

· 成果快报 ·

2023 年度中国科学十大进展

2024 年 2 月 29 日,国家自然科学基金委员会(以下简称“自然科学基金委”)发布了 2023 年度“中国科学十大进展”,分别为:人工智能大模型为精准天气预报带来新突破、揭示人类基因组暗物质驱动衰老的机制、发现大脑“有形”生物钟的存在及其节律调控机制、农作物耐盐碱机制解析及应用、新方法实现单碱基到超大大片段 DNA 精准操纵、揭示人类细胞 DNA 复制起始新机制、“拉索”发现史上最亮伽马暴的极窄喷流和十万亿电子伏特光子、玻色编码纠错延长量子比特寿命、揭示光感受调节血糖代谢机制、发现锂电池界面电荷存储聚集反应新机制。2023 年度“中国科学十大进展”主要分布在生命科学和医学、人工智能、量子、天文、化学能源等科学领域。

“中国科学十大进展”遴选活动旨在深入贯彻习近平总书记关于科技创新重要论述,落实党中央国务院关于基础研究的重大决策部署,坚持“四个面向”,坚持目标导向和自由探索“两条腿”走路,宣传我国基础研究重大进展,弘扬科学家精神,激励广大科技工作者的科学热情,开展科学普及,提升全民科学素养,为推动我国基础研究高质量发展,加快实现高水平科技自立自强夯实根基。

“中国科学十大进展”遴选活动自 2005 年启动,至今已成功举办 19 届。本次活动由自然科学基金委主办,自然科学基金委高技术研究发展中心(基础研究管理中心)和科学传播与成果转化中心承办,《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,分为推荐、初选、终选、审议 4 个环节。《中国基础科学》等推荐了 2022 年 12 月 1 日至 2023 年 11 月 30 日期间正式发表的 600 多项科学研究成果,由近 100 位相关学科领域专家从中遴选出 30 项成果,在此基础上邀请了包括中国科学院院士、中国工程院院士在内的 2 100 多位基础研究领域高水平专家对 30 项成果进行投票,评选出 10 项重大科学研究成果,经自然科学基金委咨询委员会审议,最终确定了入选 2023 年度“中国科学十大进展”的成果名单。

1 人工智能大模型为精准天气预报带来新突破

天气预报是国际科学前沿问题,具有重大的社会价值。现有数值天气预报范式源于 20 世纪 50 年代,即通过超算平台的大规模计算来求解大气运动偏微分方程组,实现对未来天气的预报。近些年使

