

2023年中国重大科学、技术和工程进展

王康友, 徐丽娇, 王志敏, 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》评选2023年中国重大科学、技术和工程进展30项。(1) 2023年中国重大科学进展10项:揭示现代类型海洋生态系统演变过程;发现主效耐碱基因可使谷物增产约20%;发现工业条件CO₂介导的有机氯析出;揭示灵长类动物演化之谜;精确测量迄今最亮伽马暴的高能辐射能谱;发现双壳类动物铰链内生物矿物硬组织的耐疲劳机制;探测到纳赫兹引力波存在的关键性证据;发现压力下液氮温区镍氧化物高温超导体;系列研究揭示人类衰老机制;破解生态修复的“梦境”之困。(2) 2023年中国重大技术进展10项:成功制备弹道二维硒化铟晶体管;研发出室温超快氢负离子导体;柔性单晶硅太阳能电池研制成功;开发丙烷脱氢耦合选择性氢燃烧制备丙烯新技术;实现用于通用DNA计算的可编程门阵列;研制出新款忆阻器存算一体芯片;实现无机材料的普适性3D打印;黏弹性无机玻璃制备成功;构建光量子计算原型机“九章三号”;培育全球首例“嵌合体”猴。(3) 2023年中国重大工程进展10项:世界首台“用于太阳磁场精确测量的中红外观测系统”调试安装;世界海拔最高、规模最大、灵敏度最强的宇宙线观测站“拉索”通过验收;中国首座深远海浮式风电平台“海油观澜号”投产;中国国家太空实验室正式运行;墨子巡天望远镜正式启用;全球规模最大综合孔径射电望远镜通过工艺测试;全球直径最大、单体最重、承载最高的整体式盾构机主轴承下线;国产首艘大型邮轮“爱达·魔都号”命名交付;世界最深、最大极深地下实验室投入科学运行;中国自主设计建造的首艘大洋钻探船“梦想”号试航。

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

收稿日期:2023-12-30;修回日期:2024-01-06

作者简介:王康友,研究员,研究方向为科技传播,电子信箱:wangkangyou@cast.org.cn;祝叶华(通信作者),副编审,研究方向为科技编辑学,电子信箱:zhuyehua@cast.org.cn

引用格式:王康友,徐丽娇,王志敏,等. 2023年中国重大科学、技术和工程进展[J]. 科技导报, 2024, 42(1): 7-29; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2024.01.001

《科技导报》自2004年第3期发表《2003年中国重大科学、技术与工程进展》以来,至今已连续20年遴选发布中国年度重大科学、技术和工程进展^[1-21]。为盘点2023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2023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24项重大科学进展、24项重大技术进展、24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,参考每项进展的得票情况,推选出2023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 2023年中国重大科学进展(10项)

1.1 揭示现代类型海洋生态系统演变过程

近5亿年来,地球上共发生过5次生物大灭绝事件,其中2.5亿年前二叠纪—三叠纪之交的生物大灭绝事件造成超过80%的海洋生物物种灭绝,

同时促使了海洋生态系统从古生代类型向现代类型转变。此前研究人员认为,完整的海洋生态系统直到中三叠世(大灭绝后约800万年)才出现,但是由于化石记录的不完备性,这一观点仍有争议。

中国地质大学(武汉)宋海军团队基于在贵阳市周边发现的特异埋藏化石库(贵阳生物群),揭示现代类型海洋生态系统的演变过程(图1)^[22]。该研究团队在贵阳生物群中发现了包括硬骨鱼、软骨鱼、牙形动物、海绵动物、双壳类、菊石类、腹足类、虾类、原蟹、放射虫、有孔虫等12个纲,总计达40种不同的生物。从生态上看,贵阳生物群的生态结构已比较完善,各个营养级均有代表,表明当时的食物网已经较为复杂。该研究证明现代类型的海洋生态系统在大灭绝之后约100万年的时间内就已经初具雏形,并且指示中生代海洋革命的时间可能也比以往的认识更为提前^[23]。贵阳生物群的发现为揭示现代类型海洋生态系统的崛起提供了关键证据,为进一步研究古特提斯洋在2.5亿年前后生物与环境的演变提供了宝贵的材料。

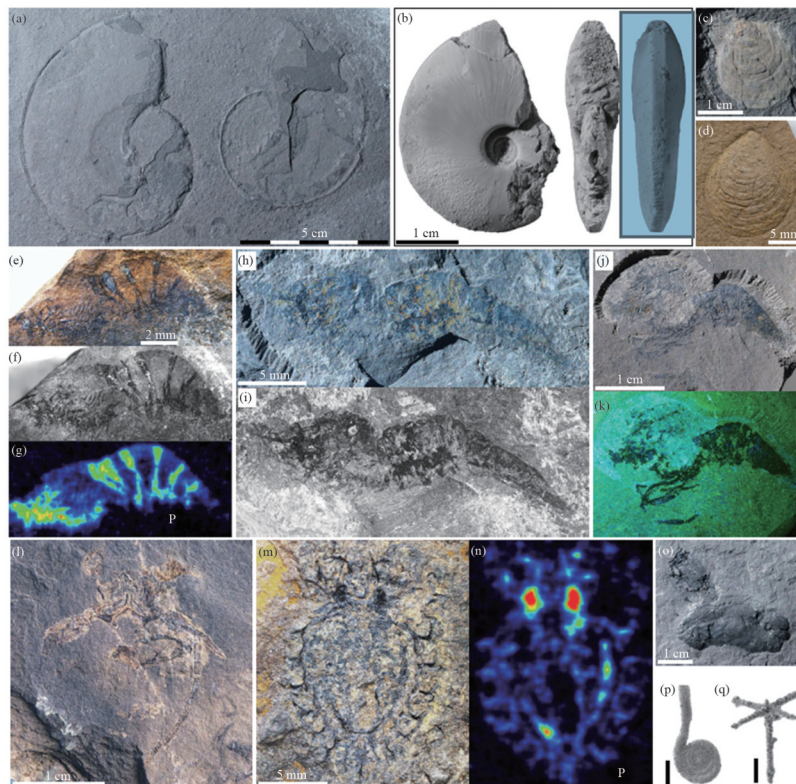


图1 贵阳生物群重要化石类别

(图片来源:《Science》)

1.2 发现主效耐碱基因可使谷物增产约20%

中国盐碱地面积达1亿 hm^2 ,占世界盐碱地总面积近1/10。土壤盐渍化不仅造成作物严重减产,而且破坏人类赖以生存的生态环境。识别或设计耐盐碱的作物是解决粮食危机的当务之急,但科学家对耐碱性植物还没有进行深入的研究。

中国科学院遗传与发育生物学研究所谢旗团队以耐盐碱作物高粱为材料,发现主效耐碱基因AT1,揭示作物耐碱的分子机制^[24]。该研究团队首先通过全基因组大数据关联分析耐盐碱差异大的高粱资源,发现1个主效耐碱基因AT1。同时,利用

哺乳动物细胞和作物系统,发现在高盐碱胁迫中,AT1可以通过调控水通道蛋白的磷酸化来调节逆境情况下水通道蛋白的活性,并将逆境导致产生的活性氧物质(ROS)泵到细胞外降低过氧化应激,揭示了高等生物高抗盐碱的分子机制。研究团队进一步对作物进行耐盐碱育种改良,在宁夏、吉林等地开展大田实验,证明AT1基因可使高粱、水稻、小麦、玉米和谷子等粮食作物在盐碱地上的产量提高约20%(图2)^[25]。该研究揭示了植物耐盐碱的重大科学问题,有望为支撑中国粮食安全国家战略中盐碱地综合利用研究发挥重要作用。

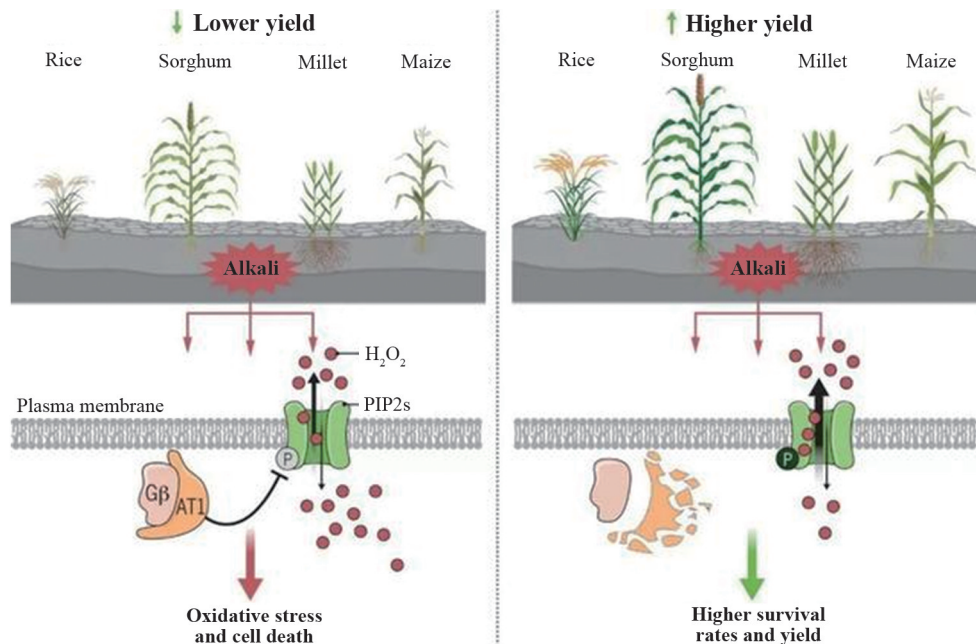


图2 AT1的遗传修饰增强植物碱性环境的耐受性

(图片来源:《Science》)

1.3 发现工业条件CO₂介导的有机氯析出

在化学工业中,产品生产所需氯气大部分通过氯碱电解制造,该过程的能量消耗较高,且导致大量CO₂排放。因此,对该工艺的能源效率进行改进具有重要的经济和环境意义。

清华大学王定胜和李亚栋团队报告了一种带有酰胺官能团的有机分子催化剂NCOOH,可以指数增强催化效率^[26]。该研究团队进行了电化学性

能测试,活化后的催化剂NCOOH表现出优异的析氯性能,有CO₂存在的情况下,在89 mV的过电位下实现了10 kA/m^2 的电流密度和99.6%的选择性(图3),可以实现媲美工业电极的活性,展现了在工业条件下相对可靠的稳定性与持续产出的能力^[27]。该反应策略可拓展运用到若干传统的金属有机电催化反应中,有望开创具有工业应用前景的“单分子电催化反应”新方向。

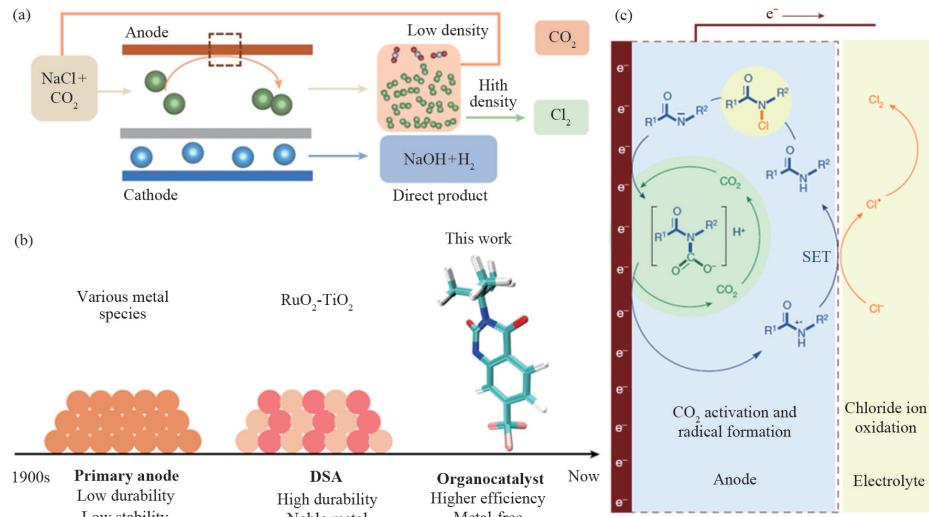


图3 氯气生产示意 (图片来源:《Nature》)

1.4 揭示灵长类动物演化之谜

非人灵长类是生物多样性保护的旗舰,是洞悉人类演化历史的关键,和连接基础研究与临床研究的桥梁。但目前仅有不到10%的非人灵长类动物的参考基因组得到了测序和解读,极大限制了对非人灵长类动物的基因组演化及分子生物学方面的深入探究。

