心微纳制备技术:厚度约160 nm且内有量子点的薄膜转移技术;定位精度<10 nm的量子点光学精确定位技术;环形槽宽度制备精度<5 nm的高质量牛眼微纳结构制备技术,在国际上率先制备出综合性能领先的“三高”量子纠缠光子对源。该工作为有高效率量子光源要求的实验提供了可能性。

1.5 在青藏高原发现丹尼索瓦古老型智人活动证据

丹尼索瓦人(Denisovans)是一支生活在上一个冰河时代的神秘人类种群,因发现于西伯利亚的丹尼索瓦洞而得名,被认为生活在距今约20万~5万年前。全世界发现的丹尼索瓦人化石极为稀少,只有出土于丹尼索瓦洞穴的少量手指骨和牙齿碎片等。2012年,科学家通过对丹尼索瓦人遗留的少量牙齿和指骨化石碎片提取的DNA进行分析,证明了丹尼索瓦人的存在。

青藏高原是世界上海拔最高的高原,被称为“世界第三极”,自然环境严酷、氧气稀薄,对人类的生存繁衍提出了挑战。史前人类对青藏高原高海

拔环境的适应历史是近年来国际研究关注的热点,中国科学院古脊椎动物与古人类研究所张晓凌等证实距今3万~4万年前,海拔4600 m以上的青藏高原已有现代智人出现;中国科学院青藏高原研究所陈发虎团队通过研究史前粟作农业人群迁徙聚居的历史,厘清了青藏高原史前人类定居高原的历史轨迹。但是,对于丹尼索瓦人在青藏高原活动的历史还未有明确证明。

2019年,陈发虎研究团队证实青藏高原东北部甘肃省夏河县出土的古人类下颌骨化石为距今16万年的青藏高原丹尼索瓦人^[33]。20世纪80年代,该化石于甘肃南部夏河县甘加盆地白石崖溶洞出土,对化石外碳酸盐结核包裹体进行铀系测年分析显示,该化石形成于至少距今16万年前。本次研究发现的古人类化石仅保存了下颌骨右侧,包括第一和第二臼齿两颗完整牙齿(图7)。通过应用古DNA和古蛋白等古人类学研究的新技术,对其体质性状以及少量粉末样品进行分析后发现,该化石为青藏高原的夏河丹尼索瓦人。该研究揭示,尼索瓦人先于现代智人来到青藏高原,且在第四纪最大冰期时已在此成功定居和活动,为进一步溯源现

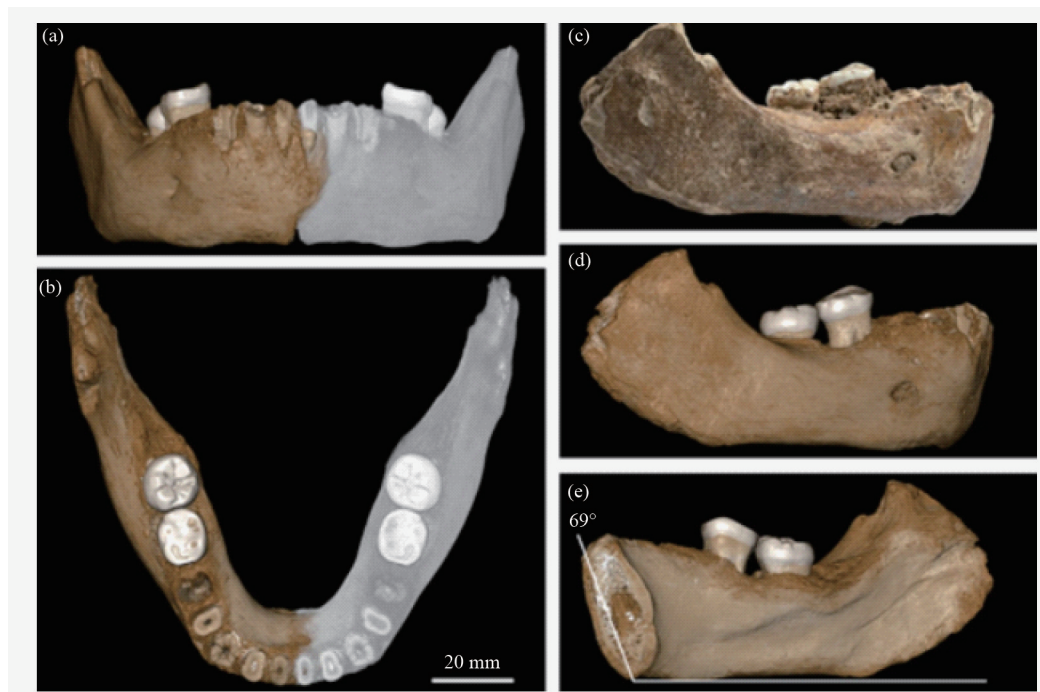


图7 丹尼索瓦古老型智人下颌骨化石(图片来源:《Nature》)

代藏族人群基因提供了新的依据。此项多学科研究成果不仅扩展了对丹尼索瓦人的研究范围,还将青藏高原最早人类活动时间提前到了16万年前,为史前人类高海拔环境适应和演化问题的研究提供了新的思路。相关研究进展于2019年5月1日发表在《Nature》上。

1.6 首次在碲化锆中观测到三维量子霍尔效应

霍尔效应是1879年美国物理学家霍尔(E.H. Hall)在研究金属的导电机制时发现的一种电磁效应。1985年,德国物理学家克劳斯·冯·克利钦(Klaus Von Klitzing)发现量子霍尔效应,将拓扑学引入凝聚态物理研究领域。迄今为止,已经有4次诺贝尔物理学奖颁发给与量子霍尔效应研究相关的成果:1985年表彰克劳斯·冯·克利钦发现量子霍尔效应;1998年表彰崔琦(Daniel Chee Tsui)、霍斯特·路德维希·施特默(Horst Ludwig Störmer)发现分数量子霍尔效应;2010年表彰安德烈·海姆(Andre Geim)和康斯坦丁·诺沃肖洛夫(Konstantin Novoselov)在室温下观察到量子霍尔效应;2016年表彰戴维·索利斯(David J. Thouless)、邓肯·霍尔丹(Duncan Haldane)和迈克尔·科斯特利茨(Michael Kosterlitz)发现物质拓扑相以及拓扑相变。1987年,哈佛凝聚态理论物理学家伯特兰·霍尔珀林(Bertrand Halperin)从理论上预言了存在三维量子霍尔效应,但多年来,对量子霍尔效应的研究仍以二维体系为主,从未进入三维体系领域。

中国的科学家选择了不同的材料开展相关研究。复旦大学物理系修发贤课题组选择拓扑半金属砷化镭(Cd_3As_2)楔形纳米结构,并于2018年首次观测到了由外尔轨道形成的新型三维量子霍尔效应,将量子霍尔效应研究从二维领域带入三维体系,为未来三维空间量子化传输提供了新思路 and 试验基础^[34]。南方科技大学张立源团队选择碲化锆(ZrTe_5)的三维晶体。碲化锆是一种具有三维层状结构的拓扑绝缘体,具有特殊的热电性质和电阻对温度的反常依赖关系,使其成为研究量子霍尔效应的良好材料。张立源自2014年起开始使用碲化锆进行三维体系研究,并于2017年初开始与中国科技大学乔振华团队合作,对来自于国内外的海量样

品进行测试分析。

2019年,乔振华与张立源等对碲化锆块体单晶体进行了磁场下的低温电子输运测量。当三维体系进入量子极限区域,电子之间的关联效应大大增强,形成电荷密度波,此时电子的密度沿着磁场方向以一定的周期振荡,整个体系转化为三维量子霍尔绝缘体。该研究成果于2019年5月8日发表在《Nature》上^[35]。此次发现首次在mm级的碲化锆块体单晶体材料中观测到三维量子霍尔效应,并实现金属-绝缘体的转换(图8)。这一工作将三维量子霍尔效应这一理论付诸实践,有望为未来的凝聚态物理的发展以及应用注入新的活力。

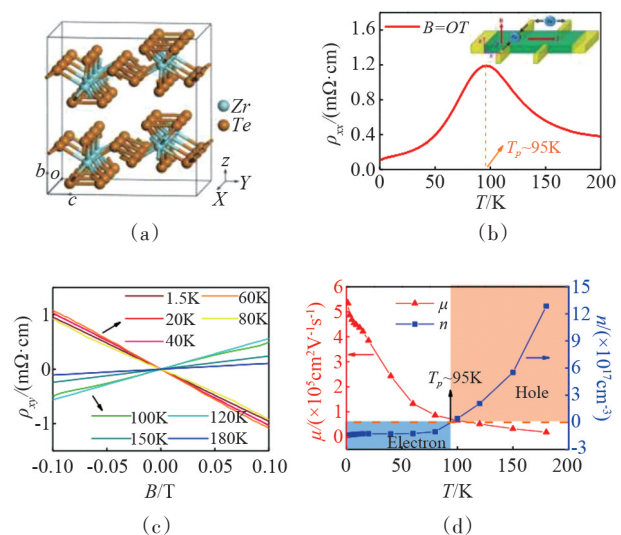


图8 ZrTe_5 的晶格结构及特征(图片来源:《Nature》)

1.7 基于“嫦娥四号”探测数据发现月球背面幔物质初步证据

月球作为地球唯一的卫星,一直以来受到人类的高度关注,自1959年前苏联和美国分别成功发射“月球号”和“先驱者号”月球探测器至今,人类对于月球的探索从未停止。有关月球早期演化的理论认为,月球和太阳系很多其他的行星类似,可能经历了岩浆海洋阶段。经过漫长的演变时期,岩浆中较轻的斜长石上浮,并结晶形成月亮,橄榄石、辉石等较重的矿物质则缓慢下沉,形成月幔。然而,由于美国和前苏联月球探索任务带回的样品中并未有直接证据能够确定月幔物质组成,月幔的组成、结构和层理等特征仍然缺乏确定的文献记载。

位于月球背面南极-艾特肯盆地(South Pole-Aitken basin, SPA)中部的冯·卡门撞击坑是月球上最大、最深、最古老的撞击坑,大约形成于40亿年前,其保存了原始月壳的岩石。美国国家航空航天局(NASA)获得的该撞击坑大小和地壳厚度的数据表明,它可能是由一次穿透了月球的月壳和内部的撞击事件造成的,此次撞击有可能透过月壳层,将内部的月幔物质带到月球表面^[36]。因此,南极-艾特肯盆地一直是科学家探索月幔物质时关注的重点。然而此前的研究并未在该撞击坑内大量发现橄榄石等月幔指示矿物存在。

2019年1月3日,“嫦娥四号”探测器“定点、定

时、精确”地着陆于冯·卡门陨石坑,成为人类历史上首个着陆于月球背面的无人探测器。着陆后,“玉兔二号”巡视器与着陆器分离,其上携带的可见光-近红外成像光谱仪(VNIS)对着陆点附近月壤进行探测,成功获取了2个探测点的高质量光谱数据(图9)。中国科学院国家天文台李春来研究组及其合作者对数据分析后发现,仪器获取的着陆点附近月壤的光谱特征与典型的月球表面物质的光谱吸收特征存在差异^[37]。进一步的分析证实,月壤物质中含量最高的是橄榄石,其次是低钙辉石,高钙辉石的含量极少。这些矿物质的组合很可能来源于月幔的深处物质。

