

搁置十余年的样本，揭开中亚西风秘密

■本报记者 李媛

2011 年，为补齐学界对西风带上游中亚地区的认知短板，蔡演军从西安出发，只身前往乌兹别克斯坦北部洞穴采集石笋样品。可他将样品拿到实验室测试分析后却发现，这批石笋的氧同位素记录对于其记录时段北半球发生的 DO 事件（快速变暖事件）没有明显响应。这一结果让他大失所望，只能把这批“没有价值”的样品存放起来。

2026 年，已是西安交通大学人居环境与建筑工程学院教授的蔡演军，经过十余年积累，基于重新采集和测试分析的石笋样品，带领团队建立跨越约 4.7 万年的中亚干旱区精确测年、高分辨率石笋氧同位素记录，厘清了不同气候背景下西风带变化对区域水汽来源和输送路径的调控机制。

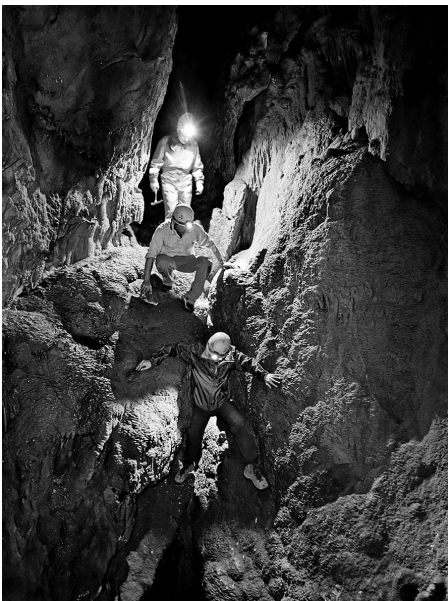
该研究不仅解决了中亚地区古气候记录之间的矛盾，也为研判未来水资源安全提供了科学依据。相关成果近日发表于美国《国家科学院刊》。

样品先放一放

2011 年，国际学界对东亚季风相关研究不断深入，但西风带上游的中亚地区依旧存在不少研究空白。当时，学界着重讨论东亚地区季风与西风的相互作用，但西风带本身如何演变始终缺少关键证据，蔡演军便把研究目光投向中亚。

蔡演军向《中国科学报》介绍，中亚地处欧亚大陆腹地，是全球典型的干旱—半干旱区，区域社会发展和生态安全高度依赖有限的水资源。受喜马拉雅、帕米尔高原、兴都库什山和天山等高大地形阻挡，印度洋水汽难以大规模进入中亚，区域降水水汽主要依靠西风环流输送。来自北大西洋、黑海、里海、地中海及西亚等不同源区的水汽可沿多条路径进入中亚，且其相对贡献会随西风带位置和强度的变化而发生调整。

“长期以来，不同地质记录对中亚过去湿度变化的趋势及其驱动机制存在不同认识，特别是中亚降水如何响应北方温带环流与南方副热带环流的变化，以及西风带调整如何重组区域水汽来源，仍缺乏长时间尺



2019 年，蔡演军（后）和国际团队在乌兹别克斯坦北部洞穴采样。受访者供图

度、高精度记录的约束。”蔡演军解释道。

蔡演军前往乌兹别克斯坦塔什干北部一个区域的两个洞穴采样。他还记得，其中一个洞穴是通过当地居民介绍获知的，等到实地才发现，洞口被砾石掩埋，经过挖掘、搬开一块石头后，才露出一条长约 3 米、仅供一人爬行通过的洞口。洞穴勘探完成准备出洞时，一同前往的德国学者因为体形偏大卡在洞口，费了很大力气才钻出来。

“去之前我们对这两个洞穴了解很少，采样时根本不知道样品属于哪个年代，在实验室通过铀系测年后发现这批样品属于末次冰期。”蔡演军说。带回的石笋数据显示，样品几乎记录不到 DO 事件的信号。

