

# 2020年中国重大科学、技术和工程进展

刘志远, 祝叶华, 徐丽娇, 陈广仁\*

《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2020年中国重大科学、技术、工程进展30项。(1) 2020年中国重大科学进展10项:精准绘制地球3亿年生物多样性变化历史;揭示脑-脾神经环路控制抗体免疫应答新机制;发现 $H+HD \rightarrow H_2+D$ 反应中直接抽取机制和漫游插入机制的量子干涉;首次合成近质子滴线百纳秒寿命超铀新核素 $^{222}\text{Np}$ ;首次证明4-乙烯基苯甲醚是蝗虫的聚集信息素;发现睡眠压力调控的神经环路机制;首次实现单个超冷分子的相干合成;首次发现快速射电暴源的辐射具有丰富偏振特征;在极细多晶体铜中发现新型亚稳结构;新型冠状病毒的发现与科学应对。(2) 2020年中国重大技术进展10项:提出质子辅助方法实现超平整石墨烯的可控生长;自主研发成功商用毫米波相控阵芯片;揭示克制小麦赤霉病的主效基因 *Fhb7*;开发RNA-RNA空间相互作用的原位全景分析技术;实现尺寸最大、晶面指数最全单晶铜箔库的可控制备;提出基于忆阻器阵列的新型脑机接口;成功研制全球神经元规模最大的类脑计算机;成功设计纳米“人造分子”简易制备方法;发现空位诱导的二维材料薄膜超快离子传输;中国量子计算原型机“九章”问世。(3) 2020年中国重大工程进展10项:“中国天眼”验收开放,取得一系列重大成果;无人潜水器和载人潜水器取得新突破;“北斗三号”最后一颗全球组网卫星发射成功;中国首个火星探测器“天问一号”成功发射;中国最大直径盾构机下线;“国和一号”和“华龙一号”两大三代核电技术取得新突破;中国最高参数“人造太阳”建成;世界首座高速铁路悬索桥开通;“嫦娥五号”完成中国首次地外天体采样;世界最强流深地核天体物理加速器成功出束。

**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17年遴选发布中国年度重大科学、技术和工程进

展<sup>[1-18]</sup>。为盘点2020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2020年1月1日至12月31日刊发

收稿日期:2021-01-27;修回日期:2021-02-10

作者简介:刘志远,副编审,研究方向为科技编辑学,电子信箱:liuzhiyuan@cast.org.cn;陈广仁(通信作者),编审,研究方向为科技哲学、科技评价,电子信箱:chenguangren@cast.org.cn

引用格式:刘志远,祝叶华,徐丽娇,等. 2020年中国重大科学、技术和工程进展[J]. 科技导报, 2021, 39(3): 12-30; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.03.001

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、30项重大技术进展、49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2020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、公布或报道的时间先后逐一介绍。

## 1 2020年中国重大科学进展(10项)

### 1.1 精准绘制地球3亿年生物多样性变化历史

重建地球生物多样性变化的历史,可以帮助人类更好地了解生物演化历程,认识生物多样性现状与人类居住环境未来发展趋势,化石记录是回溯生物多样性历史的重要依据。

南京大学沈树忠、樊隽轩团队联合国内外专家建设大型数据库,绘制出全球第一条高精度的古生代海洋生物多样性变化曲线(图1)<sup>[19]</sup>。该曲线的时间分辨率约为2.6万年,与国际同类研究相比,提高400倍。研究团队使用“天河二号”超级计算机,遴选出3112个地层剖面,11268个海洋化石物种的26万条化石数据。研究发现,2.52亿年前发生了人类

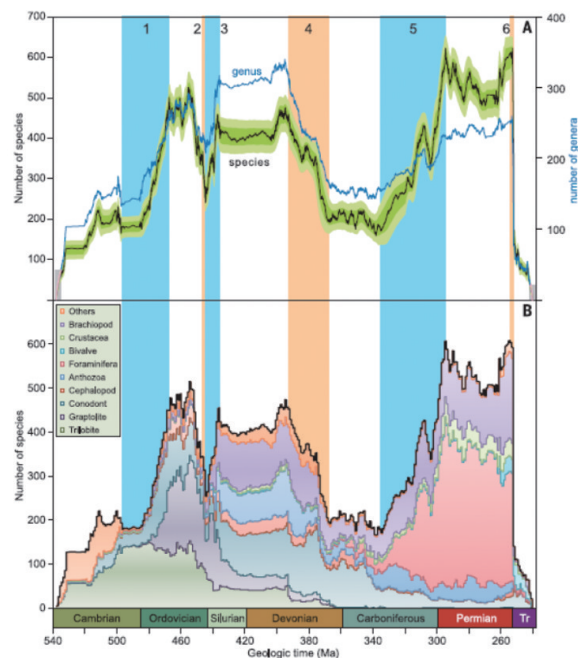


图1 古生代海洋生物多样性演变曲线  
(图片来源:《Science》)

迄今为止识别出的最大规模的生物灭绝事件,导致约81%的海洋生物在数万年内迅速灭亡。而代表“地球生命辉煌阶段”的2次重要生物辐射事件,分别发生在4.9亿—4.7亿年前和3.4亿—3亿年前,均与当时全球气候的逐渐变冷同步。新曲线精准刻画出地质历史中多次重大生物灭绝和辐射事件,揭示了当时生物多样性变化与大气CO<sub>2</sub>含量的协同关系。《Science》评述该研究“将推动整个演化古生物学的变革”,《Nature》评述“古生物学家以惊人的细节绘制出地球3亿年历史”。相关研究成果于2020年1月17日发表在《Science》上。

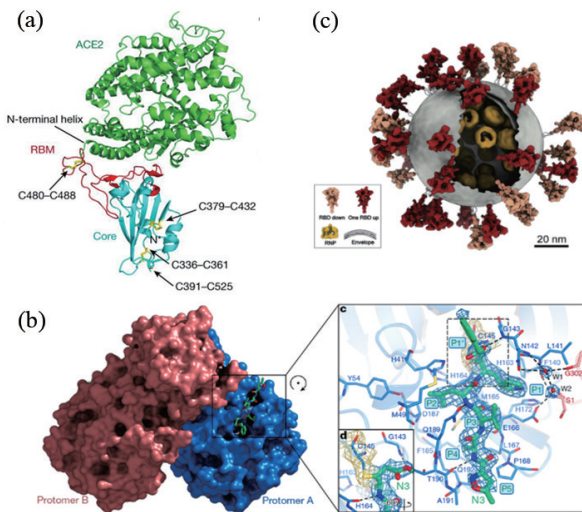
### 1.2 新型冠状病毒的发现与科学应对

2020年,新型冠状病毒(新冠病毒)在世界范围内传播,给人类健康和生命造成巨大的威胁,也给全球经济带来了极大的损失。科学界对该病毒及其引发的疾病进行了广泛而深入的研究。

2020年2月2日,石正丽等<sup>[20]</sup>对新冠病毒进行了详细的基因组测序,发现其含有29881对碱基,与SARS冠状病毒有着极高的同源性(79.6%一致),并且在宿主细胞表面的受体蛋白也是ACE2。清华大学王新泉和张林琦合作,利用X射线衍射技术,解析了新冠病毒刺突蛋白受体结合结构域(receptor-binding domain, RBD)与人受体蛋白ACE2复合物2.45 Å的高分辨率晶体结构,准确定位了新冠病毒RBD和受体ACE2的相互作用位点,揭示了受体ACE2特异性介导新冠病毒细胞侵染的结构基础,为治疗性抗体药物开发以及疫苗的设计奠定基础(图2(a))<sup>[21]</sup>。

饶子和团队先后阐明了2个抗新冠病毒药物最关键靶点蛋白的结构信息,即主蛋白酶M<sup>pro</sup>,以及由聚合酶nsp12、引物酶nsp8和辅因子nsp7组成的“核心转录复制复合体”(C-RTC),揭示了C-RTC与核酸和瑞德西韦复合物的三维结构,并描绘出新冠病毒RdRp-nsp7-nsp8转录复制机器在工作状态下的核心特征,为认识病毒的生命过程、发展高效抗病毒药物提供了关键信息(图2(b))<sup>[22-25]</sup>。

中国医学科学院医学实验动物研究所秦川团队等多家单位合作<sup>[26]</sup>,公布了首个新冠疫苗动物实验研究结果。中国科学院微生物研究所严景华团



(a) 新冠病毒刺突蛋白RBD与人源ACE2的复合物晶体结构(图片来源:《Nature》);(b) 新冠病毒主蛋白酶同源二聚体的晶体结构,及其与小分子抑制剂的结合模式(图片来源:《Nature》);(c) 结合单颗粒三维重构和断层扫描三维重构得到的新冠病毒整体结构(图片来源:《Cell》)

图2 新冠病毒结构

队等<sup>[27]</sup>,首次报道了在非人灵长类动物试验模型中,能够有效治疗和预防新冠病毒感染的特异性、全人源单克隆抗体。

2020年9月14日,清华大学李赛团队和浙江大学李兰娟团队合作<sup>[28]</sup>,结合冷冻电子断层扫描(cryo-ET)和子断层扫描图平均化(STA)对早期毒株来源的2294个完整的病毒颗粒进行成像分析,详细的揭示了新冠病毒的完整病毒结构,阐明了病毒如何在直径80 nm的内腔中包装长达30 kb的长链RNA(图2(c))。这既是新冠病毒研究中的重大突破,也是病毒结构生物学研究方法上的重大突破。

在疫苗研发方面,中国同时开展了灭活疫苗、病毒载体疫苗、蛋白亚单位疫苗、核酸疫苗等的研发,腺病毒载体疫苗在全球率先开展1期临床试验,灭活疫苗在全球率先开展3期临床试验,并获批附条件上市。

2020年,科学界在面对新冠病毒时所做出的快速响应,在众多科学家的共同努力下,新冠病毒的研究取得了重要的进展<sup>[29-31]</sup>,积累了大量的研究成果,为未来应对新的传染病威胁提供了有力的保障。

### 1.3 揭示脑-脾神经环路控制抗体免疫应答新机制

大脑活动是否可以直接控制淋巴器官的适应性免疫反应,一直是神经免疫学研究的热点,然而,研究者在很长时间内没有取得确切的证据。

清华大学免疫学研究所祁海、上海科技大学胡霁及清华大学麦戈文脑科学研究所钟毅课题组合作,发现第一条神经信号调控适应性免疫应答的解剖学通路<sup>[32]</sup>。该研究团队研发了一种新型去除小鼠脾神经的手术,发现接受手术后的小鼠在疫苗接种后产生的浆细胞(抗体分泌细胞)数量有明显缺陷,暗示了脾神经冲动信号对B细胞应答有促进作用。接下来,通过伪狂犬病毒逆行追踪,发现杏仁核中央核(CeA)和室旁核(PVN)中表达促肾上腺皮质激素释放激素(CRH)的神经元与脾神经相连。研究发现,对这些神经元进行消融或药物抑制可减少浆细胞的形成,而这些神经元的药物激活增加了免疫后血浆细胞的丰度(图3)。