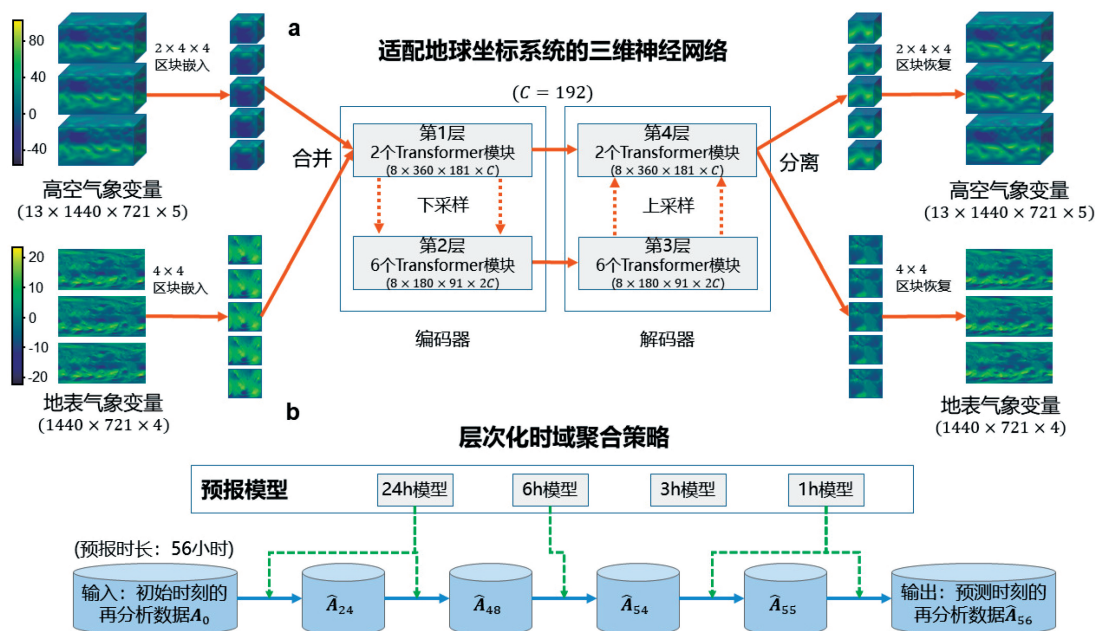


图 1 盘古气象大模型的三维神经网络结构

用该传统方法提升预报水平面临越来越大的挑战。华为云计算技术有限公司田奇、毕恺峰、谢凌曦等基于人工智能技术,提出了一种适配地球坐标系统的三维神经网络,能够有效处理天气数据中的复杂过程,并通过层次化时域聚合策略来有效减少迭代误差,成功实现了精准的中期天气预报。在1979—2017年全球天气再分析数据上训练后,构建了盘古气象大模型。该模型能够预报7天内的地表层和13个高空层的温度、气压、湿度、风速等气象要素,并将全球最先进的欧洲中长期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)集成预报系统的预报时效提高了0.6天左右,在热带气旋的路径预报误差相较于ECMWF预报系统降低了25%。该模型仅需10秒即可完成全球7天重要气象要素的预报,计算速度较数值方法提升1万倍以上。该研究展示了人工智能和大数据在解决天气预报问题上的突破。

2 揭示人类基因组暗物质驱动衰老的机制

人类基因组是生命活动的“密码本”,它控制器官再生和机体稳态,影响器官退化及衰老相关疾病的发生。在该密码本中,素有“暗物质”之称的非编码序列约占98%,其中约8%为内源性逆转录病毒元件,为数百万年前古病毒整合到人类基因组中的遗迹。古病毒序列在衰老过程中的作用及其机制是尚未开拓的科学疆域。中国科学院动物研究所刘光慧、曲静和中国科学院北京基因组研究所张维绮等利用多学科交叉手段,揭示人类基因组中沉睡的古病毒“化石”在细胞衰老过程中,可因表观遗传失稳等因素被再度唤醒、进而包装形成病毒样颗粒并驱动细胞和器官衰老的重要现象。并据此提出古病毒复活介导衰老程序性及传染性的理论以及阻断古病毒复活或扩散以实现延缓衰老的多维干预策略。通过对人类基因组中蛋白编码区域的“逆老”基因进行系统排查,发现可重启人类干细胞、运动神经元和心肌细胞活力,逆转关节软骨、脊髓及心脏衰老的新型

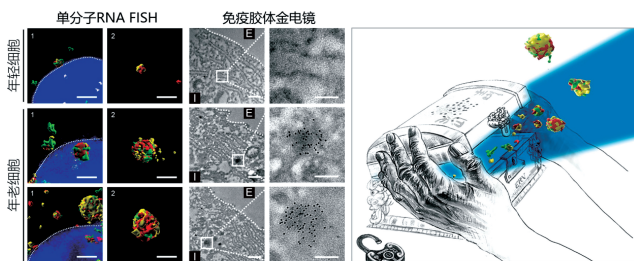


图2 古病毒复活开启衰老的潘多拉魔盒

分子靶标,并构建一系列针对器官退行的创新干预体系。以上发现为衰老生物学和老年医学研究建立了新的理论框架,为衰老及老年慢病的科学干预和积极应对人口老龄化奠定了有益的基础。

3 发现大脑“有形”生物钟的存在及其节律调控机制

昼夜节律紊乱与睡眠障碍、精神抑郁相关,严重时可导致肿瘤、糖尿病等重大疾病的发生和发展。由于缺乏对生物节律调节机制的认识,当前国际上尚未研发出针对节律紊乱性疾病的有效治疗药物。军事科学院军事医学研究院/南湖实验室李慧艳、张学敏等发现大脑视交叉上核(Suprachiasmatic Nucleus, SCN)神经元的初级纤毛,这一细胞“天线”样结构,每24小时伸缩一次,犹如生物钟的指针。初级纤毛通过调控SCN区神经元的“同频共振”调节节律,其机制与Shh(Sonic Hedgehog)信号通路密切相关。因此,SCN神经元的初级纤毛作为机体中“中央生物钟”的结构基础,参与生物钟内稳态的维持,而靶向SCN初级纤毛的Shh信号通路是治疗与昼夜节律紊乱相关人类疾病的潜在治疗策略。该“有形”生物钟的发现,对于理解生物钟的构造以及分子层面与细胞层面生物钟的联系具有重要意义。