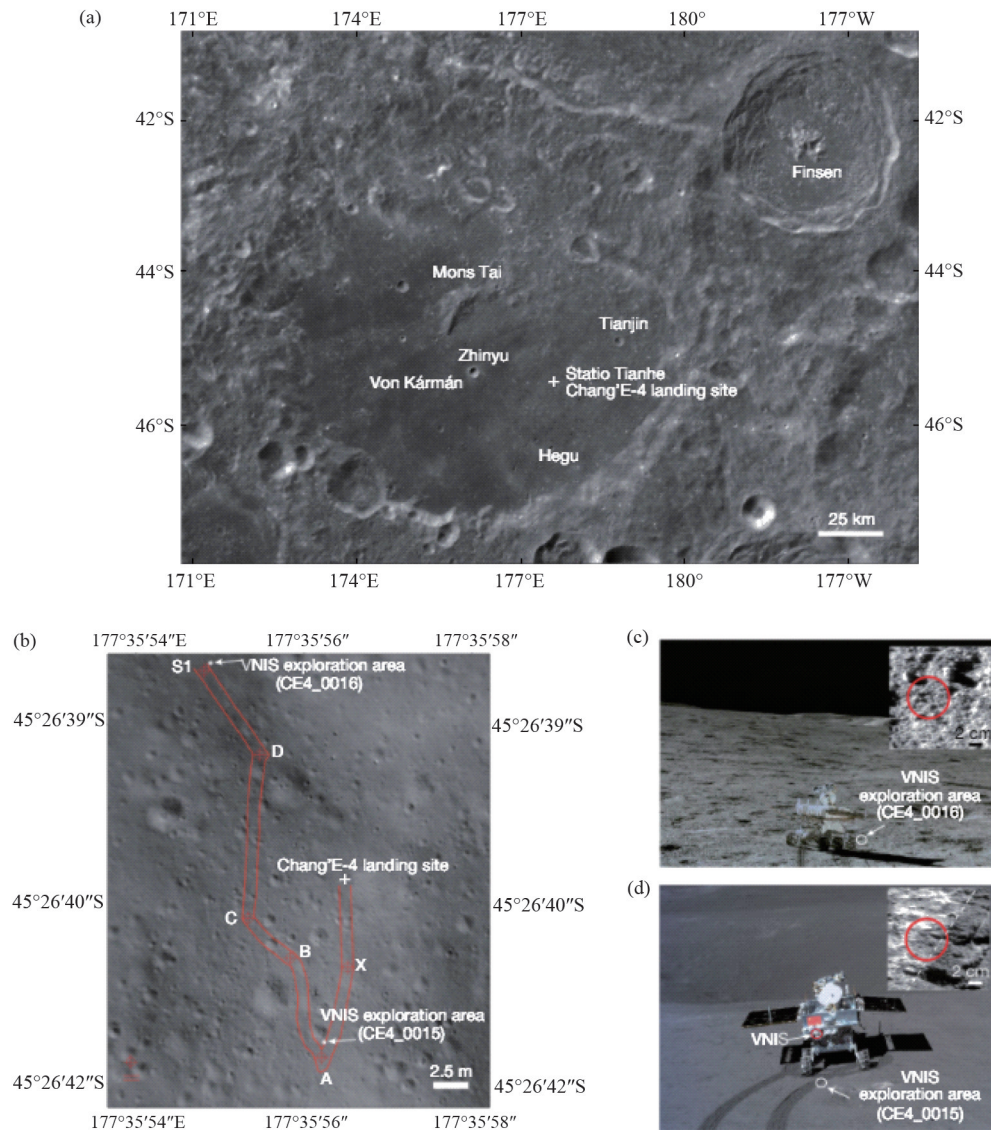


图9 嫦娥四号着陆点的位置和VNIS的测量(图片来源:《Nature》)

进一步分析着陆区域的高分辨率遥感图像数据和高光谱数据,结果显示,着陆器和月球车来自于芬森(FINSEN)撞击坑的溅射物上,芬森坑位于观测点东北部,是小天体撞击SPA盆地内部形成的一座较年轻的大撞击坑,将月球表面更深处的物质暴露出来,并撒布在冯·卡门撞击坑附近的平坦表面上。该研究基于“嫦娥四号”探测数据,证实了月幔的主要成分是橄榄石,对于确定月幔的组成具有重要的意义,加深了人类对月球内部形成与演化的理解。相关研究进展于2019年5月15日发表在《Nature》上。

1.8 揭示氦-水化合物的多重超离子状态

超离子状态是物质的相,其中化合物可以同时表现出液体和固体的特殊物态。当物体处于这种状态时,部分原子在其晶格格点附近振动,具有固体状态;而另一部分原子则可以自由地扩散,呈现液体行为。近年来,超离子态已成为全球研究的热点。研究证明,例如水和氦等,在一定的温度和压力条件下都能够出现超离子态。20世纪80—90年代,研究人员用计算机仿真方法发现水中可能存在超离子态。2019年,美国物理学家马里厄斯·米约(Marius Millot)和费德丽卡·科帕里(Federica Coppari)使用激光驱动的冲击波将水压缩至100~420 GPa、加热到2000~3000℃,首次在实验室中造出了超离子态水冰^[38]。

氦气是自然界中最惰性的元素,在常见的大气条件下通常不起反应。但近年来的研究表明,氦在高压下可以与某些物质形成化合物。有研究人员发现,氦和水在300 GPa的高压下会发生反应。这两种物质在宇宙中,特别是在天王星和海王星等巨行星中含量丰富。氦对积冰层中的物态演化的影响,目前还是人类认知的空白。南京大学物理学院孙建和王慧田等利用基于量子力学的晶体结构搜索和第一性原理分子动力学模拟等方法预言了氦和水在高压下可形成稳定化合物,并发现这些化合物在高温、高压极端条件下会出现多个超离子态^[39]。研究人员首先使用晶体结构搜索方法发现高压下最稳定的氦-水化合物,然后在高压和高温下进行广泛的分子动力学模拟,以探索这些化合物

在行星条件下的状态。最后,分析氦-水化合物的超离子性质,最终产生这些化合物中的压力-温度相图。在不同压力和温度条件下对氦-水化合物的分析揭示了两种先前未知类型的超离子状态:SI-I和SI-II。SI-I相时,氢和氧原子仍然保持着固态冰的子晶格结构,但氦原子已经开始扩散;SI-II相时,氢原子和氦原子一样开始扩散,而氧原子却仍然保持着固态晶格结构,氢和氦的轨迹交叠到一起。当温度高于2500 K以后,所有原子都发生扩散,完全成为液态(图10)。该发现将为人们重新认识氦在高压下的物理化学性质,以及天王星和海王星这类天体的结构演化提供重要的参考,展示了其在天文学和宇宙学的价值。相关研究进展于2019年7月1日发表在《Nature Physics》上。

1.9 合成超高能量密度无机介电薄膜

基于介电材料的电容器因其独特的超高功率密度,高耐压及高可靠性而在能源电力、电子器件及电能系统中扮演着至关重要的角色。然而,介质电容器的能量密度普遍较低,一直是阻碍其继续发展的主要困难。随着新型电子电学系统不断集成化和微型化,提高介质电容器的能量密度也成为了介电材料领域亟待解决的问题。

清华大学林元华和南策文等用多态纳米结构设计的超高能量密度介质,显著提升了能量密度的纳米畴结构。研究团队首先采用理论相场模拟了部分特定固溶体的晶域结构,确定具有最高能量密度及能量效率的材料组成^[40]。基于相场模拟结果,随后采用激光脉冲沉积法合成了无铅BiFeO₃-BaTiO₃-SrTiO₃固溶体薄膜(BFBSTO薄膜),实现了嵌入立方矩阵的菱面体和四方纳米结构域的共存。这种材料不仅可以维持高极化,而且能够最小化滞后现象,其能量密度可高达112 J/cm³,并拥有约80%的能量转化效率(图11)。此外,团队还对BFBSTO薄膜的工作稳定性和可靠性进行了测试(击穿强度、泄露电流、充放电循环及储能热稳定性)。测试结果表明,BFBSTO薄膜不仅有望用于kHz及以上的高频储能领域,其低漏电电流、优异的抗疲劳性能和温度稳定性可保证薄膜介电材料在极端条件下依然能正常工作。该研究可通过操

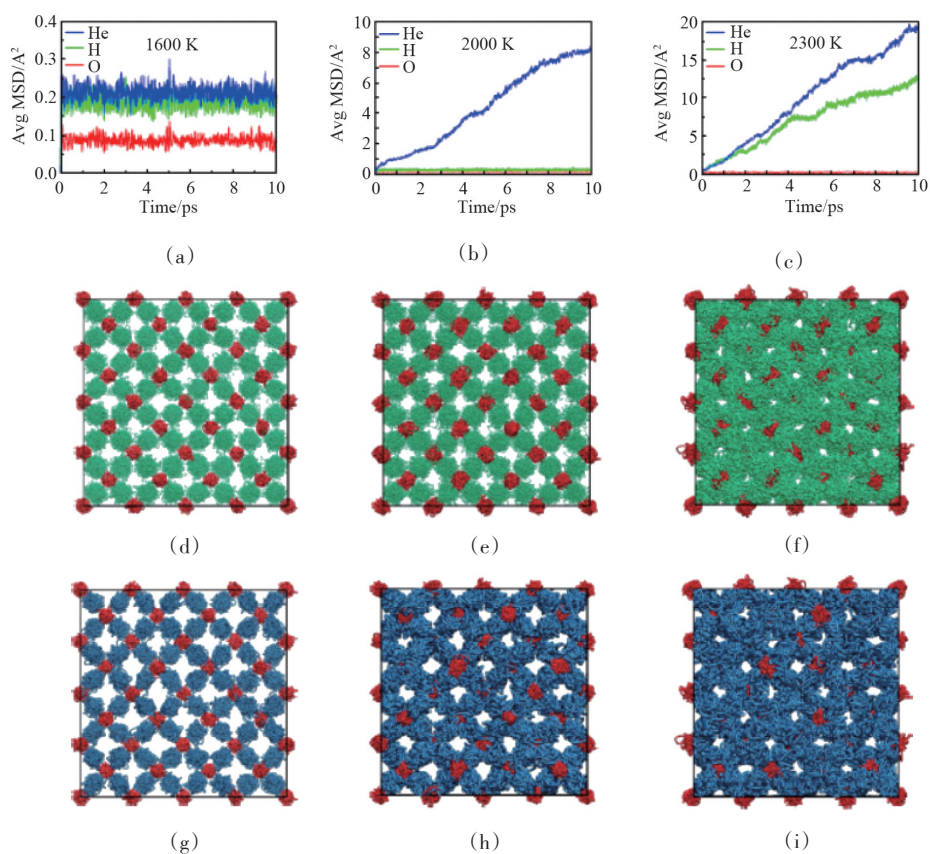


图10 在不同温度下, $\text{He}_2\text{H}_2\text{O}$ 晶体中氧原子(红色)、氢原子(绿色)和氦原子(蓝色)的运动行为 (图片来源:《Nature Physics》)

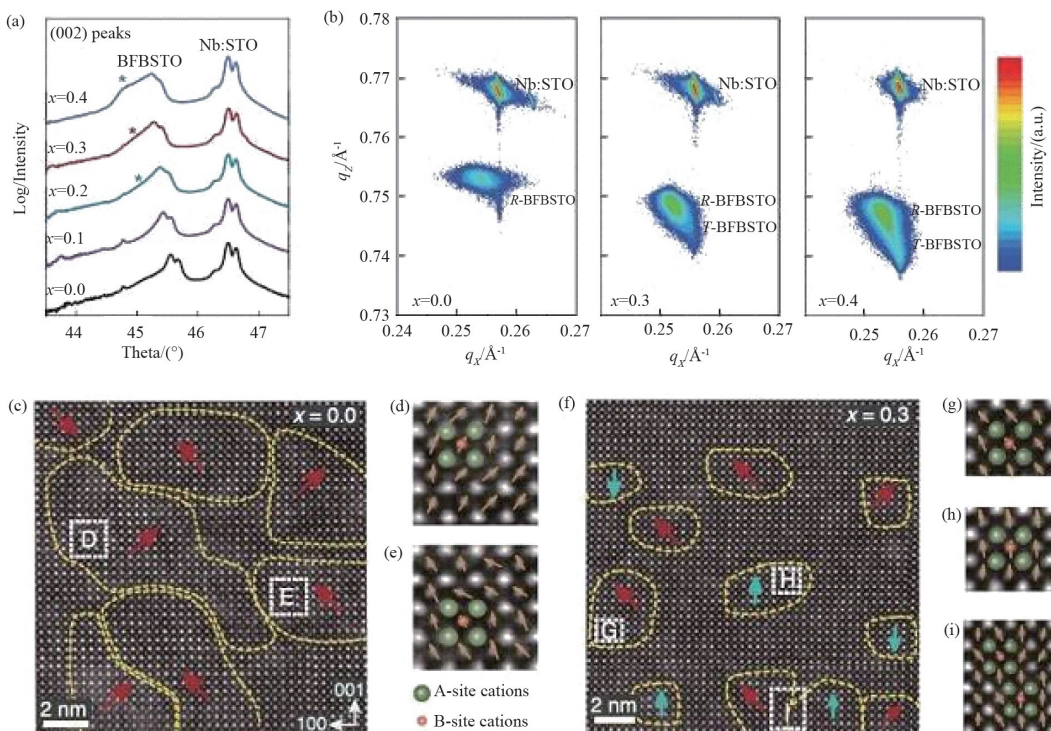


图11 BFBSTO 薄膜的相和畴结构(图片来源:《Science》)