中国科学院昆明动物研究所吴东东、浙江大学张国捷、云南大学于黎以及西北大学齐晓光、李保

国团队通过多学科交叉合作,解码灵长类基因天书,重建了灵长类生命之树,揭示不完全谱系分选广泛伴随灵长类演化历史,发现灵长类杂交成种新案例^[28]。研究人员通过对38个属、14个科、50个灵长类动物物种进行研究,得到了27个新的高质量基因组数据,推断出灵长类的最近共同祖先出现在大约6829万—6495万年前,在晚更新世时,大多数灵长类动物发生快速的群体数量锐减,暗示气候变迁会影响灵长类动物种群数量(图4)。

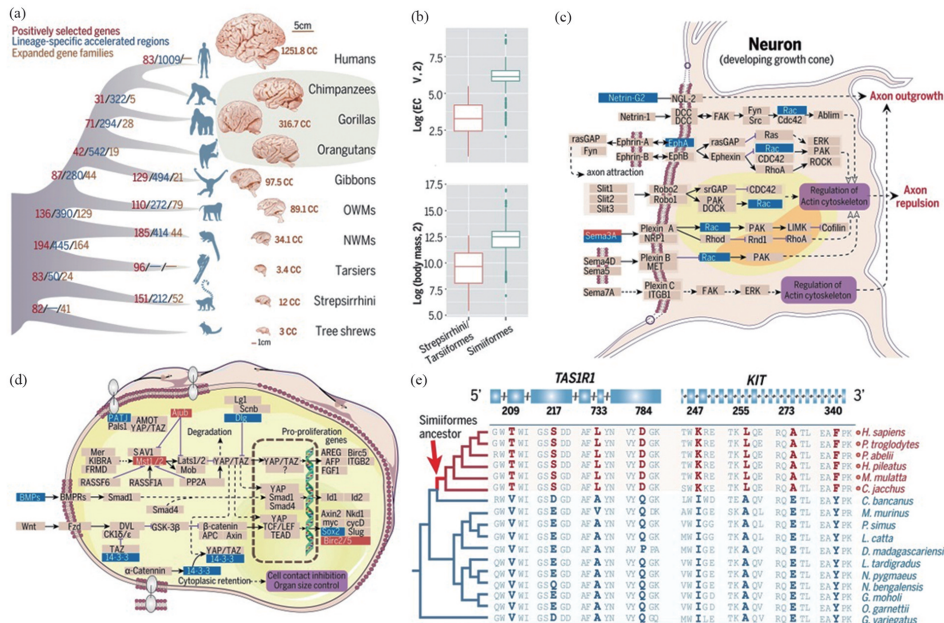


图4 大尺度灵长类高精度基因组数据集的构建和比较基因组学解析 (图片来源:《Science》)

同时,研究团队通过系列分析,厘清了灵长类动物的系统发育关系,解析了灵长类大脑、社会系统、免疫和行为等复杂性状的演化遗传基础,书写物种演化机制新认识^[29],对未来生物医学研究和灵长类动物遗传资源的开发、利用和保护研究具有十分重要的意义。

1.5 精确测量迄今最亮伽马暴的高能辐射能谱

伽马射线暴(简称“伽马暴”,GRB)是大质量恒星坍缩死亡瞬间产生的爆炸现象,能够在几秒钟内爆发出相当于太阳 100 亿年辐射总和的能量。伽马暴是天体物理以及基础物理研究领域备受青睐的极端物理研究对象,对伽马暴的观测与深入研究,有助于了解宇宙的演化历史^[30]。

2022 年 10 月 9 日,史上最亮伽马暴 GRB 221009A 爆发信号飞越 24 亿光年的时空抵达地球,高海拔宇宙线观测站(LHAASO,“拉索”)研究团队收集到 6 万多个能量大于 200 GeV 的高能伽马光子,在国际上首次展现了伽马暴万亿电子伏特以上高能光子爆发的完整过程(图 5),确定了其辐射起源于约 20 倍太阳质量的大质量恒星爆炸产生的伽马暴余辉辐射,并揭示了此伽马暴历史最亮的原因^[31-32],增进了人类对伽马暴辐射机制以及喷流结构等方面的理解,探测到来自伽马暴的最高能量光子及其能谱分布,挑战了伽马暴余辉的标准模型,

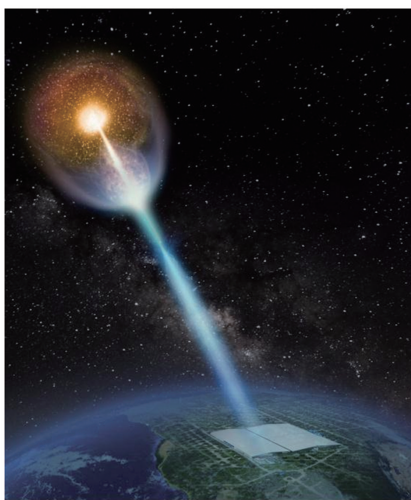


图5 “拉索”完整记录大质量恒星死亡瞬间万亿电子伏特伽马射线爆发全过程示意
(图片来源:人民网)

发现弥散在宇宙中的红外背景光明显弱于预期。该发现还打开了检验爱因斯坦相对论的适用范围、探索暗物质候选粒子——轴子等新物理研究的重要窗口。

1.6 发现双壳类动物铰链内生物矿物硬组织的耐疲劳机制

脆性材料作为结构或功能部件被广泛应用于航空航天、电子器件和组织工程等领域。通过模仿典型的生物矿物材料如珍珠母、骨骼等的结构设计可以提升脆性材料疲劳抗性,寻找并开发新的耐疲劳结构模型对未来可变形功能材料的设计制备具有重要的科学意义和应用价值。

中国科学技术大学、南方科技大学俞书宏和吴恒安研究团队成功揭示了双壳纲褶纹冠蚌铰链内的可变形生物矿物硬组织的耐疲劳机制^[33]。研究人员通过观察铰链外韧带(OL)和折扇形矿物硬组织(FFR)2个区域在双壳开合过程中的运动行为,结合有限元分析(FEA),明晰了不同区域所承担的力学角色。FFR具有跨尺度多级结构特征,宏观尺度上,FFR的扇形外形能使其在OL和外壳之间实现有效的载荷传递;微观尺度上,其具有微观形貌和晶体学取向上的一致性,意味着FFR能有效地为OL的拉伸提供支撑。这种微米尺度上的软硬复合微观结构在压缩、拉伸、剪切3种受力状态下能够进行协调变形,降低了FFR发生疲劳损伤的可能性(图6)^[34]。这项研究从宏观到微纳米尺度上揭示了FFR的跨尺度多级结构设计原则,揭示了含脆性基元的生物矿物材料在较大形变下的耐疲劳设计新机制,所提出的整合跨尺度结构特征与功能特性的设计策略,为未来耐疲劳结构材料的合理创制发展提供了新的见解。

1.7 探测到纳赫兹引力波存在的关键性证据

引力波信号极其微弱,却是探测宇宙中不发光物质的直接手段。纳赫兹引力波是引力波的一种,由于其频率极低、周期长达数年,波长可达数光年,探测十分具有挑战性。对频率低至纳赫兹的引力波进行探测,有助于天文学家理解宇宙结构的起源。

由中国科学院国家天文台李柯伽等科研人员组成的中国脉冲星测时阵列(CPTA)研究团队,探

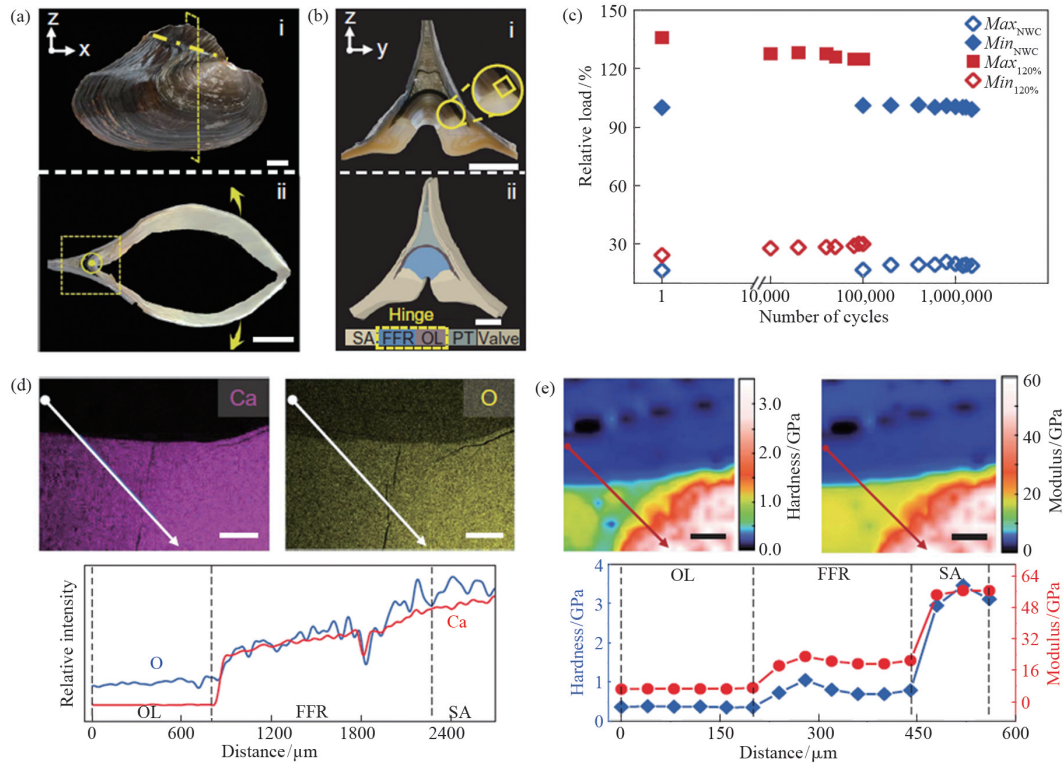


图6 典型生物和人工结构材料的耐疲劳设计机制

(图片来源:《Science》)

测到纳赫兹引力波存在的关键性证据^[35]。科研团队利用500米口径球面射电望远镜(FAST, 中国天眼), 对57颗毫秒脉冲星进行了长期系统性监测, 并将这些毫秒脉冲星组成了银河系尺度大小的引力波探测器来搜寻纳赫兹引力波(图7)。基于独立开发的软件, 科研人员对中国天眼收集的时间跨度达3年5个月的数据进行分析研究, 在4.6σ置信

度水平(误报率小于五十万分之一)上发现了具有纳赫兹引力波特征的四极相关信号的证据^[36]。这是纳赫兹引力波搜寻的一个重要突破, 表明中国纳赫兹引力波研究与国际同步达到领先水平, 不仅对星系演化和超大质量黑洞研究的广泛领域具有深远影响, 而且为引力波天体物理学打开了一个全新的窗口。

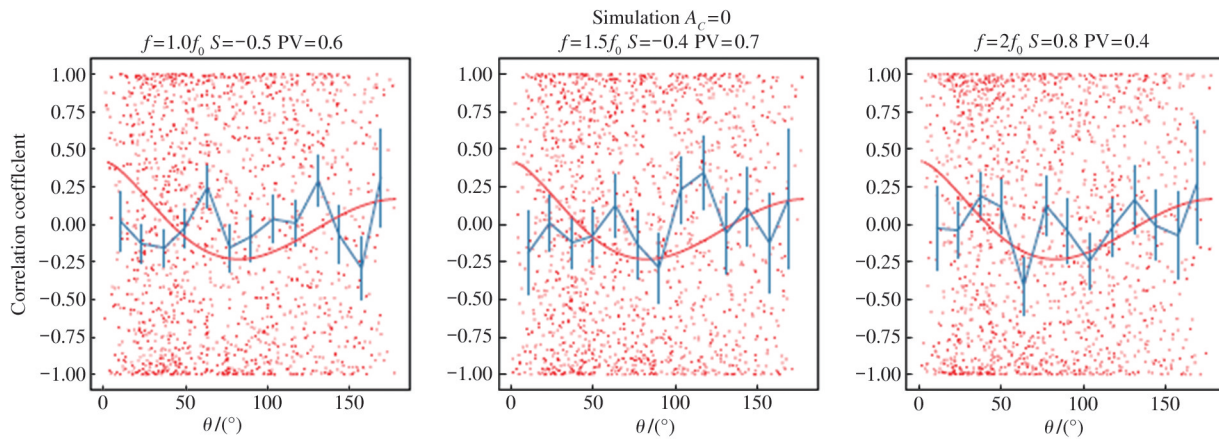


图7 脉冲星测量的相关数据

(图片来源:《Research in Astronomy and Astrophysics》)