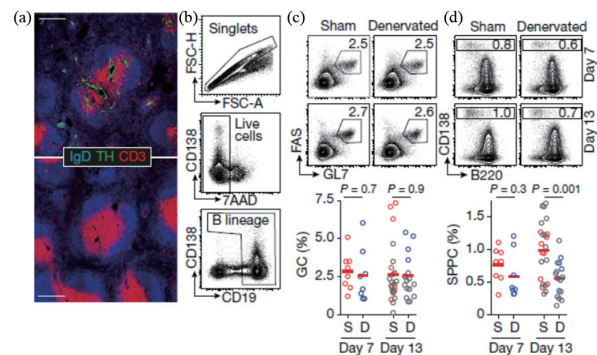


图3 去脾神经手术降低疫苗接种后的浆细胞数量(图片来源:《Nature》)

这条通路不仅可以促进疫苗接种引起的抗体免疫应答,还可以通过响应躯体行为刺激对免疫应答进行不同调控。该通路是迄今发现的第一条解剖学明确、由神经信号传递而非内分泌激素介导的、中枢神经对适应性免疫应答进行调控的通路,揭示了大脑对适应性免疫的控制,并提出了通过行为干预增强免疫能力的可能性。相关研究成果于2020年4月29日发表在《Nature》上。

### 1.4 发现 $H+HD \rightarrow H_2+D$ 反应中直接抽取机制和漫游插入机制的量子干涉

随着微观粒子领域对各种量子现象研究的不断

开展, 化学反应动力学过程中的量子力学研究也更加具体, 化学反应过程中小概率的“反常”现象不断被揭示。几何相位效应对化学反应的影响是物理化学领域备受关注的重要科学问题。最简单的化学反应体系  $H+H_2$  及其同位素取代反应一直是研究几何相位效应对化学反应影响的模型体系, 在国际上被广泛应用。然而, 由于实验和理论上存在巨大的挑战, 科学界尚未对此问题取得令人信服的结论。

中国科学院大连化学物理研究所杨学明、张东辉、孙志刚和肖春雷研究团队等在对氢原子与氢分子的同位素 ( $H+HD \rightarrow H_2+D$ ) 反应的研究中发现一种新的量子干涉现象, 并揭示了该反应中的量子几何相位效应<sup>[33]</sup>。研究团队自主组建了交叉分子束离子成像装置, 该装置具有国际最高角度分辨率。以最简单的  $H+H_2$  及其同位素的反应为研究体系, 该研究在实验上首次实现了在较高碰撞能处对后向散射 (散射角度为  $180^\circ$ ) 信号的精确测量。研究发现, 在后向散射角度上,  $H+HD$  反应的产物  $H_2$  会随碰撞能变化而呈现出有规律的振荡现象。基于拓扑学和经典轨线理论分析表明, 这些后向散射的振荡是由 2 条反应途径的干涉造成的, 这 2 条反应途径以相反的方向围绕于锥形交叉的反应势能面, 在考虑几何相位效应后, 它们的干涉图样相位将随着碰撞能发生变化, 最终呈现出有规律的振荡现象 (图 4)。通过这项研究, 在实验上发现和证实了这一重要反应体系在高能反应时一个全新的反应机理, 对于从根本上理解这一重要体系的高能反应动力学具有重要意义。相关研究成果于 2020 年 5 月 15 日发表在《Science》上。

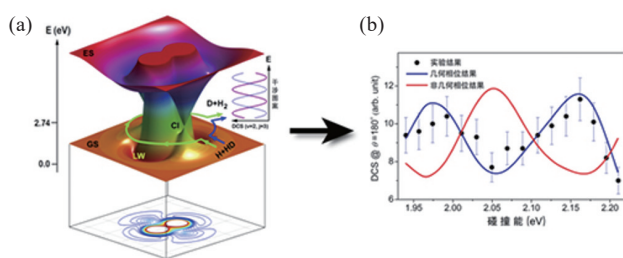


图4  $H+HD \rightarrow H_2+D$  拓扑反应途径示意(a)与后向散射产物  $H_2$  微分截面的理论与实验对比(b)

(图片来源:《Science》)

### 1.5 首次合成近质子滴线百纳秒寿命超铀新核素 $^{222}\text{Np}$

原子核是由质子和中子组成的量子多体系统。不同数量的质子和中子, 构成了具有不同性质的原子核, 称为核素。目前, 已经发现的核素只有 3300 多种, 还有大量的核素没有被发现。超铀系元素的存在与原子核的壳层结构有关, 原子核壳层结构的影响可能决定了人类能够合成元素的极限。发现实验未知的新核素, 不仅对认识物质结构具有重要意义, 而且为理解天体环境的演化提供重要信息, 是探索自然奥秘的重要手段。

中国科学院近代物理研究所研究团队与合作者利用兰州重离子加速器的充气反冲核谱仪 SHANS 装置, 首次合成了镎 (Np) 的一种新同位素核  $^{222}\text{Np}$ <sup>[34]</sup>。 $^{222}\text{Np}$  原子核具有 93 个质子和 129 个中子, 半衰期为 380 ns, 具有  $\alpha$  放射性, 处于目前已知的最重的质子滴线附近。此前, 中国科学院近代物理研究所已陆续发现新核素  $^{219, 220, 223, 224}\text{Np}$ , 此次在该同位素链中发现的新核素  $^{222}\text{Np}$ , 几乎达到了用充气反冲核谱仪研究新核素合成的半衰期极限。借助于先进的波形采样数字化电子学系统, 采用注入核- $\alpha$  关联的分析方法, 研究人员建立了来自该新核素的 6 条  $\alpha$  衰变链, 从而在实验上得到了它的衰变性质 (图 5)。 $^{222}\text{Np}$  的实验数据进一步完善了 126 中子满壳附近 Np 同位素核  $\alpha$  放射性衰变的系统性。至此, 研究人员不仅可以在宏观层面 ( $\alpha$  衰变能、半衰期), 也可以从微观层面 (约化  $\alpha$  衰变宽度) 系统性探讨 126 中子满壳对缺中子 Np 同位素核稳定性的影响, 研究发现在 Np 的缺中子核素中 126 中子壳效应依然明显。相关研究成果于 2020 年 7 月 13 日发表在《Physical Review Letter》上。

### 1.6 首次证明 4-乙烯基苯甲醚是蝗虫的聚集信息素

飞蝗是一种分布广泛的作物害虫, 威胁着世界各地的农业和环境安全。直到 20 世纪 70—80 年代, 聚集信息素有可能是蝗虫群聚成灾的关键因素这一论点才被科学家逐步接受。但是, 尚未发现能够满足蝗虫聚集信息素所有标准的化合物。

中国科学院动物研究所康乐与河北大学科研

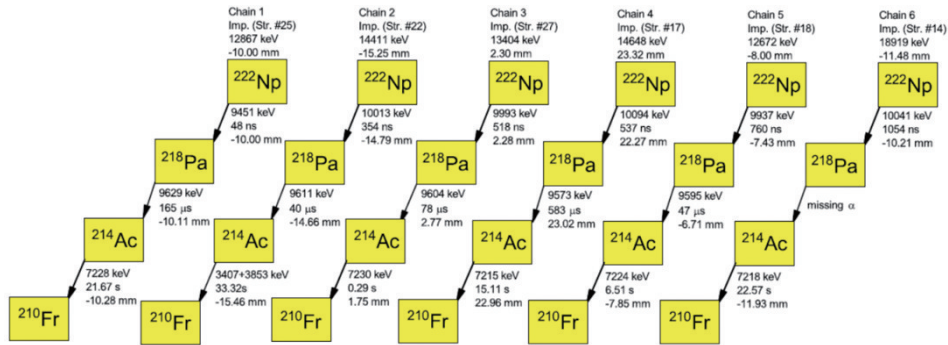


图5 实验建立的<sup>222</sup>Np衰变链(图片来源:《Physical Review Letter》)

人员合作,首次证明4-乙炔基苯甲醚(4VA)是蝗虫聚集信息素<sup>[5]</sup>。研究团队通过分析群居型和散居型飞蝗的体表和粪便挥发物,在35种化合物中鉴定出一种由群居型蝗虫特异性挥发的化合物4VA,该化合物释放量低但生物活性非常高。研究人员在飞蝗触角上的4种主要感器类型中,发现了4VA特异引起锥形感器的反应,定位在锥形感器中的嗅觉受体OR35是4VA的特异性受体。研究显示,4~5只蝗虫聚集就会释放出该化合物,并在野外吸引更多蝗虫前来聚集(图6)。该研究首次从化学分析、行为验证、神经电生理记录、嗅觉受体鉴定、基因敲除和野外验证等多个层面对飞蝗群居信息素进行了全面而充分的鉴定和验证,是昆虫学研究的一个重要突破,为蝗灾防治指明了新方向。该研究结果于2020年8月12日发表在《Nature》上。

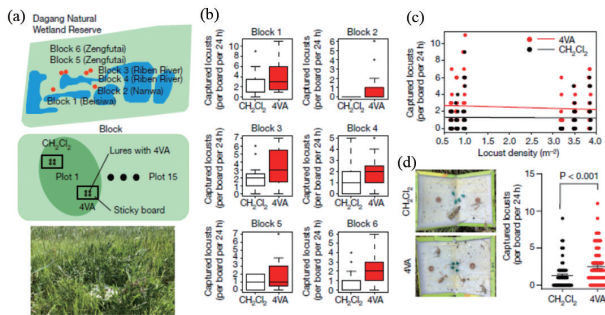


图6 飞蝗群聚信息素4VA在自然栖息地吸引蝗虫(图片来源:《Nature》)

### 1.7 发现睡眠压力调控的神经环路机制

睡眠是动物界普遍存在的现象,睡眠-觉醒周期的稳态特性提示,觉醒期间大脑促睡眠因子的积累导致了机体睡眠压力增加和“困意”产生。已有

研究表明,基底前脑区域的腺苷是介导睡眠压力的重要分子,但是神经活动如何调控腺苷的动态变化目前还不清楚。

中国科学院脑科学与智能技术卓越创新中心徐敏与北京大学李毓龙研究组合作,发现基底前脑区的谷氨酸能神经元对于腺苷的快速释放和睡眠压力的积累起着重要的调控作用,揭示了睡眠稳态调控的神经环路机制(图7)<sup>[6]</sup>。为实现在睡眠觉醒周期中对基底前脑区胞外腺苷浓度高时空分辨率的检测,研究团队开发了一种新型的遗传编码的腺苷探针,可以将胞外腺苷浓度的变化转化为快速变化的探针荧光强度。利用该探针的高时间分辨率,研究首次发现,在快速眼动睡眠时期也存在很高浓度的腺苷,并且高于清醒和非快速眼动睡眠状态。此外,腺苷浓度在睡眠时相转变时存在快速的变化,揭示其与神经元的活动密切相关。为了进一步揭示腺苷浓度增加与神经元活动的关系,探究了基