“当时心里凉了半截。”他将这批数据搁置下来，“如果只是发表一条石笋记录曲线，说不清楚背后的科学问题，就没有太大意义，只能先放着，等待机会。”

移动的屏障

转机出现在 2019 年。第二次青藏高原综合科学考察将中亚纳入周边研究范围，再加上“一带一路”倡议下国际合作不断推进，蔡演军带领团队再次前往乌兹别克斯坦。

巧合的是，西安交通大学教授程海团队此前发表的乌兹别克斯坦南部石笋记录，与蔡演军获取的北部序列变化趋势完全相反。“这次我们采到包含全新世的完整样品，再结合南北区域数据开展对比研究，研究逻辑才站得住脚。”蔡演军说。

同一个国家，南北两地的古气候信号却截然相反。这组对比给了蔡演军重要启发：乌兹别克斯坦恰好处在副热带与温带气候的交界带上。“这让我对这项研究更感兴趣，也成为理解西风水北摆动机制的突破口。”为此，团队大胆推测并初步分析认为，末次冰期较冷的气候背景下，中亚南部更多受副热带系统影响，水汽同位素与其南部的源区联系密切；北部受温带气候主导，同位素信号更多响应北方源区的水汽变化。

随后，团队通过气候模拟分析验证了这一猜想。结果显示，西风带并非固定不动，可以将其理解为一道移动的屏障，随着气候冷暖发生南北摆动。屏障向北移动，南方水汽更容易输送过来；屏障向南移动，北方水汽的贡献就会占上风。

冰期石笋为何对 DO 事件反应微弱？蔡演军给出两种解释：冰期大冰盖的存在可能使得中亚地区大气环流相对稳定，中亚处在温度响应的关键过渡位置，模拟结果显示 DO 事件的温度波动到这里被削弱，不足以留下明显记录；另外，降水季节变化和温度的同位素效应相互抵消，也会抹平相关信号。

“我们关注的不仅是降水变多还是变少，更要看降水的水汽来自哪里。”蔡演军以威海、里海的变化举例，威海大面积萎缩，里海水位下降，会导致北方水汽供给减少。如果未来南方水汽占比上升，中亚低海拔地带冬季降水会增多，但如果春季降水减少，春季土壤储水将随之下降，当地农业就需要调

整播种安排。他表示，中亚水文环境的改变，不只是降水量增减，本质是水汽来源与输送路径发生重组。

以往黄土、湖泊等古气候记录，经常在中亚南北区域得出相互矛盾的结论。这项研究解释了这种空间差异——相距不远的地点，可能归属于完全不同的气候系统。

敢在复杂区域做研究

结合团队的研究和模式模拟分析来看，未来全球变暖情形下，中亚区域水汽来源有可能更多由南方供给。当水汽更多来自南方时，降水的季节特征也会随之改变。受北方水汽主导时，当地以春季降水为主；一旦南方水汽贡献增加，则会转变为以冬季降水为主。降水季节格局一旦改变，区域水资源条件也将发生根本性变化。

蔡演军解释道，如果降水集中在紧邻夏季的春季，蒸发损耗相对较低，到夏季植被生长季，能够留存更多水分，更利于植被生长。但倘若降水以冬季为主，之后还要经历偏干旱的春季，水资源的年内分配模式就会完全改变，对区域生态安全也会产生截然不同的影响。

“这些分析结果对当地的农业生产有实际的指导意义。”蔡演军说，后续团队将通过系列工作完善整体研究体系，在厘清乌兹别克斯坦南北部变化特征的基础上，聚焦处于过渡带、信号频繁摆动的中部地区，依托已采集样品开展实验分析，探究中部区域的响应规律，以此验证前期研究结论。同时，持续推进上游区域的相关研究，完善现有研究框架。

从一度被视作毫无用处，到补上西风带研究的关键缺口，十余年的坚持让当年那次冒险有了结果。蔡演军告诉《中国科学报》，地球科学做不了快餐式研究，初看得到的认识和反复思忖推演之后的结论，往往大相径庭。做基础研究就要坐得住“冷板凳”，科研上的突破常常来源于长期积累形成的深度理解。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1073/pnas.2537342123>