图3 初级纤毛——生物钟的“有形”指针

4 农作物耐盐碱机制解析及应用

土壤盐碱化又称土壤盐渍化,是指土壤中积聚盐分形成盐碱土的过程。我国有近15亿亩盐碱地,

其中高 pH 的苏打盐碱地约占 60%。据估计,约 5 亿亩盐碱地具有开发利用潜能。长期以来,我们对植物耐盐碱性的机制认识尚有不足,阻碍了耐盐碱作物的培育和盐碱地的开发利用。中国科学院遗传与发育生物学研究所谢旗、中国农业大学于菲菲、华中农业大学欧阳亦聃等研究团队合作利用起源于非洲萨赫勒高盐碱地的高粱自然群体材料定位克隆到一个与耐碱性显著相关的主效基因 AT1,并揭示了 AT1 在碱胁迫条件下调控水通道蛋白磷酸化水平来促进植物细胞中 H₂O₂ 的外排从而赋予植物高耐盐碱性的机制。在盐碱地进行大田实验发现,基于耐盐碱等位基因 AT1 改良的作物耐盐碱能力显著提高,其中水稻、高粱和谷子等粮食作物均有效增产



图 4 利用 AT1 成果培育的甜高粱在宁夏平罗盐碱地生长情况

20%~30%。该研究为综合利用盐碱地和保障粮食安全提供了新思路。

5 新方法实现单碱基到超大片段 DNA 精准操纵

基因组编辑在生物学和医学领域具有广阔的应用前景。然而,基因组编辑在编辑精度、DNA 操控尺度和灵活性等方面仍有较大的限制。中国科学院遗传与发育生物学研究所高彩霞团队联合北京齐禾生科生物科技有限公司赵天萌团队利用人工智能辅助的大规模蛋白结构预测方法对基因组编辑新酶进行发掘。他们建立了基于三级结构的全新蛋白聚类分析方法,鉴定出多个全新脱氨酶家族成员,并开发了一系列适用于多样化应用场景的新型碱基编辑工具,解决了利用单个 AAV(Adeno-associated Virus)进行递送和大豆高效碱基编辑的难题。为突破植物大尺度 DNA 精准操纵的瓶颈,他们整合优化引导编辑系统与位点特异性重组酶,开发了植物大片段 DNA 精准定点插入技术 PrimeRoot,可实现对 10 Kb 以上大片段 DNA 的高效定点整合。此外,他们通过对基因上游开放阅读框的从头设计与理性改造,开发了精细下调靶蛋白表达的全新技术体系,并创制了产量相关性状呈梯度变化的系列水稻新种质,为作物性状精细改良提供了新方法。以上研究通过开展基因组编辑元件挖掘方法和技术体系创新,实现了对基因组的精准操纵,为作物改良和基因治疗提供了重要支撑。