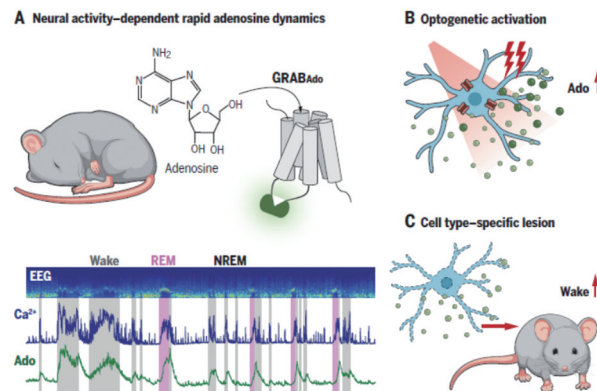


图7 腺苷在睡眠稳态调控的神经环路机制(图片来源:《Science》)

基底前脑区乙酰胆碱能神经元、谷氨酸能神经元与腺苷浓度变化的相关性和因果性。结果表明这2类神经元的钙活动与胞外腺苷浓度高度相关,并且神经活动总是提前于腺苷释放。以上实验表明,基底前脑区的谷氨酸能神经元对睡眠压力的积累起到了重要调控作用。该研究为进一步探索睡眠稳态调节机制奠定了坚实的基础。相关研究成果于2020年9月4日发表在《Science》上。

### 1.8 首次实现单个超冷分子的相干合成

超冷分子有比超冷原子更丰富的内部能级,是一种非常重要的量子资源。超冷单分子在超冷碰撞和化学、凝聚态体系的量子模拟、精密测量和量子信息处理等前沿科学领域具有广泛的潜在应用。但是,由于分子复杂的能级结构以及难以完全控制的原子-分子系统,在实验上制备和操控单个冷分子仍然极具挑战性。

中国科学院精密测量院詹明生、何晓东研究团队<sup>[37]</sup>首创了一种单分子相干合成的新方法,即原子自旋与相对运动波函数耦合(spin-motion coupling, SMC),在国际上首次实现单个超冷分子的相干合成(图8)。研究人员用微波,通过将原子自旋耦合到具有固有偏振梯度的强聚焦激光器中,从而将2个原子相干地结合成一个在 MHz 级的弱结合分子。在 SMC 机制支配下,光阱中原子之间的相对运动波函数偏离分子相互作用势的中心,从而导致与弱束缚态波函数之间的重叠积分得到增强,即原子-分子间的微波跃迁概率得到增强,最终实现了处于囚禁势基态的单个分子的相干合成。此外,通过人为调整微波强度,该研究还实现了光阱中双

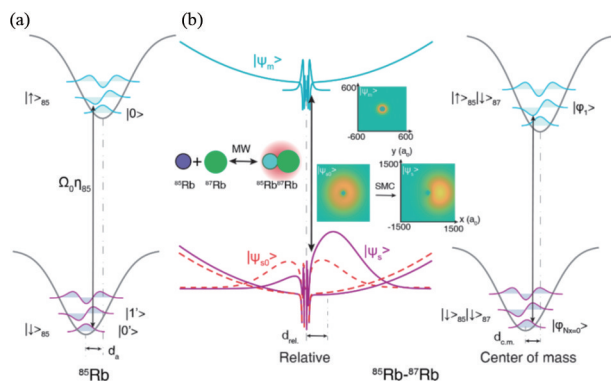


图8 SMC 机制和分子缔合原理示意  
(图片来源:《Science》)

原子与单个分子之间长寿命的拉比振荡,即实现了2个原子量子体系中原子态与分子态的可控相干叠加。该方法避免了光缔合过程存在的退相干缺陷,是一种纯净的分子态操控方法,具有优越的相干性。这项工作标志着对原子之间核间距自由度的相干控制,为基元化学反应过程相干控制、量子少体束缚态的相干合成及其量子调控提供了可能性。相关研究成果于2020年10月16日发表在《Science》上。

### 1.9 首次发现快速射电暴源的辐射具有丰富偏振特征

快速射电暴(FRB)是已知宇宙中射电波段最强的爆发现象,它持续时间只有几毫秒,却能够释放巨大的能量。过去几十年中,探寻FRB来源一直是现代天文学研究的热点。其中,磁星驱动理论受到广泛支持。详细的偏振观测有助于了解FRB的发生机制。然而,现有的FRB偏振数据显示了許多偏振特性,尚未得到确切的证实。

北京大学、中国科学院及国际合作团队,在国际上首次发现快速射电暴爆发源FRB 180301的辐射具有丰富的偏振特征<sup>[38]</sup>。研究人员在12 h的观测时间里,利用FAST探测到了FRB 180301的15次爆发,每次爆发的强度曲线各不相同,并在其中7次中发现了不同的偏振角波动(图9)。研究结果表明,宇宙中FRB的爆发源可能来自致密天体磁层中的物理过程。这些爆发的偏振角特征的多样性与无线电发射的磁起源一致,并不利于引用相对论激波的辐射模型。相关研究成果于2020年10月28日发表在《Nature》上。

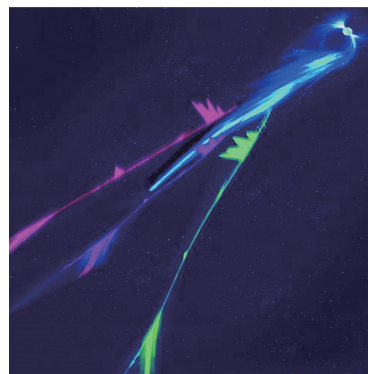


图9 磁星释放的快速射电暴  
(图片来源:《Nature》)

2020年11月,北京师范大学、北京大学、中国科学院及国际合作团队又报道了一次8 h的有针对性的无线电观测活动<sup>[39]</sup>。该活动包括4个Sessions,并辅以多波长(光学和硬X射线)数据。在第3个Session,在 $\gamma$ 射线能量中检测到29个软 $\gamma$ 射线中继器(SGR)爆发。结果表明FRB-SGR爆发关联很少,FRB可能在几何上是成束的,或者与SGR爆发关联的类FRB事件可能具有较窄的频谱和所观察频带之外的特征频率。相关研究成果于2020年11月4日发表在《Nature》上。

### 1.10 在极细多晶体铜中发现新型亚稳结构

金属通常以多晶体形式存在,使其具有晶界,从而表现出热力学不稳定性。在加热升温的过程中,晶界由于发生粗化现象而逐渐消失,导致金属在高温下难以维持原有结构,进而严重降低其强度性能,限制了金属材料的进一步应用发展。

中国科学院金属研究所沈阳材料科学国家研究中心李秀艳、周鑫和卢柯与上海交通大学金朝晖课题组发现,当晶粒尺寸降低到几纳米时,纯金属铜多晶体会形成一种新型亚稳结构——受限晶体(schwarz crystal)结构(图10)<sup>[40]</sup>。研究人员利用2步低温塑性变形技术,将纯铜薄片的晶粒尺寸降低到10 nm以下。该结构在显微结构下呈现出典型的类似水油不互溶双连续相中常见的流形结构。经系统表征纳米晶粒的尺寸、形态、取向及分布等发现,许多极小晶粒具有规则的Kelvin截角八面体形态,并且存在相当数量的低能界面。该结构具有极小界面(minimal interface)的三维结构表现出极

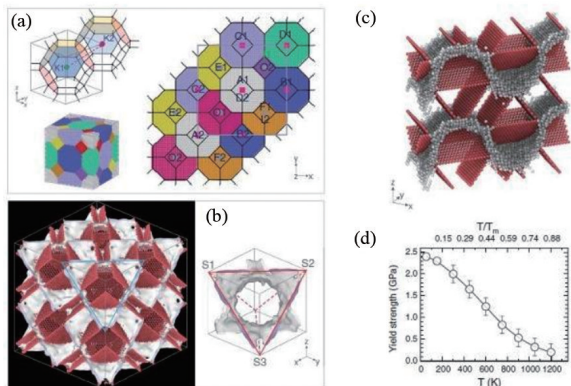


图10 Schwarz晶体的原子模型和分子动力学模拟  
(图片来源:《Science》)

高的热稳定性和力学稳定性,即便温度升高到熔点附近,晶粒粗化现象依然可被有效抑制,保证其强度不会大幅下降。这一发现表明除非晶固态外,多晶体金属在晶粒极细时还存在另外一种亚稳固体状态,其稳定性甚至远高于非晶固体,为研发高稳定性金属材料及制造工艺提供了新的机遇。相关研究成果于2020年11月13日发表在《Science》上。

## 2 2020年中国重大技术进展

### 2.1 提出质子辅助方法实现超平整石墨烯的可控生长

化学气相沉积方法是目前制备大面积、高质量石墨烯的最主要方法。该方法生长的石墨烯与其生长基体之间存在耦合作用,由于二者热胀率的差异,高温生长的石墨烯在降温过程中会形成褶皱,而这些褶皱的存在大大限制了石墨烯在大尺寸下的量子输运特性<sup>[41]</sup>。

为了在生长石墨烯的同时与生长基体解耦进而根除褶皱,南京大学物理学院高力波团队及合作者开发了一种质子辅助化学气相沉积方法用来生长无褶皱的超平整石墨烯。利用质子对石墨烯的可渗透性,提出了渗透的质子在石墨烯与生长基体之间会重组为氢。由于氢体积较大,不能反向穿透石墨烯,因此这些重组的氢会弱化石墨烯与基体的耦合作用。这种与生长基体解耦的石墨烯,从根本上避免了褶皱的产生,同时表现出与悬浮石墨烯类似的特征,包括能带的线性色散关系和无掺杂状态。石墨烯薄膜的超平整特性能确保在后续的器件制作过程中,表面残存的光刻胶更容易彻底清除。尤为重要的是,对于线宽 $100\ \mu\text{m}\sim 1\ \text{mm}$ 的超平整石墨烯器件,在室温下仍然呈现量子霍尔效应,此线宽大大高于目前报道的微米级(图11)。这项工作不仅提出了一种生长大尺寸均匀的超平整石墨烯的方法,同时发现质子辅助方法还可以用于消除已经存在的石墨烯褶皱,对其他低维材料的去褶皱、无损应力调控、应变掺杂以及储氢等也具有参考意义。相关研究结果于2020年1月8日发表在《Nature》<sup>[42]</sup>上。

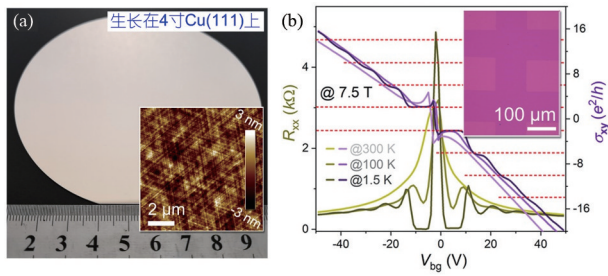


图11 超平整石墨烯薄膜的形貌(a)与大线宽下量子霍尔效应(b)(图片来源:《Nature》)