发现·进展

中国科学技术大学等

提出实现拓扑平带和分数陈绝缘体新平台

本报讯（记者王敏）中国科学技术大学教授秦维与中国科学技术大学、合肥国家实验室教授张振宇合作，提出一种新思路——将具有 Rashba 自旋轨道耦合的二维材料、塞曼耦合与人工超晶格相结合，构筑高度可控的孤立拓扑平带，并在其中实现稳定的分数陈绝缘体。近日，相关成果在线发表于《物理评论快报》。

分数陈绝缘体可看作分数量子霍尔态在晶格体系中的推广，其低能激发具有分数化特征，部分非阿贝尔分数量子态还被认为可应用于拓扑量子计算。实现分数陈绝缘体，通常要求体系同时具备非平庸能带拓扑以及平坦、孤立的电子能带。因此，如何寻找和设计拓扑平带一直是该领域的重要课题。近年来，分数陈绝缘体相关现象已在转角二硫化钼、菱方多层石墨烯等体系中得到广泛研究。然而，这类体系通常依赖特定莫尔结构与相互作用驱动的发极化，并受到竞争量子态、无序、应变和晶格弛豫等因素影响。

针对这一难题，研究团队提出一种不同的设计思路：不再依赖材料中天然存在的平带，而是利用外部可调手段主动“制造”拓扑平带。研究发现，塞曼耦合首先在 Rashba 能带底部形成近乎平坦的部分能带，随后周期性人工晶格通过能带折叠和布拉格散射，将该平坦区域与其他色散能带分离，最终形成孤立的拓扑平带。进一步的多体精确对角化计算表明，该平带在 1/3 和 2/3 分数填充时均可形成稳定的分数陈绝缘体，并在较宽的参数范围及一定程度的扰动下保持稳定。论文还系统分析了实现该方案的候选材料与器件参数，为实验实现提供了具体参考。

研究人员介绍，与主要依赖特定莫尔结构的方案相比，该平台具有较强的人工设计和调控能力。同时，该方案可拓展至多种具有较强 Rashba 自旋轨道耦合的二维材料，并与现有的外延生长和微纳加工技术相结合。该工作作为在莫尔材料之外探索拓扑平带、分数陈绝缘体以及更丰富的强关联拓扑量子态提供了新的材料平台和设计思路。

相关论文信息：<https://doi.org/10.1103/z4g8-2kwj>

华东理工大学

新策略助力有机室温磷光寿命提升

本报讯（记者江庆龄）华东理工大学教授马骥团队提出一种主体分子去芳构化的有机室温磷光材料设计策略，实现了有机室温磷光寿命的大幅提升。相关研究成果近日发表于《德国应用化学》。

有机室温磷光材料具有大斯托克斯位移、长寿命和丰富激发态行为等特点，在信息加密、生物成像、光电显示等领域具有广阔的应用前景。如何获得更长寿命、更高效率的室温磷光，一直是该领域的重要科学问题。目前，主客体掺杂策略是构筑高性能有机室温磷光材料的常规策略。

在前期研究基础上，研究团队通过将主体分子中的平面芳香环转变为三维环己烷结构，实现了主体分子骨架的重构。这种结构调控能够显著缩短主体与客体之间的空间距离，增强分子间相互作用和三线态—三线态能量转移（TTET），从而稳定三线态激子，显著延长掺杂材料的室温磷光寿命。

研究团队进一步将其拓展至多种主体和客体体系。实验结果表明，不同体系均表现出一致的寿命提升规律，其中最高可实现 58.65 倍的室温磷光寿命提升。此外，去芳构化能够改变主体分子的三维堆积方式，从而重塑主客体体系的激发态演化路径，增强 TTET，在丰富三线态的同时稳定三线态。