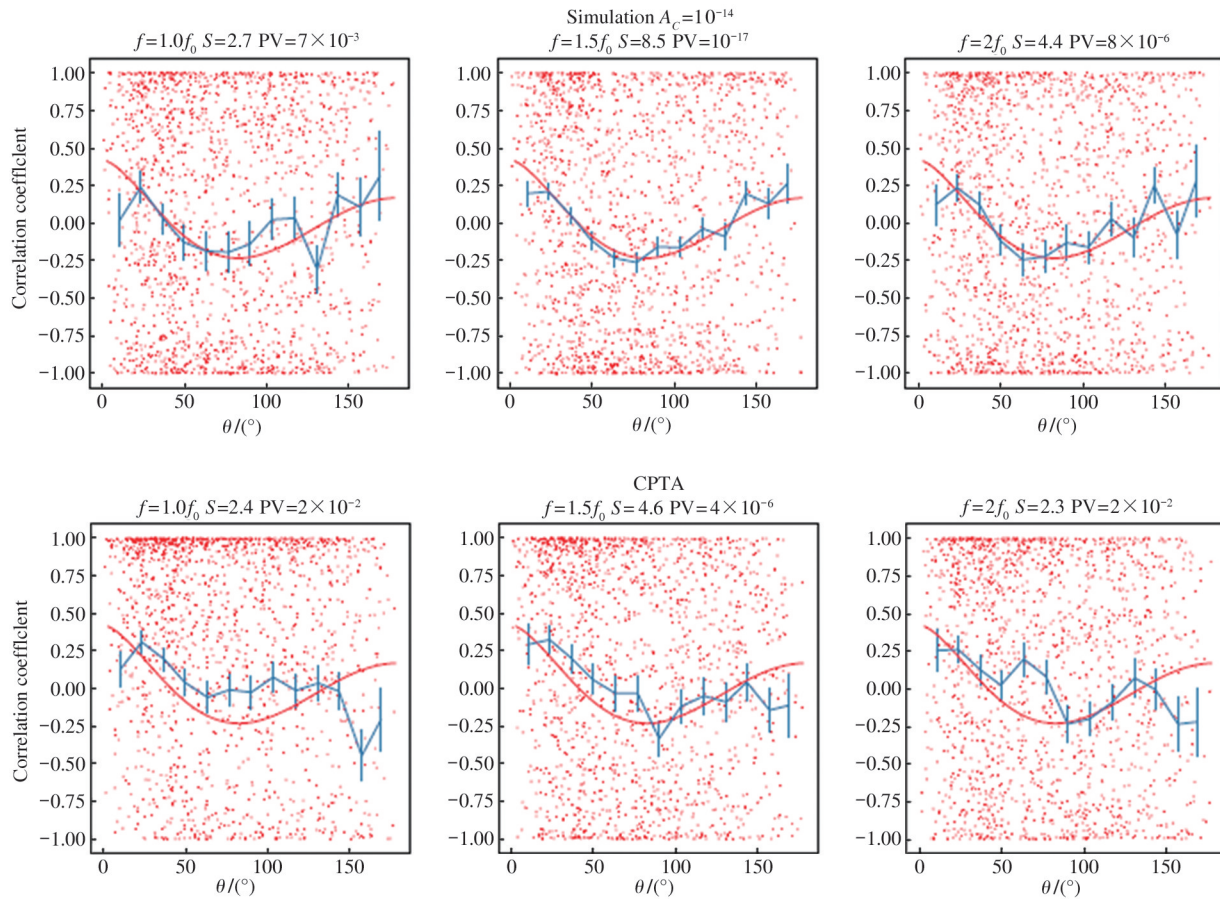


图7 脉冲星测量的相关数据(续)

(图片来源:《Research in Astronomy and Astrophysics》)

1.8 发现压力下液氮温区镍氧化物高温超导体

超导材料由于其独特性质在能源、医疗、信息、精密测量等领域有着十分重要的应用,但大多数简单金属或合金材料的超导转变温度都在 40 K 以下,限制了超导材料的广泛应用。

中山大学王猛研究团队与清华大学张广铭等在实验上发现一种在压力下液氮温区可实现超导的镍氧化物——镧镍氧 327 ($\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$)^[37]。研究者合成并测量了 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 单晶样品在百万大气压下的电输运情况,发现在 80 K 左右时电阻明显下降,看到显著的超导转变证据(图 8);在 25.2 GPa 压力下进行了磁化率测试,实验结果表明样品在 77 K 以下明显出现抗磁性。由此,在实验上证明了镧镍氧 327 单晶样品在超过 14 GPa 的压力下出现 80 K 的高温超导电性^[38-39]。这是中国科学家发现的全新高温超导体系,是人类目前发现的第二种液氮温

区非常规超导材料。液氮温区镍基氧化物超导体具有不同于铜氧高温超导体的晶体结构和电子态结构,此项发现将有助于破解高温超导的微观机理,并在液氮温区实现超导材料的广泛应用。

1.9 系列研究揭示人类衰老机制

衰老是人类慢性疾病的重要危险因素,细胞衰老是机体衰老及衰老相关疾病发生发展的主要驱动因素之一。在衰老过程中,细胞的表观遗传程序被打乱,多个处于沉默状态的“老化”信号调控失序,进而激活启动细胞内的一系列衰老程序。然而,占据人类基因组序列较大比例的内源性逆转录病毒(ERV)古病毒元件是否参与了衰老的程序化调控还未见报道。

中国科学院动物研究所刘光慧、曲静团队联合中国科学院北京基因组研究所张维绮团队,利用包括啮齿类、非人灵长类以及人类组织细胞在内的系

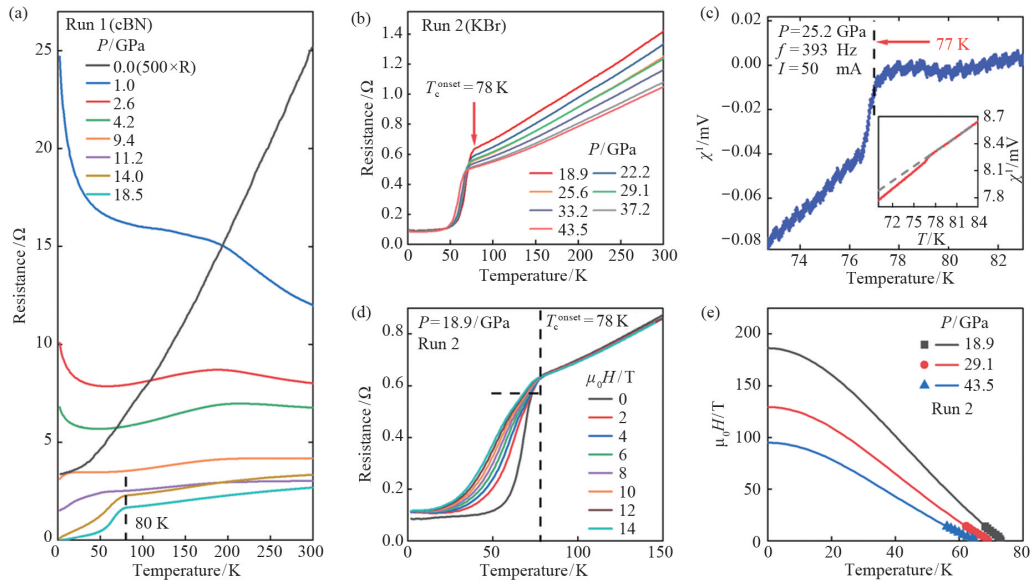


图8 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$ 单晶样品高压下的电阻、抗磁性及超导电临界磁场的拟合

(图片来源:《Nature》)

统性衰老研究体系和多学科交叉技术手段,发现衰老细胞中表观遗传紊乱导致基因组中ERV古病毒元件的转录激活并翻译成病毒蛋白,进而包装成为病毒颗粒^[40]。一方面,衰老细胞中ERV的反转录产物通过激活cGAS-STING天然免疫通路诱发细胞衰老和炎症;另一方面,衰老细胞释放的ERV病毒颗粒可通过旁分泌或体液介导的方式在器官、组织、细胞间有效传递并放大衰老信号,使得年轻细胞因受“感染”而老化(图9)。通过对ERV古病毒潜伏、复活、细胞间传递等不同生命周期环节的解析,研究人员开发出可有效阻断ERV转录、反转

录、病毒级联感染等多个环节的新型干预策略,进而延缓组织和机体的衰老进程。该研究首次系统性揭示了衰老诱导的内源性逆转录病毒复活可作为细胞、器官乃至机体衰老的驱动力和度量标志物,为衰老的程序化、级联放大和可干预性提供了新理论依据,为衰老的科学评估和预警以及年龄相关疾病的防治提供了重要线索和思路,对衰老转化医学领域具有潜在的应用价值,对于积极应对人口老龄化意义重大。

同时,研究团队还基于全基因组基因增强筛选手段,对全基因组范围内的2万多个蛋白编码基因进行了全面排查,首次系统鉴定了人间充质前体细胞的促更生因子合集。其中转录因子SOX5是逆转人类细胞衰老基因名录中的全新、强效更生因子,可在不改变细胞身份的前提下促进多种人类细胞年轻化^[41]。SOX5作为转录激活因子结合在衰老抑制基因HMGB2的增强子区域,激活HMGB2表达,进而启动了细胞年轻化进程。基于过表达SOX5的“基因疗法”可以延缓小鼠关节衰老,促进关节软骨年轻化并改善骨关节炎症状。该研究加深了科学界对衰老程序化理论的认识,揭示了独立于重编程因子的全新细胞更生因子合集,并建立了逆转细胞和组织衰老的新型策略。这些新的因子

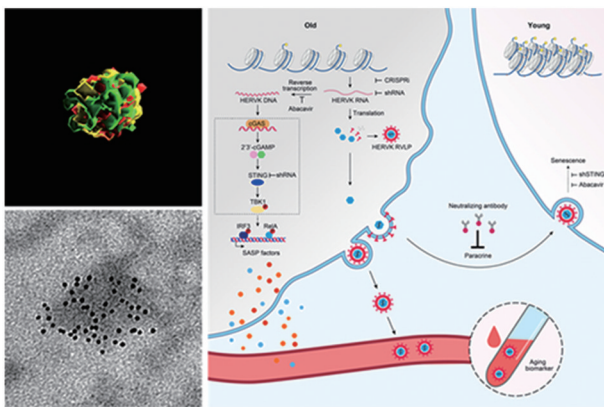


图9 内源性古病毒复活驱动衰老的机制及干预策略

(图片来源:《Cell》)

和技术体系为阐明驱动衰老的分子通路、建立人类器官衰老及相关退行性疾病的临床诊断及干预手段提供了新的可能。

进一步聚焦器官衰老,研究团队综合运用单细胞核转录组、神经组织学、神经电生理等技术手段,发现一类全新的在年老的灵长类动物脊髓中特异存在的CHIT1阳性小胶质细胞亚型,并将其命名为AIMoN-CPM (aging-induced motor neuron toxic CHIT1-positive microglia),这类细胞可以通过旁分泌CHIT1蛋白激活运动神经元中的SMAD信号,进而驱动运动神经元衰老,而补充维生素C可抑制脊髓运动神经元的衰老和退行^[42]。AIMoN-CPM的发现,为理解脊髓衰老及老年群体多种慢病共存开辟了新的科学疆域,以AIMoN-CPM和CHIT1为靶标,或可为人类脊髓衰老的干预,以及老年共病的积极防控带来新的希望。

1.10 破解生态修复的“梦境”之困

植被是地球上诸多生态系统的基础,维系着一系列关键生态系统服务功能。因此,修复植被通常是退化生态系统修复的主要方式,对促进生态文明建设和全球可持续发展具有重要意义。通常认为,停止、治理对环境的破坏,并在必要时开展种植后,

植被将会恢复;植被恢复后,植食动物、捕食动物也会按营养级自下而上逐步恢复(上行效应),即修复生态学中的“梦境假说”(the “Field of Dreams” hypothesis)。然而,许多基于上行效应的植被修复工程成效低、成本高或长期仍不能恢复至自然植被状态。如何破解这一困境,更为高效地推进植被修复是生态修复中亟需解决的关键问题。