## 2.2 自主研发成功商用毫米波相控阵芯片

要建立覆盖全球每个角落的宽带通信网络,消除信号盲点,必须推动宽带卫星通信和5G毫米波通信这两件“工具”商用落地。1月19日,中国自主可控、成本超低的毫米波相控阵芯片问世(图12),它速度快、覆盖广,打破了毫米波通信技术商用的制约,实现了中国在该项技术上的突破。

东南大学尤肖虎、赵涤葵课题组联合天锐星科技有限公司,基于多个项目所形成的技术积累,对超低成本CMOS工艺毫米波芯片、大规模天线阵设计进行了深入探索;深南电路股份有限公司同步解决了大规模天线阵电路板制造及集成工艺等关键技术。在世界上首次较为彻底地解决了阻碍CMOS毫米波通信问题,关键性能指标与国际水准相当,发射机效率和接收机功耗等指标远超国际,每个通道成本仅为传统常用技术路线的几十分之一,研制水平首次进入世界前列,实现了从芯片到天线阵的全面自主可控,为中国5G优势延续5~10年打下重要基础。相关研究成果已在宽带卫星通信、与中星16号互通中得到示范应用,有望在2022年实现规模商用<sup>[43-44]</sup>。



图12 商用毫米波相控阵芯片  
(图片来源:网络通信与安全紫金山实验室)

## 2.3 揭示克制小麦赤霉病的主效基因 *Fhb7*

小麦赤霉病是世界范围内极具毁灭性且防治困难的真菌病害,有小麦“癌症”之称。由于小麦有着庞大的基因组及小麦-真菌互作的复杂性,科研工作者对小麦抗赤霉病机制的了解十分有限<sup>[45]</sup>。

山东农业大学农学院教授、山东省现代农业产业技术体系小麦创新团队首席专家孔令让及其团队从小麦近缘植物长穗偃麦草中首次克隆出抗赤霉病主效基因 *Fhb7*(图13),且成功将其转移至小麦品种中,首次明确并验证了其在小麦抗病育种中不仅具有稳定的赤霉病抗性,而且具有广谱的解毒功能,为解锁赤霉病这一世界性难题找到了“金钥匙”。已有30多家单位利用抗赤霉病的种质材料进行小麦抗赤霉病遗传改良,并在山东、河南、江苏、安徽等地进行广泛试验,结果表现良好。相关研究成果于2020年4月10日在线发表在《Science》<sup>[46]</sup>上。

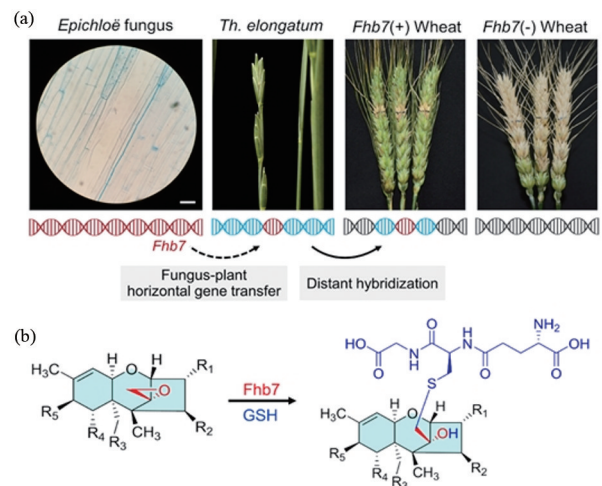


图13 *Fhb7*的跨物种转移和抗赤霉病分子机理  
(图片来源:《Science》)

## 2.4 开发 RNA-RNA 空间相互作用的原位全景分析技术

哺乳动物细胞内存在着海量的非编码RNA分子,它们通常会形成复杂的高级结构,并在各种蛋白质的介导下与其他RNA分子相互作用,以调控众多关键生命活动过程。因此系统解析细胞内RNA分子的高级结构及作用靶标是破解生命健康奥秘的关键。然而,由于技术手段的限制,迄今为止,细胞内RNA的原位高级结构和作用靶标依然不明<sup>[47]</sup>。

中国科学院生物物理研究所薛愿超研究组与合作者开发了RNA原位构象测序新技术RIC-seq (RNA in situ conformation sequencing), 通过高特异性、高效率、低噪音的原位近端连接和测序, 首次全景式解析了细胞内RNA分子的原位高级结构和作用靶标(图14)。借助RIC-seq技术, 研究团队发现增强子和启动子区产生的非编码RNA可相互作用, 并介导染色质环化, 进而促进癌基因MYC的转录。RIC-seq技术为破译RNA结构密码和调控机制提供了强大的工具, 在RNA病毒的结构、靶标和致病机制研究中有着广泛的应用前景。相关研究结果于2020年5月6日发表在《Nature》<sup>[48]</sup>上。

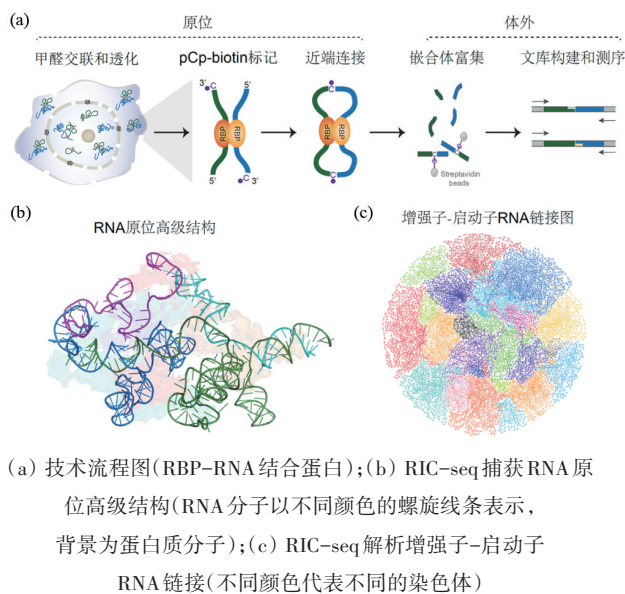


图14 RIC-seq技术全景式解析RNA高级结构和作用靶标 (图片来源:薛愿超研究组)

## 2.5 实现尺寸最大、晶面指数最全单晶铜箔库的可控制备

高指数晶面的单晶铜被认为是用来外延生长具有各异对称性的二维单晶材料的理想衬底, 制备具有多种对称性结构的大尺寸单晶铜箔具有重大意义。然而, 传统的退火方法只能形成表面能最低的晶面即低指数的单晶Cu(111), 大尺寸、多指数晶面单晶铜的可控制备极具挑战性<sup>[49]</sup>。

北京大学/松山湖材料实验室刘开辉、王恩哥与南方科技大学俞大鹏联合团队在国际上首次实现了种类最全(30余种)、尺寸最大(A4纸尺寸)的高指数晶面单晶铜箔库制造。提出界面能驱动单

晶金属“变异和遗传”的退火生长机制, 通过特殊的预退火处理工艺, 在铜表面形成一层氧化物界面, 该界面的出现削弱了表面能驱动晶面生长的主导作用, 大幅提高了高指数晶面“核”的形成概率; 同时, 通过还原性气氛退火过程将动力学晶界消除, 可实现该高指数晶面“核”的异常长大, 从而制备出A4纸尺寸的高指数晶面单晶, 种类多达30余种(图15)。此外, 受生物学中“遗传”思想的启发, 将制得的单晶铜箔作为“种子基因”, 直接放置在多晶铜箔上, 成功实现了铜箔晶面指数的“克隆”, 从而得到了具备特定晶面指数的大尺寸单晶铜箔库的可控制备。该铜箔库将为高功率电力、高频电子、选择性催化、量子材料外延等提供关键功能材料。相关研究成果于2020年5月28日发表在《Nature》<sup>[50]</sup>上。

## 2.6 提出基于忆阻器阵列的新型脑机接口

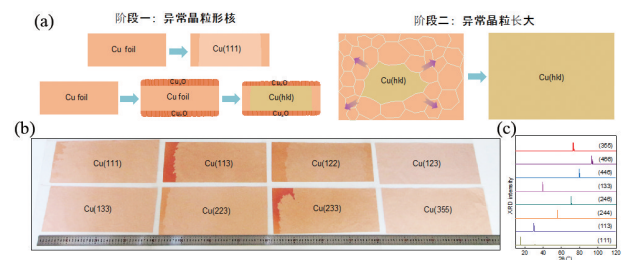


图15 单晶形核长大过程以及8种代表性单晶铜箔 (图片来源:《Nature》)

忆阻器是一种新型信息处理器件, 其工作机制与人脑中的神经突触、神经元等具有一定的相似性, 基于忆阻器的神经形态计算可以突破传统计算架构, 在实现高并行度的同时显著降低功耗<sup>[51]</sup>。

清华大学钱鹤、吴华强团队联合洪波团队提出了基于忆阻器阵列的新型脑机接口, 实验制备了具有模拟阻变特性的忆阻器阵列, 并构建了基于忆阻器的神经信号分析系统(图16)。该系统包含用于神经信号高效预处理的忆阻器滤波器组和用于智能分类识别的忆阻器神经网络。为了验证该系统的可行性, 研究团队演示了癫痫相关的神经信号滤波与分类, 忆阻器系统最终实现了93.46%的大脑癫痫状态识别准确率, 相较于传统CMOS硬件, 具有400倍以上的功耗优势。相关研究成果于2020年8月25日在线发表在《Nature Communications》<sup>[52]</sup>上。

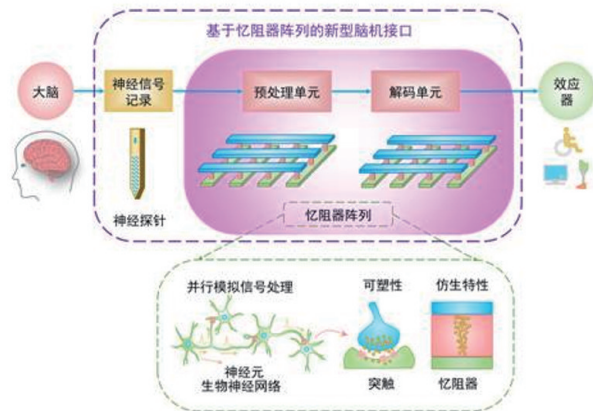


图16 基于忆阻器阵列神经信号分析系统的新型脑机接口(图片来源:清华大学新闻网)

## 2.7 成功研制全球神经元规模最大的类脑计算机

类脑计算具有于算一体、事件驱动、高度并行等特点,是国际学术界与工业界的研究焦点,更是重要的科技战略,已被看作解决人工智能等计算难题的重要路径之一。

9月1日,浙江大学联合之江实验室共同研制成功的中国首台基于自主知识产权类脑芯片的类脑计算机(Darwin Mouse)发布(图17),这也是目前国际上神经元规模最大的类脑计算机。该类脑计算机包含792颗浙江大学研制的达尔文2代类脑芯片,支持1.2亿脉冲神经元、近千亿神经突触,与小鼠大脑神经元数量规模相当,典型运行功耗只需要



图17 类脑计算机(图片来源:浙江大学新闻网)

