中国科学报

CHINA SCIENCE DAILY

总第 9116 期　2026 年 11 月 13 日　星期五　今日 4 版

中国科学院主管　中国科学报社出版

国内统一连续出版物号 CN 11－0084　代号 1－82

主办：中国科学院　中国工程院　国家自然科学基金委员会　中国科学技术协会

听《中国科学报》　《中国科学报》官微　科学网 App　科学网官微

新浪微博 http://weibo.com/kexuebao　　科学网 www.sciencenet.cn

钙钛矿晶硅叠层电池：从地面到太空

■本报见习记者 金梦婷

对一颗卫星而言，能源的重要性不言而喻。仅那对太阳能电池翼，就占到成本的 1/5。

传统空天用的多结砷化镓电池，效率高、稳定性好，但工艺复杂、原材料稀缺，成本居高不下，一平方米要几十万元，被业内称为“像金子一样昂贵”。

与此同时，相应的需求还在增加：无论是拓展太空光伏技术，还是推进低轨卫星星座的大规模部署，甚至构建太空算力中心，这些应用场景对电源系统的共同要求是质量轻、效率高、成本可控的太阳能电池翼。

近日，苏州大学（以下简称苏大）教授张晓宏、刘江团队牵头制备的钙钛矿晶硅叠层电池获得 35.1%的稳定光电转换效率并获得第三方认证。相关成果发表于《自然》。“这追平了多结砷化镓电池的效率，但预计成本不到其 1%。”论文第一作者、在苏大从事博士后研究的方正告诉《中国科学报》。

从地面光伏到空天光伏

这项研究并非以太空为起点。2018 年团队开始从事钙钛矿晶硅叠层电池相关研究时，目标是替代地面晶硅光伏。当时地面晶硅电池的光电转换效率约为 22%，团队的叠层样品效率仅略高于 20%。

所谓钙钛矿晶硅叠层电池，是将两种吸光材料上下叠加：顶层为钙钛矿电池，主要吸收可见光；底层为晶硅电池，主要吸收钙钛矿难以利用的长波段红外光。单结晶硅电池的光电转换效率理论极限为 29.4%，其中相当一部分损耗来自高能光子的能量以热的形式散失。叠层结构为这部分能量提供了高效利用的通道，可将理论光电转换效率上限提升至 43%以上。经过七八年迭代，团队制备的电池在实验室中的转换效率提升至 33%。

2025 年，团队在柔性叠层电池界面调控方面取得了两项突破。今年 1 月 1 日，这两个研究成果同期发表于《自然》。团队在 60 微米厚的超薄硅片上实现了 33.6%的认证效率，在 261 平方厘米的商业硅片上实现了 29.8%的认证效率，创下柔性叠层电池的两项世界纪录；器件经 43000 次极端弯折后，仍保持初始效率的 97%。

这为行业提供了一个新的判断：叠层电池不仅可用于地面，也具备空天应用的可能。“我们发现这个技术的效率能够对标太空光伏，并且成本优势突出。基于这一特点，我们调整方向，重点开发附加值更高、应用性更强的产品，主动对接国家发展战略。”方正说。

降低成本背后的技术突破

传统空天所用的多结砷化镓电池的高成本并非工艺所致，而是源于两个长期受限的环节：外延生长设备与吸收层原材料。

这类电池的外延生长依赖金属有机化学气相沉积（MOCVD）设备，核心装备长期依靠进口，产线投入较高；其吸收层所用原材料多为稀有金属，价格昂贵且供给受限。

相比之下，团队采用的在晶硅电池上叠加钙钛矿层的技术路线大幅降低了成本：钙钛矿可采用溶液法低温涂布制备，无需高温扩散与昂贵真空设备，原材料亦为常见元素。方正表示，新电池每平方米的成本约为数百元。仅就材料成本而言，不到多结砷化镓电池的 1%。

不过，新方法并非简单将两层材料叠加起来，而是涉及一个关键的技术创新。

为提升光吸收能力，晶硅底电池表面通常被刻蚀成密集的金字塔绒面，形成明显的微观起伏。钙钛矿与晶硅之间需要沉积一层约几纳米厚的自组装单分子层，由它选择性提取并输运空穴。然而，单分子层分子之间容易发生强烈的 π－π 堆叠，进而趋于无序聚集，导致它在金字塔尖峰等起伏部位难以实现均匀覆盖，局部区域因此裸露，载流子在这些位置发生复合损失。

