中国科学报

CHINA SCIENCE DAILY

总第 9081 期　2026 年 9 月 17 日　星期四　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

向极限迈进，单铜氧层高温超导体问世

■本报记者 江庆龄

1986 年，德国物理学家约翰内斯·贝德诺尔茨和瑞士物理学家卡尔·亚历山大·米勒在镧钡铜氧化物中发现高温超导现象，一个新的研究领域就此开启。

此后，学界对铜基高温超导体开展了深入研究，迄今已发展出数十种材料体系。它们组分有别、超导临界温度各不相同，却都有着相似的层状结构——铜原子和氧原子构成的平面与其他原子层交替堆叠。这些材料为何能实现高温超导，至今仍是凝聚态物理领域最重要也最具挑战性的问题之一。

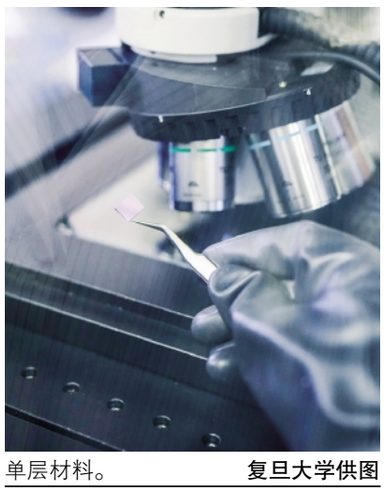
恰逢铜基高温超导发现 40 周年之际，复旦大学教授张远波、阮威团队与中国科学院院士、中国科学技术大学教授陈仙辉团队合作，成功制备出只含一个铜氧面的铜基高温超导体。联合团队通过实验证实了高温超导的二维本质，并在超导体与绝缘体转变的临界点发现了奇异的“反常金属态”和量子临界现象，为研究高温超导机理提供了全新的量子实验平台。相关研究成果近日发表于《自然》。

在“旧问题”中看到“新机会”

2011 年，33 岁的张远波结束海外求学和研究，回国加入复旦大学。此时，他已经从事石墨烯研究近十年，并在向黑磷等其他二维材料拓展。

作为二维材料领域的一个早期开拓者，张远波对于这类材料的物理特性一直很着迷。倘若常规的三维层状材料是一本书，张远波做的事情就是仔细研读其中的一页——既可以“管中窥豹”，通过这一页了解全书的一些特点，也有可能挖掘出不存在于三维体系中的物理现象。

“二维材料的所有原子都暴露在表面上，没有被‘藏起来’的部分，相比三维材料更容易被调控。”张远波补充道。



单层材料。　复旦大学供图

2015 年，张远波团队与陈仙辉团队在《自然－纳米技术》发表合作成果，介绍了一种调节二维材料内部电荷的方法。他们发现，通过调节二硫化钽内部的电荷，可以让材料变得更导电或者更绝缘、呈现或失去超导性，实现材料的“七十二变”。

也是在这个阶段，张远波开始关注铜基高温超导体中的维度问题。

目前大多数高温超导材料均呈层状结构，由原子层逐层堆叠而成。但从理论上看，二维体系中热涨落强烈，二维高温超导原则上并不稳定。这种看似矛盾的现象或许就隐藏着理解高温超导机理的关键。

很自然地，张远波看到了转向新领域的机会。“我们想到，实验室此前建立的一系列二维材料制备与表征方法，或许也可以用来研究高温超导中的这个问题。”他说。

张远波团队与合作者选择了一种有代表性的铜基超导体铋锶钙铜氧（$Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$，Bi－2212）。经过 4 年攻关，团队发现，二维极限下的单层 Bi－2212 具备高温超导所需的一切条件。这项工作为高温超导的二维理论模型提供了直接实验证据，并在 2019 年发表于《自然》。

但是考虑到单层 Bi－2212 中仍有两个铜氧面，两者之间的相互作用可能会帮助稳定超导，张远波又开始寻找其他铜基超导体材料。

这一次，他们关注到单层结构中仅含一个铜氧面的材料 $Bi_2Sr_2CuO_{6+\delta}$（Bi－2201）。研究结果显示，单层 Bi－2201 的最佳超导转变温度比块体降低了大约 10%，但完整保留了块体材料的强关联物理特征，铜氧化物的核心物理属性在单个铜氧面中依然完好呈现。

“实测数据有力支持了铜氧化物高温超导是二维现象的观点，为这一长期假设提供了确切的实验证据。”张远波告诉《中国科学报》。

在此基础上，团队成功观测到从莫特绝缘相到整个超导穹顶的完整物理相图，并进一步在接近绝对零度（约 100 毫开尔文）的实验条件下，探索了超导－绝缘体的量子临界区域。