复旦大学贺强团队通过构建和分析包含64个国家、2594组实验的全球数据库,系统解析了植食动物对植被恢复的影响(下行效应)、全球格局及管理措施(图10)^[43]。研究发现,虽然植食动物在自然区域对植被多样性起促进作用,但在修复区域则强烈抑制植被的多度和多样性。植食动物对植被的这种抑制作用在气温较高、降水较少的修复区域尤为强烈。通过暂时排除植食动物、重引入捕食动物等管理下行效应,可使植被恢复成效平均提高100%~400%。因此,管理下行效应是基于自然法则大幅提升全球许多大型植被恢复工程成效的重要潜在途径^[44-45]。该研究为何时、何地、如何管理下行效应以提高植被恢复的成效提供了新见解,为破解生态修复的“梦境”之困提供了新思路。

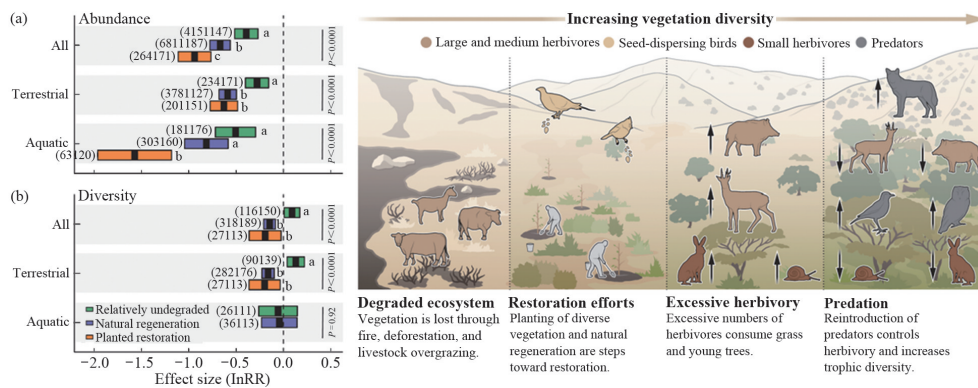


图10 植食动物对植被多度和多样性恢复的下行效应

(图片来源:《Science》)

2 2023年中国重大技术进展(10项)

2.1 成功制备弹道二维硒化铟晶体管

由于逐渐接近摩尔定律物理极限,硅基芯片的发展受到制约。原子级二维半导体材料由于具有超薄体、高迁移率等优势,引起科学界和工业界的

广泛兴趣,只是由于接触、栅介质和材料等技术瓶颈,至今已实现的二维晶体管性能尚不能与业界硅基晶体管相媲美。

北京大学彭练矛、邱晨光团队构筑了10 nm超短沟道弹道二维硒化铟晶体管(图11)^[46],创造性地

提出稀土元素钇诱导二维相变理论,首次使二维晶体管实际性能超过 Intel 硅基 Fin 晶体管和 International Roadmap for Devices and Systems (IRDS) 预测的硅极限,并将二维晶体管工作电压降至 0.5 V, 实现国际上迄今速度最快、能耗最低的二维半导体晶体管。该研究采用高载流子热速度(更小有效质量)的 3 层

硒化钨作沟道,实现了室温弹道率高达 83%, 远高于硅基晶体管的弹道率(小于 60%);解决了二维材料表面生长超薄氧化层的难题,制备出 2.6 nm 超薄双栅氧化钨,将器件跨导提升至 6 mS/μm, 超过现有二维器件 1 个数量级;开创了掺杂诱导二维相变技术,克服了二维器件领域金半接触的国际难题,将总电阻刷新至 124 Ω·μm。这项研究突破了

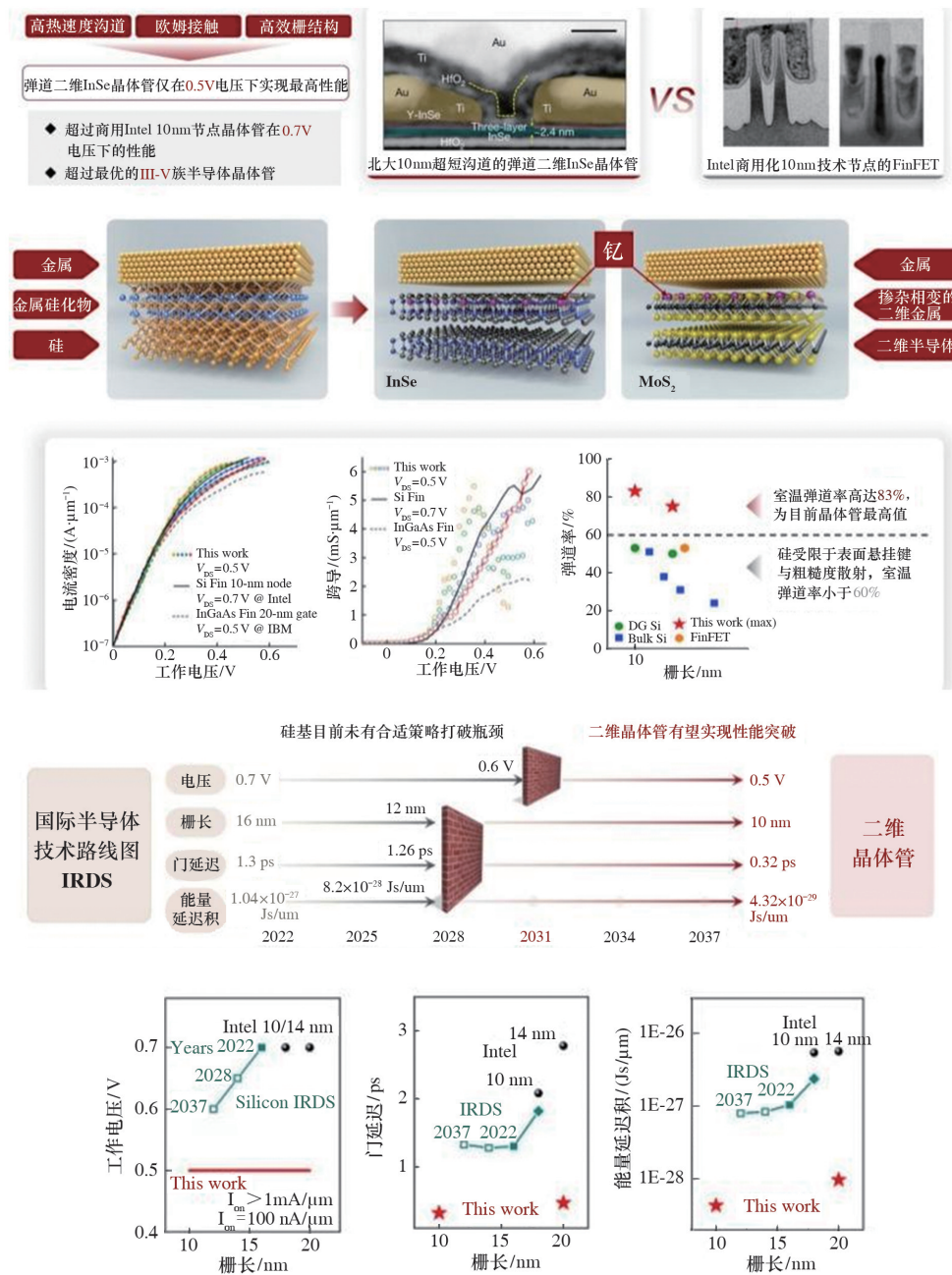


图 11 北京大学团队研制的弹道二维晶体管 (图片来源:《Nature》)

长期以来阻碍二维电子学发展的关键科学瓶颈,将二维晶体管的性能率先推进理论极限,首次在实验上证明二维器件性能和功耗优于业界先进节点硅基晶体管,有望在未来亚 1 nm 技术节点实现高速低功耗芯片。

2.2 研发出室温超快氢负离子导体

氢负离子(H^-)具有强还原性及高氧化还原电势等特点,是颇具潜力的氢载体和能量载体。氢负离子导体是在一定条件下具有优异氢负离子传导能力的材料,在氢负离子电池、燃料电池、电化学转化池、膜反应器、氢传感器等能源及电化学转化器件中具有广阔应用前景。

此前报道的氢负离子导体只能在约 300°C 实现超快传导。中国科学院大连化学物理研究所陈萍、曹湖军团队提出全新材料设计研发策略,通过机械化学方法在稀土氢化物——氢化镧(LaH_x)晶格中制造大量缺陷和纳米微晶,使电子电导率比结晶态 LaH_x 下降 5 个数量级以上,同时“维持”氢负离子通过协同迁移机制快速传输,从而实现了首个温和条件下($-40\sim 80^\circ\text{C}$)的超快氢负离子传导。在 -40°C 时,该氢负离子导体的电导率高达 10^{-2} S/cm ,活化能仅为 0.12 eV 。此外,还首次实现了室温全固态氢负离子电池的放电,证实了这种全新氢负离子电池的可行性(图 12)^[47]。

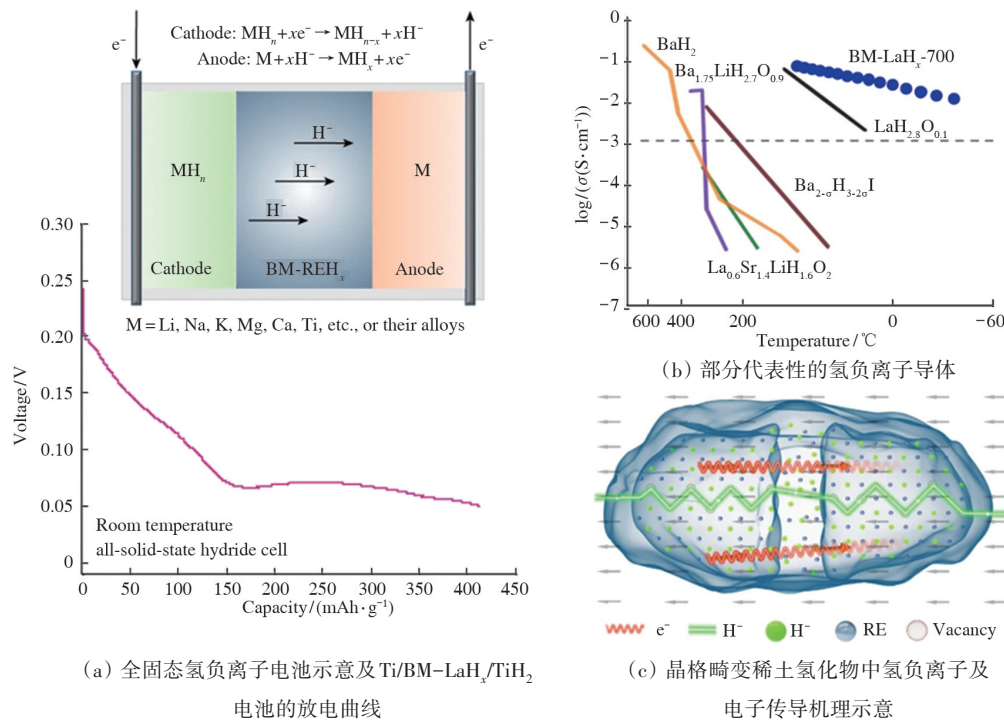


图 12 全固态氢负离子电池与氢负离子传导

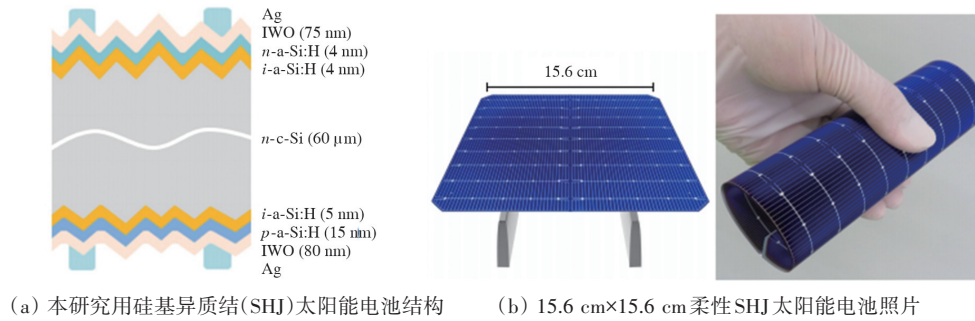
(图片来源:《Nature》)