对此，团队提出的方案是“空间共轭”分子设计：在分子内部引入可控的扭转，保持分子电荷传输能力的同时，抑制分子间的过度堆叠，从而在粗糙绒面上实现较为均匀的保形覆盖，覆盖率超过 80%。

审稿人认为，这项工作回应了该领域一个真实而重要的难题：在粗糙的金字塔织构上，如何既保住分子的共轭程度与导电能力，又实现贴合表面的均匀覆盖。

正是这个界面上的突破，将电池的光电转换效率从 33.6%提升到了35.1%。“这个数字差距看起来小，但在电池领域其实已经是很大的突破了。”方正说。

进入太空还须过几道关

这项成果的研发集合了高校和企业共同的力量。团队所研发的叠层电池底部的晶硅电池由隆基绿能科技股份有限公司提供并持续优化，顶部的钙钛矿电池由苏大和西北工业大学合作研发。

在刘江看来，头部企业拥有雄厚的工程化能力，可快速推进技术放大，实现产品的高可靠性与稳定性；而高校的核心优势体现在原始创新与机理解析层面，二者形成优势互补、各有侧重的分工格局。

产业界的参与，也让这项研究的验证走得更远。除效率认证外，团队已完成弯曲试验、高低温循环、长期光照稳定性及不同温度下的稳定性测试。

而钙钛矿晶硅叠层电池想要真正实现太空应用，还须通过一系列极端环境适应性考验。

太空环境与地面差异显著。低轨卫星在轨运行期间，需承受 −120℃至 150℃的冷热交替，膜层材料在反复热胀冷缩下容易开裂。与此同时，太空中高能粒子、紫外线辐射会损坏电池，低轨环境特有的原子氧也会缓慢腐蚀电池组件。

针对这些难题，团队下一步计划进行各种极端环境下的验证测试，特别是长时间的高低温循环测试。“我们将在地面模拟 5 年 25000 次循环，电池效率要维持在 80%以上，才能达到产业化的可行性要求。”刘江说。

相关论文信息：*https://doi.org/10.1038/s41586-026-11226-8*

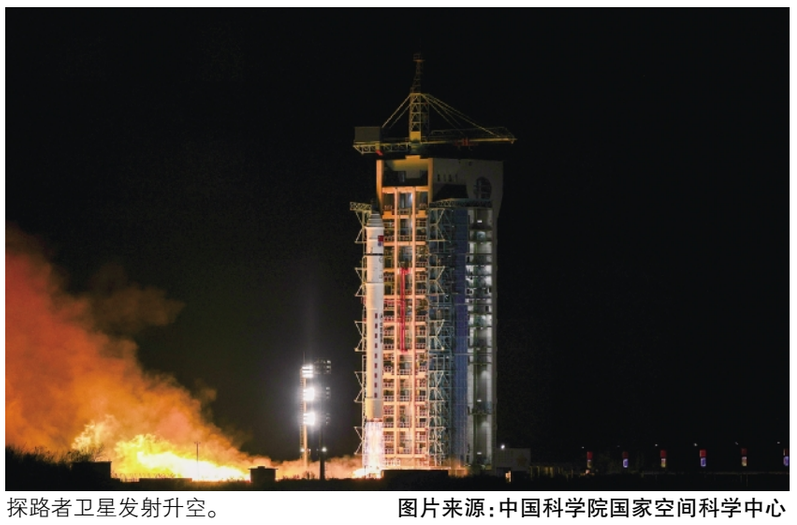
探路者卫星成功发射

本报讯（记者倪思洁）11 月 11 日 19 时 41 分，我国在酒泉卫星发射中心使用长征二号丁（CZ-2D）Y108 运载火箭，以一箭四星组合体方式，成功将探源计划探路者卫星发射升空。卫星顺利进入预定轨道，发射任务取得圆满成功。

探路者卫星是太空探源科学卫星计划的技术试验星，将对“鸿蒙计划”“夸父二号”以及国家空间科学中长期发展规划中具有引领性和重大应用前景的有效载荷关键技术进行在轨验证并开展在轨试验。验证任务结束后，将开展空间环境监测示范探测和研究。卫星设计寿命 2 年，运行于轨道高度 600 千米的太阳同步晨昏轨道。