“我们在单层 Bi－2201 中观测到一个奇特的量子临界现象。”张远波表示，随着温度降低，传统量子临界点附近的普适标度行为失效，其有效临界指数随着接近临界区而迅速发散，呈现出典型的量子格里菲斯奇异性。

此外，在绝对零度极限下，超导与绝缘之间出现了反常金属态，即随着温度降低，材料的电阻趋于一个非零的稳定值。这与超导体的零电阻、绝缘体随降温越来越难导电的表现都不同。

“反常金属态既可以通过降低空穴掺杂获得，也可以通过外加垂直磁场获得。”阮威表示，“该发现与玻色金属图像吻合，即高温超导由一种无能隙、非超流的二维玻色体系经由量子相变涌现。”

试错，还是试错

“石墨烯工艺直接用于高温超导其实并不适合，需要摸索新的方法。”受访过程中，张远波多次提到“试错”。

刚开始研究 Bi－2212 时，团队就遇到了一个棘手问题。二维高温超导材料非常脆弱，一放到空气中就“变质”。空气中的微量水分会完全破坏它的结构，稍一受热又可能让其中的氧流失，改变材料的性质。他们必须找到一个合适的环境，让单层 Bi－2212 从剥离到接入测量电路都能得到妥善保护。

经过一年多的反复试错，团队把石墨烯的整套研究体系“搬进”了氩气环境，并让操作台保持在零下 40℃的低温条件下。他们还自主开发了微电极冷焊技术，在低温下将电极直接焊到薄片上，避开了常规操作中可能损伤样品的加热步骤。

这套研究体系支撑了团队 2019 年的研究，也为此次工作奠定了基础。

“前一项工作中发展的材料制备等技术，可以用于其他二维材料。”张远波介绍，“Bi－2201 最主要的难点，是在极端低温条件下进行原位调控。”

由于只有一个铜氧面，单层 Bi－2201 在载流子调控范围和精度这两个方面都展现出前所未有的能力。团队发现，在单层 Bi－2201 中，掺杂水平与方块电阻之间存在对应关系，而空穴掺杂水平又由间隙氧决定，进而改变超导性质。基于此原理，团队发展了一套在臭氧环境中的原位掺杂调控技术，实现了对氧含量的可逆调节。

（下转第 2 版）

国家超算互联网发布气象领域重大应用成果

本报讯（记者赵广立）9 月 15 日，国家超算互联网核心节点（曙光 8000）气象领域重大应用成果发布会在河南郑州举行。会上，中国气象局地球系统数值预报中心联合中科曙光宣布，依托国家超算互联网核心节点十万卡 AI4S 计算集群设施，基于自主研发的多矩约束有限体积方法（MCV），仅以 3840 张国产加速卡就实现了 5 公里空间分辨率、10 天全球预报压缩至约 1 小时内的目标。该成果标志着我国自主物理大气预报模式性能迈入国际第一梯队。

《全国气象发展“十五五”规划》明确提出，要建成无缝隙全覆盖的新一代地球系统数值预报模式，实现全球 5 公里、区域 1 公里、重点区域 500 米的高精度预报目标。但在气象数值预报向公里级、百米级超高分辨率迭代的过程中，计算量呈指数级增长，传统算力架构难以兼顾精度、时效与能效。

作为中国气象局地球系统数值预报中心研发的下一代气象预报引擎，本次 MCV 模式依托国家超算互联网核心节点全国产十万卡 AI4S 计算集群，使通信整体性能提升约 3 倍，在 1 小时内完成全球 5 公里空间分辨率、未来 10 天的预报计算，达到国际主流业务时效标准，并通过批量预报质量检验。

中国气象局地球系统数值预报中心表示，该突破是自主数值模式与国产算力协同创新的重要成果，为我国在这一领域向公里级乃至百米级持续推进奠定了基础。

在地球科学领域，国家超算互联网平台已为超过 20 家省级气象、环境、海洋单位提供了长期算力服务。同时，国家超算互联网提供的超智融合算力，也在为中国气象局发布的第二届人工智能气象预报模型示范计划护航。该计划旨在遴选一批优秀气象模型“同台竞技”，加速气象预报模型从科研试验向业务应用的转化。

据了解，立足“十五五”气象现代化建设新征程，国家超算互联网正协同中国气象局地球系统数值预报中心，完成全球 3 公里分辨率模拟试验，为我国下一代大气模拟继续演进提供先期验证，夯实智慧气象算力根基。