纵构建纳米尺度畴结构为设计高性能介电材料以及其他受益于纳米级域结构操作的功能材料提供依据。相关成果于2019年8月9日发表在《Science》上^[41]。

1.10 解析非洲猪瘟病毒三维结构并揭示其组装机制

非洲猪瘟(African swine fever, ASF)于1921年在肯尼亚首次被发现,近年间在高加索、俄罗斯和东欧的许多国家广泛传播。非洲猪瘟病毒(African swine fever virus, ASFV)是一种复杂的DNA病毒,可在猪之间快速有效地传播,具有高度传染性,发病率和死亡率接近100%,2018—2019年有超过3000万头猪被捕杀,对生猪的养殖和社会的经济发展造成巨大损失。探索非洲猪瘟病毒的结构,揭

示病毒入侵机制,开发新型疫苗以防御病毒传播是亟待解决的问题。

中国科学院生物物理研究所饶子和、王祥喜团队和中国农业科学院哈尔滨兽医研究所步志高团队等合作,从30~40 d的无特定病原体猪中分离出猪骨髓细胞,采用单颗粒三维重构方法首次解析了非洲猪瘟病毒全颗粒的三维结构。该三维结构达到了8.8 Å的整体分辨率^[42]。ASFV具有整体20面体形态和5个结构层,从内至外分别为:第1层为包含基因组的类核、第2层为厚的直径180 nm的核壳、第3层为70 Å厚的脂质双层膜、第4层为20面体蛋白衣壳,第5层为外囊膜。病毒颗粒结构复杂,包含3万余个蛋白亚基,直径约为260 nm,是目前近原子分辨率结构得到解析的最大病毒颗粒(图12)。

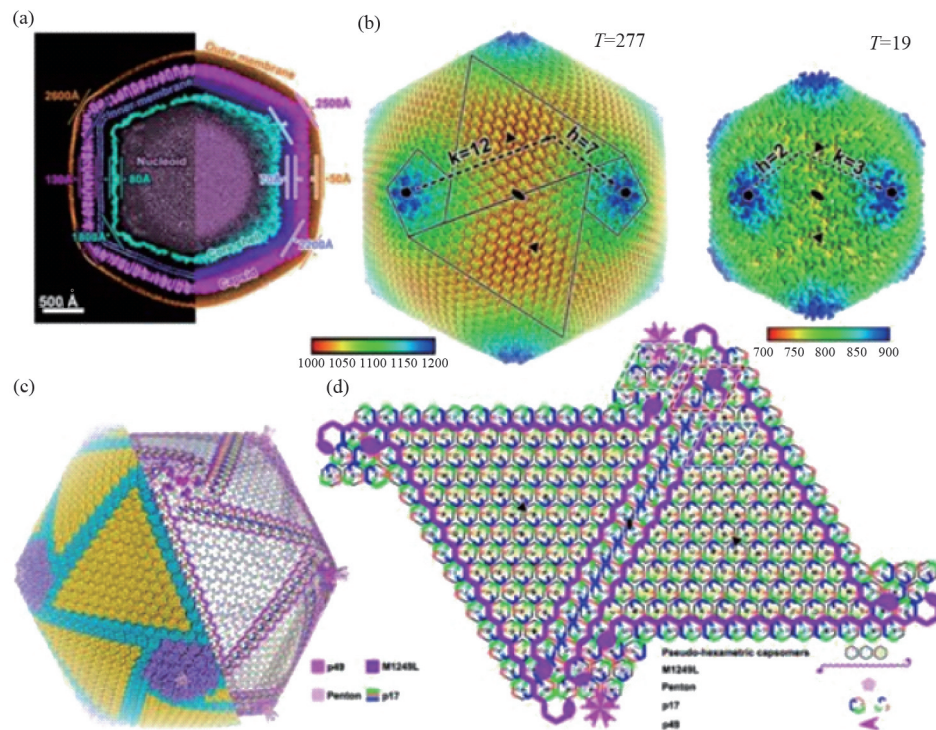


图12 ASFV病毒颗粒的结构(图片来源:《Science》)

该研究通过鉴定非洲猪瘟病毒多种新型结构蛋白,组装了主要衣壳蛋白p72等原子模型。p72蛋白位于ASFV外层衣壳,由4个蛋白亚基ER1-ER4组成^[43]。它是一种潜在的表位蛋白,即可能作为基因的呈递通道,帮助病毒向外层表达一些信号分子,这可能作为未来疫苗的开发靶点。通过揭示

非洲猪瘟病毒的三维结构和组装机制,可以确定病毒潜在的保护性抗原和关键抗原表位信息,阐明该病毒入侵宿主细胞的方法、欺骗和对抗免疫系统的机制,为进一步研发高效、安全的新型非洲猪瘟疫苗提供依据。相关研究进展于2019年11月1日发表在《Science》上。

2 2019年中国重大技术进展

2.1 揭示600多种植物“癌症”病原机理

大丽轮枝菌是一种毁灭性的植物维管束土传病原真菌,能够侵染棉花、马铃薯等660多种植物,与马铃薯晚疫病并列为世界头号检疫对象,在中国造成棉花年均减产20%以上,直接经济损失达数百亿元。100年来,全球科学家一直致力于回答大丽轮枝菌维束管定殖、微菌核形成、无性繁殖、寄主广谱与专化、落叶与非落叶等科学问题,但在大丽轮枝菌广适性背景下的寄主专化性的遗传机制和其引起植物落叶的调控机制一直未能突破。

中国农业科学院植物保护研究所戴小枫团队进行了长期系统的黄萎病病原收集,鉴定引起棉花落叶性状的精准表现型,从1000余株菌中筛选出大丽轮枝菌落叶性状分析群体,经全基因组重测序分析发现大丽轮枝菌通过“掠夺”与其长期混生的棉花枯萎病菌的基因组片段,从而获得了对棉花的超强侵染能力。进一步研究发现,N-酰基乙醇胺

化合物的合成和转运直接参与了该致病过程,它一方面使棉花对内源激素脱落酸更加敏感,另一方面导致棉花的脱落酸合成发生紊乱,最终引起寄主叶片全部脱落,进而死亡,首次揭示了这一被称为植物“癌症”的病原真菌是如何引起棉花等寄主植物落叶、减产和绝收的分子机理与过程(图13、图14)。研究成果于2019年1月4日在线发表在国际期刊《New Phytologist》^[44-45]上。

研究团队开发出了该病菌流行的早期预警分子检测技术,获9项国家发明专利。未来将联合美国加州大学戴维斯分校、西北农林科技大学等15家优势单位,发起“全球大丽轮枝菌基因组学研究国际大科学计划”,开展150株来源不同国家、不同寄主的大丽轮枝菌全基因组解析,同时对2000株不同变异型菌株进行重测序变异组分析,为最终从基因组学、分子进化与合成生物学等角度,系统破解黄萎病病原起源、群体结构及遗传演化等百年科学难题奠定基础。

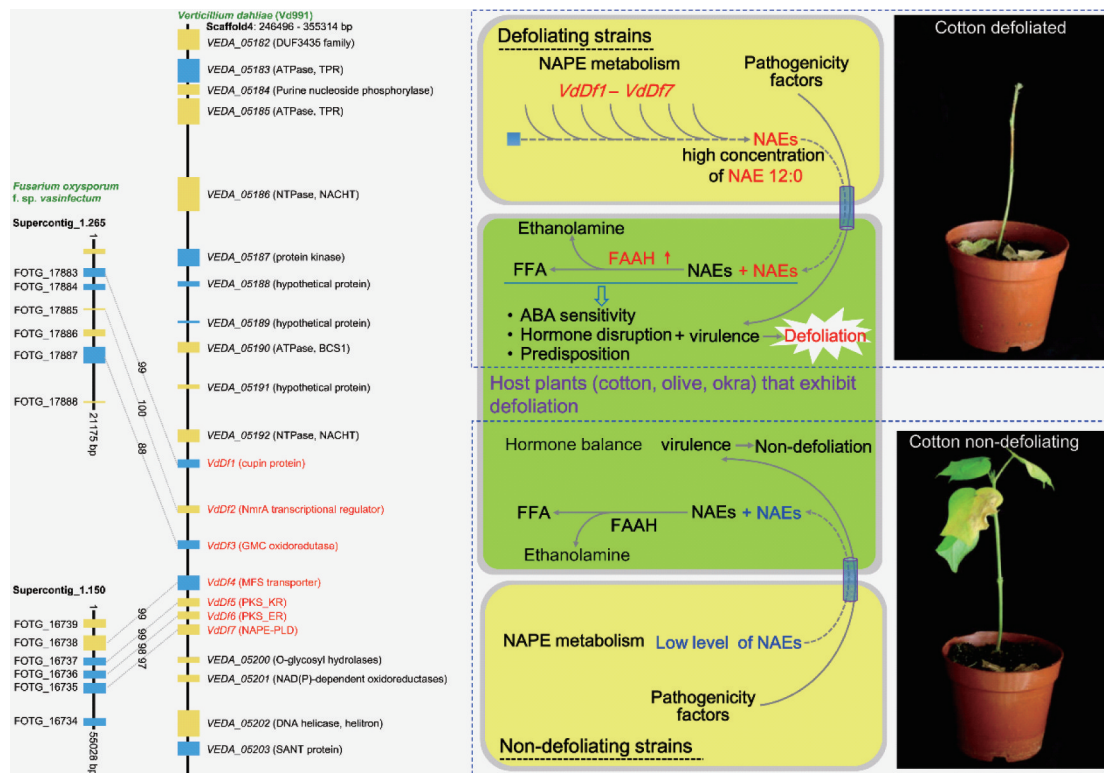


图13 大丽轮枝菌落叶性状关键遗传变异及调控寄主落叶机制模型(图片来源:《New Phytologist》)