据悉，探路者卫星工程研制 A、B、C、D 四颗卫星。A 星载荷包括磁场与速度场成像仪（MHI）、甚大面积伽马射线空间望远镜探路者（VLAST-P）、高分辨率大气边界层激光探测仪（HiRAL）、朗缪尔探针（LMP）和空间天气效应监测仪（SWEM）。BCD 星以编队方式构成空间分布式低频干涉成像谱仪技术试验系统。卫星入轨后完成 A 星与 BCD 星组合体分离，以及 BCD星分离部署、编队控制和星间测量验证，开展有效载荷在轨技术验证和试验。

探路者卫星工程由中国科学院负责组织实施。



探路者卫星发射升空。　图片来源：中国科学院国家空间科学中心

科研人员开发环形 RNA 单分子成像技术

本报讯（见习记者郑浩威）如果把细胞里大多数的线性 RNA 想象成一根根细线，环形 RNA 就是首尾闭合相接的小绳圈。将它们“分清”并不容易，环形 RNA 与同源线性 RNA 序列几乎相同，就像两根材质和花纹一样的绳子，只能在绳子的“接头处”看出区别。中国科学院分子细胞科学卓越创新中心研究员陈玲玲研究组开发的 abcFISH 技术，正是靶向这一独特接头，将单个靶点信号放大为显微镜下可辨认的荧光亮点，让研究人员能够在细胞和组织切片中对环形 RNA 进行观察、计数和定位。相关成果近日在线发表于《自然－方法》。

除独特的反向剪接位点（BSJ）外，环形 RNA 与同源线性 RNA 共享外显子序列，因此难以被特异识别。同时，多数环形 RNA 较短、丰度较低，进一步增加了检测难度。传统单分子荧光原位杂交（smFISH）技术通常需要多条探针共同结合，而短分子难以提供足够的结合位置。因此，亟须开发一种兼顾特异性和灵敏度，并支持多重成像的检测方法。

abcFISH 技术利用锁探针和引物探针分别识别环形 RNABSJ 两侧的序列。当两种探针在接头处相邻结合后，T4DNA 连接酶将锁探针连接成一个 DNA 环。随后，ϕ29DNA 聚合酶以引物探针为起点，以 DNA 环为模板进行复制，生成一条含有大量重复序列的 DNA 长链，这一过程称为“滚环扩增”。最后，多条荧光探针结合到这些重复序列上，将单个环形 RNA 对应的信号放大为显微镜下清晰可见的荧光亮点。

该技术支持多重荧光信号标记，可区分同一基因产生的多种环形 RNA 亚型。研究人员用不同颜色的荧光信号标记不同目标，实现了在同一细胞中同时观察三种环形 RNA，并分别测量其数量和分布。

abcFISH 技术能够在保留组织结构的切片中直接检测环形 RNA，将环形 RNA 的表达情况与其空间位置对应起来。除了常规组织切片，abcFISH 技术还能够用于福尔马林固定石蜡包埋样本。

该成果为环形 RNA 功能解析、疾病转化研究提供了全新工具。

相关论文信息：*https://doi.org/10.1038/s41592-026-03299-0*

新策略让仿珍珠层材料强韧不再“挑方向”

本报讯（记者王敏）中国科学技术大学教授高怀岭、孙晓昊与上海交通大学教授邹多宏等合作，提出同心砖泥结构设计策略，通过重组微片的排列方式改善材料在压缩、弯曲和扭转条件下的力学表现，并显著提升抗疲劳性能。近日，相关成果在线发表于《国家科学评论》。

天然珍珠层由坚硬的矿物微片与柔软的有机相交错排列，形成兼具强度与韧性的砖泥结构。然而，传统平板砖泥结构具有明显的力学方向依赖性，方向一致的层间界面容易成为损伤扩展的通道，限制了材料在复杂、多向载荷条件下的可靠性。

针对这一问题，研究团队通过自组装成膜、薄膜卷绕及前驱液灌注与原位聚合，构筑了同心砖泥结构复合材料。该设计将氧化铝微片组织为围绕轴心排列的同心层状结构，使得层间的薄弱方向不再统一指向一处，而是绕轴心呈轴对称散开，不再形成贯穿整个材料的弱面，为改善棒状材料在多种加载方式下的力学响应提供了新思路。

研究团队以组成和密度接近的平板砖泥复合材料作为对照，系统开展力学测试。结果表明，在所测试的压缩、弯曲和扭转载荷下，同心结构均表现出更高的强度和耗能能力。断口形貌观察发现，同心结构中的裂纹沿轴向、径向及环向曲折扩展，与平板对照中较为集中的层间分层和阶梯状断裂形成对比。