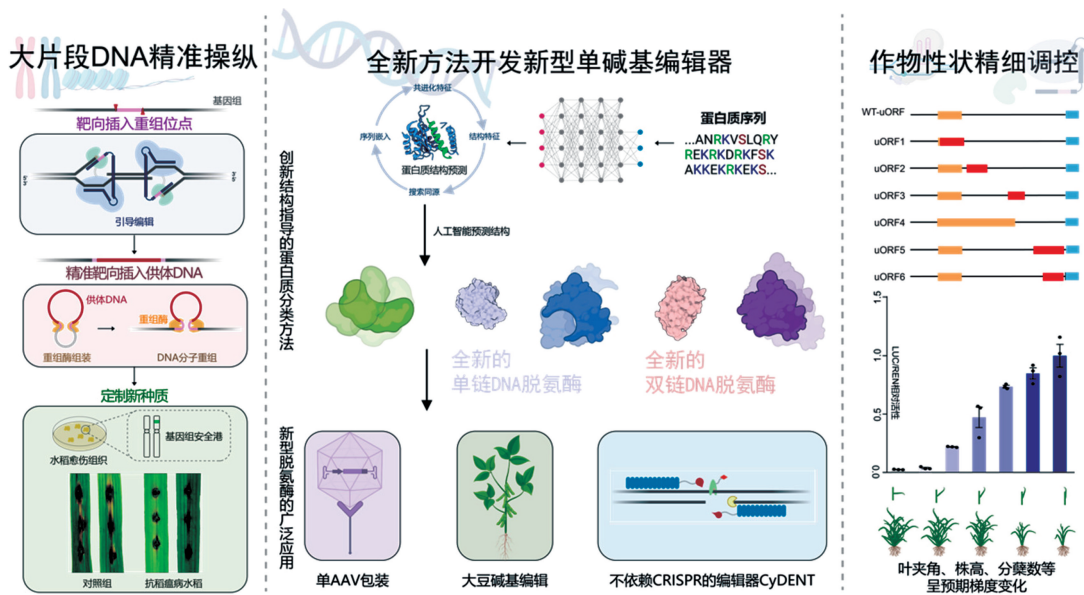


图 5 单碱基编辑到大尺度 DNA 精准操纵

6 揭示人类细胞 DNA 复制起始新机制

DNA 复制起始的精准调控是维持人类基因组稳定、抑制遗传疾病和癌症发生的关键生命过程之一。6 个 MCM 基因编码的 MCM2-7 蛋白的双六聚体(DH)在成千上万个复制原点的组装是解开双链 DNA 和启动复制的必经过程。但是 MCM-DH 在染色体上具体的组装和作用机制尚不清楚。香港大学翟元梁、香港科技大学党尚宇、戴碧瑾等解析了人类 MCM-DH 复合物(hMCM-DH)的 2.59-Å 高分辨率冷冻电镜结构。在该结构中,hMCM-DH 可直

接降低 DNA 双链的稳定性,将位于两个六聚体结合处的 DNA 双链解开,并拉伸产生初始的开口结构(Integration Operating System, IOS)。IOS 在基因组中成簇且广泛地分布于无转录活性的基因间区,并与偶发的 DNA 复制起始区域高度重合。干扰 IOS 会抑制 hMCM-DH 的形成,进而抑制相应 DNA 复制的启动。该研究不仅揭示了人类 MCM-DH 组装及初始 DNA 解旋以促进复制起始的新机制,也为开发以 DNA 复制为靶标的抗癌药物提供了重要基础。