350~500 W。同时,团队还研制了专门面向类脑计算机的操作系统——达尔文类脑操作系统(DarwinOS),实现对类脑计算机硬件资源的有效管理与调度,支撑类脑计算机的运行与应用。类脑计算机的研究成功将为神经科学家提供更快更大规模的仿真工具,提供探索大脑工作机理的新实验手段<sup>[53-54]</sup>。

## 2.8 成功设计纳米“人造分子”简易制备方法

分子可以表现出单个原子所不具备的性质,与此相似,由无机纳米粒子精准组装形成的、具有精确空间构型的粒子团簇(又称为胶体分子)能够表现出单个纳米粒子所不具备的更为丰富特殊的性能。原子可以通过轨道杂化原理形成结构精确的分子;对无机纳米粒子而言,其定向组装的策略则尚需探索<sup>[55]</sup>。

复旦大学聂志鸿团队创新性地提出利用反应性嵌段聚合物诱导纳米粒子间定向键合形成纳米尺度胶体分子的自组装策略(图18)。将分别带有羧基(-COOH)和叔胺(-NMe<sub>2</sub>)官能团的嵌段聚合物均匀接枝在金纳米粒子表面,作为具有各向同性的A、B两种纳米“原子”。当两种纳米“原子”相互靠近,不同聚合物配体之间的酸碱中和反应会诱导聚合物链构象和电荷排布发生变化,自发生成各向异性。A-B成键方向的空间斥力和重新排布之后的电荷库仑斥力,决定了成键方向的对称性。粒子间的定向成键也展现了其自受限的特点,因而可以得到较高产率的目标胶体分子。生成的胶体分子种类AB<sub>x</sub>也主要由A、B粒子表面分别所携带的

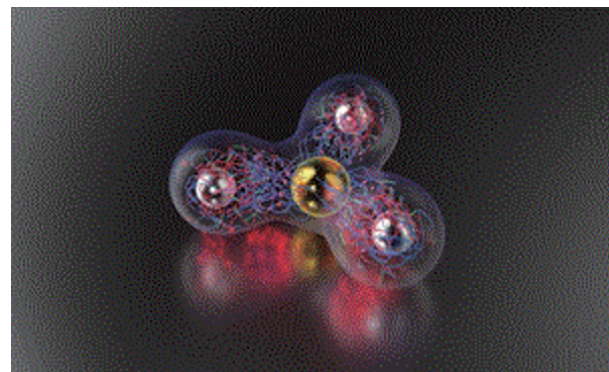


图18 类BF<sub>3</sub>分子构型的AB<sub>3</sub>胶体分子示意(图片来源:复旦大学新闻网)

酸碱基团比值ZA/B所决定。此外,这类胶体分子的双亲性可通过嵌段聚合物外端惰性链段进行调节,因此,可以进一步组装得到更为复杂结构。该研究成功突破了现有纳米粒子精准组装调控困难、产率低下的技术瓶颈,为制备新型复合材料提供新思路。相关研究成果于2020年9月11日发表在《Science》<sup>[56]</sup>上。

## 2.9 发现空位诱导的二维材料薄膜超快离子传输

离子传输对能量存储和转换应用至关重要,如质子和锂离子传导膜分别是燃料电池和锂离子电池的关键材料。常用的商业质子传导膜Nafion膜在高温(>80℃)和/或低湿条件下,由于含水量的降低,其性能会发生严重衰减<sup>[57]</sup>。

中国科学院金属研究所任文才、成会明研究团队,制备出一类由二维过渡金属磷硫化物(MPX<sub>3</sub>, M=Cd、Mn、Fe、Co、Ni、Zn、Cr等, X=S或Se)纳米片组装而成的膜,发现过渡金属空位使该类薄膜具有超快的离子传输性能(图19)。Cd<sub>0.85</sub>PS<sub>3</sub>Li<sub>0.15</sub>H<sub>0.15</sub>薄膜为质子传输占主导的离子导体,在90℃和98%相对湿度条件下的传导率高达0.95 S/cm,是目前已报道的水相质子传输材料的性能最高值,且在低温、低湿条件下仍保持很高的质子传导率。研究还发现Cd<sub>0.85</sub>PS<sub>3</sub>Li<sub>0.3</sub>和Mn<sub>0.77</sub>PS<sub>3</sub>Li<sub>0.46</sub>薄膜具有超快的锂离子传导特性,证明了空位诱导离子快速传输的普适性。空位诱导离子快速传输为设计与开发高性能离子传导膜提供了一种新思路,石墨烯发现者、2010年诺贝尔物理学奖获得者Konstantin Novosel-

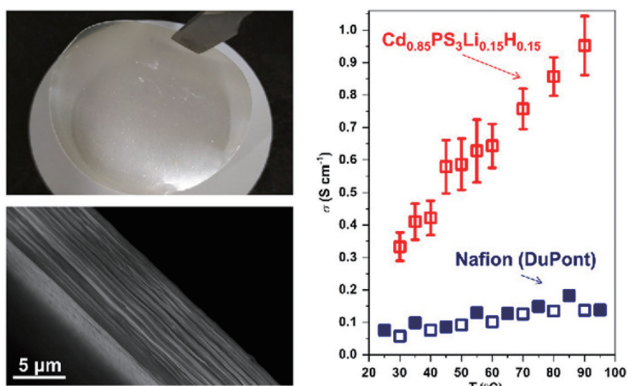


图19 98%相对湿度下Cd<sub>0.85</sub>PS<sub>3</sub>Li<sub>0.15</sub>H<sub>0.15</sub>纳米片组装膜及其离子传输性能(图片来源:《Science》)

ov评价其为“二维材料发展的一个里程碑”。相关研究成果于2020年10月30日发表在《Science》<sup>[58]</sup>上。

## 2.10 中国量子计算原型机“九章”问世

2019年9月,美国谷歌公司推出53个量子比特的计算机“悬铃木”,对一个数学算法的计算只需200 s,而当时世界最快的超级计算机“顶峰”需2 d,实现了“量子优越性”<sup>[59]</sup>。

中国科学技术大学宣布潘建伟团队与中国科学院上海微系统研究所、国家并行计算机工程技术研究中心合作成功构建76个光子的量子计算原型机“九章”,这一突破使中国成为全球第二个实现“量子优越性”的国家。实验显示,当求解5000万个样本的高斯玻色取样时,“九章”需200 s,而目前世界最快的超级计算机“富岳”需6亿年,等效来看,“九章”的计算速度比谷歌的“悬铃木”快100亿倍,并弥补了“悬铃木”依赖样本数量的技术漏洞(图20)。该突破历经20年科研攻关,攻克了高品质光子源、高精度锁相、规模化干涉三大技术难题,牢固确立了中国在量子计算研究中的第一方阵地位,为未来实现可解决具有重大实用价值问题的规模化量子模拟机奠定了技术基础。相关研究成果于2020年12月4日在线发表在《Science》<sup>[60]</sup>上。

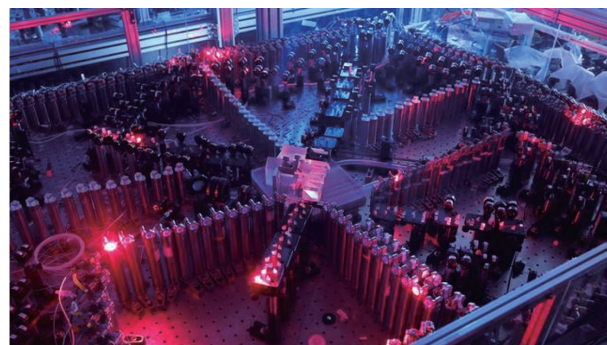


图20 光量子干涉实物(图片来源:新华网)

## 3 2020年中国重大工程进展(10项)

### 3.1 “中国天眼”验收开放 取得一系列重大成果

1月11日,中国500米口径球面射电望远镜(FAST)通过国家验收,正式开放运行(图21)<sup>[61]</sup>。FAST近1年观测服务超过5200个观测机时,取得

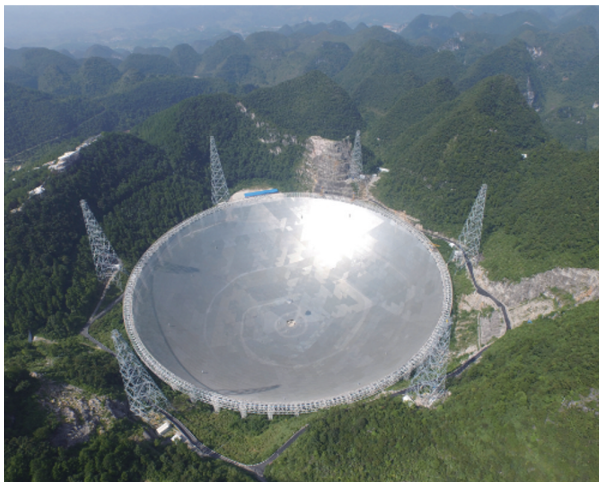


图21 500米口径球面射电望远镜(FAST)  
(图片来源:中国科学院)

一系列重大科学成果。

FAST由中国科学院国家天文台自主设计建造,2016年9月25日在贵州省黔南州平塘县大窝凼竣工落成,是当今世界上口径最大、灵敏度最高的天文射电望远镜,被形象地称为“中国天眼”,是具有中国自主知识产权的大科学装置。

河外星系的中性氢观测是FAST的重要科学目标之一。3月27日,FAST在武仙座球状星团中发现一个脉冲双星系统,并通过脉冲星计时观测证认该双星系统由一颗脉冲星与一颗白矮星组成,这是FAST发现的第一个脉冲双星系统,这是FAST首次发布脉冲星计时观测研究成果<sup>[62]</sup>。4月22日,FAST在球状星团M92中发现距离地球约2.6万光年的典型“红背蜘蛛”脉冲双星系统M92A,这是在M92中首次探测到的脉冲星<sup>[63]</sup>。5月8日,FAST首次发现距离地球约85亿光年的快速射电暴<sup>[64]</sup>。7月2日,FAST的19波束接收机对一批低红移恒星形成星系样本中的4个星系进行先导观测,成功探测到3个星系的中性氢发射线<sup>[65]</sup>。

FAST已经启动了脉冲星测时阵列、漂移扫描多科学目标巡天等5个重大和优先项目。未来3~5年,FAST的高灵敏度将有可能在低频引力波探测、快速射电暴起源、星际分子等前沿方向取得突破<sup>[66]</sup>。