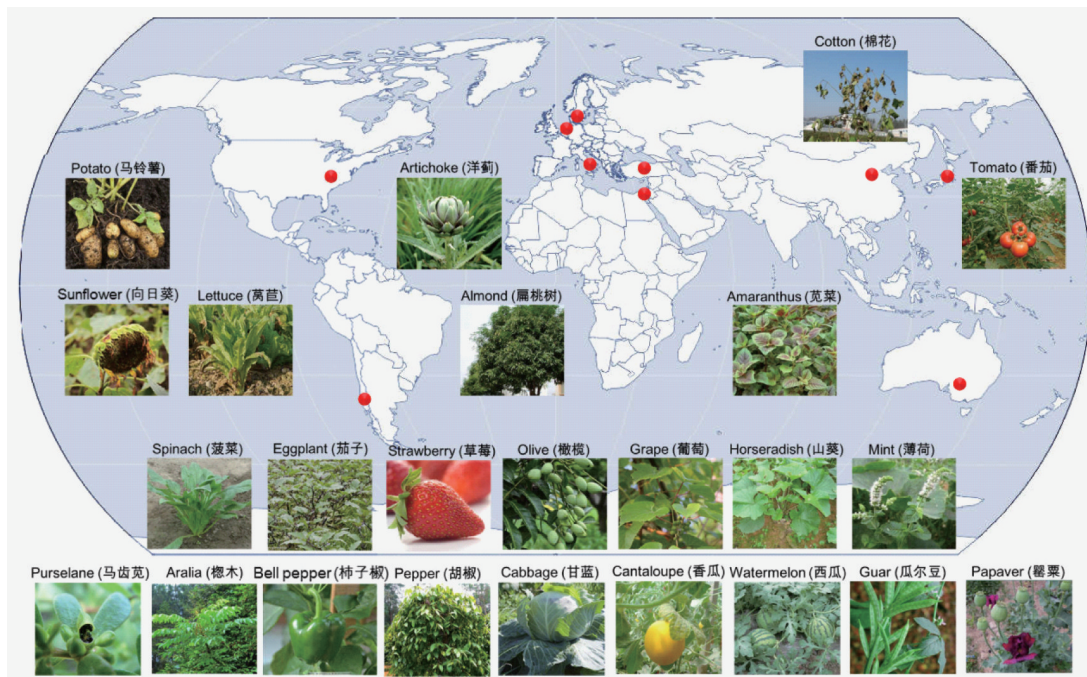


图14 “全球大丽轮枝菌基因组学研究国际大科学计划”解析来源不同国家、不同寄主大丽轮枝菌
(图片来源:《New Phytologist》)

2.2 EWGS实现常温常压制备高纯度氢气

氢能源被视为21世纪最具发展潜力的清洁能源,目前工业上大规模制备氢气离不开高温高压(180~250℃,1.0~6.0 MPa)及目标产物的提纯。发展更经济的、环境友好的方法,在温和条件下直接制备高纯氢气是氢能源发展的迫切需求,但也极具挑战。

中国科学院大连化学物理研究所邓德会团队经过长期探索,结合电化学反应原理,巧妙地将工业上大规模制备氢气的主要方法——水汽变换(WGS)反应的氧化还原反应拆分为彼此分离的两个半反应,首次提出了一种能在常温常压下高能量效率制备高纯氢气(>99.99%)的新策略:室温电化学水汽变换(EWGS)反应(图15)。EWGS反应中,一氧化碳在阳极发生氧化反应,生成的二氧化碳与电解质氢氧化钾进一步反应生成碳酸钾,避免了二氧化碳的排放;同时水在阴极直接被还原生成高纯氢气。阴阳两极由阴离子交换膜分隔开,保持溶液离子平衡的同时分隔两极产物,因此从原理上避免了传统WGS中氢气需要分离提纯的过程。通过对催化剂的设计和电极结构的优化,该反应在常温常

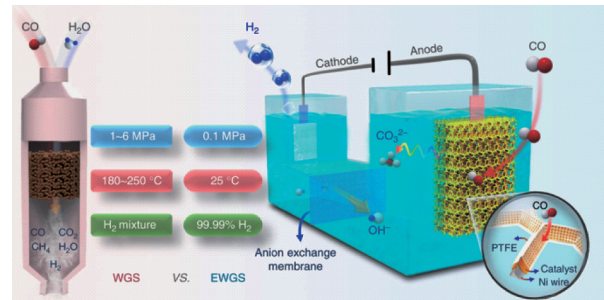


图15 EWGS与传统WGS工艺对比示意
(图片来源:《Nature Communications》)

压条件下实现99.99%高纯氢的制备并且达到接近100%的产氢法拉第效率。相比传统的WGS,EWGS是一种完全不同的、可以在室温常压下进行的高效催化过程,这为低能耗生产高纯氢气提供了新思路。相关研究结果于2019年1月8日发表在《Nature Communications》^[46-47]上。

2.3 铋离子可对大幅提升铅碘钙钛矿太阳能电池工作寿命

钙钛矿太阳能电池是广受关注的新一代光伏技术,而其工作稳定性是目前产业化的主要障碍。传统研究主要通过组分优化、封装、界面改性和紫

外光过滤等有效抑制如氧气、水分和紫外光等因素导致的性能下降,从而提升器件的稳定性。然而要进一步提高器件的寿命,需要发展一种长期有效的方法以抑制使役过程中材料的本征缺陷。

为提高本征稳定性,北京大学工学院周欢萍课题组、化学与分子工程学院严纯华/孙聆东课题组及其合作者提出,通过在钙钛矿活性层中引入铕离子对($\text{Eu}^{3+}/\text{Eu}^{2+}$)作为“氧化还原梭”,可同时消除 Pb^0 和 I^- 缺陷,进而大幅提升器件使用寿命。有趣的是,该离子对在器件使用过程中没有明显消耗,对应的器件效率最高达到了21.52%(认证值为20.52%),并且没有明显的迟滞现象。同时,引入铕离子对的薄膜器件表现出优异的热稳定性和光稳定性,在连续太阳光照或 85°C 加热1000 h后,器件仍可分别保持原有效率的91%和89%;在最大功率点连续工作500 h后保持原有效率的91%(图16)^[48]。该方法解决了铅卤钙钛矿太阳能电池中限制其稳定性的一个重要的本质性因素,可以推广至其他钙钛矿光电器件,对于其他面临类似问题的无机半导体器件也具有参考意义。相关研究进展于2019年1月18日发表在《Science》^[49]上。

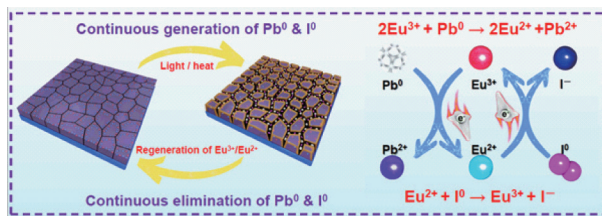


图16 氧化还原离子对 $\text{Eu}^{3+}/\text{Eu}^{2+}$ 循环消除 Pb^0 和 I^- 缺陷和 $\text{Pb}^{2+}/\text{I}^-$ 离子对再生的机理(图片来源:《Science》)

2.4 石墨烯-碳纳米管复合支架可模拟脑神经网络

针对多种神经退行性疾病的治疗,医学界已经提出移植神经干细胞的构想。三维碳神经支架将是很好的载体,它能帮助医生将神经干细胞精准放置到病变地点,并帮助其增殖、分化,以实现干细胞替代治疗的目的。

中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所程国胜等联合意大利、美国学者组成的研究团队,成功构建了“互联互通”三维石墨烯-碳纳米管复合网络支架。这种三维碳复合材料成功克服了传

统三维石墨烯泡沫空隙过大的缺点,同时真正意义上实现了碳纳米管三维空间网络的构建。碳纳米管在石墨烯表面的原位生长,使得复合支架具有优异的导电性和机械稳定性,实现了碳纳米管和石墨烯的三维几何、机械和电学互联互通^[50]。利用这种复合支架培养原代大脑皮层神经元,能更好地模拟大脑皮层的复杂性。将脑胶质瘤细胞种植在构建的大脑皮层模型中,利用先进的成像和分析技术,系统研究了单胶质瘤细胞在三维空间上的速度分步,成功构建了脑胶质瘤的运动模型,对于新型药物的筛选及进一步精准医疗具有重要意义(图17)。相关研究成果发表在《Advanced Materials》^[51]和《Carbon》^[52]上。

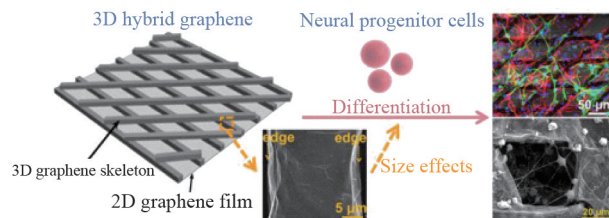


图17 三维石墨烯支架的尺寸效应对神经前体细胞的分化行为有明显的影响(图片来源:《Carbon》)

2.5 首创具有原子级精度的全碳电子器件制备技术

当前,基于硅基半导体的微纳电子技术正在逼近其物理尺寸极限,而碳基器件相较硅基器件预期具有更快的速度和更低的功耗,被认为是最有希望替代现有硅基技术的未来信息器件方向之一。如何制备具有原子级精度的全碳电子器件是未来碳基芯片领域的发展瓶颈。

针对这一关键技术问题,厦门大学固体表面物理化学国家重点实验室洪文晶和谢素原团队,基于厦门大学在富勒烯材料制备的优势,通过器件制备技术的自主研发和创新,将具有完美二维结构的石墨烯作为电极,而将具有独特电子学性质的富勒烯作为核心单元,克服单个富勒烯尺寸不到1 nm带来的巨大挑战,构筑了由富勒烯和石墨烯组成的全碳电子器件(图18),并通过与英国兰卡斯特大学柯林·兰伯特团队在理论计算方面的合作,发现该全碳电子器件在电子学领域具有众多新奇的量子特性。

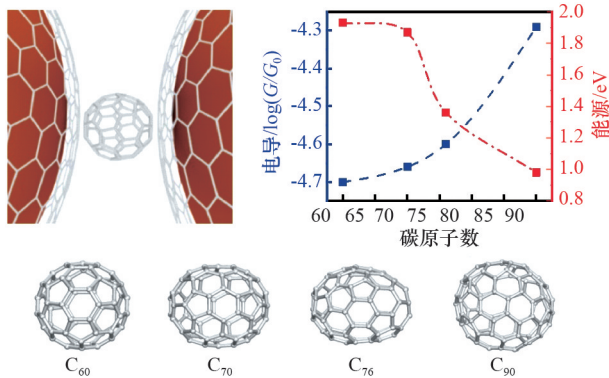


图18 富勒烯和石墨烯组成的全碳电子器件示意
(图片来源:洪文晶)

该研究团队在富勒烯器件的量子特性调控领域进行深入探索^[53],在国际上首创了具有原子级规整结构的全碳电子器件的制备技术,从而将碳基电子器件推进至亚纳米的极限尺寸,对于全碳电子学的发展具有重要意义。相关研究成果于2019年4月15日在线发表于《Nature Communications》^[54]上。

2.6 基于材料基因工程方法研制出高温块体金属玻璃

金属玻璃具有独特的无序原子结构、优异的机械和物理化学特性,在能源、通信、航天、国防等高新技术领域有广泛应用,是现代合金材料的重要组成部分。然而,玻璃形成成分的理论预测仍然极具挑战性,迄今为止发现的具有特定性能的金属玻璃主要是反复试验和尝试的结果。金属玻璃在接近玻璃转变温度(软化温度)时会发生塑性流动,导致机械强度显著降低,严重限制了它们的高温应用。虽然目前已经开发出玻璃转变温度大于1000 K的金属玻璃,但其过冷液相区(介于玻璃转变温度和结晶温度之间的温度区间)很窄,玻璃形成能力不足,导致热塑成形性能很差,难以进行零部件加工。

中国科学院物理研究所柳延辉研究组与合作者设计了一种Ir-Ni-Ta-(B)合金体系,基于材料基因工程理念开发了具有高效、无损、易推广等特点的高通量实验方法,获得了高温块体金属玻璃,其玻璃转变温度高达1162 K(图19)。新研制的金属玻璃在高温下具有极高强度,1000 K时的强度高达3700 MPa,远远超出此前报道的块体金属玻璃和传统的高温合金。该金属玻璃的形成能力可达

到3 mm,过冷液相区达136 K,宽于此前报道的大多数金属玻璃,使其可通过热塑成形获得在高温或恶劣环境中应用的小尺度部件。该项研究报道的高通量实验方法具有很强的实用性,颠覆了金属玻璃领域60年来“炒菜式”的材料研发模式,证实了材料基因工程在新材料研发中的有效性和高效率,为解决金属玻璃新材料高效探索的难题开辟了新的途径,也为新型高温、高性能合金材料的设计提供了新的思路^[55]。相关研究进展发表在2019年5月2日《Nature》^[56]上。