2.3 柔性单晶硅太阳能电池研制成功

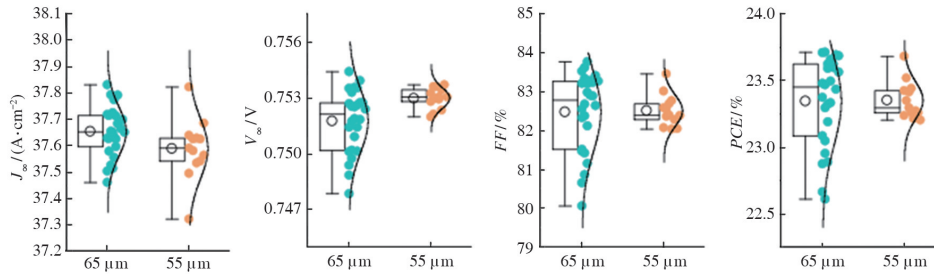
柔性太阳能电池在集成到建筑物或可穿戴电子产品的光伏发电方面具有巨大的潜力。但由于硅晶圆易碎,柔性晶体硅太阳能电池开发一直未取得显著进展。

中国科学院上海微系统与信息技术研究所刘文柱、刘正新、狄增峰等与长沙理工大学刘小春提出了一种制造可折叠硅片的方法,通过使硅片的边

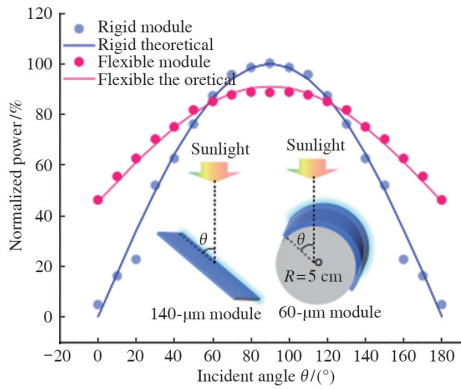
缘变钝、防止它们发生脆性断裂,制造出弯曲角度超过 360° 的 6 英寸(1 英寸=2.54 cm)太阳能电池,且可以实现其大面积($>240 \text{ cm}^2$)、高效($>24\%$)的商业化生产。在 1000 次左右弯曲循环后,电池保持 100% 的功率转换效率(图 13)^[48]。在组装成大型($>10000 \text{ cm}^2$)柔性组件后,电池在 $-70\sim 85^\circ\text{C}$ 热循环 120 h 后仍保留 99.62% 的功率。此外,当电池连接到软气囊(模拟暴风),在暴露于强气流中 20 min



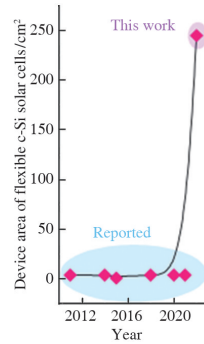
(a) 本研究用硅基异质结 (SHJ) 太阳能电池结构 (b) 15.6 cm×15.6 cm 柔性 SHJ 太阳能电池照片



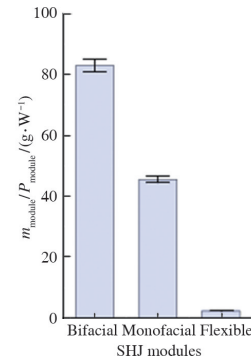
(c) 65 和 55 μm SHJ 太阳能电池的短路电流密度 (J_{sc})、开路电压 (V_{oc})、填充因子 (FF) 和效率 (PCE)



(d) 2 个微型电池组件的归一化功率随光线入射角 θ 的变化趋势



(e) 柔性 c-Si 太阳能电池器件面积的演变



(f) 在标准条件下测试的双面、单面和柔性 SHJ 模块的质量功率比, 其中 m_{module} 和 P_{module} 为模块的质量和功率

图 13 太阳能(组件)性能表现 (图片来源:《Nature》)

后仍保留 96.03% 的功率。研究认为,这一技术可用于大面积生产柔性电池。研究表明,材料的机械性能不仅取决于其在原子水平的晶格结构,介观尺度对称性也有显著作用。这一发现可能对遇到材料脆性挑战的其他领域提供广泛借鉴。

2.4 开发丙烷脱氢耦合选择性氢燃烧制备丙烯新技术

丙烯在全球石化产业链中具有重要地位,是衡

量国家经济发展水平的重要标志。丙烷脱氢制丙烯技术具有较高的碳资源利用经济性,是实现轻质化烯烃生产的关键技术。传统商业化丙烷直接脱氢是高温强吸热反应,受热力学平衡限制,工艺能效低。

天津大学巩金龙团队针对直接脱氢热力学受限、脱氢与氢燃烧反应动力学不匹配等科学问题,发现催化活性位有序化结构对反应中间物种迁移

的引导规律,揭示氢物种溢流对脱氢反应和选择性氢燃烧反应的串联作用,开发了脱氢活性位与选择性氢燃烧活性位串联的氧载体催化剂,通过氢与晶格氧的燃烧为脱氢反应原位供热,在反应温度比传统工艺低 50℃ 的条件下,获得 42.7% 丙烷转化率和 81.3% 丙烯选择性,氧载体催化剂在脱氢-再生循环测试中保持性能稳定,建立了氢溢流介导耦合脱氢吸热反应和选择性氢燃烧放热反应新工艺(图 14)。该研究开发的丙烷脱氢耦合选择性氢燃烧制备丙烯新技术成功突破了传统直接脱氢工艺的技术局限,显著提升了丙烯生产效率和能量利用效率,变革了丙烯生产技术,为烯烃生产的高质量低碳化发展奠定科学基础^[49]。

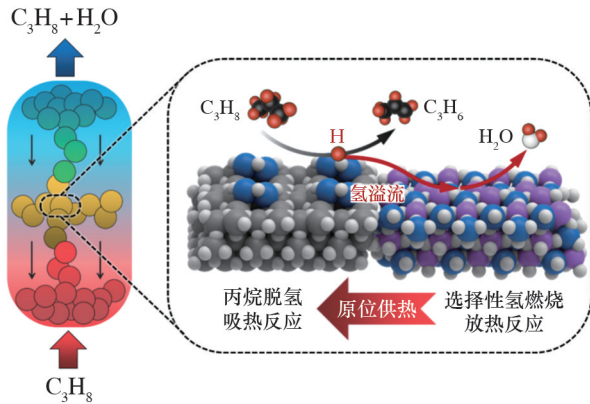


图 14 丙烷脱氢耦合选择性氢燃烧生产丙烯
(图片来源:天津大学巩金龙研究组)

2.5 实现用于通用 DNA 计算的可编程门阵列

液相 DNA 电路在编码和执行算法方面具有大规模并行的潜力,但通用 DNA 集成电路(DICs)的发展尚未得到探索。现有 DNA 计算体系仅能针对特定功能进行硬件定制,如何发展具有通用性的 DNA 运算元件的编程与集成成为制约 DNA 计算领域发展的瓶颈。

上海交通大学化学化工学院/变革性分子前沿科学中心/张江高等研究院 DNA 存储研究中心樊春海、王飞发展了一种支持通用性数字计算的 DNA 可编程门阵列(DNA-based programmable gate array, DPGA),可通过分子指令编程的方式实现通用数字 DNA 计算,实现了无衰减大规模液相分子电路的构建^[50]。研究团队证明利用单链 DNA 作为统一传输信号(DNA-UTS),可实现类似电子在电路中传输的功能;进而开发一种支持通用性数字计算的 DPGA,实现器件内的可编程性和器件间可集成性(图 15)^[50]。利用 DPGA 的可编程性与高集成度,该研究首次在实验上实现高达 30 个逻辑元件、500 条 DNA 链,包含 30 层 DNA 链取代反应的电路规模。研究证明了 DPGA 的高度可扩展性,并展示了将 DPGA 作为分子诊断中的信息处理核心,对疾病相关分子靶标进行非线性分类。集成无明显信号衰减的大规模 DPGA 系统标志着迈向通用 DNA 计算的关键一步。

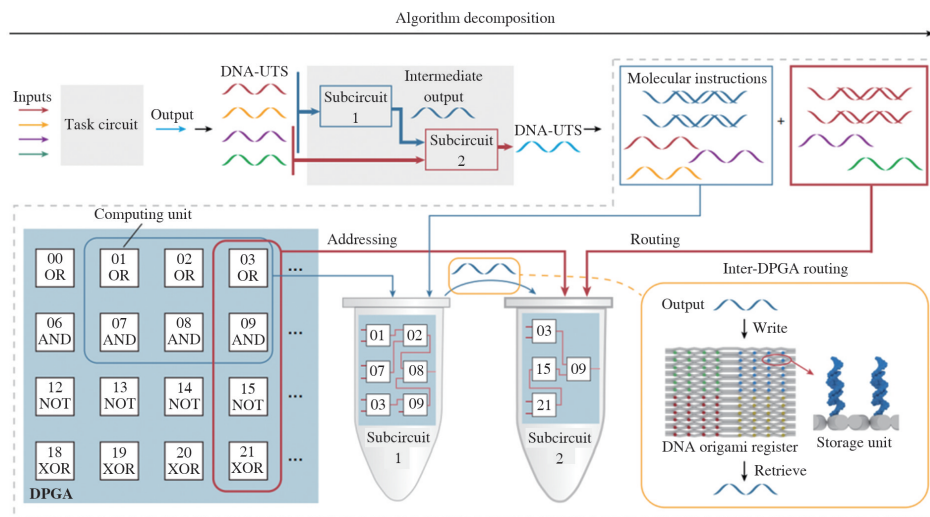


图 15 利用 DNA 链实现器件内可编程性和器件间可集成性
(图片来源:《Nature》)

2.6 研制出新款忆阻器存算一体芯片

忆阻器(memristor)在断电之后仍能“记忆”通过的电荷,被用作新型纳米电子突触器件。由于传统反向传播训练算法所要求的高精度权重更新方式与忆阻器实际特性的适配性较差,实现全系统集成、支持高效片上学习的忆阻器芯片面临较大挑战。

清华大学钱鹤、吴华强研究团队基于存算一体计算范式,通过算法、架构、集成方式的全流程协同创新,研制出全球首款全系统集成、支持高效片上学习的忆阻器存算一体芯片(图 16^[51])。该芯片包含支持完整片上学习所必需的全部电路模块,成功完成图像分类、语音识别和控制任务等多种片上增量学习功能验证,展示出高适应性、高效率、高通用性、高准确率等特点。相同任务下,该芯片实现片上学习的能耗仅为先进工艺下专用集成电路(ASIC)系统的3%,具有满足人工智能时代高算力需求的应用潜力。它为突破冯·诺依曼传统计算架构下的能效、算力瓶颈提供了一种创新发展路径,有望促进人工智能、自动驾驶、可穿戴设备等领域发展。

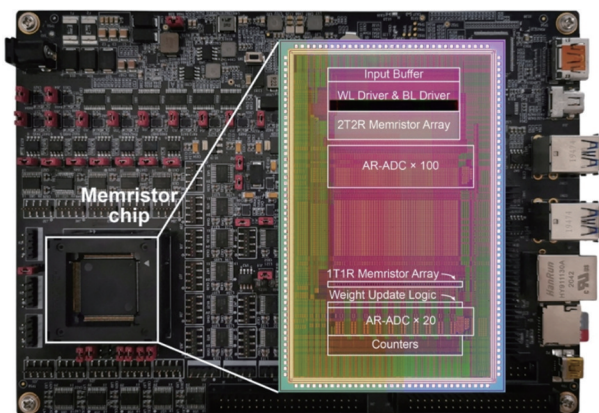


图 16 忆阻器存算一体芯片及测试系统
(图片来源:《Science》)

2.7 实现无机材料的普适性 3D 打印

无机材料的纳米级分辨率 3D 打印为探索具有特别功能的设备,提供了不同的材料加工途径。然而,现有 3D 打印技术通常需要使用光固化树脂作为模板,这会降低所打印的材料纯度并降低性能。

清华大学李景虹、张昊、孙洪波、林琳涵等研究

团队将胶体纳米化学设计与飞秒激光制造技术相结合,开发了光化学键合的超快激光 3D 打印技术(3D Pin)(图 17^[52])。该技术无需树脂,打印材料保留了组成纳米晶体的固有特性,并展现出 3D 结构所带来的新功能。非线性光激发具有的高时空分辨特征使得打印溶液中纳米晶体间的成键和扩散过程高度限域,实现了纳米级精度、复杂三维结构的精密构筑,打印分辨率达到 150 nm;纳米晶体所具有的尺寸和结构可调性及尺寸依赖的物理性质等使得所打印的 3D 结构展现出独特的多级结构、高机械性能和优异的光学性质。例如,由 II-VI 族半导体量子点 3D 打印而成的纳米三维螺旋阵列,在可见至近红外波段展现出宽波段手性光学响应,手性因子比传统方法提升了 20 倍,展现出优异的手性光学特性。该研究开发的新的无机材料 3D 打印方法,普遍适用于半导体(如 II-VI、III-V 和金属卤化物钙钛矿等)、金属(如金)和半导体氧化物(如氧化铜、氧化钛等),并可实现多种不同材料的混合和异质结构打印,为拓宽 3D 打印材料库并构建基于无机材料的 3D 结构与器件提供了新思路。