我国首个“熔盐储能＋二氧化碳”发电项目开工

据新华社电 中国华能 9 月 16 日宣布，我国首个将熔盐储能与二氧化碳发电结合的示范项目“睿碳号”，当日在华能山东八角电厂开工。这是目前国内规模最大的同类工程，首期建设 1 台 50 兆瓦超临界二氧化碳发电机组，配套 100 兆瓦 /400 兆瓦时熔盐储能系统。

这个项目是国家科技重大专项“二氧化碳‘热力电池’关键技术开发与工程示范”的载体工程，开工标志着我国在二氧化碳发电与新型储能融合领域，进入实体工程建设阶段。

传统火电机组主要靠水蒸气推动设备发电，这套机组改用超临界二氧化碳作为动力介质。项目创新采用“储热＋发电”的运行模式：用电低谷时，用电厂富余电力加热熔盐，把电能转化成热能存起来；用电高峰时，高温熔盐释放热量加热二氧化碳，再驱动机组发电。熔盐在这里就像一个大型“超级充电宝”，实现电能错峰调配。

相比传统蒸汽机组，超临界二氧化碳动力循环发电技术的优势明显：能量密度更高，发电效率更好，设备占地更小，调节也更灵活。超临界二氧化碳机组可在 0 到 100%负荷之间平滑调整出力，调节速率是传统煤电机组的 4 倍，能快速配合电网调峰。

项目将于 2027 年投产，将为新型储能技术规模化应用积累实践经验，支撑我国新型电力系统建设，也为全球能源低碳转型、提升可再生能源消纳能力提供中国样本。　**（戴小河）**

科学家提出“溶剂门控”新概念

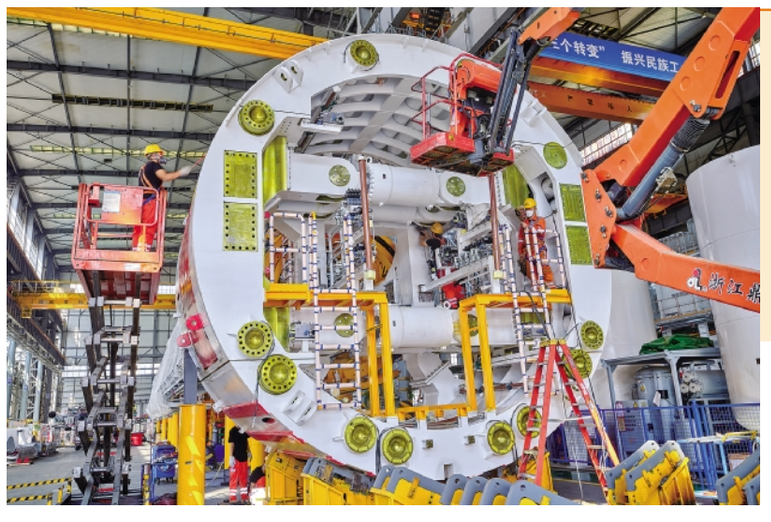
本报讯（记者孙丹宁）近日，中国科学院大连化学物理研究所副研究员邢嘉成、研究员徐云鹏、中国工程院院士刘中民团队在分子筛限域催化与分子扩散机制研究方面取得新进展。团队发现，大分子能否进入传统分子筛微孔并接近内部活性位，不仅取决于分子尺寸与孔径的匹配关系，还受到溶剂分子在孔道内竞争吸附与空间占据的调控。相关成果发表于《美国化学会志》。

分子筛具有规则的纳米孔道，分子尺寸与孔径之间的匹配关系是理解其吸附、扩散和择形催化性能的重要基础。传统观点认为，当反应分子尺寸接近甚至超过分子筛孔口时，其进入微孔并接近内部活性位将受到严重限制。因此，针对大分子催化反应，已有研究主要集中于构筑介孔、缩短扩散路径，或开发更大孔径的分子筛材料。

在该研究中，团队以传统微孔钛硅分子筛 TS－1 催化环己烯环氧化为模型体系。研究发现，在甲醇溶剂中，环己烯转化率低于 6.9%；而在不额外加入反应溶剂的条件下，转化率可提高至 88.8%，环氧化物选择性保持在 89%以上，且这一提升未改变 TS－1 本征 MFI 微孔结构。当孔道处于空置或弱占据状态时，部分环己烯能够进入微孔；而尺寸更小的甲醇会优先占据孔口、孔道及钛活性中心附近的有限空间，降低了环己烯进入微孔和接近活性位的概率。基于上述结果，团队提出“溶剂门控”概念，即溶剂不仅是液相反应介质，还可以通过竞争吸附和孔体积占据，调控反应分子对微孔内部活性位的实际可达性。