### 3.2 无人潜水器和载人潜水器取得新突破

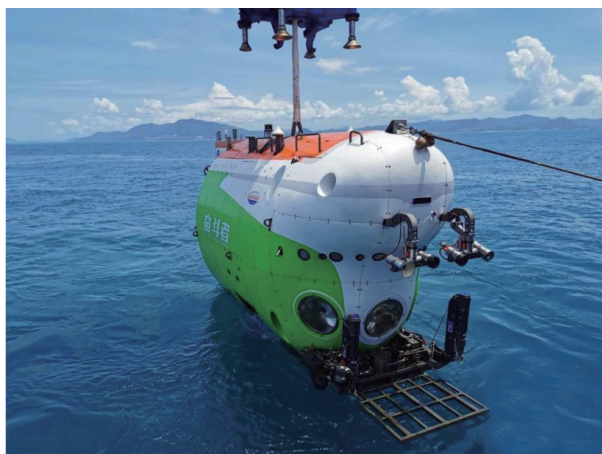
5月14日,“海斗一号”全海深自主遥控潜水器

(图22(a))在马里亚纳海沟完成万米海试,最大下潜深度达10907 m,刷新中国潜水器最大下潜深度纪录,填补了中国万米作业型无人潜水器的空白<sup>[67]</sup>。11月10日,“奋斗者”号载人潜水器(图22(b))在马里亚纳海沟成功坐底,坐底深度10909 m,中国在大深度载人深潜领域达到世界领先水平<sup>[68]</sup>。



(a)“海斗一号”布放

(图片来源:中国科学院沈阳自动化研究所)



(b)“奋斗者”号载人潜水器(图片来源:新华网)

图22 中国自主研发的无人潜水器和载人潜水器

“海斗一号”由中国科学院沈阳自动化研究所主持研制,自2016年7月启动项目,于2019年完成实验室总装联调、水池试验、千岛湖湖试和南海4500 m阶段性海试。2020年4月23日“海斗一号”搭乘“探索一号”科考船奔赴马里亚纳海沟,在40多天里,实现了4次万米下潜。借助具有完全自主知识产权的全海深高精度声学定位技术和机载多传感器信息融合方法,完成了对“挑战者深渊”最深区域的

巡航探测与高精度深度测量,在高精度深度探测、机械手作业、声学探测与定位、高清视频传输等方面创造了中国潜水器领域多项第一,为深入研究探索深渊地质环境特点和生物演化机制提供了宝贵素材<sup>[67]</sup>。

“奋斗者”号全海深载人潜水器于2016年立项启动,由中国船舶集团有限公司第七〇二研究所牵头总体设计和集成建造、中国科学院深海科学与工程研究所等多家机构联合研发。2020年10月10日,“奋斗者”号赴马里亚纳海沟开展万米海试,成功完成13次下潜,其中8次突破万米。11月10日,“奋斗者”号创造了10909 m的中国载人深潜新纪录,标志着中国在大深度载人深潜领域达到世界领先水平<sup>[68]</sup>。

### 3.3 “北斗三号”最后一颗全球组网卫星发射成功

6月23日,中国在西昌卫星发射中心用长征三号乙运载火箭,成功发射北斗系统第55颗导航卫星暨“北斗三号”最后一颗全球组网卫星(图23)。至此,“北斗三号”全球卫星导航系统星座部署全面完成,中国北斗朝着完整服务全球的目标迈出关键一步<sup>[69]</sup>。



图23 “北斗三号”全球卫星导航系统最后一颗组网卫星在西昌卫星发射中心点火升空  
(图片来源:新华社)

“北斗三号”系统于2009年11月启动建设,由24颗中圆地球轨道卫星、3颗地球静止轨道卫星和3颗倾斜地球同步轨道卫星,共30颗卫星组成。10余年来,工程建设历经关键技术攻关、试验卫星工程、最简系统、基本系统、完整系统5个阶段,400多家单位、30余万科技人员集智攻关,攻克星间链

路、高精度原子钟等160余项关键核心技术,突破500余种器部件国产化研制,实现“北斗三号”卫星核心器部件国产化率100%<sup>[70]</sup>。

此次发射的北斗导航卫星和配套运载火箭分别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抓总研制,中国科学院微小卫星创新研究院等多家科研院所全方位参与了研制建设。这是长征系列运载火箭的第336次飞行<sup>[69]</sup>。7月31日,“北斗三号”全球卫星导航系统正式开通。中国自主建设、独立运行的全球卫星导航系统已全面建成,这意味着,中国北斗正式走出中国,走向世界,将可以为全球用户提供基本导航(定位、测速、授时)、全球短报文通信、国际搜救等服务<sup>[70]</sup>。

### 3.4 中国首个火星探测器“天问一号”成功发射

7月23日,中国在文昌航天发射场用长征五号遥四运载火箭成功发射首次火星探测任务“天问一号”探测器(图24),火箭成功将探测器送入预定轨道,开启火星探测之旅,迈出了中国行星探测第一步<sup>[71]</sup>。



图24 “天问一号”火星探测器发射升空  
(图片来源:人民网)

首次火星探测任务于2016年1月经党中央、国务院批准立项,由国家航天局组织实施,具体由工程总体和探测器、运载火箭、发射场、测控、地面应用等五大系统组成。此次任务的科学目标是实现对火星的表面形貌、土壤特性、物质成分、水冰、大气等方面的科学探测。“天问一号”探测器将由长征五号运载火箭送入地火转移轨道,按照计划,飞行

约7个月后抵达火星。在经历火星捕获、火星停泊后,着陆巡视器将与环绕器分离,进入火星大气。着陆巡视器成功着陆后,火星车驶离着陆平台,搭载的科学载荷开机,开始火星表面巡视探测<sup>[71]</sup>。

此次火星探测是中国行星探测阶段的首次任务,也是中国深空探测领域全新的里程碑,有望一次实现“环绕、着陆、巡视”3个目标。这是其他国家第一次实施火星探测从未有过的,面临的挑战也是前所未有的<sup>[71]</sup>。

### 3.5 中国最大直径盾构机下线

9月27日,由中国铁建重工集团、中铁十四局集团联合研制的16米级超大直径盾构机“京华号”(图25)在中国铁建重工集团长沙第一产业园下线,这是中国迄今研制的最大直径盾构机<sup>[72]</sup>。

盾构机的技术水平是衡量一个国家地下施工装备制造水平的重要标志。自2009年开始,盾构机国产化和产业化工作加速推进<sup>[73]</sup>。

5月8日,中国中铁自主研发的国内最大直径(9.83 m)敞开式硬岩掘进机“云岭号”下线,刷新了国产硬岩掘进机直径纪录,该设备将用于云南省滇中引水工程。5月10日,世界首台矿用小转弯全断面硬岩掘进机在中铁工程装备集团有限公司郑州基地正式下线,设备将用于贵州省四季春煤矿,进一步提升旗下煤矿瓦斯抽采巷道的开拓效率与施工安全性<sup>[74]</sup>。9月27日下线的“京华号”盾构机整机长150 m,总质量4300 t,最大开挖直径达16.07 m,出厂后将参与北京东六环改造工程建设<sup>[72]</sup>。9月29日,中国中铁自主研发的第1000台盾构机在郑州下线。这台直径8.64 m的土压平衡盾构机将用于广东珠江三角洲水资源配置工程<sup>[73]</sup>。10月15日,由隧道股份上海隧道工程有限公司自主研发制造的超大直径盾构机“骐跃”在上海浦东调试下线。“骐跃”整机总重约为3200 t,总长约为99 m,其中主机长度约为16 m,刀盘切削直径达14.05 m<sup>[75]</sup>。

目前中国国产盾构机年产约500台套,按照平均每台套6000万元测算,每年可实现产值约300亿元、净利润约50亿元。未来中国根据不同需求还将继续加强超级掘进机、超大直径盾构机等新产品的研发,使盾构机真正从“中国制造”走向“中国创造”<sup>[73]</sup>。



图25 “京华号”盾构机(图片来源:新华网)

### 3.6 “国和一号”和“华龙一号”两大三代核电技术取得新突破

9月28日,中国自主设计的最大功率的核电机组“国和一号”完成研发<sup>[76]</sup>。10月21日,“华龙一号”(图26)全球首堆——中核集团福清核电5号机组首次达到临界状态,标志着机组正式进入带功率运行状态,向建成投产迈出了重要一步<sup>[77]</sup>。“国和一号”和“华龙一号”均为中国具有完全自主知识产权的三代核电技术,这两大核电技术的新突破,标志着中国在三代核电技术领域跻身世界前列。



图26 “华龙一号”

(图片来源:“中国核能”微信公众号)

“国和一号”自2008年启动研发,是由国家电投集团依托国家大型先进压水堆核电站重大专项开发的、具有自主知识产权的大型先进核电型号。“国和一号”核电机组设计寿命达60年,发生严重事故的概率相比二代核电机组降低100倍。采用“非能动”安全设计理念,单机功率达到150万kW,单台机组年发电量可满足超过2200万居民的用电需求,每年可减少CO<sub>2</sub>等温室气体排放超过900万t,代表着当今世界三代核电技术的先进水平,是中国

核电技术研发和产业创新的最新成果<sup>[76]</sup>。

“华龙一号”由中国核工业集团公司和中国广核集团有限公司设计研发。设计寿命为60年,反应堆采用177堆芯设计,堆芯设计换料周期18个月,创新采用“能动和非能动”相结合安全系统及双层安全壳等技术,在安全性上满足国际最高安全标准要求。“华龙一号”全球首堆——福清核电5号机组于2015年5月开工建设,并于2020年9月顺利完成177组燃料组件装载,首堆所有核心设备均已实现国产,所有设备国产化率达88%,完全具备批量化建设能力。“华龙一号”是中国核工业核电技术设计、采购、安装、调试、运营能力的综合体现,对带动中国核电装备制造制造业高质量发展具有重要意义<sup>[77]</sup>。

### 3.7 中国最高参数“人造太阳”建成

12月4日,中国新一代可控核聚变研究装置“中国环流器二号M”(HL-2M)(图27)正式建成放电,标志中国正式跨入全球可控核聚变研究前列,HL-2M将进一步加快人类探索未来能源的步伐<sup>[78]</sup>。

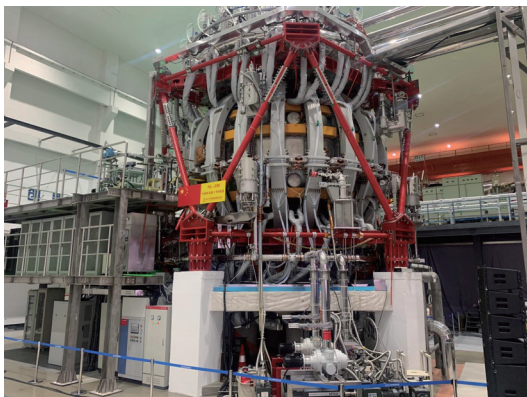


图27 “中国环流器二号M”装置

(图片来源:中国新闻网)

HL-2M于2009年由国家原子能机构批复立项,由中核集团核工业西南物理研究院自主设计建造。核聚变由氘、氚离子聚合成氦,聚合中损失的质量转化为超强能量,这和太阳发光发热原理相同,所以可控核聚变研究装置又被称为“人造太阳”。HL-2M是中国规模最大、参数最高的“人造太阳”。可控核聚变需要超高温、超高密度等条件,多采用先进托卡马克装置,通过超强磁场将1亿℃的等离子体约束在真空室内,达到反应条件。目前