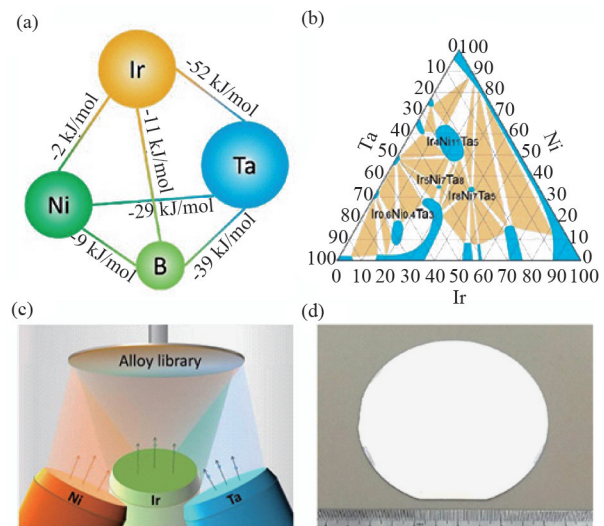


图19 Ir-Ni-Ta-(B)高温非晶合金的设计及高通量实验方法(图片来源:《Nature》)

2.7 自主研发临床全数字PET/CT装备获准进入市场

正电子发射断层成像(PET)是继超声、CT(computed tomography)和核磁共振之后当今的尖端医学影像技术,在恶性肿瘤、神经系统疾病、心血管疾病等重大疾病早期诊断、疗效评估、病理研究等方面,具有极大应用价值。因涉及核物理、电子、材料、精密制造、生物医学等诸多学科,PET关键技术和设备市场主要为少数跨国企业垄断。

2019年5月31日,华中科技大学谢庆国团队发明的全数字PET/CT(图20)通过国家药品监督管理局注册审批,获得市场准入和对外销售资质。该研究团队于2004年发明“全数字PET”概念,历经10余年形成完整技术体系。在此基础上研发的临

床全数字PET/CT装备,使用了具有完全自主知识产权的全数字PET技术,以“全数字”和“精确采样”为本质特点,从源头上颠覆了传统PET的技术路线,可精准检测到最小尺寸病灶,大幅提前癌症发现时间^[57]。首台临床全数字PET/CT的取证上市,意味着国产全数字PET打破国际技术垄断,中国高端医疗仪器开发取得重大突破。

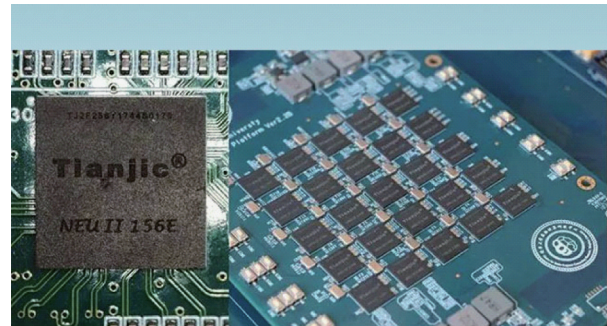


图20 人体临床数字PET装机(图片来源:中新网)

2.8 开发出全球首款异构融合类脑计算芯片

目前占主流的专有人工智能在应用上还有很大的局限性,因此,可以赋能各行各业的人工通用智能是未来的发展方向,但其至今未有有效解决方案。发展人工通用智能的方法主要有两种:一种是以神经科学为基础,尽量模拟人类大脑;另一种是以计算机科学为导向,让计算机运行机器学习算法。两者融合被认为是发展人工通用智能的最佳解决方案之一,发展一个两者融合的计算平台将是推动融合的关键。

清华大学施路平团队借鉴脑科学的基本原理,提出了符合脑科学基本规律的新型类脑计算架构——异构融合的天机类脑计算芯片架构,开发出全球首款异构融合类脑计算芯片——“天机芯片”(图21)^[58]。该芯片可同时支持计算机科学和神经科学的神经网络模型,例如人工神经网络和脉冲神经网络,发挥它们各自的优势。为了验证天机芯片的处理能力,研究人员开发了一辆由该芯片驱动的自动驾驶自行车。试验中,无人自行车不仅可以识别语音指令、实现自平衡控制,还能对前方行人进行探测和跟踪,并自动避障,成功展示了结合机器学习和类脑算法的混合设计(图22)^[59]。这种融合技术



(a) “天机芯片”单片 (b) 5×5阵列扩展板

图21 天机芯片(图片来源:清华大学新闻网)



图22 自动行驶自行车演示平台

(图片来源:清华大学新闻网)

有望极大发挥基于计算机科学的人工神经网络和基于神经科学的脉冲神经网络的优势,促进了人工通用智能的进一步研究和发展^[60]。相关研究成果于2019年8月1日发表在《Nature》上。

2.9 开创基于自噬选择性降解亨廷顿病致病蛋白的药物研发新路径

突变蛋白的积累是许多疾病的主要根源,降低这些蛋白质的水平可能从根本上治疗这些疾病。细胞自噬是所有真核细胞保守的一种内源性降解途径,可以降解包括致病蛋白在内的多种致病物质,但是缺乏选择性。

复旦大学鲁伯坝、丁灏和费义艳等研究组合作,提出驾驭自噬选择性降解致病蛋白的原创设想:寻找同时与自噬小体关键蛋白LC3及致病突变蛋白结合的化合物,从而利用这些小分子将致病蛋白选择性靶向至细胞自噬进行清除(图23)。合作团队通过实验,决定首先选择亨廷顿病的致病蛋白——突变HTT(mHTT)实现上述设想。mHTT含有过长的聚谷氨酰胺(polyQ)从而导致亨廷顿舞蹈症,这是一种被称为不治之症的神经退行性疾病。

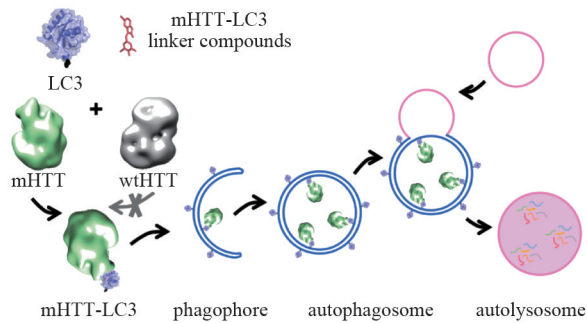


图 23 以致病蛋白 mHTT 为例,该细胞自噬过程示意
(图片来源:《Nature》)

该团队通过基于小分子微阵列与前沿光学方法的高通量筛选,发现并验证有 4 个与 LC3 和 mHTT 相互作用,但不与野生型 HTT 相互作用的小分子化合物。这些化合物将 mHTT 特异性靶向到自噬细胞降解,而不影响野生型 HTT 蛋白,从而选择性降低 mHTT 水平,并拯救了与此种疾病相关的表型。进一步研究显示,这些化合物与过长的 polyQ 相互作用,也可以降低突变 ataxin-3 蛋白(ATXN3)水平,这是一种中国人人群中发病率较高的共济失调 III 型疾病的 polyQ 蛋白。因此,该研究成果不仅可能对亨廷顿病的治疗有效,也可能运用于其他 polyQ 疾病。由此提出并证明的利用自噬小体绑定化合物降低致病蛋白水平这一概念,可以拓展至无法靶向的致病蛋白,甚至非蛋白的致病物质,开创了一条药物研发新途径。相关研究进展于 2019 年 11 月 7 日发表在《Nature》^[61-62]上。

2.10 光子量子计算输出态空间维数提高百亿倍

研制量子计算机已成为前沿科学的最大挑战之一,其中,量子计算研究的第一个阶段性目标是实现“量子计算优越性”,即研制出量子计算原型机在特定任务的求解方面超越经典的超级计算机。利用超导量子比特实现随机线路取样和利用光子实现玻色取样是目前国际学术界公认的演示量子计算优越性的两大途径。

面向这一战略目标,中国科学技术大学潘建伟研究团队利用自主研发的国际最高效率和最高品质单光子源、最大规模和最高透过率的多通道光学干涉仪,并通过与中国科学院上海微系统与信息技术研究所尤立星在超导纳米线高效率单光子探测

器方面的合作,成功实现了 20 光子输入 60×60 模式(60 个输入口,60 层的线路深度,包括 396 个分束器和 108 个反射镜)干涉线路的玻色取样实验(图 24、图 25)。与国际同行的类似工作相比,实验成功操纵的单光子数增加了 5 倍,模式数增加了 5 倍,取样速率提高了 6 万倍,输出态空间维数提高了百亿倍。其中,由于多光子高模式特性,输出态空间达到了 370 万亿维数,这等效于 48 个量子比特展开的希尔伯特空间。因此,实验首次将玻色取样推进到一个全新的区域:无法通过经典计算机直接全面验证该玻色取样量子计算原型机,向演示量子计算优越性的科学目标迈出了关键的一步。研究成果于 2019 年 12 月 18 日发表在《Physical Review Letters》^[63-64]上。

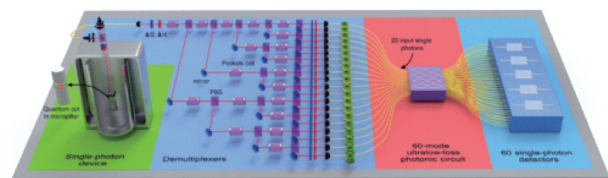


图 24 玻色取样实验装置
(图片来源:《Physical Review Letters》)

3 2019 年中国重大工程进展

3.1 高能同步辐射光源验证装置(HEPS-TF)通过验收

2019 年 1 月 31 日,高能同步辐射光源验证装置(HEPS-TF)通过验收,为未来建设先进高能同步辐射光源奠定了坚实的技术基础^[65]。

中国科学院高能物理研究所是 HEPS-TF 项目的法人单位,北京科技大学是联合共建单位。作为高能同步辐射光源(HEPS)的预研项目,HEPS-TF 旨在解决 HEPS 的设计难题,完成相关加速器和光束线站的关键技术研发及 HEPS 的加速器物理设计和工程方案(图 26)^[65]。

目前,HEPS-TF 工程目标及所有任务已经完成。通过自主创新和集成创新,HEPS-TF 工程在加速器、光束线和实验站等方面取得了一系列重大技术成果:国内首次成功研制了超高梯度(80 T/m)

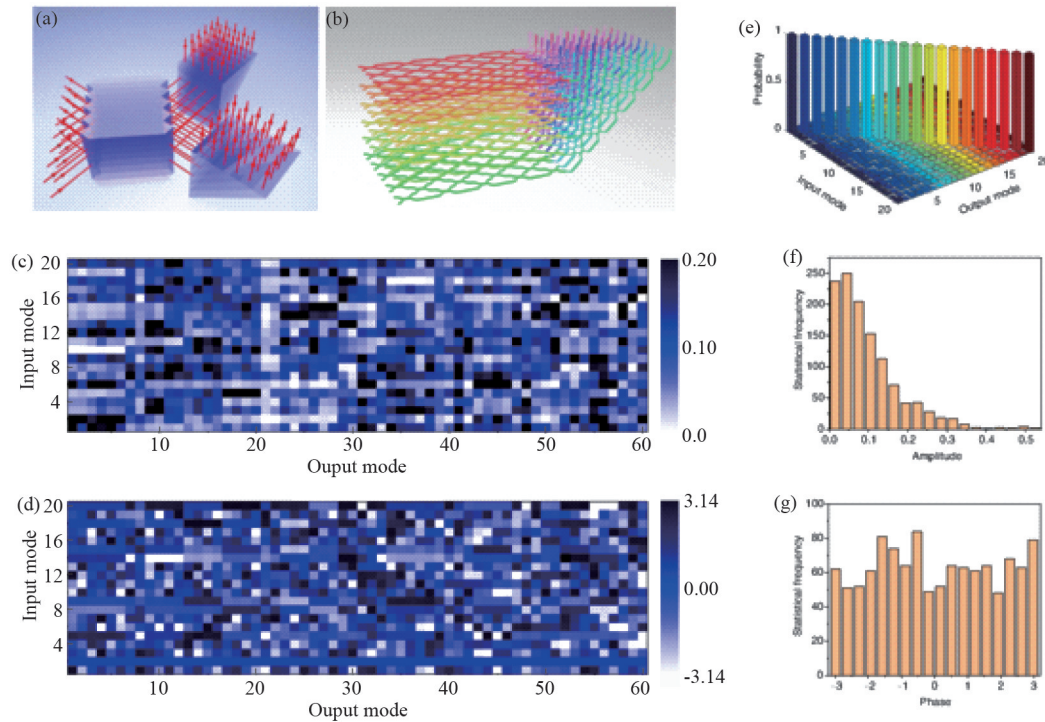


图25 60×60模式光子网络的结构与特性(图片来源:《Physical Review Letters》)



