中国科学报

CHINA SCIENCE DAILY

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

扫二维码 看科学报　扫二维码 看科学网

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

总第 8852 期　2025 年 10 月 15 日　星期三　今日 4 版

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

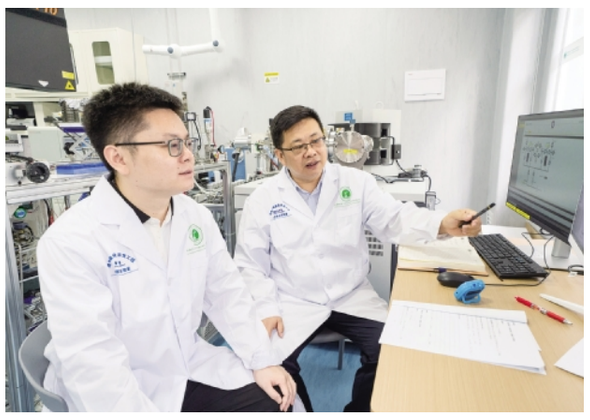
让亿年岩石“开口”，他们重构地球氧化史

■本报记者 杨晨

岁月失语，惟石能言。在成都理工大学，有这样一个团队，他们搜罗了上千块跨越数亿年历史的古老岩石，通过抽丝剥茧般的细致研究，让它们“开口说话”，还原地球大气氧含量的演化历程。

近日，成都理工大学教授李超团队关于地球大气氧含量演化的研究成果发表于《自然》。该团队首次以直接、连续的地质证据，揭示了地球从无氧环境演进为如今富氧状态历时 20 亿年，且关键转折点发生在 4.1 亿年前，并创新性提出，在短时间尺度上，大气与海洋的氧含量存在“此消彼长”的竞争关系。

文章从投稿到被接收，仅用了半年时间。审稿人评价该研究“提供了迄今关于大气氧含量演化的最佳指标记录，为当前大气氧化历史的认识树立了‘新标杆’”。



李超（右）正在指导王海洋。　受访者供图

瞄准悬而未决的难题

旁人或许只关注研究迅速登上顶刊的光环，但只有当事人清楚，其背后是 7 年的坚持和求索。

2018 年的秋天，在团队成员、成都理工大学沉积地质研究院研究员王海洋的记忆里尤为深刻。当时，他正准备赴美国路易斯安那州立大学进行为期一年的博士联合培养学习。李超鼓励他借这次出国的机会跳出“舒适圈”，找到一个更具突破性的研究方向，做一些“有真正价值的工作”。他们的讨论最终落在了地球科学中一个悬而未决的难题——地球大气氧含量的升起与演化问题上。

以往对此的研究大多依赖间接指标。科学家通过分析海洋沉积岩反推地质历史时期海洋的氧化状态，进而推测大气氧水平。但这类记录经历了漫长且复杂的地球化学改造，像一部被反复誊抄的古籍，难免丢失很多原始信息。

李超开始思考，能否找到一种更直接的定量方法，重建远古时期大气氧含量，捕捉来自大气且被地质载体直接记录的信号。

一项由路易斯安那州立大学教授鲍惠铭（现任职于南京大学）团队开展的研究，为追溯远古大气“配方”带来了启示。

氧原子有氧 −16、氧 −17 和氧 −18 三种同位素。阳光照射下，大气中的氧气、臭氧和二氧化碳会发生光化学反应，并产生氧同位素比例变化。这一光化学反应会导致臭氧和二氧化碳具有氧 −17“正异常”，而大气中剩余的氧气则相应表现出氧 −17“负异常”。这就像一枚化学印章，被“盖”在大气氧气分子上。随后，携带特殊“标签”的氧气分子与陆地或水中的硫化物发生化学反应，并将“标签”贴在它们的产物硫酸盐上。这些硫酸盐结晶沉淀形成石膏、重晶石等矿物后，如同时间胶囊，将远古大气的氧 −17 异常完整封存。鲍惠铭团队通过提取、测量并计算石膏、重晶石等矿物中硫酸盐的氧 −17 负异常强度，反演地质历史时期大气二氧化碳浓度。