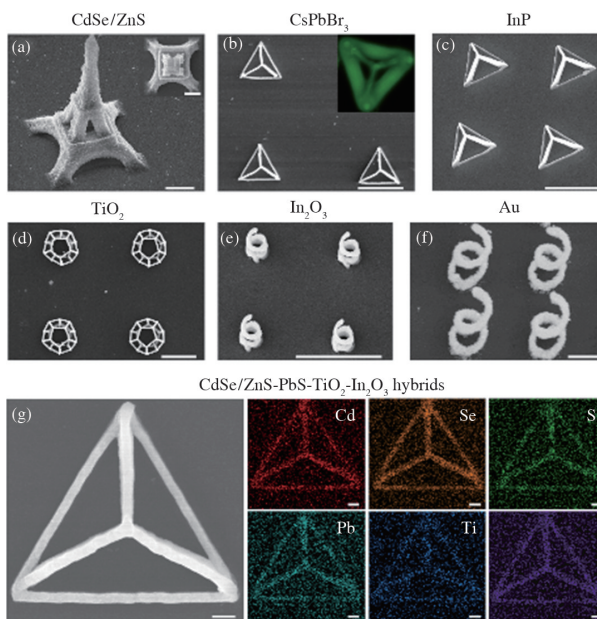


图 17 多种纳米材料 3D 打印及混合打印的结构形貌、荧光图及元素表征
(图片来源:《Science》)

2.8 黏弹性无机玻璃制备成功

全固态电池被誉为下一代颠覆性的电池技术,除了有望解决当前液态电池所存在的安全隐患外,还能够大幅提升电池的能量密度和循环稳定性,已成为能源领域研究的焦点。然而,由于固体电解质与电极之间界面的不稳定性,全固态电池的实际应用仍面临挑战。

中国科学院物理研究所陈立泉、胡勇胜等与合作者将四氯铝酸盐(如 LiAlCl_4 和 NaAlCl_4) 中的氯原子部分替代为氧原子,成功将在室温下易碎的晶体熔盐转化为具有黏弹性的无机玻璃。这种类似于有机聚合物的无机玻璃具有很好的变形能力和柔

性,即使在室温下也能够弯曲和折叠。这一突破性的发现将有机聚合物电解质的柔性与传统无机陶瓷电解质高离子电导率($>1 \text{ mS/cm}$)和耐高电压能力($>4.3 \text{ V}$)的优点相结合,有效解决了电极和电解质之间的机械和化学稳定性问题,实现了全固态电池在室温下无需外部压力下的平稳运行(图 18)^[53]。该研究弥补了传统无机陶瓷和聚合物电解质在柔韧性和力学性能方面的不足,颠覆了以往人们对无机固体电解质难以具备聚合物电解质黏弹性的认知,为固体电解质的研发开辟了新的方向,为全固态电池的发展提供了创新性的解决方案。

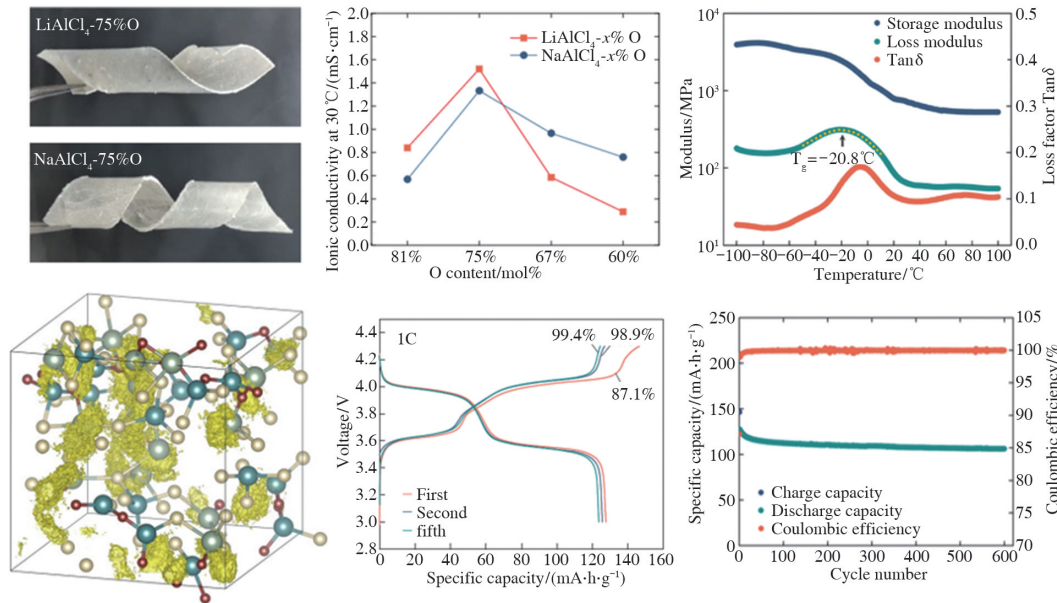


图 18 黏弹性无机玻璃固体电解质和全固态电池的性能

(图片来源:《Nature Energy》)

2.9 构建光量子计算原型机“九章三号”

量子计算具有超快的并行计算能力,研制量子计算机是当前世界科技前沿的最大挑战之一。中国科学技术大学中国科学院量子信息与量子科技创新研究院潘建伟、陆朝阳、刘乃乐等研究团队与中国科学院上海微系统与信息技术研究所、国家并行计算机工程技术研究中心合作,成功构建了 255 个光子的量子计算原型机“九章三号”,再度刷新了光量子信息的技术水平和量子计算优越性的世界纪录。

中国科学技术大学团队 2020 年构建 76 光子的“九章”光量子计算原型机^[54], 2021 年进一步研制 113 光子的可相位编程的“九章二号”^[55]和 56 比特的“祖冲之二号”量子计算原型机^[56],使中国成为唯一在光学和超导 2 种技术路线达到“量子计算优越性”的国家。“九章三号”理论上首次发展了包含光子全同性的新理论模型,实现了更精确的理论与实验的吻合;发展了完备的贝叶斯验证和关联函数验证,全面排除了所有已知的经典仿冒算法,为量子计算优越性提供了进一步数据支撑。“九章三号”处

理高斯玻色取样的速度比“九章二号”提升100万倍,比当前最快的超级计算机快1亿亿倍。其 $1\ \mu\text{s}$ 可算出的最复杂样本,当前全球最快的超级计算机“前沿”(Frontier)约需200亿年(图19)^[57]。“九章三

号”是在研制量子计算机之路上迈出的重要一步,该研究进一步巩固了中国在光量子计算领域的国际领先地位。

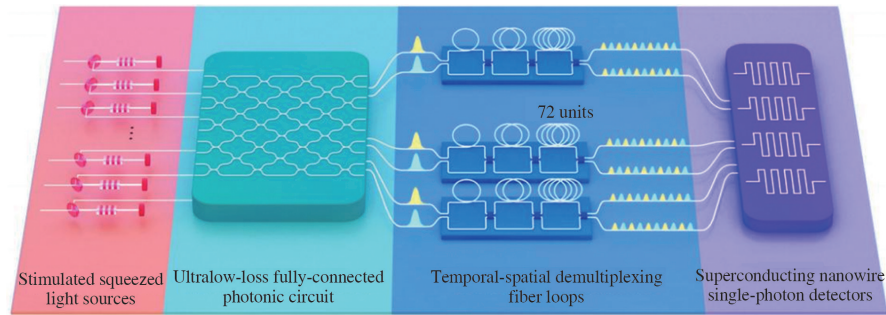


图19 “九章三号”实验装置示意

(图片来源:《Physical Review Letters》)

2.10 培育全球首例“嵌合体”猴

由于供体细胞无法与宿主胚胎发育状态相匹配,非人灵长类嵌合体培养存在巨大挑战。2023年11月9日,中国科学院脑科学与智能技术卓越创新中心(神经科学研究所)、上海脑科学与类脑研究

中心刘真研究组、脑智卓越中心非人灵长类研究平台孙强研究团队和中国科学院广州生物医药与健康研究院 Miguel A. Esteban 研究组组成的研究团队培育出世界上首只高比例胚胎干细胞“嵌合猴”(图20)^[58]。

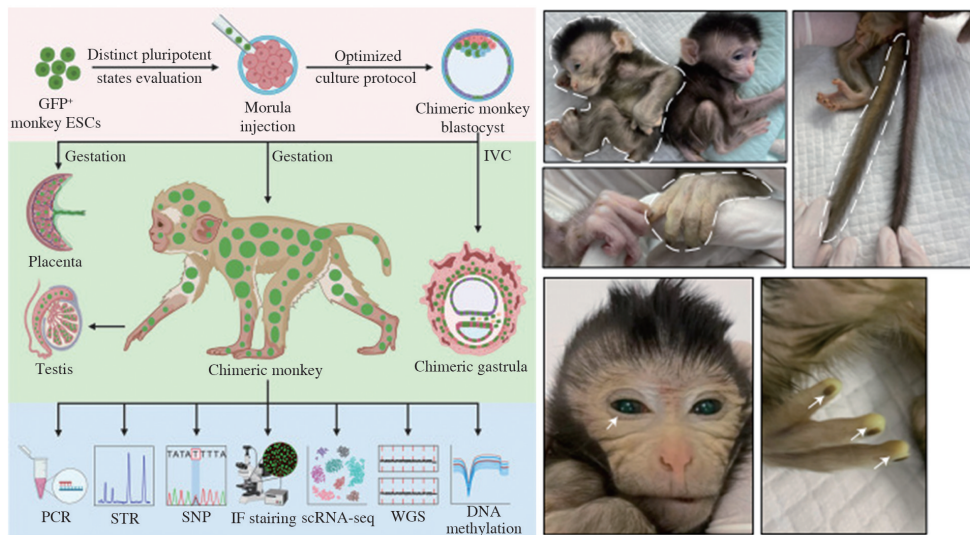


图20 嵌合体猴

(图片来源:《Cell》)

这只“嵌合猴”由食蟹猴(长尾猕猴)的2个基因不同胚胎的细胞培育而来。研究团队建立了处于6种不同培养体系下的食蟹猴胚胎干细胞,从克隆形态、免疫荧光、单细胞转录组、线粒体代谢、全基因组甲基化、核型分析和全基因组测序等方面,

对其进行全面系统地评估,并优化了嵌合胚胎的培养程序。研究团队给干细胞添加绿色荧光蛋白,以将由干细胞发育而成的组织区分开来。经过筛选的干细胞团被注射到猴子的桑葚胚中,形成猴嵌合胚胎,被移植到雌猴体内,在1只流产猴胚胎和1只

活产猴体内检测到嵌合现象。严格分析表明,嵌合体猴 26 处不同组织中干细胞占比 21%~92%,平均值为 67%。

该研究严格遵守生物伦理规范,所有实验均符合国际干细胞研究学会的研究指南,并经过中国科学院脑科学与智能技术卓越创新中心伦理委员会审核。该研究为干细胞多能性研究提供了一个重要平台,对灵长类动物干细胞多能性和非人类灵长类动物基因工程研究具有重要意义,为后续利用干细胞建立疾病猴模型等打下重要基础。

3 2023 年中国重大工程进展(10 项)

3.1 世界首台“用于太阳磁场精确测量的中红外观测系统”调试安装

2023 年 4 月 14 日,由中国科学院国家天文台、中国科学院上海技术物理研究所、中国科学院西安光学精密机械研究所联合研制的世界首台“用于太阳磁场精确测量的中红外观测系统”(AIMS)进入调试安装阶段(图 21),该装置投入使用后将填补国际上没有中红外波段的太阳磁场望远镜的空白,对中国太阳物理研究具有重大意义^[59]。



图 21 世界首台用于太阳磁场精确测量的中红外观测系统
(图片来源:央视新闻)

太阳磁场的基本结构及其性质是目前尚未解决的重大科学问题之一。为将太阳磁场测得更准,AIMS 利用红外波段同样磁场强度产生的信号更强的特点,将现在的太阳矢量磁场测量精度提高 1 个量级^[59]。该系统中,红外光学、焦平面阵列探测器和真空制冷 3 个系统构成了红外成像终端,包括探