全球在共同探索其实现方法,建造模拟实验平台。HL-2M是中国自主知识产权的模拟核聚变研究装置。该装置比上一代型号HL-2A更加紧凑,等离子体温度可达到1.5亿℃,远超HL-2A的5500万℃,等离子体体积是HL-2A的3倍,电流强度是HL-2A的6倍,可实现高密度、高比压、高自举电流运行,将大力提升中国堆芯级等离子体物理研究及相关关键技术研发水平<sup>[78]</sup>。

在中国核能发展实施“热堆-快堆-聚变堆”三步走战略中,将聚变能作为解决能源问题的最终一步。开发核聚变能不仅是解决中国能源战略需求的途径,对中国未来能源与国民经济的可持续发展具有重大战略意义<sup>[78]</sup>。

### 3.8 世界首座高速铁路悬索桥开通

12月11日,中国首座公铁两用悬索桥,也是世界上运行速度最快、运行荷载最大、跨度最大的公铁两用悬索桥——连镇铁路五峰山长江大桥(图28)建成通车,标志着中国在高速铁路上率先引入悬索桥桥型,中国大跨度桥梁建造技术达到了世界领先水平<sup>[79]</sup>。



图28 五峰长江大桥(图片来源:中铁大桥局集团)

五峰山长江大桥是连淮扬镇铁路的关键控制性工程,位于连镇高铁扬州东至大港南站间,由国铁集团和江苏省共同投资建设、中铁大桥院设计、中铁大桥局承建。大桥全长6409 m,其中主桥长1432 m,跨江主跨1092 m,采用单跨悬吊钢桁梁悬索结构,上层为高速公路双向8车道,设计时速100 km/h;下层为4线高速铁路,设计时速250 km/h<sup>[80]</sup>。

五峰山长江大桥的建设,创造了7项世界第一,即五峰山长江大桥是世界上首座高速铁路悬索

桥,中国首座铁路悬索桥;世界上公路铁路车道数最多、荷载重量最大的铁路悬索桥;世界上主缆直径最大的悬索桥,单根主缆设计内力 88500 t,主缆直径达 1.3 m,为目前世界上最大直径主缆;世界上陆地沉井基础面积最大的悬索桥;世界首座采用板桁结合新型加劲梁结构的公铁两用悬索桥;世界首次在铁路道砟桥面采用轧制不锈钢复合钢板;世界首次在正交异性板 U 肋与顶板之间采用全熔透焊接技术<sup>[79]</sup>。

五峰山长江大桥牵引着由此经过的连锁铁路,北接山东,南接皖浙赣,贯通江苏南北,成为长三角城际网和江苏省“四纵四横”铁路网的重要组成部分,是连接鲁、苏、皖、浙、赣五省的铁路纵向大通道<sup>[80]</sup>。

### 3.9 “嫦娥五号”完成中国首次地外天体采样

12月17日,“嫦娥五号”返回器在内蒙古四子王旗预定区域成功着陆(图29),带回月球风暴洋区域的钻取和表取样品,成功完成中国首次地外天体采样返回任务,使中国成为世界上第二个月球无人自主采样返回的国家,为中国探月工程重大科技专项“绕、落、回”三步走发展战略画上圆满句号<sup>[81]</sup>。

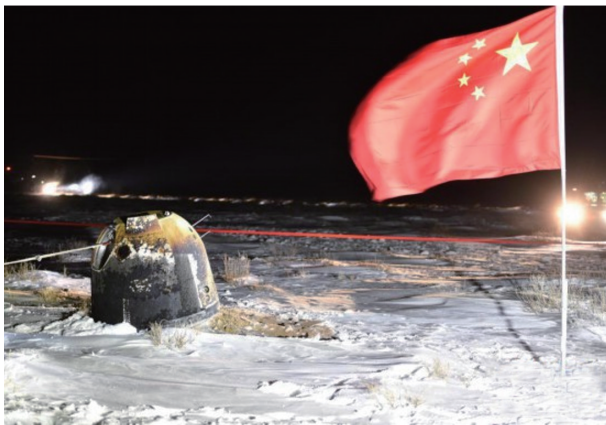


图29 “嫦娥五号”返回器在内蒙古四子王旗预定区域成功着陆(图片来源:新华网)

由中国航天科技集团有限公司研制的“嫦娥五号”探测器,是迄今为止中国研制的最为复杂的航天器系统之一,由轨道器、返回器、着陆器、上升器组成,包含15个分系统<sup>[82]</sup>。11月24日,中国在文昌航天发射场,用长征五号遥五运载火箭成功发射探

月工程“嫦娥五号”探测器<sup>[83]</sup>。作为中国探月工程三期的主任务,“嫦娥五号”由上升器、着陆器、轨道器、返回器4个部分“串联”组成,先后经历发射入轨、地月转移、近月制动、环月飞行、月面下降、月面采样、月面上升、交会对接、环月等待、月地转移和再入回收等飞行阶段,最终在内蒙古四子王旗着陆,重达 1731 g 的“嫦娥五号”样品移交中国科学院,将在位于国家天文台的“月球样品实验室”中存储、处理和分析,正式开启月球样品与科学数据的应用和研究<sup>[81]</sup>。

“嫦娥五号”实现了中国开展航天活动以来的4个“首次”:首次在月面自动采样;首次从月面起飞;首次在38万 km 外的月球轨道上进行无人交会对接;首次带着月壤以接近第二宇宙速度返回地球。嫦娥五号任务作为中国复杂度最高、技术跨度最大的航天系统工程,对于中国提升航天技术水平、完善探月工程体系、开展月球科学研究、组织后续月球及星际探测任务,具有承前启后、里程碑式的重要意义<sup>[84]</sup>。

### 3.10 世界最强流深地核天体物理加速器成功出束

12月26日,由中核集团原子能院和中国科学院近代物理研究所自主研制的世界上束流强度最高深地实验设施——锦屏深地核天体物理加速器(图30)成功出束,束流强度达到 2 mA,综合性能达到国际同类装置先进水平<sup>[85]</sup>。

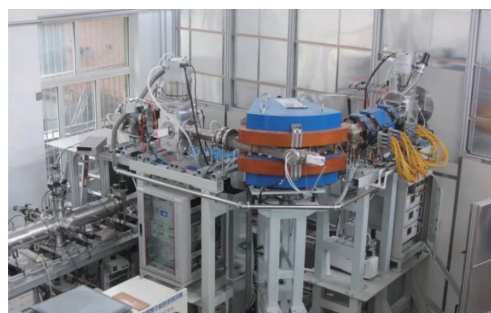


图30 强流高压加速器  
(图片来源:中国原子能科学研究院)

中国锦屏地下实验室是目前世界上最深的地下实验室,垂直岩石覆盖达 2400 m,可以将宇宙线通量降到地面水平的千万分之一至亿分之一;同时,洞内岩体本身的天然放射性也极低。这些为暗物质探测、核天体物理、中微子实验等重大基础性

前沿课题研究提供了得天独厚的良好环境。在深地实验室开展核反应的直接精确测量是国际公认的核天体物理前沿课题。锦屏深地核天体物理加速器项目旨在依托锦屏山地下实验室,向核天体物理研究领域最关键的“圣杯”反应发起冲击,为理解大质量恒星的演化和元素起源提供新的数据。这是国际上首次在深地实验室开展慢中子俘获过程关键中子源反应的直接测量,为研究宇宙重元素的产生提供可靠的中子源反应数据;同时,为理解银河系星际空间中大量铝-26的起源做出贡献,取得核天体物理领域的原创性研究成果。

这是中国核天体物理研究取得的重大突破,标志着中国完全掌握强流高压加速器制造技术,并将进一步推动中国锦屏山地下实验室成为面向世界开放的国家级基础研究平台<sup>[85]</sup>。

**致谢:**本次遴选中,“2020年重大科学进展”候选条目,是从科学技术部高技术研究发展中心主办,《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2020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] 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[J]. 科技导报, 2019, 37(3): 6-26.
- [18] 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.
- [19] Fan J, Shen S, Erwin D H, et al. A high-resolution summary of Cambrian to Early Triassic marine invertebrate biodiversity[J]. *Science*, 2020, 367(6475): 272-277.
- [20] Zhou P, Yang X L, Wang X G, et al. A pneumonia outbreak associated with a new coronavirus of probable bat origin[J]. *Nature*, 2020, 579(7798): 270-273.
- [21] Lan J, Ge J, Yu J, et al. Structure of the SARS-CoV-2 spike receptor-binding domain bound to the ACE2 receptor[J]. *Nature*, 2020, 581(7807): 215-220.
- [22] Gao Y, Yan L, Huang Y, et al. Structure of the RNA-dependent RNA polymerase from COVID-19 virus[J]. *Science*, 2020, 368(6492): 779-782.
- [23] Yan L, Zhang Y, Ge J, et al. Architecture of a SARS-CoV-2 mini replication and transcription complex[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 5874.
- [24] Wang Q, Wu J, Wang H, et al. Structural basis for RNA replication by the SARS-CoV-2 polymerase[J]. *Cell*, 2020, 182(2): 417-428.
- [25] Jin Z, Du X, Xu Y, et al. Structure of M<sup>pro</sup> from SARS-CoV-2 and discovery of its inhibitors[J]. *Nature*, 2020, 582: 289-293.
- [26] Gao Q, Bao L, Mao H, et al. Development of an inactivated vaccine candidate for SARS-CoV-2[J]. *Science*, 2020, 369(6499): 77-81.
- [27] Shi R, Shan C, Duan X, et al. A human neutralizing antibody targets the receptor-binding site of SARS-CoV-2[J]. *Nature*, 2020, 584(7819): 120-124.
- [28] Yao H, Song Y, Chen Y, et al. Molecular architecture of the SARS-CoV-2 virus[J]. *Cell*, 2020, 183(3): 730-738.
- [29] Gao Q, Bao L, Mao H, et al. Development of an inactivated vaccine candidate for SARS-CoV-2[J]. *Science*, 2020, 369(6499): 77-81.
- [30] Xia S, Duan K, Zhang Y, et al. Effect of an inactivated vaccine against SARS-CoV-2 on safety and immunogenicity outcomes: Interim analysis of 2 randomized clinical trials[J]. *The Journal of the American Medical Association*, 2020, 324(10): 951-960.
- [31] Wang H, Zhang Y, Huang B, et al. Development of an inactivated vaccine candidate, BBIBP-CorV, with potent