该研究将传统的“静态孔径控制”认识拓展至孔径、框架动态性、分子构象、吸附热力学及多组分竞争占据共同作用的催化扩散影响机制，为通过调控溶剂和限域微环境提高微孔活性位利用率提供了新思路。

相关论文信息：*https://doi.org/10.1021/jacs.6c12516*



9 月 15 日，超大直径泥水平衡盾构机“中铁 1662 号”在河南郑州下线，其直径 16.68 米，为我国自主研制的最大直径盾构机，将用于安徽合肥 G4001 连接线下穿董铺水库项目隧道建设。

据了解，该隧道盾构段长约 2.9 公里，采用双洞双层结构设计。盾构机不仅作业面大，而且需在陡坡急弯处作业，施工环境极为复杂，对设备的掘进控制精度及姿态调整能力提出了极高要求。

“中铁 1662 号”盾构机整机长 125 米，重约 4800 吨。如此“大块头”的装备，推进系统配置了液压浮动支撑装置，同时还配备了高精度导向系统与管片选型系统，共同保障盾构机轻巧拐弯。　**图片来源：视觉中国**

破译棉花遗传的“空间折叠密码”

■本报记者 李思辉 通讯员 唐瑞婕

如果把棉花 DNA 比作一根长线，传统研究大多聚焦于长线上的一个个“点位”基因，无法看到 DNA 链条在细胞核内的折叠、缠绕，以及由此产生的基因调控过程。

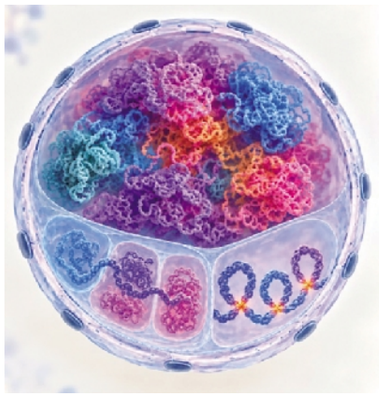
在中国工程院院士张献龙带领下，华中农业大学教授王茂军课题组发现“三维基因组结构是传统 DNA 序列变异之外可供作物改良利用的新型靶标”，并在此基础上破译了棉花遗传的“空间折叠密码”，为拓展现有栽培棉的遗传多样性提供了新方向。

9 月 16 日，相关研究成果在线发表于《细胞》。这是该刊历史上首篇关于棉花的研究论文。

从点位到三维

何谓“棉花三维基因组研究”？通俗来讲，DNA 不只是线性的序列，它还会在细胞核内折叠盘绕。空间构型的变化能够直接调控基因表达，进而左右棉花纤维的长短、品质。三维基因组研究则关注这根 DNA 链条如何在细胞核内折叠、缠绕，以此理解基因调控的内在逻辑。

对于为何十余年如一日聚焦这项研究，王茂军介绍，棉花长期驯化和定向育种，在改善纤维品质的同时，也伴随着栽培棉遗传多样性的下降，可利用的优异变异日益有限。因此，突破传统线性 DNA 变异视角，厘清驯化选择、遗传变异、染色质结构重塑、基因表达及



三维染色质空间组织示意图。　受访团队供图

纤维品质之间的关系，是阐明纤维品质遗传改良分子基础的新切入点。

近 3 年，研究团队利用涵盖半野生－栽培棉群体的 301 份陆地棉种质，共获得 337 套纤维发育的 Hi－C 数据，构建了棉花群体纤维的泛三维基因组图谱，使驯化的相关染色质空间结构能够在种质间进行比较和量化。

通过整合群体重测序、泛基因组结构变异和 Hi－C 数据，研究人员发现，序列变异在染色质拓扑结构域（TAD）重构位点显著富集。然而，DNA 序列并不能解释全部的三维结构变化，例如群体中部分染色质重构伴随染色质开放性或组蛋白修饰改变。这表明，除 DNA 序列差异外，不同棉花种质之间还存在多样的空间调控差异。

传统全基因组关联分析虽然可以研究“哪些 DNA 变异与性状相关”，却很难解释大量非编码变异如何通过所处的核内空间结构影响基因表达和表型。为此，该研究开发了染色质互作组关联分析方法 CIWAS，将 TAD 边界绝缘强度和染色质环互作强度作为可量化的分子性状，进一步连接了基因型、基因表达和纤维品质。