有限元模拟显示，同心排列有助改善载荷传递、分散应力并减轻局部应力集中，与实验观察相互印证，为理解结构重组带来的力学性能提升提供了依据。

在循环弯曲测试中，同心结构展现出突出的抗疲劳优势。在所比较的相同最大应力条件下，其疲劳寿命超过平板对照的 1000 倍；按各自静态弯曲强度归一化后，在相应比较区间仍具有超过 100 倍的寿命优势。循环力学响应与三维 X 射线显微成像结果共同提示，同心结构有助于延缓不可逆损伤累积，抑制局部损伤形成连续破坏通道的趋势。

研究团队还将材料加工成传动轴原型和精密机械结构件，展示了其加工与工程应用潜力。该研究通过空间重组层间薄弱方向，为面向多向载荷服役环境且兼顾承载能力、耗能与抗疲劳性能的仿生结构材料提供了新的设计思路。

相关论文信息：*https://doi.org/10.1093/nsr/nwag681*

他要给全国的湿地“做体检”

■本报记者 沈春蕾

“看得清、算得准、用得上。”这是中国科学院东北地理与农业生态研究所（以下简称东北地理所）研究员毛德华团队在湿地监测评估方面追求的目标。

近日，毛德华在接受《中国科学报》采访时透露，在遥感大数据和云计算平台的支持下，团队首次实现了 10 米空间分辨率、年度连续更新（2016—2024 年）的国家尺度湿地动态监测，平均总体精度达到 81%以上。相关研究成果发表于《国际摄影测量与遥感期刊》。



受访者供图

从“大致在哪”到“精准定位”

“我们的工作就是要给东北乃至全国的湿地‘做体检、建档案、开药方’。”毛德华介绍，团队利用卫星遥感、大数据和模型模拟，精准看清湿地在哪里、怎么变、为什么变、会带来什么生态后果。

东北黑土地是我国湿地的主要分布区，也是保障国家粮食安全的“压舱石”。这里湿地与耕地空间交错、相互转化频繁，且时空异质性强。如何在保障国家粮食安全的同时，守住生态红线？为此，毛德华团队应用科技手段，以多视角评估湿地农田化与退耕还湿等的效应问题。

毛德华告诉记者，随着科技的发展，湿地监测评估手段发生了很大的变化：20 世纪 80 年代，湿地监测评估主要依赖野外调查绘制地图；20 世纪 90 年代，随着中巴资源卫星的发射，湿地监测评估从人眼判断变为电脑勾绘。

自 2008 年来到东北地理所读硕士研究生以来，毛德华一直从事湿地遥感相关的研究和工作，在全国湿地精准分类制图和碳储量估算方面取得了具有代表性的研究成果。

2025 年，毛德华等人构建了 30 米空间分辨率的中国国家尺度湿地空间分布数据集。该数据集由 3 个湿地一级类、14 个湿地二级类组成，包括 1980 年、1990 年、2000 年、2010 年、2015 年和 2020 年共 6 期数据。

随着遥感大数据、人工智能和地面观测深度融合，毛德华发现，湿地监测正从过去“大致在哪、大概多少”的判断提升到“逐年变化、精准定位”的认知，这为国家湿地资源调查、生态保护红线认定、自然保护地优化整合等提供了第一手本底数据。

敢坐“冷板凳”，敢闯“无人区”

今年 4 月，毛德华获共青团中央、全国青联颁发的 2026 年度新时代青年先锋奖。从事科研工作这些年来，毛德华越来越深刻地体会到，要在科研领域真正做出经得起检验的成果，既要有坐得住“冷板凳”的定力，也要有敢闯“无人区”的锐气。

面对研究中遇到的瓶颈、失败和无数挫折，科研人员也会产生困惑和焦虑。毛德华的做法是，把视野放宽、把失败和瓶颈当作科研的常态，并坚信自己一定能做出真正有影响力的工作。

“做科研不仅要有坚定的意志力，还要付诸行动。”为了能把全国的湿地分布制图和碳库储量估算做得更准确，毛德华进行了大量的野外调查。“在开展湿地遥感的地面观测时，我们需要穿着下水裤，背着不能接触水的设备，在太阳最好的时间段进入沼泽地里开展测光谱、飞无人机等工作，被蚊子叮咬甚至中暑都是常态；为减少水对观测数据的影响，我们还需要在秋冬季节刚刚结冰的时候，先挖一米深的土壤剖面，然后趴在冰凉的地上取土壤下层的样品。”