测器芯片在内的所有部件均为国产。该终端系统主要用于 8~10 μm 波段太阳单色成像观测研究太阳剧烈爆发过程中的物质和能量转移机制^[60]。

AIMS 是青海冷湖天文观测基地已落地的 9 个天文望远镜项目之一。目前 9 项 35 台天文望远镜中,已有 4 台投入科学观测,待全部投入使用后,冷湖天文观测基地将成为亚洲最大的天文观测基地^[59]。

3.2 世界海拔最高、规模最大、灵敏度最强的宇宙线观测站“拉索”通过验收

2023 年 5 月 10 日,目前世界上海拔最高、规模最大、灵敏度最强的宇宙线观测站——“拉索”通过国家验收(图 22),观测性能创造多项“世界之最”^[61]。



图 22 “拉索”鸟瞰图
(图片来源:中国科学院高能物理研究所)

“拉索”项目于 2015 年 12 月获国家发展和改革委员会批复立项,由中国科学院和四川省人民政府共建,中国科学院成都分院与中国科学院高能物理研究所承担建设,2017 年主体工程动工,2021 年全部完成建设。

“拉索”位于四川省稻城县海子山,平均海拔 4410 m,占地面积 1.36 km^2 ,由地面簇射粒子探测器阵列(包含 5216 个电磁粒子探测器和 1188 个缪子探测器)、水切伦科夫探测器阵列(面积约 78000 m^2)和广角切伦科夫望远镜阵列(18 台)组成,采用 4 种探测技术,可全方位、多变量测量来自高能天体的伽马射线和宇宙线^[61]。该项目在建设过程中,实现了多项重大自主创新,首次在大视场成像切伦科夫望远镜中大规模使用新型硅光电管,改变了这类望远镜不能在月夜工作的传统观测模式,实现了有效观测时间的成倍增长,推动了相关技术的革新与发展^[62]。

3.3 中国首座深远海浮式风电平台“海油观澜号”投产

2023年5月20日,中国首座深远海浮式风电平台“海油观澜号”(图23)成功并入文昌油田群电网,这是我国首次实现深远海浮式风电平台直接为海上油气田群供电。“海油观澜号”是目前世界上最深最远,也是全球首个给海上油气田供电、海域环境最恶劣的半潜式深远海风电平台^[63]。



图23 中国首座深远海浮式风电平台“海油观澜号”并网投产
(图片来源:人民网)

“海油观澜号”服役于距海南文昌136 km的海域,装机容量7.25 MW,海缆设计水深120 m,采用全动态复合截面设计,包含3根导体截面70 mm²的35 kV电缆,以及3根12芯光纤。海缆一端固定在文昌油田群海上油气平台,另一端与“海油观澜号”浮式风电平台连接。投产后,年均发电量将达2200万kWh,将全部用于油田群生产用电,每年可节约燃料近1000万m³天然气,减少CO₂排放2.2万t^[64]。

文昌油田群打造了“风电+气电+智慧电网”的一体化供电新模式,保障风电并网后油田群电网能够持续平稳运行。通过油田能源管理系统、风机监控系统以及风功率预测系统之间的相互配合,将油田群的4个燃料电站与“海油观澜号”风电平台融合成一个整体,实现了风电与油田电能的统一控制和管理,形成主动控制与被动响应双重保障^[63]。

3.4 中国国家太空实验室正式运行

2023年8月18日,中国国家太空实验室正式运行,并建立起独具中国特色的近地空间科学与应用体系,空间应用有序展开、成果频现^[65]。

2023年11月28日,中国载人航天工程办公室发布了神舟十六号乘组返回地面手持高清相机通过飞船绕飞拍摄的空间站组合体全景照片,这是中国首次在轨获取以地球为背景的空间站组合体全貌图像,也是中国空间站的第一组全构型工作照(图24)。

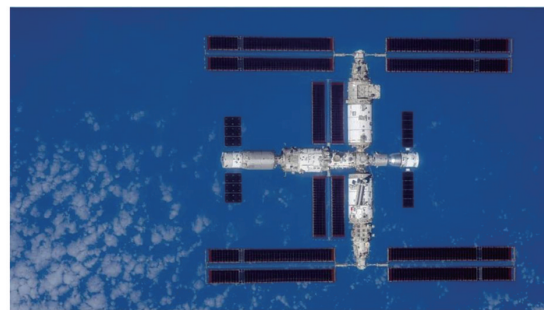


图24 神舟十六号航天员拍摄空间站组合体全景图像
(图片来源:中国载人航天微信公众号)

中国空间站于2022年底全面建成,具备大规模开展空间科学研究的能力^[65]。搭建的中国特色的近地空间科学与应用体系,建成了功能完善、性能先进、学科覆盖全面的国家太空实验室平台。舱内的25个科学实验机柜与一系列舱外设施接口,能够支持空间生命科学与生物技术、空间天文与天体物理等诸多学科方向的研究与应用。同时面向应用项目全寿命周期管理,优化了应用项目征集、遴选、培育、立项和择优机制,吸引和凝聚国内外一流科学与应用团队,持续开展高水平科学研究与应用。建立了载荷研制保障、总装集成、软件评测、工效学与医学评价、系统联试等研制支持条件,形成载荷分级分类研制流程,充分运用数字化、智能化等先进手段,持续提升载荷工程化研制能力。形成了强大的在轨实验支持能力。充分发挥在轨航天员特别是载荷专家的作用,开展载荷舱内组装与更换、升级与维护、实验过程监控、实验样品更换和处置等^[65]。

3.5 墨子巡天望远镜正式启用

2023年9月17日,中国科学技术大学和中国科学院紫金山天文台联合研制的墨子巡天望远镜(图25)正式启用,这是目前全球唯一的大口径兼



图25 墨子巡天望远镜
(图片来源:中国科学技术大学)

大视场光学时域巡天望远镜,是目前北半球光学时域巡天能力最强的设备,将显著提升中国时域天文研究能力^[66]。

墨子巡天望远镜位于青海省海西蒙古族藏族自治州冷湖镇海拔4200 m的赛什腾山天文台址,于2018年3月1日联合启动研制,主镜口径2.5 m,配备7.65亿像素大靶面主焦相机,采用国际先进的主焦光学系统设计和主镜主动光学矫正技术,可实现3度视场范围内均匀高像质和极低像场畸变成像,具备强大的巡天能力,能够每3个晚上巡测整个北天球1次。

墨子巡天望远镜兼具大视场和高分辨成像能力,首光获取了仙女座星系及其外围区域的多色图像。首光图像利用不同夜晚观测的150幅图像叠加而成,可以测定仙女座星系及周围环境中的天体亮度变化,开展时域天文学研究。此外,结合FAST射电观测数据,首光科学图像数据能够进一步揭示星系中恒星形成和气体之间的演化^[66]。

3.6 全球规模最大综合孔径射电望远镜通过工艺测试

2023年9月27日,中国科学院国家空间科学中心牵头建设的国家重大科技基础设施“空间环境地基综合监测网”标志性设备之一——圆环阵太阳射电成像望远镜(图26)顺利通过工艺测试。这是目前全球规模最大的综合孔径射电望远镜,为中国太阳物理和空间天气研究提供高质量的自主观测数据^[67]。



图26 圆环阵太阳射电成像望远镜
(图片来源:中国新闻网)

圆环阵太阳射电成像望远镜的圆环阵,坐落于海拔3820 m的四川稻城,由313部直径6 m的抛物面天线构成,均匀分布在直径为1 km的圆环上,是目前全球规模最大的综合孔径射电望远镜。它不仅能监测太阳的各种爆发活动,还能监测太阳风暴进入行星际的过程,对理解太阳爆发机制和日地传播规律,预测太阳活动对地球的影响具有重要作用。

建设过程中,项目团队提出了原创的圆环阵列构型和中心定标总体方案,突破了单通道多环绝对相位定标等关键技术。3月,处于系统调试阶段的圆环阵,就开展了中国首次基于射电图像序列的脉冲星探测实验,从连续射电图像中成功识别出脉冲星闪烁;5月,圆环阵与欧洲低频阵列开展了联合观测实验,实现了交叉验证;7月,圆环阵已具备连续稳定高质量监测太阳活动的的能力,脉冲星成像等射电天文观测能力得到初步验证,开启了科学试观测^[67]。

3.7 全球直径最大、单体最重、承载最高的整体式盾构机主轴承下线

2023年10月12日,中国铁建重工集团自主研发、直径8.61 m盾构机主轴承(图27)在湖南长沙



图27 直径8.61 m盾构机主轴承
(图片来源:央视新闻)

下线。这是目前全球直径最大、单体最重、承载最高的整体式盾构机主轴承,它的研制成功标志着国产超大直径主轴承研制及产业化能力跻身世界领先水平^[68]。

主轴承是盾构机的“心脏”部件,需要直面盾构机超重载、大偏载、频变载等极端恶劣工况考验,其服役寿命与可靠性受材料、设计、制造和试验等多种关键因素制约,研制难度更是随尺寸增加而倍增。此前,超大直径盾构机主轴承关键技术被国外企业长期垄断。为攻破盾构机全产业链全面自主化的薄弱环节,铁建重工联合上下游企业、高等院校展开协同攻关,建成国际领先的盾构机主轴承生产线,成功研制出3~7.6 m全系列主轴承;打造了全球最大的主轴承工况模拟试验台,解决了大型低速重载主轴承难以试验验证的世界性难题。

整体式盾构机主轴承的成功研制,标志着中国超大直径主轴承研制及产业化能力跻身世界领先水平,实现了国产盾构机主轴承从中小直径到超大直径型谱的全覆盖^[68]。

3.8 国产首艘大型邮轮“爱达·魔都号”命名交付

2023年11月4日,中国国产首艘大型邮轮“爱达·魔都号”(图28)正式命名交付,标志着中国已具备同时建造航空母舰、大型液化天然气运输船、大型邮轮的能力,集齐造船工业“三颗明珠”,也填补了国产大型邮轮空白,实现国产大型邮轮领域零的突破^[69]。



图28 首艘国产大型邮轮“爱达·魔都号”
(图片来源:新华社)

“爱达·魔都号”于2019年10月份开工,总吨位为13.55万t,入级英国劳氏船级社(LR)和中国船级社(CCS),总长323.6 m,型宽37.2 m,最大吃水

8.55 m,最大航速22.6节。2020年11月10日,“爱达·魔都号”全面转入坞内连续搭载总装阶段,实现了从详细设计、生产设计到实船总装搭载的重大跨越。2021年10月18日实现全船贯通,2021年12月17日实现坞内首次起浮,2023年6月6日实现顺利出坞。

这艘大型邮轮拥有136个系统,2万多套设备。零部件数量达2500万个,相当于5架C919国产大飞机、13辆复兴号高铁列车的工程物量。电缆布置长度达到4300 km,相当于上海至拉萨的铁路距离^[69]。该邮轮区别于其他大型船舶的突出特点还有功能“全”。24层楼高,拥有2826间舱室,可容纳6500多人,船上豪华酒店、影院剧场、水上乐园一应俱全,如同一座“移动的海上城市”。大型邮轮是国家制造业、科技水平综合实力的集中体现,被誉为中国造船工业“皇冠上的最后一颗明珠”。“爱达·魔都号”的交付实现了我国在大型邮轮建造领域零的突破。

3.9 世界最深、最大极深地下实验室投入科学运行

2023年12月7日,中国锦屏地下实验室二期极深地下极低辐射本底前沿物理实验设施土建公用工程完工,标志着世界最深、最大的极深地下实验室正式投入科学运行(图29)。锦屏大设施将发展成涵盖粒子物理、核天体物理、宇宙学、生命科学、岩石力学等多学科交叉的世界级深地科学研究中心,助力国家科创平台“跨越式提升”^[70]。



图29 位于中国锦屏地下实验室(CJPL)二期的中国暗物质实验CDEX-1T大型液氮恒温器
(图片来源:雅砻江流域水电开发有限公司)

2010年12月,中国锦屏地下实验室(一期)建成投运,成为中国首个、世界最深的地下实验室。

2014年,清华大学与雅砻江公司规划建设实验室二期项目,地下可用实验空间增加到33万m³。在二期工程基础上,“锦屏大设施”项目获得国家批复。锦屏大设施实验室位于四川凉山锦屏水电站锦屏山隧道中部地下2400 m处,以锦屏山为天然平台,以水电站深埋长隧洞为基础。

作为粒子物理和核物理领域的“国之重器”,锦屏大设施为暗物质、中微子、核天体物理等前沿物理科学研究提供了极低辐射本底实验条件,同时作为开放共享的大科学装置,也为深地岩体力学、深地医学等深地科学提供了绝佳的研究平台^[70]。