图26 高能同步辐射光源效果图(图片来源:澎湃新闻)

四极铁、大间隙高场强(2.6 T)超导扭摆器和纳秒级快脉冲冲击器系统;自主研制了与进口设备性能相当的300 A高精度电流传感器和数字束流位置测量电子学系统;成功研制了国际上首个166 MHz加速电子的1/4波长超导原型腔;突破了超高温、大载荷、大变形和多环境因素耦合等原位环境与同步辐射实验技术集成的瓶颈。另外,自主设计研制的二维X射线像素阵列探测器是中国高端X射线探测器研制的重要突破^[66]。

作为第四代同步辐射光源,即将开始建设的

HEPS发射度比先前的同步辐射光源更小,因而具有更高亮度,该光源将为基础科学和工程科学等领域原创性、突破性创新研究提供重要支撑平台,让更多的科学实验成为可能^[67]。

3.2 200 t推力固体火箭发动机地面热试车成功

2019年3月5号,由中国航天科技集团研制的200 t推力固体火箭发动机地面热试车获得圆满成功。多项新技术的采用,使该发动机的综合性能达到世界一流水平,为中国未来固体运载火箭提供了更强劲、性价比更高的先进动力^[68]。

这是目前国内装药量最多、推力最大的高性能纤维缠绕复合材料壳体整体式固体发动机,发动机直径2.65 m,装药量71 t,推力200 t,采用多项新技术,综合性能达到世界一流水平。例如该发动机的壳体采用先进工艺,由非金属材料通过缠绕方式成型。相比以往型号所用的金属壳体,其强度更大、质量更轻,能大大提高发动机比冲^[68]。本次试车的成果,可以应用于中国长征系列运载火箭中第一型全固体运载火箭长征十一号(CZ-11)的未来改进型中^[69]。

与CZ-11火箭(图27)相比,改进型火箭的一级发动机综合性能更为先进,可实现中国固体火箭运载能力的大幅提升,预计火箭700 km太阳同步轨道的运载能力可从400 kg左右提升到1.5 t左右。特别是由于集成了原有发动机的优势和近年来先进发动机的研制经验,在商业航天的大背景下,发动机的成本得到了更好的控制,相对于其他运载工具,具有更高的综合性价比优势,将有力增强中国固体运载火箭在商业航天发射市场的竞争力^[69-70]。



图27 长征十一号(CZ-11)

(图片来源:中国航天科技集团有限公司)

3.3 自升式碎石铺设整平船“一航津平2”下水

2019年4月26日,由中交第一航务工程局有限公司研发、上海振华重工建造的世界最大、最先进的自升式碎石铺设整平船“一航津平2”在南通下水(图28),投产后将进一步巩固中国在海底隧道基础设施施工领域的世界领先地位^[71]。



图28 在建中的自升式碎石铺设整平船“一航津平2”

(图片来源:中国交通新闻网)

“一航津平2”主船体为箱型“回”字结构,船长98.7 m、宽66.3 m,相当于1个足球场大小;在不移

动船身的情况下,单个船位碎石铺设整平作业范围达2500 m²,等同于6个标准篮球场^[71]。型深6.5 m,桩腿总长75 m(可根据水深工况环境接长至95 m),铺设整平作业最大水深40 m,每4个船位即可完成单个沉管的抛石整平作业^[72]。碎石铺设整平船一般用于深水碎石基床铺设,集基准定位、石料输送、高精度铺设整平、质量检测验收功能于一体,因其铺设作业的高效率和自动化,被形象地称为深水碎石铺设的“3D打印机”^[71]。在实际作业中,该船的功能相当于海底铺路机,通过抛石管精准定位,向海床投入碎石并铺平,大型海底隧道的沉管就铺设在碎石面上,高效率的作业速度可以解决受海底水流影响在碎石上产生回淤量大的难题,保障沉管快速安装^[72]。与“津平1”相比,“一航津平2”在性能、规格、国产化程度等方面均实现超越,多项性能位居国际领先水平:该船铺设范围更广,整平效率也更高,整平速度较“津平1”提升了1倍,最高可达5 m/min;作业寿命更长,桩腿使用寿命长达2000 h。“一航津平2”是超级工程深中通道的核心装备,同时,在设计、建造方面均实现了国产化,尤其是施工管理系统成功突破国外技术封锁,实现了整套系统国产化^[73]。

2019年11月18日,“一航津平2”顺利交船,标志着中国深水整平技术与装备实力提升至新高度。“一航津平2”即将服役的深中通道,是继港珠澳大桥之后的又一项超级工程。

3.4 中国首次固体运载火箭海上发射成功

2019年6月5日,中国在黄海海域用长征十一号海射运载火箭,将技术试验卫星捕风一号A、B星及5颗商业卫星顺利送入预定轨道(图29),这是中国首次在海面实施运载火箭发射技术试验,填补了中国运载火箭海上发射的空白^[74]。

国家航天局负责固体运载火箭海上发射技术试验项目的组织管理协调,中国航天科技集团有限公司所属中国运载火箭技术研究院负责研制火箭,海工企业负责船舶发射平台,中国卫星发射测控系统部负责发射、测控任务组织实施^[74]。作为此次发射的主要任务载荷,捕风一号A、B卫星由中国航天科技集团有限公司所属中国空间技术研究院总研

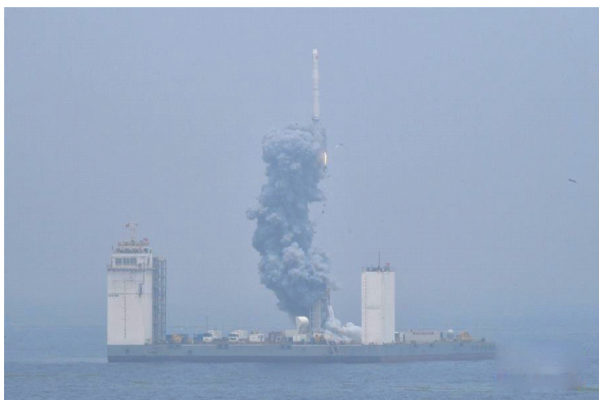


图29 固体运载火箭海上发射(图片来源:新华网)

制,主要用于台风等极端天气监测,可准确测量海面风场,实现精准预报台风。海上发射模式,是火箭陆上发射场发射、特种大型飞机平台空中发射之外,又一种新颖且高效的发射方式。海上发射可充分利用中国丰富的民用船舶资源、港口资源、测控资源,社会资源深度参与,实现航天技术与海洋工程的有效融合,带动社会经济高质量发展。海上发射还解决了火箭残骸的落区安全问题^[75]。

本次飞行试验首次采用“航天+海工”技术融合,突破了海上发射稳定性、安全性、可靠性等关键技术,全面验证了海上发射的试验流程,初步构建了多方融合的海上发射模式,将助力中国商业航天进一步多元化发展、更好地服务于“一带一路”沿线国家^[75]。

3.5 天宫二号空间实验室阶段全部任务圆满完成

2019年7月19日,天宫二号空间实验室受控离轨并再入大气层,少量残骸落入南太平洋预定安全海域。天宫二号受控再入大气层,标志着中国载人航天工程空间实验室阶段全部任务圆满完成^[76]。

天宫二号是中国第一个真正意义上的太空实验室,由实验舱和资源舱组成,总长10.4 m,舱体最大直径3.35 m,于2016年9月15日发射入轨,设计在轨寿命2年(图30)^[77]。天宫二号空间实验室自2016年9月15日发射入轨以来,先后与神舟十一号载人飞船和天舟一号货运飞船完成4次交会对接,成功支持2名航天员在轨工作生活30天,突破掌握航天员中期驻留、推进剂在轨补加等一系列关键技术,并在超期服役的300多天里,完成多项拓



图30 天宫二号空间实验室
(来源:中国航天科技集团微信公众号)

展试验,共搭载14项约600 kg重的应用载荷,开展60余项空间科学实验和技术试验,取得一大批具有国际领先水平和重大应用效益的成果^[77]。其中,天宫二号搭载的空间冷原子钟,根据在轨测试结果推算冷原子钟日稳定度达到 $7.2E \times 10^{-16}$;中欧联合研制的伽玛暴偏振探测仪(POLAR),成功探测到55个宇宙伽玛暴事例,为国际伽玛暴联合探测做出了重要贡献。此外,天宫二号还搭载太空养蚕、双摆实验、水膜反应等3个香港中学生太空科技设计大赛获奖的实验项目,取得了良好的社会效益^[78]。

此次航天器受控离轨是中国航天史上的第二次,第一次为天舟一号受控离轨。与天舟一号采取的“一步”飞控实施的策略不同,天宫二号采取了“两步走”的飞控实施策略:第一步,先将天宫二号轨道降低到近地点200 km的椭圆轨道;第二步,再将天宫二号轨道降至近地点70 km的椭圆轨道,进入大气层。天宫二号受控离轨的成功完成意义重大,为中国在航天器领域广泛推广主动离轨技术提供了有力支撑^[79]。

3.6 自主研发最大直径泥水平衡盾构机成功始发

2019年8月13日,中国自主研发的最大直径泥水盾构机——“春风号”在深圳春风隧道正式投入使用(图31)。该设备是迄今为止中国自主设计制造的最大直径泥水平衡盾构机,其设计制造技术达到了世界先进水平^[80]。

“春风号”盾构机由中铁装备集团与中铁隧道局联合研制,于2018年9月在郑州成功下线。盾构机总长135 m,重4800多 t,开挖直径15.80 m,是为

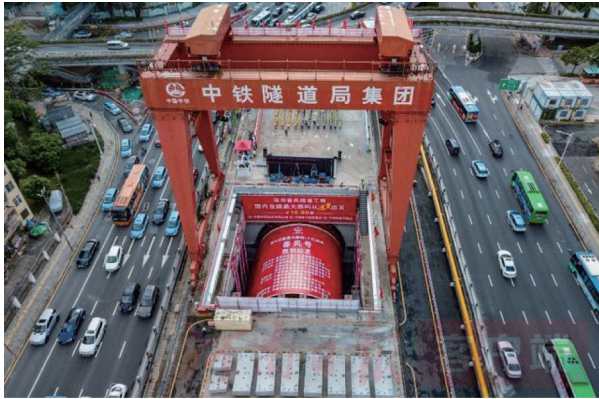


图31 “春风号”在深圳春风隧道正式投入使用
(图片来源:《河南日报》)



图32 “深海勇士”号在西沙执行深潜任务
(图片来源:澎湃新闻)

春风隧道建设量身定制的“大国重器”,突破了一系列关键技术,填补了中国直径15 m级别大直径泥水平衡盾构机领域的空白。“春风号”总功率超过1.15万kW,比“复兴号”高铁的总牵引动力高10%,推力高达2.46万t,约是中国最大运载火箭长征五号的24倍。它是中国大型设备自主研发的一次重大突破,将成为助力春风隧道建设的强大利器^[81]。