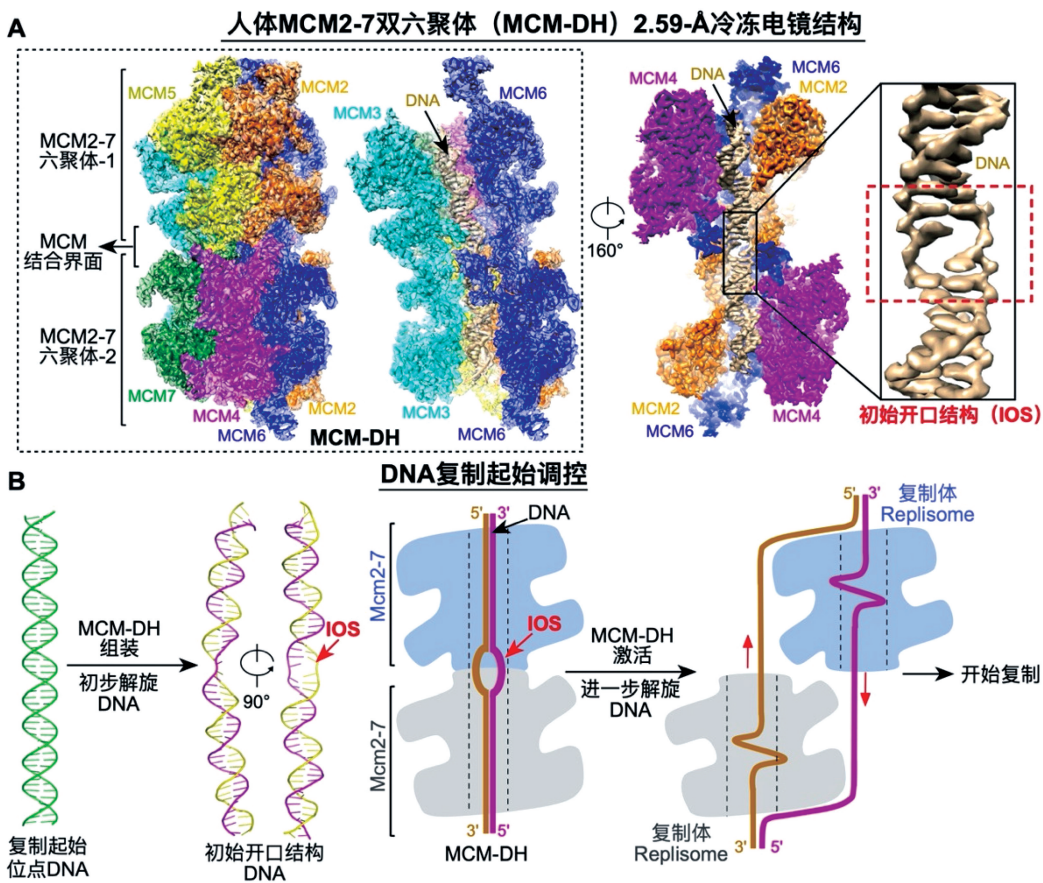


图 6 人体 MCM2-7 双六聚体(MCM-DH)冷冻电镜结构及 DNA 复制起始调控步骤

7 “拉索”发现史上最亮伽马暴的极窄喷流和十万亿电子伏特光子

伽马射线暴是宇宙大爆炸之后最剧烈的天体爆炸现象,万亿电子伏特(TeV)以上辐射观测对揭示其爆炸过程、辐射机制和探索新物理前沿都具有重要意义。2022 年 10 月 9 日,史上最亮的伽马射线暴 GRB 221009A 爆发信号飞越 24 亿光年的时空抵达地球。由中国科学院高能物理研究所曹臻领导的

高海拔宇宙线观测站(简称“拉索”,Large High Altitude Air Shower Observatory, LHAASO)国际合作组凭借拉索前所未有的高灵敏度和大视场优势,在国际上首次完整记录了伽马射线暴万亿电子伏特以上高能光子爆发的全过程,包括高能光子亮度在早期的快速增强过程,以及后期亮度突然快速减弱,由此确定此伽马射线暴的极端相对论喷流具有迄今已知最小的张角,揭开了此伽马射线暴成为史上最亮的秘密。拉索还精确测量了该伽马射线暴