基于显著延长的磷光寿命，研究团队构建了基于维吉尼亚密码和摩尔斯密码的时间分辨信息加密系统，并开发了具有可逆黏附性能的智能粘接材料，展示了该策略在信息安全、智能材料等领域的应用潜力。

相关论文信息：<https://doi.org/10.1002/anie.6451405>

香港科技大学

全球首台零衰减“弹卡”制冷装置研制成功

本报讯（记者朱汉斌）香港科技大学讲座教授孙庆平团队成功研发出全球首台零衰减“弹卡”制冷装置。他们运用抗疲劳固态制冷剂，开发出持久且环保的制冷技术，即使循环运行超过 100 万次，仍能保持稳定性能。日前，相关成果发表于《焦耳》。

“弹卡”制冷是一种利用形状记忆合金应力诱发可逆相变效应的技术，有望取代传统制冷剂，成为绿色新方案。然而受制于制冷性能衰减和长期可靠性不足两大缺点，该技术一直未获广泛使用。现有“弹卡”制冷装置大多采用商业镍钛形状记忆合金（NiTi）作为制冷剂，但这种材料在长期相变循环过程中容易产生功能疲劳，长期使用使用下，制冷效果会越来越差。

为突破这一瓶颈，研究团队开发发出一种抗疲劳形状记忆合金，并将其集成于新颖的固态制冷剂结构中。这是一种四元 TiNiCuCo 形状记忆合金，相比传统 NiTi，该材料在反复相变循环过程中能够保持稳定的“弹卡”性能，实现稳定的潜热释放和吸收，提供可靠的固态制冷剂。团队通过结合该新型形状记忆合金材料、器件设计与系统工程，成功解决了材料功能疲劳和结构可靠性两大关键问题，开发出零衰减“弹卡”制冷装置，能在长期运行过程中保持稳定制冷能力。

此外，该装置还具有结构紧凑、耐用的器件架构。团队进一步优化器件整体结构，以减少热损失并提升系统稳定性。新设计可减少约 50% 的零部件数量，并将无效结构比例由 15% 降低至 5%。

运用这种新型材料和器件设计，研究团队构建出了多个制冷单元集成的“弹卡”制冷装置。此装置在 100 万次循环运行过程中，仍能保持 400 W 制冷功率和 41 开尔文温跨的稳定输出，且性能毫无衰减。TiNiCuCo 制冷的加速疲劳测试亦显示，新型材料在 1 亿次循环运行后，性能仍然毫无衰减。如应用于实际场景，预计制冷使用寿命可超过 10 年。

相关论文信息：<https://doi.org/10.1016/j.joule.2026.102627>

“科学家精神耀天山”系列活动举办

本报讯（记者高雅丽）近日，“科学家精神耀天山”系列活动在新疆多地举办。活动通过科学家大剧院巡演、科学家事迹展览、科学家精神宣讲等形式，走进兵团及南北疆各地，面向新疆广大青年科技工作者、高校师生及社会公众弘扬科学家精神，带来一场兼具思想性与艺术性的科学文化盛宴。

本次活动以中国地质大学（武汉）原创话剧《大地之光》巡演为重点。剧目以中国现代地球科学和地质工作的主要奠基人李四光先生为原型，围绕李四光在第四纪冰川科学论证、寻找钨矿、石油会战、地震预测预报等具有典型意义的生平事迹，生动再现了老一辈科学家对科学事业的执着追求，深刻展现了李四光先生的鲜明个性、科学人生和家国情怀。剧目分别在乌鲁木齐晚报剧院和塔里木大学综合馆演出，同步配套李四光生平事迹展览。

活动期间，“科学家精神百场讲坛”同步召开。湖南杂交水稻研究中心研究员辛业芸走进新疆农业大学及新疆农业大学附属中学，用鲜活故事播撒科学种子，启迪青年理想；“国家卓越工程师”称号获得者方向晨走进塔里木大学，引导边疆青年立足时代使命，勇担科技重任。