“该方法是否可以反演古大气氧含量？”李超提出了这个设想。他意识到，这种信号有望成为揭示古大气氧含量的直接指标。

李超当即与路易斯安那州立大学联系，看可否让王海洋到鲍惠铭的实验室系统学习并进行硫酸盐氧 −17 同位素的分析。

“小心求证”之旅

前人认为，大气氧分子中独特的氧 −17 负异常信号，能够通过氧化陆地上的黄铁矿，转化为如白霜般的硫酸盐，并随河流进入海洋。然而，这些硫酸盐与海水中的氧原子发生交换时，其携带的氧 −17 负异常信号很快就会被彻底“抹掉”。

“但远古海洋的水体多为‘分层停滞’，洋流活动远不如今天这般活跃。”李超假设，倘若恰逢大规模陆地风化，巨量携带“指纹”的硫酸盐在短时间内汹涌入海，在还来不及与周围海水交换、混合、被“抹掉”时，或许就被浅海区广泛且正快速沉淀的碳酸盐矿物“捕获”。也就是说，经“类质同象替代”这一化学过程，带有氧 −17 负异常信号的硫酸根离子瞬间卷入正结晶的碳酸盐晶格中“锁死”，最终固结成岩并被保存下来。

“这是一个大概率事件。”李超坚信，在漫长的地质时间尺度上，广阔的古海洋范围内，总会有一些地点在持续、有效地“录制”着当时的大气信息。

为此，远在路易斯安那州立大学实验室里的王海洋开启了“小心求证”之旅。

由于新元古代晚期（约 6 亿年前至 5 亿年前）是地质历史上公认的海洋氧化事件发生阶段，因此可以选择该时期的岩石“开刀”。

王海洋选择从岩石中弥散状重晶石入手。重晶石是硫酸根离子构成的矿物，前人利用它已在古代硫循环和海洋化学研究方面取得成果，摸索出了成熟、可靠的实验方法。然而，实验结果并不理想。王海洋和李超意识到，弥散状重晶石的成因环境复杂，未必能够记录到大气氧的这些特殊信号。

于是，王海洋的研究对象转向了李超提出的沉积碳酸盐晶格“捕获”的硫酸盐，即“碳酸盐结合态硫酸盐”。

实验进行时，恰好碰上新冠疫情，王海洋所在大学实验室被管控。后来，实验室作为单一密闭空间最多允许 1 至 2 人戴口罩工作。王海洋打申请报告，争取到了每天进入实验室的机会。但重晶石测试已耗费了半年时间，他结束访学已进入倒计时。雪上加霜的是，关键碳酸盐矿物样品短缺。

好在王海洋得到了国内同门的大力帮助。一批采集自华南地区、可满足实验需求的岩石样本从武汉寄出。在全球物流几近停摆的情况下，一个方便面箱大小、装满石头的包裹漂洋过海，寄到王海洋手中。

尽管初期测试屡屡受挫，但怀着“至少做完所有样品”的念头，王海洋坚持了下来。数月后，当关键样品的氧 −17 同位素数据陆续展示出清晰的氧−17 负异常信号时，王海洋心中百感交集。

亿年前的氧分子终于“开口说话”，猜想被证实。

从“快照”到连续“电影”

但这只是一个开端，研究团队需进一步证明这一发现的普遍性。

“大气具有全球性。”李超解释，土壤与地貌会因地域不同而呈现巨大差异，但大气成分在全球范围内基本一致。“既然 6 亿年前华南的岩石能捕捉到这一氧气信号，那么在同期或不同期、地质背景相似的其他地区的岩石中，理应也能找到类似记录。”

于是，他们数年间陆续收集了千余份样品。其中，有的来自我国各地，有的则借由国际合作，取自澳大利亚、美国与英国同行的储备库。

部分国内样品是团队成员野外采集的成果。每年 6 到 8 月，他们都会冒着酷暑深入山区或无人区考察采样。

在广袤大地上，如何精准定位研究所需的形成于数亿年前的岩石？

王海洋介绍，全国地质大调查已系统厘清了我国各地区沉积岩的年龄与分布，建立了翔实的数据库，研究人员可直接按目标年代查询定位。

（下转第 2 版）

全球首个！聚变能研究与培训协作中心落地中国

据新华社电 全球首个国际原子能机构（IAEA）聚变能研究与培训协作中心落地四川省成都市，标志着中国在聚变能源领域的国际地位与影响力实现显著跃升，将为成都建设全球聚变能源创新高地、推动可控核聚变商业化进程注入动能。