亮度随光子能量的变化,发现其亮度随能量变化的规律保持稳定,观测能谱延伸至十万亿电子伏特以上,超出了理论预期,挑战了伽马射线暴余辉辐射的标准模型。

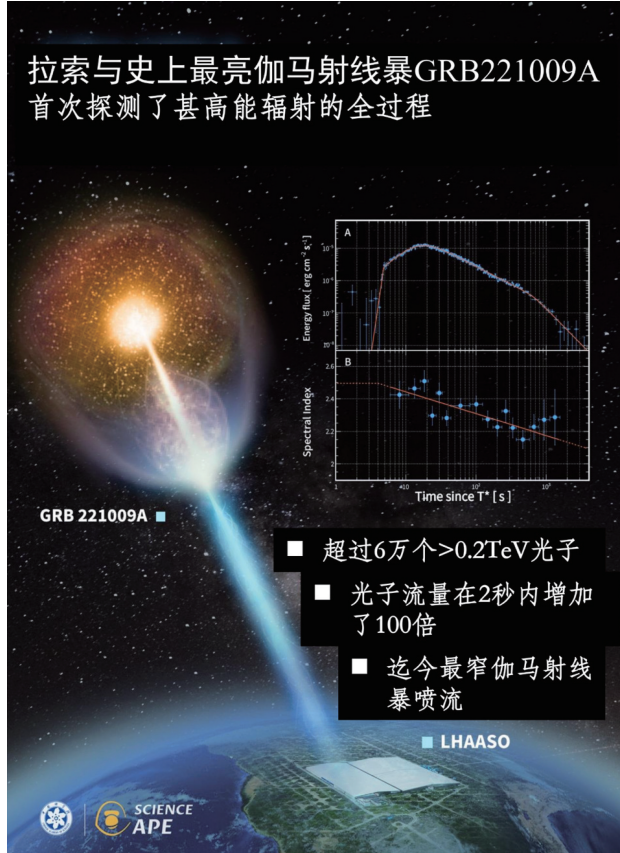


图 7 拉索观测到的伽马暴 GRB 221009A 高能光子爆发的全过程

8 玻色编码纠错延长量子比特寿命

目前超导量子比特的错误率离实用化还相差十多个数量级,需要进行量子纠错以构建错误率更低的逻辑量子线路。量子纠错旨在充分利用无限维希尔伯特空间的冗余度来保护逻辑量子比特免受噪声的干扰。通过对错误的实时探测和纠正,逻辑量子比特的相干寿命将得以延长。然而,传统的量子纠错过程通常会不可避免地引入新的错误,使得量子纠错面临“越纠越错”的尴尬局面。如何使编码保护的逻辑量子比特的寿命超过体系中最佳物理量子比特,超越盈亏平衡点,是衡量量子纠错是否有效的关键判据。南方科技大学俞大鹏、徐源,福州大学郑仕标,清华大学孙麓岩等展示了一种基于超导电路量子电动力学架构的量子纠错方法,其核心技术是将逻辑量子比特二项式编码在一个与辅助超导比特色散耦合的微波谐振腔的离散光子数态中,其编码于

空间与错误子空间严格正交。通过在辅助比特上施加截断频率梳脉冲,可高保真度地重复读取错误症状,并通过实时反馈控制反复纠正错误,从而有效延长逻辑量子比特的相干寿命,并超越盈亏平衡点达 16%,实现了量子纠错正增益。该研究展示了量子纠错的优越性,表明了硬件高效的离散变量编码在容错量子计算中的潜力。

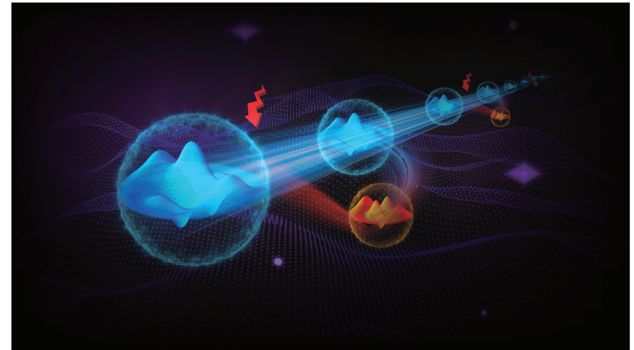


图 8 量子纠错过程

9 揭示光感受调节血糖代谢机制

光是生命最重要的外部环境因素之一,可调节一系列重要生理与病理过程。公共卫生研究表明,人造光是代谢紊乱的高危因素,例如夜间光污染会显著增加糖尿病等代谢性疾病风险。然而,光对血糖代谢调节的生物学机制不明。中国科学技术大学薛天等揭示了光调控生物(小鼠和人)血糖代谢的神经机制。在动物模型上发现光信号被眼内的视网膜固有光敏神经节细胞(ipRGCs)接收后,通过下丘脑视上核 AVP(Arginine Vasopressin)神经元、脑干孤束核 GABA(γ -Aminobutyric Acid)抑制性神经元,经交感神经最终到达棕色脂肪组织。光通过这一多级神经环路抑制棕色脂肪的交感神经活动,降低脂肪组织消耗血糖引起的产热,导致机体血糖代谢能力下降。更为重要的是发现在人体上同样存在类似的光感受调节血糖代谢的机制,蓝光污染显著降低

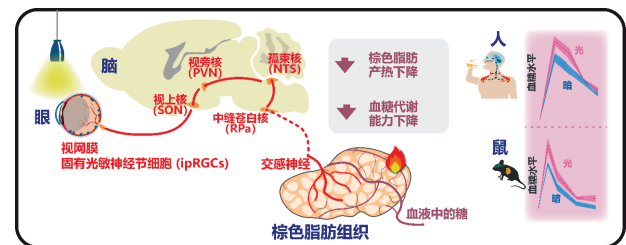


图 9 “眼—脑—棕色脂肪轴”介导光调节血糖代谢神经机制

人体消耗血糖的能力。该研究发现全新的“眼—脑—外周脂肪轴”介导光对血糖代谢产热的调节机制,为防治光污染导致的糖代谢紊乱相关疾病提供了理论依据与潜在的干预靶点。

10 发现锂硫电池界面电荷存储聚集反应新机制

锂硫电池具有极高的能量密度(理论值:2600 Wh kg⁻¹)和较低的成本,然而受限于传统原位表征工具的时空分辨率及锂硫体系的不稳定性和环境敏感性等因素,在原子/纳米尺度上对锂硫电池界面反应的理解尚不深入。厦门大学廖洪钢、孙世刚和北京化工大学陈建峰等开发高时空分辨电化学原位液相透射电镜技术,耦合真实电解液环境和外加电场,