据悉，“科学家精神耀天山”系列活动由中国科协、教育部、文化和旅游部、中国科学院、中国工程院、共青团中央、中国文联七部门联合主办。

苏刚：从问题的“根”出发，才能做出原创突破

（上接第 1 版）

这一方法兼具高计算精度与无负符号问题等优势，为高温超导、新奇磁性物态等研究提供了可靠工具。在苏刚看来，根挖得越深，计算精度越高，结论就越可靠。有些复杂量子系统需要连续计算两年，即便如此，团队也不愿以降低精度换取一时速度。

长期积累，终成质变。量子多体计算从验证理论的辅助工具转变为预言新物态、新效应指导实验的新范式。这套“利器”也为将近 20 年后回答更大的科学问题，埋下了伏笔。

从破解“超固态之问”到直抵国家重大需求

自然界是否存在一种物质状态，既具有固体的有序排列，又具有超流体般的无阻力流动？这就是凝聚态物理悬置已久的“超固态之问”。2005 年，这一问题被《科学》列入 125 个最具挑战性的科学问题。

转机来自具有三角晶格结构的钴基磁性材料。科学家在该材料中发现极低温下自旋涨落的痕迹，而苏刚团队 20 余年打磨的有限温度张量网络方法，恰好能对此类强关联、强阻挫体系进行高精度计算。

团队确认，具有自旋阻挫的三角晶格各向异性反铁磁材料可以呈现自旋超固态。

预言必须接受实验检验。苏刚随即组织跨单位联合攻关团队合成高质量单晶样品，

同步开展极低温中子散射、磁热效应实验测量与理论计算。无数次讨论、漫长而反复的验证，最终换来关键结果——样品同时表现出“自旋有序”与“超流涨落”特征，实验与高精度理论计算吻合。

2024 年初，苏刚与合作者在《自然》发表论文，提出自旋超固态确切存在的有力证据。英国物理学会《物理世界》评价“这一发现代表了基础物理学的一项突破”。

基础研究往往在意想不到处开花结果。团队意外发现，借助自旋超固态表现出的巨磁卡效应，在不使用昂贵且稀缺的氦-3 的情况下，可实现 94 毫开尔文（零下 273.056 摄氏度）的极低温。由此，无氦-3 极低温固态制冷成为现实。

这件事意义重大。极低温环境是空间探测、量子科技和物质科学研究的基础条件，而氦-3 资源稀缺、价格高昂，且面临禁运。“这一研究开辟了固体极限制冷新途径，有望为空间探测、量子科技、物质科学等领域的极低温制冷难题提供新的解决方案。”苏刚说。

2026 年，团队在拓展自旋超固态材料体系、冲击更低温度等方面接连取得进展，与合作者在金属偶极磁体中发现自旋超固态，成功研制纯金属制冷模块。相关成果刊发于《自然》。

从理论预言、材料合成、极低温测量到器件研制，这条完整链条展示了基础研究如何跨越学科边界，直抵国家重大需求。



《钛度》剧照。中国科技馆供图

话剧《钛度》讲述“奋斗者”号载人舱球壳研发故事

本报讯（记者高雅丽）9 月 20 日，由中国科学技术馆联合中国煤矿文工团打造的家风家风系列原创话剧《钛度》，在中国科学技术馆迎来首场演出。剧目以 2018 年钛合金深海载人舱球壳焊接突发低温裂纹为切入点，串联起



2013 年万米深海载人舱材料选型激烈论证、新钛合金 Ti62A 艰苦研发、科研人员理想与现实的挣扎抉择，穿插老一辈科学家言传身教的家风与学风传承，多时空交织勾勒出幅鲜活立体的中国深海材料人的奋斗群像。

作为中国科技馆家风学风原创剧目，《钛度》旨在以“科学+艺术”的创新表达，将重大科技攻关史实转化为科普文化产品，引导公众读懂科技自立自强背后科技工作者的赤诚坚守与家国担当。该剧将上演至 9 月 29 日。