春风隧道工程是粤港澳大湾区建设的重点工程,也是深圳首条“单洞双层”的机动车隧道,建成后,“南环”道路升级为“地上高架+地下隧道”的立体走廊,通行能力提升1倍以上,区域内拥堵状况将有效缓解。作为项目工程的关键控制性环节,“春风号”大盾构安全高效的现场组装至关重要。它是中国大型设备自主研发的一次重大突破,将成为助力春风隧道建设的强大利器^[80]。

3.7 “南海深部计划”取得丰硕成果

2019年8月14日,中国海洋科学第一个大规模的基础研究计划——“南海深海过程演变”(“南海深部计划”)取得丰硕成果。中国科学家在南海深部重大科学问题上,提出了挑战传统认识的新观点,取得了南海深部研究的科学主导权^[82]。

2011年,国家自然科学基金委立项启动了“南海深部计划”,对南海进行深入研究,以在崭新的水平上认识海洋变迁及其对海底资源和宏观环境的影响。从2013年的“蛟龙”号到2018年的“深海勇士”号实现了3个深潜航次(图32)。通过深潜航次,中国科学家首次在南海海底发现了古热液区,

发现在南海迄今规模最大的海底铁锰结核区,在南海首次发现“冷水珊瑚林”和新的冷泉活动喷口。“南海深部计划”还开展了“3+1个”国际大洋钻探航次。通过“南海深部计划”的开展,深拖磁测系统、宽频带海底地震仪、深水锚系观测、海山浅钻等众多先进深海技术,都在南海得到了集结应用,极大地促进了中国海洋科学与技术的融合发展^[83]。

通过“南海深部计划”的实施,中国还广泛开展了国际合作,培养锻炼出一支多学科门类,跨越古今界限、海陆界限、地球和生命科学界限等时空尺度的研究队伍,推动中国地球与海洋科学的创新研究呈现出勃勃生机^[82]。

3.8 北斗三号系统核心星座部署完成

2019年12月16日,长征三号乙运载火箭在西昌卫星发射中心成功将中国北斗卫星导航系统第52、53颗卫星送入预定轨道(图33)。至此,北斗三号在该轨道上规划的24颗卫星已全部到位,标志着全球系统核心星座部署完成,将全面开启“全球时代”^[84]。

此次发射的北斗导航卫星和配套运载火箭(及配套远征一号上面级)由中国航天科技集团有限公司所属的中国空间技术研究院和中国运载火箭技术研究院分别抓总研制。北斗系统采用多功能、一体化建设思路,具备向全球用户独立提供高精度卫星导航定位授时服务能力,其混合星座设计是世界首创,在信号体制、技术体制和服务功能上保持了领先水平。目前,北斗高精度导航定位,将导航与



图 33 长征三号乙运载火箭发射(图片来源:中国新闻网)

通信功能创造性结合,通过短报文应急联络,在抗震救灾、国际搜救等领域优势凸显^[85]。

自2017年11月首次发射北斗三号组网卫星以来,北斗系统2年时间实现18次30颗卫星发射的连战连捷,创造了中国航天发射历史上高密度、高成功率的新纪录^[85]。2018年底,北斗三号基本系统建成,提前2年为全球用户提供服务;2019年底,北斗三号核心星座部署完成;2020年,北斗三号全球组网发射任务收官,将全面开启“全球时代”。北斗高精度多系统兼容的卫星导航应用产品覆盖100多个国家与地区,包括所有“一带一路”沿线国家。中国已启动了北斗系统接续发展的总体论证和关键技术攻关,计划于2035年前建成以北斗系统为核心的综合定位、导航、授时体系,为世界导航发展提供“中国方案”^[86-87]。

3.9 长征五号遥三运载火箭发射成功

2019年12月27日20:45,长征五号遥三运载火箭(“胖五”)在中国文昌航天发射场点火升空(图34),成功将实践二十号卫星送入预定轨道。作为中国首型5 m芯级直径的大推力运载火箭,长征五号运载火箭运载能力位居世界前列。其成功发射,为中国航天“超级2020”打下坚实基础^[88]。

长征五号运载火箭是中国运载火箭升级换代的工程,作为中国首型大推力无毒无污染液体火箭,创新难点多,技术跨度大,复杂程度高。火箭采用全新5 m芯级直径箭体结构,捆绑4个3.35 m直径助推器,总长57 m,起飞重量约870 t,近地轨道运载能力25 t级,地球同步转移轨道14 t级,地月



图 34 长征五号遥三运载火箭发射

(图片来源:《人民日报》)

转移轨道运载能力8 t级,整体性能和总体技术达到国际先进水平^[89]。

此次成功发射的航天科技集团五院研制的实践二十号卫星,是中国研制的地球同步轨道发射重量最重的卫星,采用了大推力、多模式电推进技术,搭载了10余项国际领先的技术试验载荷。卫星的成功发射,为中国新一代卫星平台的全面推广与应用奠定了坚实基础。长征五号运载火箭的研制,也为新一代运载火箭积累了宝贵经验。2020年,长征五号乙、长征七号甲、长征八号等多型新一代运载火箭都将相继迎来首飞。2020年,按照计划,载人空间站建设、“嫦娥五号”月球采样返回、火星探测等航天大剧都将陆续揭幕。这一幕幕大剧上演的舞台,都需要大火箭“胖五”来搭建^[90]。

3.10 世界首条智能高铁“京张线”开通运营

2019年12月30日,京张铁路开通运营,世界首列自动驾驶的复兴号G8811次和G2505次在北京北站分别开往太子城和张家口(图35)。京张高铁是继青藏铁路、京沪高铁之后,中国铁路工程第3个里程碑,它实现了智能建造、智能装备和智能运营,开启了世界智能铁路的先河^[91]。

京张高铁起自北京北站,终至张家口站,正线全长174 km,最高设计时速350 km/h,京张高铁智能动车组实现自动驾驶,搭载了自主研发的北斗导航,可实时精准定位。智能复兴号动车组还具备车站自动发车、区间自动运行、车站自动停车、车门自动开门、车门站台门联动等功能^[92]。京张高铁

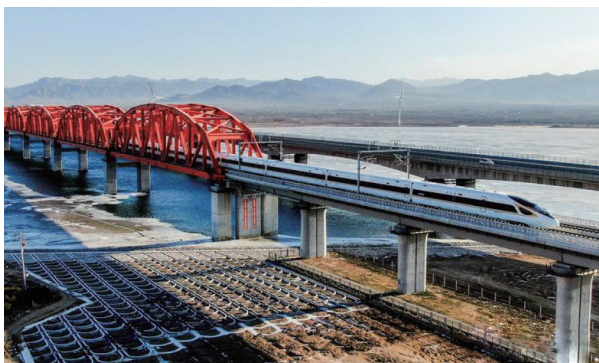


图 35 复兴号动车组列车驶过京张高铁官厅水库特大桥(图片来源:河北新闻网)

是国家《中长期铁路网规划》中“八纵八横”京兰通道的重要组成部分,也是北京冬奥会重要配套基础设施工程,于2015年12月开工建设。京张高铁由中国自主设计建造,是世界上最先进的时速达到350 km/h的智能高速铁路。开通后,北京至张家口太子城的冬奥会主赛场可在1 h内通达;与连接开通的张家口至呼和浩特、张家口至大同高铁相衔接,北京至呼和浩特可约2 h 20 min通达,北京至大同可约1 h 40 min通达^[93]。截至2019年底,中国铁路营业总里程达到13.9万 km,其中高铁3.5万 km。

致谢 本次遴选,“2019年重大科学进展”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2019年度“中国科学十大进展”候选条目中产生的。

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] 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.
- [16] 陈广仁, 刘志远, 田恬, 等. 2017年中国重大科学、技术和工程进展[J]. 科技导报, 2018, 36(3): 8-26.
- [17] 陈广仁, 刘志远, 田恬, 等. 2018年中国重大科学、技术和工程进展. 科技导报, 2019, 37(3): 6-26.
- [18] Croce R, van Amerongen H. Natural strategies for photosynthetic light harvesting[J]. Nature Chemical Biology, 2014, 10(7): 492.
- [19] Falkowski P G, Katz M E, Knoll A H, et al. The evolution of modern eukaryotic phytoplankton[J]. Science, 2004, 305(5682): 354-360.
- [20] Wang W, Yu L J, Xu C, et al. Structural basis for blue-green light harvesting and energy dissipation in diatoms[J]. Science, 2019, 363(6427): eaav0365.
- [21] Pi X, Zhao S, Wang W, et al. The pigment-protein network of a diatom photosystem II—light-harvesting antenna supercomplex[J]. Science, 2019, 365(6452): eaax4406.
- [22] Qin X, Pi X, Wang W, et al. Structure of a green algal photosystem I in complex with a large number of light-harvesting complex I subunits[J]. Nature Plants, 2019, 5(3): 263-272.
- [23] Shen L, Huang Z, Chang S, et al. Structure of a $C_2S_2M_2N_2$ -type PSII-LHCII supercomplex from the green alga *Chlamydomonas reinhardtii*[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2019, 116(42): 21246-21255.
- [24] 2016年诺贝尔物理学奖揭晓 拓扑相变: 开启一个未知世界展[EB/OL]. (2016-10-06)[2020-02-06]. <http://world.people.com.cn/n1/2016/1006/c1002-28757474.html>.