实现对锂硫电池界面反应原子尺度动态实时观测和研究。发现电池活性材料表面分子聚集成为分子团进行反应,电荷转移可以首先存储在聚集分子团中,分子团得到电子但不会发生转化,直到获得足够电子后瞬时结晶转化。而没有活性的材料表面遵循经典的单分子反应途径,多硫化锂分子逐步转化为Li₂S。模拟计算表明,活性中心与多硫化锂之间的静电作用促进了Li⁺和多硫分子的聚集,证实分子聚集体中的电荷可以自由转移。近百年来,电化学界面反应通常被认为仅存在“内球反应”和“外球反应”单分子途径。该研究揭示了电化学界面反应存在第三种“电荷存储聚集反应”机制,加深了对多硫化物演变及其对电池表界面反应动力学影响的认识,为下一代锂硫电池设计提供指导。

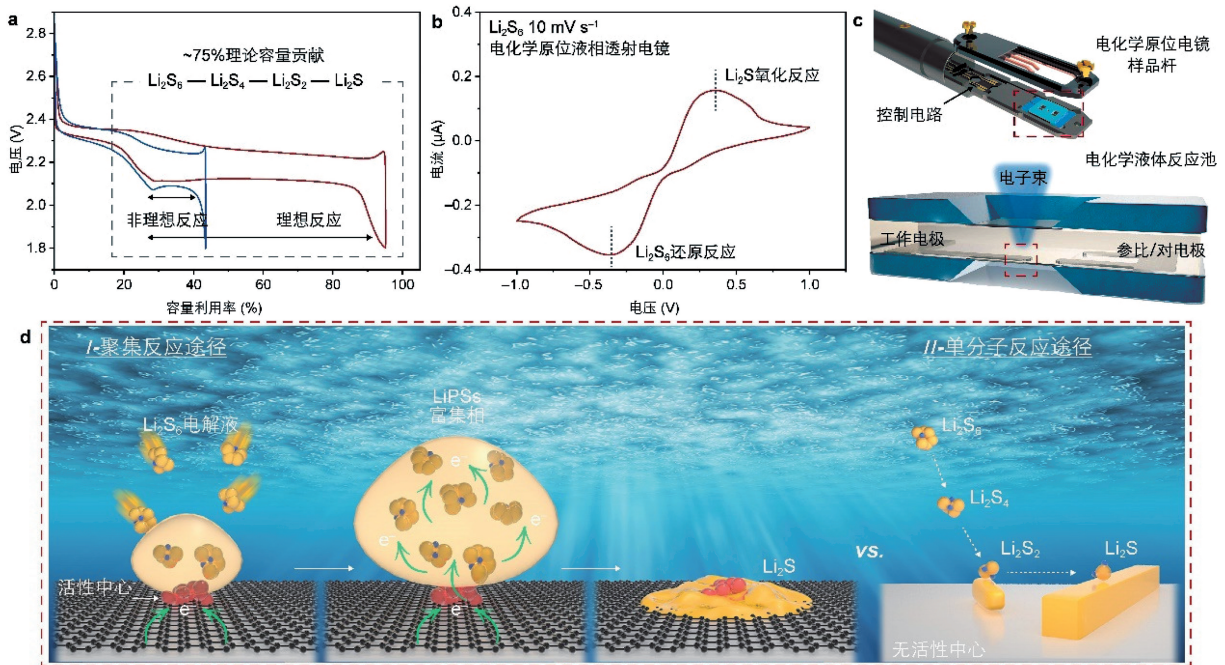


图 10 电化学原位透射电子显微镜技术研究锂硫电池界面反应

(来源:国家自然科学基金委员会高技术研究发展中心(基础研究管理中心))