团队的付出换来了长时序且具有一致性的国家尺度湿地分布及景观演变数据集。基于这些大尺度数据集，团队采用机器学习等方法系统评估了 1980 至 2020 年间中国湿地景观变化对土壤有机碳库的影响。

毛德华介绍，在这 40 年间，我国湿地农田化导致累计损失约 574.66 万亿克碳，约占全国湿地土壤碳库的 10.6%；湿地恢复（退耕还湿）促进了土壤有机碳的增加；保护和恢复措施能够共同抵消湿地农田化所导致的一多半碳损失，其中恢复措施贡献了 186.36 万亿克碳的增加，约占全国湿地土壤碳库的 3.43%，抵消了约 32.4%的湿地农田化导致的碳损失。

研究结果显示，湿地保护与恢复在减缓碳损失的同时，还提升了陆地生态系统碳汇能力，为实现“碳中和”目标发挥了重要作用，也为制定基于科学证据的湿地管理与土地利用政策提供了关键依据。

青年科研人的责任与担当

作为一名年轻的科研工作者，毛德华一直在思考：新时代的青年科研人，究竟该以怎样的姿态立身处世、担当作为。

在他看来，青年科研人员应不局限于个人得失、论文数量，把研究方向对准国家急需、人民福祉，把论文写在祖国大地上；要敢闯敢干、勇于创新，寻找和突破领域内的难点问题，在科学研究中勇挑重担；要脚踏实地、甘于奉献，在生态、地理、农业这些“慢科研”领域，更要坐得住“冷板凳”，把一件事做深、做透、做出实效。

毛德华从事的湿地遥感、景观变化及其生态效应研究就属于“慢科研”。多年来，他搭建了湿地景观“格局－过程－效应”的研究框架，推动了湿地科学、遥感科学、景观地理学的学科交叉研究，开发出湿地生态系统监测评估方法，明确了湿地对全球变化的响应。相关研究成果对指导国家和区域湿地可持续管理等具有重要的科学意义和应用价值。

（下转第 2 版）

科苑星光　青春之歌

美国出新规监管合成 DNA

寰球眼

本报讯 随着人们日益担忧人工智能会让危险病原体制造变得更加容易，受美国政府资助的从事 DNA 序列合成与编辑的科研人员，将面临更为严格的监管。

据《科学》报道，美国近日发布《核酸合成筛查国家政策》，首次要求这类研究人员必须从美国官方核准的供应商处采购。这些供应商需要核验客户身份，并对订单开展筛查，排查存在潜在风险的序列。

这一硬性政策要求将在未来 340 天内分阶段落地。部分生物安全专家认为，尽管方案尚有局限，却是朝着正确方向迈出的重要一步。“筛查从自愿执行变成需要核验落实，是实实在在的进步。”美国斯坦福大学的 Drew Endy 说。

科研人员合成 DNA 已有数十年历史，但近几十年的技术进步让人们能够合成越来越长的序列，并将其组装成基因，甚至完整的细菌、病毒基因组。以前生物实验室常常在线向企业订购这些序列，而现在台式 DNA 合成设备可以让科研人员在实验室里自主合成目标序列。

美国麻省理工学院的 Kevin Esvelt 表示：“这项政策值得肯定，至少我们开始采取行动了。它会使滥用 DNA 变得更加困难。”不过，Esvelt 认为其中一些关键表述仍然模糊。比如，政策仅要求筛查长度为 50 个碱基对及更长的 DNA 序列。而图谋实施生物恐怖活动的人，可以向多家不同供应商分别订购大量短片段，再拼接出危险序列。

Esvelt 还指出，目前监管对象只覆盖接受联邦资金资助的科研人员。他希望该政策能够推动相关企业对所有客户落实筛查要求。

“这项政策只在美国境内生效。”美国约翰斯·霍普金斯大学的 Gigi Gronvall 担心，监管重心放在合成 DNA 上却没有堵住制造危险病原体的其他途径。“还有许许多多改造 DNA 的手段，并不一定需要从头合成。”

Gronvall 同时提出，政策只针对新出厂的 DNA 合成设备，而市面上大量已经投入使用的台式仪器依然存在被滥用的风险。政策虽然鼓励厂商推出以旧换新或者回购方案，但并非强制执行。

美国政府将落实监管、保障新规执行的任务交给美国国家标准与技术研究院（NIST），却没有配套足够经费支撑。“NIST 需要在很短时间内完成大量工作，经费能否到位还不确定。”Endy 说。在 Esvelt 看来，这项政策会给各机构的生物安全专员增加巨大工作量。（王方）