这是记者 10 月 14 日从正在成都市举办的世界聚变能源集团第 2 次部长级会议暨国际原子能机构第 30 届聚变能大会上了解到的信息。

国家原子能机构主任单忠德表示，中国高度重视聚变能发展，已建成多个大科学装置，正积极推进产学研深度融合与国际合作。

据介绍，聚变能作为人类和平利用核能的重要发展方向，与裂变能相比具有能量密度大、原料资源丰富、放射性污染低、固有安全性好等突出优势，是未来清洁能源的重要发展方向之一。

“中国将与国际原子能机构、国际热核聚变实验堆组织及各国一道，不断推进全球能源创新可持续发展，促进人与自然和谐共生，为共建清洁、美丽、可持续的世界贡献中国智慧、中国方案，让聚变能更好造福人类。”单忠德说。

世界聚变能源集团由国际原子能机构于 2023 年 10 月发起，旨在强化国际共识，推动各国核科技产业界及公私营机构加大投入，加快聚变能工程示范和商业应用进程。世界聚变能源集团第 2 次部长级会议发布了聚变能源展望 2025 报告，发表了世界聚变能源集团部长级会议成都声明。

（宋晨 李力可）

2025 年诺贝尔经济学奖揭晓

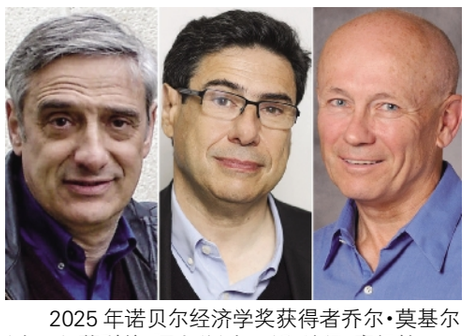
寰球眼

本报讯 瑞典皇家科学院 10 月 13 日在斯德哥尔摩宣布，将 2025 年诺贝尔经济学奖授予经济学家乔尔·莫基尔、菲利普·阿吉翁和彼得·豪伊特，以表彰他们对创新驱动经济增长理论的阐释。其中，莫基尔获得一半奖金，另一半奖金由阿吉翁和豪伊特分享。莫基尔通过研究史料，揭示了为何持续增长会成为现代经济常态。而阿吉翁和豪伊特则研究了持续增长背后的运行机制。

爱尔兰都柏林大学经济史学家摩根·凯利是莫基尔的长期合作伙伴。凯利表示，在这些诺奖研究出现前，“创新是个黑箱”。“非经济学家可能对此感到惊讶，但当时确实没有类似的经济模型。”

美国西北大学教授莫基尔 1946 年出生，是一位杰出的经济史学家。他揭示了通过技术进步实现持续增长的先决条件，即技术革新必须有科学理解作为支撑，才能带来持续的经济增长。他提出要让创新形成“自我生成”的持续过程，人类不仅需要知道某种技术或方法行之有效，更需要对其背后的科学原理和逻辑进行解释。

1956 年出生的阿吉翁现为法国法兰西学院、欧洲工商管理学院教授，英国伦敦政治经济学院教授。1946 年出生的豪伊特现为美国布朗大学教授。他们发展了奥地利经济学家约瑟夫·熊彼特的“创造性破坏”概念，阐明了技术革新下的企业竞争在推动经济繁荣方面的重要性。他们的研究表明，如果没有创造性破坏，即新兴企业凭借新技术淘汰老牌企业，经济增长就会停滞。



2025 年诺贝尔经济学奖获得者乔尔·莫基尔（左一）、菲利普·阿吉翁（右二）和彼得·豪伊特。

图片来源：《自然》

在英国萨塞克斯大学经济学家玛丽亚·萨沃纳看来，此次诺贝尔经济学奖的获奖者是“一直在思考创新的连带效应及其对社会意味着什么的人”，包括如何通过创新应对气候变化等重大社会挑战。

（徐锐）

科学家开发新型柔性离子凝胶

本报讯（见习记者江庆龄）华东理工大学田禾院士、马骧教授团队基于全新离子凝胶体系，构建了一系列兼具高应变、高韧性、长寿命磷光发射特性的导电柔性材料，为柔性有机室温磷光材料应用提供了新视角。相关研究近日发表于《德国应用化学》。

近年来，有机室温磷光材料在信息加密、数据存储、生物医学成像等方面应用前景广阔，其中柔性有机室温磷光材料更是引起了广泛关注。然而，目前柔性有机室温磷光材料开发集中于聚乙烯醇、聚丙烯酰胺等富氢键有机聚合物材料，与电路集成应用需求仍有较大差距。