锁定 59 个三维结构特征

该研究筛选出与优异纤维相关的 39 个 TAD 边界和 20 个染色质环，提供了潜在可用于纤维品质改良的三维结构靶标。CIWAS 不仅能够辅助识别传统 GWAS 难以解析的调控信号，也使 TAD 边界和染色质环等三维结构能够被有效纳入复杂性状遗传分析中。

研究团队进一步将呈现群体分化的 TAD 边界和染色质环，与基于序列定义的驯化选择信号结合，鉴定出 88 个边界和 203 个染色质环呈现纯化选择信号；再整合驯化选择、三维结构和基因表达信息，锁定了 9138 个相关表达基因，其中 904 个在栽培棉中上调的基因显著富集于纤维发育过程。

基于具有明确功能的调控分化基因，他们构建了纤维驯化相关基因调控网络，将三维结构分化、转录重编程与纤维发育关键通路联系起来。由此，该团队把棉花驯化的分子图景，从线性序列选择延伸至核内空间调控，从而揭示了 DNA 序列之外隐秘的“三维驯化印记”。

为进一步揭示三维结构形成的序列基础，研究团队利用深度学习模型和计算机饱和突变分析，从棉花基因组中鉴定出 2701 个可能影响三维结构的高效应片段。这些 DNA 序列可能承载着维持染色体空间折叠的信息。

总体而言，该研究将驯化选择、遗传变异、空间结构重塑与纤维性状纳入同一遗传解析框架，再次印证三维基因组结构是传统 DNA 序列变异之外可供作物改良利用的新型靶标，破译了棉花遗传的“空间折叠密码”，为拓展现有栽培棉的遗传多样性提供了新的方向。

“接下来，我们希望不再只是描绘三维基因组图谱，而是进一步理解哪些染色质空间结构可以被预测、被干预、被重塑，并最终让这些隐秘的分子靶标服务于棉花纤维品质改良。”王茂军说。

张献龙则表示，这项研究既回应了基础生物学问题，又对接了棉花产业发展需求，可谓一举两得。未来，他希望带领研究团队在此基础上，开发提高棉花纤维品质的方法，并将其应用到棉花之外的更多作物上，助力农作物的精准遗传育种，助推我国农业产业的提质增效。

相关论文信息：*https://doi.org/10.1016/j.cell.2026.08.038*

资金短缺，美“新视野”号将关闭两台仪器

寰球眼

本报讯 据《科学》报道，由于资金短缺，美国国家航空航天局（NASA）将于 10 月关闭“新视野”号探测器用于研究太阳风的两台仪器。目前该探测器正在接近太阳系外缘。

“新视野”号因飞越冥王星和探索柯伊伯带而闻名，同时也在持续观测太阳的带电粒子“风”及其在太阳系周围形成的巨大“气泡”。这项工作主要依靠两个粒子探测器：用于测量高能粒子的“冥王星高能粒子光谱仪”，以及用于测量太阳风中低能粒子的“冥王星周围太阳风探测器”。

然而，过去两年里，NASA 每年都未拨付 200 万美元的仪器维护经费，这笔资金原本用于支付工程师与科学家的薪资。“新视野”号首席研究员、美国西南研究院的行星科学家 Alan Stern 表示，任务组别无选择，只能关闭这些仪器。“我们实在无力承担维持这些仪器继续运行的费用了。”

美国阿拉巴马大学的空间物理学家 Gary Zank 表示，关闭这些仪器“将造成无法估量的损失”。与“旅行者”号任务不同，“新视野”号能够直接测量“捕获离子”。这些来自星际空间的中性原子在日球层内带电，并被太阳风裹挟。它们会从太阳风中汲取能量，并在激波边界，即超音速太阳风骤然减速的区域发挥作用。

“新视野”号目前与太阳的距离是地日距离的 66 倍，冥王星与太阳距离的两倍。它可能会在未来几年内穿越激波边界。Stern 表示，该探测器状态良好，可运行至 2050 年。NASA 前首席科学家 James Green 表示，如此长的服役时间将使探测器最终穿越日球层顶进入星际空间，从而帮助人们了解太阳系“气泡”边缘如何随时间推移而收缩或扩张。他呼吁继续运行探测器上的仪器，因为“这是一个千载难逢的机会”。

“新视野”号的未来一度充满不确定性，因为 NASA 不同部门间曾就由谁为其提供资金而争执不休。该机构最终达成一项协议：行星科学部门承担大部分运营费用——每年约 1000 万美元，日球物理学部门则每年提供 200 万美元。日球物理学部门曾连续数年提供这笔资金，但在 2025 和 2026 财年却未予拨付，导致任务不得不终止。　**（文乐乐）**