- [25] 陆琦. 拓扑物理学即将迎来爆发吗[EB/OL]. (2019-2-28) [2020-02-06]. <http://news.sciencenet.cn/sbhtmlnews/2019/2/343853.shtm>.
- [26] Zhang T, Jiang Y, Song Z, et al. Catalogue of topological electronic materials[J]. *Nature*, 2019, 566(7745): 475-479.
- [27] Tang F, Po H C, Vishwanath A, et al. Comprehensive search for topological materials using symmetry indicators [J]. *Nature*, 2019, 566(7745): 486-489.
- [28] Dai J, Huang Y J, He X, et al. Acetylation blocks cGAS activity and inhibits self-DNA-induced autoimmunity[J]. *Cell*, 2019, 176(6): 1447-1460.
- [29] Liu Z S, Cai H, Xue W, et al. G3BP1 promotes DNA binding and activation of cGAS[J]. *Nature Immunology*, 2019, 20(1): 18-28.
- [30] 国家自然科学基金委员会. 中山大学王雪华教授研究团队在量子纠缠光源研究上取得重大进展[EB/OL]. (2019-04-30) [2020-02-06]. <http://www.nsf.gov.cn/csc/20340/20343/38170/index.html>.
- [31] Liu R, Zhou Z K, Yu Y C, et al. Strong light-matter interactions in single open plasmonic nanocavities at the quantum optics limit[J]. *Physical Review Letters*, 2017, 118(23): 237401.
- [32] Liu J, Su R, Wei Y, et al. A solid-state source of strongly entangled photon pairs with high brightness and indistinguishability[J]. *Nature Nanotechnology*, 2019, 14(6): 586-593.
- [33] Chen F, Welker F, Shen C C, et al. A late middle pleistocene denisovan mandible from the Tibetan Plateau[J]. *Nature*, 2019, 569(7756): 409-412.
- [34] Zhang C, Zhang Y, Yuan X, et al. Quantum Hall effect based on Weyl orbits in Cd_3As_2 [J]. *Nature*, 2019, 565(7739): 331-336.
- [35] Tang F, Ren Y, Wang P, et al. Three-dimensional quantum Hall effect and metal-insulator transition in ZrTe_5 [J]. *Nature*, 2019, 569(7757): 537-541.
- [36] 国家天文台基于嫦娥四号探测数据发现月球背面幔源物质初步证据[EB/OL]. (2019-05-16)[2020-02-08]. http://www.cas.cn/zkyzs/2019/05/200/kjyz/201905/t20190521_4692584.shtml.
- [37] Li C, Liu D, Liu B, et al. Chang'E-4 initial spectroscopic identification of lunar far-side mantle-derived materials[J]. *Nature*, 2019, 569(7756): 378-382.
- [38] Millot M, Coppari F, Rygg J R, et al. Nanosecond X-ray diffraction of shock-compressed superionic water ice[J]. *Nature*, 2019, 569(7755): 251-255.
- [39] Liu C, Gao H, Wang Y, et al. Multiple superionic states in helium-water compounds[J]. *Nature Physics*, 2019, 15(10): 1065-1070.
- [40] 林元华, 南策文. 基于多相纳米域设计的超高能量密度无铅介电薄膜[EB/OL]. (2019-09-23)[2020-02-07]. http://www.mse.tsinghua.edu.cn/column/12_1.html.
- [41] Pan H, Li F, Liu Y, et al. Ultrahigh-energy density lead-free dielectric films via polymorphic nanodomain design[J]. *Science*, 2019, 365(6453): 578-582.
- [42] 清华大学院士解读非洲猪瘟病毒[EB/OL]. (2019-10-08) [2020-02-09]. http://www.sohu.com/a/345441778_745353.
- [43] Wang N, Zhao D, Wang J, et al. Architecture of African swine fever virus and implications for viral assembly[J]. *Science*, 2019, 366(6465): 640-644.
- [44] Zhang D D, Wang J, Wang D, et al. Population genomics demystifies the defoliation phenotype in the plant pathogen *Verticillium dahliae*[J]. *New Phytologist*, 2019, 222(2): 1012-1029.
- [45] 瞿剑. 600多种植物“癌症”病原机理揭示[N]. *科技日报*, 2019-01-08.
- [46] Cui X J, Su H Y, Chen R X, et al. Room-temperature electrochemical water-gas shift reaction for high purity hydrogen production[J]. *Nature Communications*, 2019, doi: 10.1038/s41467-018-07937-w.
- [47] 李大庆. 新技术实现常温常压制备高纯度氢气[N]. *科技日报*, 2019-01-17.
- [48] Science报道北京大学周欢萍组、严纯华组及合作者在钙钛矿太阳能电池稳定性研究上的重要进展[EB/OL]. (2019-01-17). <http://www.coe.pku.edu.cn/zkky/kyxx/kyxw/911967.htm>.
- [49] Wang L G, Zhou H P, Hu J N, et al. A Eu^{3+} - Eu^{2+} ion redox shuttle imparts operational durability to Pb-I perovskite solar cells[J]. *Science*, 2019, 363(6424): 265-270.
- [50] 张晔. 石墨烯-碳纳米管复合支架可模拟脑神经网络[N]. *科技日报*, 2019-02-28(01).
- [51] Xiao M, Li X Y, Song Q, et al. Cortex-like networks: A fully 3D interconnected graphene-carbon nanotube web allows the study of glioma infiltration in bioengineered 3D cortex-like networks[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(52): 1870397.
- [52] Ma X, Xiao M, Hao Y, et al. Precisely controllable hybrid graphene scaffold reveals size effects on differentiation of neural progenitor cells in mimicking neural network[J]. *Carbon*, 2019, 145: 90-99.
- [53] 谢开飞. 世界首例具有原子精度的全碳电子器件面世

- [N]. 科技日报, 2019-04-16(01).
- [54] Tan Z B, Zhang D, Tian H R, et al. Atomically defined angstrom-scale all-carbon junctions[J]. *Nature Communications*, 2019, doi: 10.1038/s41467-019-09793-8.
- [55] 物理所等用材料基因工程方法发现高温非晶合金[EB/OL]. (2019-05-06). http://www.cas.cn/syky/201905/t20190506_4690983.shtml.
- [56] Li M X, Zhao S F, Lu Z, et al. High-temperature bulk metallic glasses developed by combinatorial methods[J]. *Nature*, 2019, 569(7754): 99-103.
- [57] 杨亚, 马芙蓉, 王潇潇. 中国自主研发临床全数字PET/CT装备获准进入市场[EB/OL]. (2019-06-06). <http://www.chinanews.com/cj/2019/06-06/8858180.shtml>.
- [58] 孙琪, 宋美黎. 我国科学家研制出新型类脑计算芯片[EB/OL]. (2019-08-01)[2019-12-23]. http://www.xinhuanet.com/2019-08/01/c_1124827432.htm.
- [59] 清华大学“天机芯片”入选2019世界互联网15项领先科技成果[EB/OL]. (2019-10-21)[2019-12-13]. http://news.tsinghua.edu.cn/publish/thunews/9659/2019/20191021-150536357487590/20191021150536357487590_.html.
- [60] Pei J, Deng L, Song S, et al. Towards artificial general intelligence with hybrid Tianjic chip architecture[J]. *Nature*, 2019, 572(7767): 106-111.
- [61] Li Z Y, Wang C, Wang Z Y, et al. Allele-selective lowering of mutant HTT protein by HTT-LC3 linker compounds [J]. *Nature*, 2019, 575(7781): 203-209.
- [62] 王春. 复旦大学团队研发亨廷顿病潜在新药, “明辨忠奸”的小分子胶水[N]. 科技日报, 2019-10-31.
- [63] Wang H, Qin J, Ding X, et al. Boson sampling with 20 input photons and a 60-mode interferometer in a 1014-dimensional Hilbert space[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 123: 250503.
- [64] 中国科大在光量子计算领域取得重要突破: 态空间维数提高百亿倍, 玻色取样逼近里程碑[EB/OL]. (2019-12-23)[2019-12-30]. <http://quantum.ustc.edu.cn/web/node/823>.
- [65] 任芳言. 世界最亮同步辐射光源验证装置通过验收[N]. 中国科学报, 2019-02-01(01).
- [66] 李大庆. 世界最亮同步辐射光源建设有了底气[N]. 科技日报, 2019-02-01(01).
- [67] 董瑞丰. 高能同步辐射光源验证装置通过国家验收 最亮光源年中开建[EB/OL]. (2019-02-01) [2019-12-20]. http://www.xinhuanet.com/2019-02/01/c_1124075849.htm.
- [68] 付毅飞, 张佳星. 我国最大推力固体火箭发动机试车成功[EB/OL]. (2019-03-06) [2019-12-21]. <http://scitech.people.com.cn/n1/2019/0306/c1007-30960318.html>.
- [69] 我国最大推力整体式先进固体火箭发动机试车成功 航天科技研制[EB/OL]. (2019-03-06) [2019-12-21]. <http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588124/c10641474/content.html>.
- [70] 赵竹青. 我国最大推力整体式固体火箭发动机试车成功[EB/OL]. (2019-03-06)[2019-12-21]. http://news.china.com.cn/live/2019-03/06/content_348530.htm.
- [71] 王赤凤. “一航津平2”自升式碎石铺设整平船成功下水[EB/OL]. (2019-04-10)[2019-12-24]. http://www.zgjt.com/zhitong/2019-04/10/content_220641.htm.
- [72] 中交集团研发自升式碎石铺设整平船成功下水[EB/OL]. (2019-04-10)[2019-12-24]. <http://news.sina.com.cn/c/2019-04-12/doc-ihvhiewr5243981.shtml>.
- [73] 张晔. “一航津平2”来了,海底便有了“路”[EB/OL]. (2019-04-10)[2019-12-24]. http://www.xinhuanet.com/tech/2019-04/26/c_1124417889.htm.
- [74] 胡喆, 萧海川. 我国首次固体运载火箭海上发射技术试验取得成功[EB/OL]. (2019-06-05)[2019-12-21]. http://www.xinhuanet.com/tech/2019-06/05/c_1124586083.htm.
- [75] 付毅飞. 中国火箭掌握发射“新姿势”!长十一完成海射首秀[EB/OL]. (2019-06-05)[2019-12-21]. <http://scitech.people.com.cn/n1/2019/0605/c1007-31121644.html>.
- [76] 李国利, 邓孟, 肖建军. 天宫二号受控离轨按期归来 中国载人航天完成空间实验室阶段全部任务[EB/OL]. (2019-07-19) [2019-12-23]. http://www.xinhuanet.com/politics/2019-07/19/c_1124776218.htm.
- [77] 李国利, 喻菲, 张瑞杰. 天宫二号如期“回家” 六大精彩瞬间难忘[EB/OL]. (2019-07-19) [2019-12-23]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1639493454043815023&wfr=spider&for=pc>.
- [78] 天宫二号受控离轨如期“回家”[EB/OL]. (2019-07-20) [2019-12-20]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=163953603-5094401659&wfr=spider&for=pc>.
- [79] 胡喆. 在轨飞行超过1000天, 天宫二号“荣休”背后的三大看点[EB/OL]. (2019-07-19)[2019-12-23]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1639561633107739344&wfr=spider&for=pc>.
- [80] 孙凯笛. 中国自主研发最大直径盾构机始发 达世界先进水平[EB/OL]. (2019-08-16)[2019-12-24]. <http://www.chinanews.com/sh/2019/08-16/8928246.shtml>.
- [81] 杨凌. 我国自主研发最大直径泥水平衡盾构机深圳始发[EB/OL]. (2019-08-15)[2019-12-25]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1641890825622946059&wfr=spider&for=pc>.

- [82] 张建松. 我国“南海深部计划”取得丰硕成果[EB/OL]. (2019-08-14) [2019-12-27]. http://www.xinhuanet.com/2019-08/14/c_1124875068.htm.
- [83] 陆琦. “南海深部过程演变”重大研究计划收官在即[EB/OL]. (2019-04-02) [2019-12-23]. <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2019/4/424776.shtm>.
- [84] 付毅飞. 北斗三号全球系统核心星座部署完成[EB/OL]. (2019-12-17) [2019-12-26]. http://www.cas.cn/kj/201912/t20191217_4727802.shtml.
- [85] 刷新纪录!北斗三号全球系统核心星座部署完成[EB/OL]. (2019-12-16) [2019-12-26]. https://www.guancha.cn/industry-science/2019_12_16_528586.shtml.
- [86] 章文. 北斗三号全球系统核心星座部署完成[N]. 光明日报, 2019-12-17(8).
- [87] 沈湫莎. 北斗“三步走”:为世界导航提供“中国方案”[EB/OL]. (2019-12-17) [2019-12-28]. <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2019/12/433909.shtm>.
- [88] 长征五号遥三运载火箭成功发射[N]. 人民日报海外版, 2019-12-28(02).
- [89] “胖五”归来!长征五号遥三运载火箭发射成功[EB/OL]. (2019-12-28) [2019-12-28]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1654089248237622050&wfr=spider&for=pc>.
- [90] 王天益, 程雪. 长征五号遥三运载火箭成功发射:中国运载火箭的“长征”路[EB/OL]. (2019-12-30). http://www.mod.gov.cn/topnews/2019-12/30/content_4857724_4.htm.
- [91] 矫阳. 世界首条智能高铁“京张线”开张了[EB/OL]. (2019-12-31). http://tech.gmw.cn/2019-12/31/content_334-42839.htm.
- [92] 从“人”到“大”!京张高铁全线开通[EB/OL]. (2019-12-31) [2019-12-25]. http://difang.gmw.cn/he/2019-12/31/content_33445290.htm.
- [93] 习近平对京张高铁开通运营作出重要指示强调 京张高铁建成投运意义重大 冬奥会各项筹备工作都要高标准高质量推进[EB/OL]. (2019-12-30) [2019-12-22]. http://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2019-12/30/c_112540-5183.htm.

Top advances of science, technology and engineering from China in 2019

CHEN Guangren, LIU Zhiyuan, ZHU Yehua, XU Lijiao

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

Abstract For the event sponsored by *Science & Technology Review* to select Chinese annual top advances in science, technology and engineering, altogether top 10 scientific, top 10 technological and top 10 engineering achievements during January 1 to December 31 of 2019 have been selected from respective published influential academic journals and scientific newspapers. The selection procedure involved screening and recommending candidates internally, followed by appraisal of experts including editorial board members and external reviewers. This article introduces these achievements in a time sequence of publishing.

Keywords S&T achievements of China; major advance of science; major advance of technology; major advance of engineering



(责任编辑 王志敏)