- protection against SARS-CoV-2[J]. *Cell*, 2020, 182(3): 713-721.
- [32] Zhang X, Lei B, Yuan Y, et al. Brain control of humoral immune responses amenable to behavioural modulation [J]. *Nature*, 2020, 581(7807): 204-208.
- [33] Xie Y R, Zhao H L, Wang Y F. Quantum interference in  $H+HD \rightarrow H_2+D$  between direct abstraction and roaming insertion pathways[J]. *Science*, 2020, 368(6492): 767-771.
- [34] Ma L, Zhang Z Y, Gan Z G, et al. Short-lived  $\alpha$ -emitting isotope  $^{222}\text{Np}$  and the stability of the  $N=126$  magic shell[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 125(3): 032502.
- [35] Guo X, Yu Q, Chen D, et al. 4-Vinylanisole is an aggregation pheromone in locusts[J]. *Nature*, 2020, 584(7822): 584-588.
- [36] Peng W, Wu Z, Song K, et al. Regulation of sleep homeostasis mediator adenosine by basal forebrain glutamatergic neurons[J]. *Science*, 2020, 369(6508): eabb0556.
- [37] He X, Wang K, Zhuang J, et al. Coherently forming a single molecule in an optical trap[J]. *Science*, 2020, 370(6514): 331-335.
- [38] Luo R, Wang B J, Men Y P, et al. Diverse polarization angle swings from a repeating fast radio burst source[J]. *Nature*, 2020, 586(7831): 693-696.
- [39] Lin L, Zhang C F, Wang P, et al. No pulsed radio emission during a bursting phase of a Galactic magnetar[J]. *Nature*, 2020, 587(7832): 63-65.
- [40] Li X Y, Jin Z H, Zhou X, et al. Constrained minimal-interface structures in polycrystalline copper with extremely fine grains[J]. *Science*, 2020, 370(6518): 831-836.
- [41] 《Nature》刊登南京大学物理学院团队研究成果: 质子辅助生长超平整石墨烯薄膜[EB/OL]. (2020-01-09). <https://news.nju.edu.cn/zhxw/20200109/i96198.html>.
- [42] Yuan G, Lin D, Wang Y, et al. Proton-assisted growth of ultra-flat graphene films[J]. *Nature*, 2020, 577: 204-208.
- [43] 张晔. 我自主研发成功商用毫米波相控阵芯片[N]. *科技日报*, 2020-01-20.
- [44] 紫金山实验室自主研发毫米波相控阵芯片入选“2020中国光学领域十大社会影响力事件”[EB/OL]. (2021-01-06). <https://www.pmlabs.com.cn/plus/view.php?aid=1052>.
- [45] 韩扬眉, 翟荣惠. 找到了! 小麦“癌症”克星是它[N]. *中国科学报*, 2020-04-10.
- [46] Wang H, Sun S, Ge W, et al. Horizontal gene transfer of Fhb7 from fungus underlies Fusarium head blight resistance in wheat[J]. *Science*, 2020, 368(6493): eaba5435.
- [47] 生物物理所等开发 RIC-seq 新技术系统解析 RNA 的原位高级结构及作用靶标[EB/OL]. (2020-05-07). [http://www.cas.cn/syky/202005/t20200507\\_4744857.shtml](http://www.cas.cn/syky/202005/t20200507_4744857.shtml).
- [48] Cai Z K, Cao C C, Ji L, et al. RIC-seq for global in situ profiling of RNA-RNA spatial interactions[J]. *Nature*, 2020, 582: 432-437.
- [49] 刘开辉课题组实现 30 余种高指数晶面、A4 纸尺寸单晶铜箔库制造突破[EB/OL]. (2020-05-28). <http://www.phy.pku.edu.cn/info/1031/5179.htm>.
- [50] Wu M, Zhang Z, Xu X, et al. Seeded growth of large single-crystal copper foils with high-index facets[J]. *Nature*, 2020, 581(7809): 406-410.
- [51] 微纳电子系与医学院合作提出基于忆阻器阵列的新型脑机接口, 构建脑电神经信号高效处理系统[EB/OL]. (2020-09-17). <https://news.tsinghua.edu.cn/info/1003/81915.htm>.
- [52] Liu Z, Tang J, Gao B, et al. Neural signal analysis with memristor arrays towards high-efficiency brain[J]. *Cature Communications*, 2020, 11(1): 4234.
- [53] 我国科学家成功研制全球神经元规模最大的类脑计算机[EB/OL]. (2020-09-01). <http://www.news.zju.edu.cn/2020/0901/c23225a2190595/page.htm>.
- [54] 中国科学家成功研制全球神经元规模最大的类脑计算机[EB/OL]. (2020-09-01). <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2020/9/444948.shtm?id=444948>.
- [55] Science 主刊: 聂志鸿教授团队报导纳米尺度胶体分子制备新方法[EB/OL]. (2020-09-18). <http://polymer.fudan.edu.cn/Data/View/3615>.
- [56] Yi C, Liu H, Zhang S, et al. Self-limiting directional nanoparticle bonding governed by reaction stoichiometry [J]. *Science*, 2020, 369(6509): 1369-1374.
- [57] 沈春蕾. 中科院金属所发现高性能离子传导膜[N]. *中国科学报*, 2020-10-31.
- [58] Qian X T, Chen L, Yin L C, et al. CdPS<sub>3</sub> nanosheets-based membrane with high proton conductivity enabled by Cd vacancies[J]. *Science*, 2020, 370(6516): 596-600.
- [59] 里程碑式突破! 中国量子计算原型机“九章”问世[EB/OL]. (2020-12-04). <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1685100982422185274&wfr=spider&for=pc>.
- [60] Zhong H S, Wang H, Deng Y H, et al. Quantum computational advantage using photons[J]. *Science*, 2020, 370(6523): 1460-1463.
- [61] 任芳言, 陈欢欢. 不可能变可能“天眼”精神让奇迹延续—记中国天眼 FAST 团队[EB/OL]. (2020-01-11). <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2020/1/434736.shtm>.
- [62] 孙自法. 中国“天眼”首次发现脉冲双星系统[EB/OL]. (2020-03-28). <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2020/3/437559.shtm>.
- [63] 孙自法. 中国“天眼”发现 2.6 万光年外“红背蜘蛛”脉冲双星系统[EB/OL]. (2020-04-22). <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2020/4/438763.shtm>.
- [64] 孙自法. 中国“天眼”首次发现新快速射电暴来自 85 亿年前宇宙深处[EB/OL]. (2020-05-08). <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2020/5/439479.shtm>.
- [65] 孙自法. 中国“天眼”首次探测到河外星系中性氢发射线 或助暗物质研究[EB/OL]. (2020-07-02). <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2020/7/442266.shtm>.
- [66] 何星辉. 中国天眼: 在射电天文领域领先世界 20 年[EB/OL]. (2020-10-27). <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2020/10/447565.shtm>.
- [67] 王莹, 包昱涵. 10907 米!“海斗一号”全海深潜水器成

- 功完成万米海试[EB/OL]. (2020-06-08). <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2020/6/441134.shtm>.
- [68] 习近平致信祝贺“奋斗者”号全海深载人潜水器成功完成万米海试并胜利返航[EB/OL]. (2020-11-28). [http://www.xinhuanet.com/politics/2020-11/28/c\\_1126797200.htm](http://www.xinhuanet.com/politics/2020-11/28/c_1126797200.htm).
- [69] 北斗三号最后一颗组网卫星“重启”发射成功[EB/OL]. (2020-06-24). [https://news.gmw.cn/2020-06/24/content\\_33935941.htm](https://news.gmw.cn/2020-06/24/content_33935941.htm).
- [70] 北斗三号卫星核心器部件国产化率 100%[EB/OL]. (2020-08-03). <http://www.chinanews.com/gn/2020/08-03/9254899.shtml>.
- [71] 我国首次火星探测任务“天问一号”探测器成功发射[N]. 人民日报, 2020-07-24(01).
- [72] 我国研制最大直径盾构机在长沙下线[EB/OL]. (2020-09-27). [http://www.xinhuanet.com/politics/2020-09/27/c\\_1126547975.htm](http://www.xinhuanet.com/politics/2020-09/27/c_1126547975.htm).
- [73] 乔地. 1000 台! 我国盾构机从 0 到世界第一[EB/OL]. (2020-09-29). [http://www.xinhuanet.com/energy/2020-09/30/c\\_1126560832.htm](http://www.xinhuanet.com/energy/2020-09/30/c_1126560832.htm).
- [74] 我国两大世界级盾构机成功下线[EB/OL]. (2020-05-11). [http://www.xinhuanet.com/energy/2020-05/11/c\\_1125967352.htm](http://www.xinhuanet.com/energy/2020-05/11/c_1125967352.htm).
- [75] 国产超大直径盾构机“骐跃”调试下线[EB/OL]. (2020-10-16). [http://sh.xinhuanet.com/2020-10/16/c\\_1394437-77\\_2.htm](http://sh.xinhuanet.com/2020-10/16/c_1394437-77_2.htm).
- [76] 中国三代核电技术“国和一号”研发完成[EB/OL]. (2020-09-28). <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2020/9/446278.shtm>.
- [77] 我国自主三代核电“华龙一号”全球首堆首次达到临界状态[EB/OL]. (2020-10-21). <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2020/10/447291.shtm>.
- [78] 新一代“人造太阳”装置“中国环流器二号 M”建成并实现首次放电[EB/OL]. (2020-12-04). [http://stdaily.com/index/kejixinwen/2020-12/04/content\\_1056672.shtml](http://stdaily.com/index/kejixinwen/2020-12/04/content_1056672.shtml).
- [79] 金凤. 7 项世界之最 世界首座高速铁路悬索桥即将开通[EB/OL]. (2020-12-10). <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2020/12/449998.shtm>.
- [80] 创多项世界之最的五峰山长江大桥, 开通! [EB/OL]. (2020-12-11). [https://mp.weixin.qq.com/s?src=11&time\\_stamp=1613800255&ver=2901&signature=R49y7wu2sh-N50vsKM4zGfwAeX5Nl0Zb5jMODk0wUoLccscJ3-jhG-W4WcHW12dLhoOH4GLhXBdKyZqHB4H81sgW0WC7-UviFC4Sv9kfwV0ajrU7z0EXY8TO7HVFBFCrs&new=1](https://mp.weixin.qq.com/s?src=11&time_stamp=1613800255&ver=2901&signature=R49y7wu2sh-N50vsKM4zGfwAeX5Nl0Zb5jMODk0wUoLccscJ3-jhG-W4WcHW12dLhoOH4GLhXBdKyZqHB4H81sgW0WC7-UviFC4Sv9kfwV0ajrU7z0EXY8TO7HVFBFCrs&new=1).
- [81] 张宇, 付毅飞. 中国探月, 六战六捷! [EB/OL]. (2020-12-17). <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2020/12/450-379.shtm>.
- [82] 庞丹, 付毅飞. 嫦娥五号出发, 力争实现中国航天史上 5 个“首次”[EB/OL]. (2020-11-25). <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2020/11/449115.shtm>.
- [83] 嫦娥五号探测器发射成功 开启我国首次地外天体采样返回之旅[EB/OL]. (2020-11-24). <https://news.sina.com.cn/c/2020-11-24/doc-iinezxs3359903.shtml>.
- [84] 庞之浩. 嫦娥五号发射在即 采样返回或将改写月球历史[EB/OL]. (2020-11-22). <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2020/11/448933.shtm>.
- [85] 地下 2400 米! 世界最强流深地核天体物理加速器成功出束[EB/OL]. (2020-12-26). <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2020/12/450974.shtm>.

## Top advances of science, technology and engineering from China in 2020

LIU Zhiyuan, ZHU Yehua, XU Lijiao, CHEN Guangren\*

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 2020 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 傅雪)