3.10 中国自主设计建造的首艘大洋钻探船“梦想”号试航

2023年12月18日,中国自主设计建造的首艘大洋钻探船“梦想”号(图30)正式命名,22日在广州南沙首次试航,“梦想”号不仅钻探深度是世界最深,还建有全球面积最大、功能最全的船载实验室,标志着中国深海探测能力建设迈出重要一步^[71]。



图30 “梦想”号大洋钻探船
(图片来源:中国地质调查局)

“梦想”号由中国自然资源部中国地质调查局牵头负责,由中国船舶集团设计建造,150余家单位参研参建。总吨约33000 t,总长179.8 m、型宽32.8 m,续航力15000海里,可抵御16级台风海况,具备海域11000 m的钻探能力。该船是按照“小吨位、多功能、模块化”设计建造理念,实现了多项国际首次、首创,突破10余项关键技术^[71]。

“梦想”号具有全球最先进的钻探系统,具有油气钻探和大洋科学钻探2大作业模式,其中深水无隔水管泥浆循环系统由中国自主研制,在该领域实

现了从无到有的突破;建有全球面积最大、功能最全、流程最优的船载实验室,总面积超3000 m²,可满足海洋领域全学科研究要求;建有全球规模最大、最先进的科考船综合信息化系统,通过全船超2万个监控点,可实现钻采作业全过程监测、科学实验智能协同。“梦想”号全球首次同时应用了最新一代30 MW闭环环网电站和电池蓄能技术,船舶经济性和可靠性大幅提升,节约能耗超过15%。

“梦想”号预计于2024年全面建成,交付使用后,将主要承担国家重大科技项目和国际大科学计划中的大洋科考钻探任务^[71]。

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] 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.
- [20] 王康友, 徐丽娇, 刘志远, 等. 2021年中国重大科学、技术和工程进展[J]. 科技导报, 2022, 40(3): 6–24.
- [21] 王康友, 刘志远, 祝叶华, 等. 2022年中国重大科学、技术和工程进展[J]. 科技导报, 2023, 41(3): 6–28.
- [22] Dai X, Davies J, Yuan Z W, et al. A Mesozoic fossil lagerstätte from 250.8 million years ago shows a modern-type marine ecosystem[J]. *Science*, 2023, 379(6632): 567–572.
- [23] Science|宋海军教授团队《贵阳生物群揭示现代类型海洋生态系统的崛起》[EB/OL]. (2023–02–10)[2024–01–05]. <https://bgeg.cug.edu.cn/info/1043/2645.htm>.
- [24] Zhang H L, Yu F F, Xie P, et al. A G γ protein regulates alkaline sensitivity in crops[J]. *Science*, 2023, 379(6638): eade841.
- [25] 中国科学家揭示作物主效耐碱基因 有望大幅提升作物产量 [EB/OL]. (2023–03–24) [2024–01–05]. https://www.cas.cn/yw/202303/t20230323_4881502.shtml.
- [26] Yang J R, Li W H, Tang H T, et al. CO₂-mediated organocatalytic chlorine evolution under industrial conditions[J]. *Nature*, 2023, 617: 519–523.
- [27] 工业条件下 CO₂ 介导的有机催化氯析出 [EB/OL]. (2023–05–25) [2024–01–06]. <https://news.sciencenet.cn/htmlpaper/2023/5/20235251199881898.shtml>.
- [28] Shao Y, Zhou L, Li F, et al. Phylogenomic analyses provide insights into primate evolution[J]. *Science*, 2023, 380(6648): 913–924.
- [29] 揭示灵长动物演化之谜 这个团队一次发6篇《科学》 [EB/OL]. (2023–06–02) [2024–01–06]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1767552940014340785&wfr=spider&for=pc>.
- [30] “中国天眼”，又有重要新发现！ [EB/OL]. (2023–06–29) [2024–01–08]. http://www.cas.ac.cn/cm/202306/t20230630_4918843.shtml.
- [31] LHAASO Collaboration, CAO Z, Aharonian F, et al. A tera-electron volt afterglow from a narrow jet in an extremely bright gamma-ray burst[J]. *Science*, 2023, 380(6652): 1390–1396.
- [32] The LHAASO Collaboration. Very high-energy gamma-ray emission beyond 10 TeV from GRB 221009A[J]. *Science Advances*, 2023, 46(9): eadj2778.
- [33] Meng X S, Zhou L C, Liu L, et al. Deformable hard tissue with high fatigue resistance in the hinge of bivalve *Cristaria plicata*[J]. *Science*, 2023, 380(6651): 1252–1257.
- [34] 南科大俞书宏团队《Science》发文揭秘可变形生物矿物硬组织耐疲劳机制 [EB/OL]. (2023–07–14) [2024–01–12]. <https://www.nsf.gov.cn/esc/20340/20343/65401/index.html>.
- [35] Xu H, Chen S Y, Guo Y J, et al. Searching for the nano-Hertz stochastic gravitational wave background with the Chinese Pulsar Timing Array Data Release I[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2023, 23: 075024.
- [36] 中国天眼发现纳赫兹引力波存在的关键性证据(科技自立自强) [EB/OL]. (2023–06–30) [2024–01–08]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1770114381154032938&wfr=spider&for=pc>.
- [37] Sun H L, Huo M W, Hu X W, et al. Signatures of superconductivity near 80 K in anickelate under high pressure [J]. *Nature*, 2023, 621: 493–498.
- [38] 中山大学王猛团队发现镍基高温超导体 [EB/OL]. (2023–07–13) [2024–01–09]. <https://www.sysu.edu.cn/news/info/2331/1059131.htm>.
- [39] 物理系张广铭教授与实验组合作首次发现液氮温区镍氧化物高温超导体 [EB/OL]. (2023–07–13) [2024–01–08]. <https://www.tsinghua.edu.cn/info/1175/105413.htm>.
- [40] Liu X Q, Liu Z P, Wu Z M, et al. Resurrection of endogenous retroviruses during aging reinforces senescence[J]. *Cell*, 2023, 186(2): 287–304.
- [41] Jing Y B, Jiang X Y, Ji Q Z, et al. Genome-wide CRISPR activation screening in senescent cells reveals SOX5 as a driver and therapeutic target of rejuvenation[J]. *Cell Stem Cell*, 2023, 30(11): 1452–1471.
- [42] Sun S H, Li J M, Wang S, et al. CHIT1-positive microglia drive motor neuron aging in the primate spinal cord [J]. *Nature*, 2023, 624: 611–620.
- [43] Xu C L, Silliman B R, Chen J S, et al. Herbivory limits success of vegetation restoration globally[J]. *Science*, 2023, 382(6670): 589–594.
- [44] 登上 Science 封面: 复旦大学贺强团队破解生态修复的“梦境”之困 [EB/OL]. (2023–11–06) [2024–01–10]. <https://news.fudan.edu.cn/2023/1104/c4a137796/page.htm>.
- [45] Villar N. Trophic cascades help restore vegetation[J]. *Science*, 2023, 382(6670): 516–517.
- [46] Jiang J F, Xu L, Qiu C G, et al. Ballistic two-dimensional InSe transistors[J]. *Nature*, 2023, 616(7957): 470–475.
- [47] Zhang W J, Cui J R, Wang S S, et al. Deforming lanthanum trihydride for superionic conduction[J]. *Nature*, 2023, 616(7955): 73–76.
- [48] Liu W Z, Liu Y J, Yang Z Q, et al. Flexible solar cells based on foldable silicon wafers with blunted edges[J]. *Nature*, 2023, 617(7962): 717–723.
- [49] Wang W, Chen S, Pei C L, et al. Tandem propane dehydrogenation and surface oxidation catalysts for selective propylene synthesis[J]. *Science*, 2023, 381(6660): 886–890.
- [50] Lv H, Xie N L, Li M Q, et al. DNA-based programmable gate arrays for general-purpose DNA computing[J]. *Nature*, 2023, 622(7982): 292–300.
- [51] Zhang W B, Yao P, Gao B, et al. Edge learning using a fully integrated neuro-inspired memristor chip[J]. *Sci-*

- ence, 2023, 381(6663): 1205–1211.
- [52] Li F, Liu S F, Liu W Y, et al. 3D printing of inorganic nanomaterials by photochemically bonding colloidal nanocrystals[J]. *Science*, 2023, 381(6665): 1468–1474.
- [53] Dai T, Wu S Y, Lu Y X, et al. Inorganic glass electrolytes with polymer-like viscoelasticity[J]. *Nature Energy*, 2023, 8(11): 1221–1228.
- [54] Zhong H S, Wang H, Deng Y H, et al. Quantum computational advantage using photons[J]. *Science*, 2020, 370(6523): 1460–1463.
- [55] Zhong H S, Deng Y H, Qin J, et al. Quantum leap for quantum primacy[J]. *Physical Review Letters*, 2021, 127(18): 180502.
- [56] Wu Y L, Bao W S, Cao F S, et al. Strong quantum computational advantage using a superconducting quantum processor[J]. *Physical Review Letters*, 2021, 127(18): 180501.
- [57] Deng Y H, Gu Y C, Liu H L, et al. Gaussian Boson sampling with pseudo-photon-number-resolving detectors and quantum computational advantage[J]. *Physical Review Letters*, 2023, 131(15): 150601.
- [58] Cao J, Li W J, Li J, et al. Live birth of chimeric monkey with high contribution from embryonic stem cells[J]. *Cell*, 2023, 186(23): 4996–5014.
- [59] 世界首台观测太阳磁场的中红外望远镜“呼之欲出”[EB/OL]. (2023-04-14)[2023-12-12]. <http://www.stdaily.com/index/kejixinwen/202304/df0464e21b852f10-a0a75ea7c.shtml>.
- [60] 世界首台！我国在中红外太阳观测领域取得新进展[EB/OL]. (2023-04-15)[2023-12-12]. http://www.news.cn/tech/2023-04/15/c_1129526743.htm.
- [61] 探索宇宙线起源之谜 高海拔宇宙线观测站“拉索”通过国家验收[EB/OL]. (2023-05-10)[2023-12-21]. http://www.news.cn/politics/202305/10/c_1129604686.htm.
- [62] 高海拔宇宙线观测站“拉索”通过国家验收[EB/OL]. (2023-05-11)[2023-12-21]. <http://www.stdaily.com/index/kejixinwen/202305/5265b45517f946f49ee14062f14-0ff6a.shtml>.
- [63] 我国首座深远海浮式风电平台“海油观澜号”成功并网投产[EB/OL]. (2023-05-20)[2023-12-20]. http://www.news.cn/2023-05/20/c_1129632607.htm.
- [64] 我国首座深远海浮式风电平台“海油观澜号”成功并网发电[EB/OL]. (2023-05-23)[2023-12-20]. <https://finance.sina.com.cn/jjxw/2023-05-23/doc-imyutmzk7410-919.shtml?cref=cj>.
- [65] 中国国家太空实验室正式运行 建立起近地空间科学与应用体系[EB/OL]. (2023-08-18)[2023-12-23]. http://www.news.cn/2023-08/18/c_1129810705.htm.
- [66] 墨子巡天望远镜正式启用[EB/OL]. (2023-09-17)[2023-12-10]. <http://finance.people.com.cn/GB/n1/2023/0917/c1004-40079519.html>.
- [67] 全球规模最大综合孔径射电望远镜建成[EB/OL]. (2023-09-28)[2023-12-20]. <http://www.news.cn/science/20230928/2bd49411be3d43e1a82bef1d6bed33c9/c.html>.
- [68] 全球最大直径盾构机主轴在长沙下线[EB/OL]. (2023-10-12)[2023-12-21]. <http://hn.people.com.cn/n2/2023/1013/c336521-40602300.html>.
- [69] 首艘国产大型邮轮“爱达·魔都号”出坞[EB/OL]. (2023-06-06)[2023-12-15]. <http://news.gscn.com.cn/system/2023/06/06/012970771.shtml>.
- [70] 世界最深、最大极深地下实验室投入科学运行[EB/OL]. (2023-12-10)[2023-12-15]. <https://news.sciencenet.cn/htmlnews/2023/12/513935.shtml>.
- [71] 我国首艘大洋钻探船“梦想”号试航[EB/OL]. (2023-12-18)[2023-12-25]. https://ishare.ifeng.com/c/s/v002ZJ2fA-JgAOST3jAKLp6PaRAn3mOd-_LX—khsr3PtYpqSQ.

Top advances of science, technology and engineering from China in 2023

WANG Kangyou, XU Lijiao, WANG Zhimin, ZHU Yehua*

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 Jan. 1 to Dec. 31 of 2023 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 chronological sequence.

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



(责任编辑 傅雪)