研究团队基于离子液体与富氢键聚合物单体之间的多级相互作用，成功构建了一系列具有超长室温磷光发射的柔性离子凝胶材料。实验结果显示，此类材料在富溶剂环境下兼具优异的机械性能和光学性能。具体而言，材料的最大应变伸长率接近 1000%，最大韧性约为 77.11 兆焦耳 / 立方米，在室温下可以表现出接近 60 秒的超长余辉发射，发光覆盖范围可从深蓝到近红外一区。

此外，研究团队将柔性离子凝胶材料与智能材料相结合，成功应用于工业聚合监测、应力损伤自报告材料、智能导电材料等场景中。

相关论文信息：

https://doi.org/10.1002/anie.202518340

新策略实现 室温下超灵敏二氧化氮检测

本报讯（记者孙丹宁）中国科学院大连化学物理研究所研究员冯亮团队通过一种新型内置电场调控策略，构建了铁（Fe）− 氯氧化铋（BiOCl）材料，实现了室温下对二氧化氮气体的超高灵敏度检测，检测限低至 117ppt，响应时间小于 10 秒，并具备较好的长期稳定性和选择性。相关研究成果近日发表于《先进功能材料》。

气体传感器在环境检测、工业安全、智能家居、医疗诊断及公共安全等领域具有不可替代的重要作用。它们能够实时、连续检测大气中的有害气体成分，为空气质量评估、污染源追踪、生产过程控制和危险气体泄漏预警等提供关键数据支撑。在“双碳”与绿色发展的背景下，对氮氧化物、二氧化硫、挥发性有机物等典型污染物的精准检测需求日益迫切。然而，传统半导体气体传感器普遍依赖高温工作条件，不仅能耗高、设备寿命短，还存在灵敏度低、交叉干扰显著、基线漂移严重等问题，严重制约了其在常温、高湿、复杂背景气体环境下的可靠应用。因此，研发高灵敏、高选择性、低功耗且能在室温下稳定工作的新型气体传感材料与技术，已成为该领域的研究热点和难点。

研究团队提出在单一组分材料中构建内置电场，铁掺杂在氯氧化铋晶格中形成不对称的铁 − 氧 − 铋结构，驱动电子定向迁移，协同铁离子动态价态变化，构建“电场引擎”，提升了室温下对二氧化氮的传感性能。该策略还可推广至铜、锡等可变价金属掺杂体系，具有良好普适性。

研究团队还开发了基于该传感器的无线检测系统，实现了对汽车尾气中二氧化氮的实时检测，展现出良好的应用前景。

相关论文信息：

https://doi.org/10.1002/adfm.202520096

磁共振检查 可诊断早期类风湿关节炎伤损

本报讯（记者刁雯蕙）香港中文大学医学院科研团队进行了一项为期 8 年的类风湿关节炎磁共振追踪研究。他们发现，早期类风湿关节炎患者的关节结构损伤程度可分为渐进型和非渐进型，而这两种截然不同的病情发展无法通过一般的 X 光检查识别。该研究表明，磁共振是早诊断类风湿关节炎大体损伤程度的关键，为制定和预防不可逆转的关节损伤甚至残障的相关治疗方案提供了新思路。相关研究成果近日发表于《欧洲放射学》。

研究团队对 81 名初期类风湿关节炎患者进行了为期 8 年的磁共振跟进研究。所有参加者的病症出现时间均少于 24 个月，并于治疗前、第一年及第八年接受磁共振扫描，以全面评估炎症及结构性关节的损伤。

研究结果显示，类风湿关节炎的病情发展可分为两大类型，与发炎的严重程度随时间的变化有关。约 2/3 的患者呈现非渐进型结构损伤，即“非渐进型患者”，初次求诊时的磁共振影像显示结构性损伤属轻微，而这些患者在 8 年的跟进期内未再出现关节变形。

其余 1/3 的患者则出现渐进型结构损伤，即“渐进型患者”，初次求诊时的磁共振评估显示中至重度的关节损伤。即使这些病人已接受调理免疫系统的药物治疗，病情仍持续恶化。直到第八年，渐进型患者的功能受损比率是非渐进型患者的两倍。在初次求诊时，渐进型患者的关节早已严重变形。

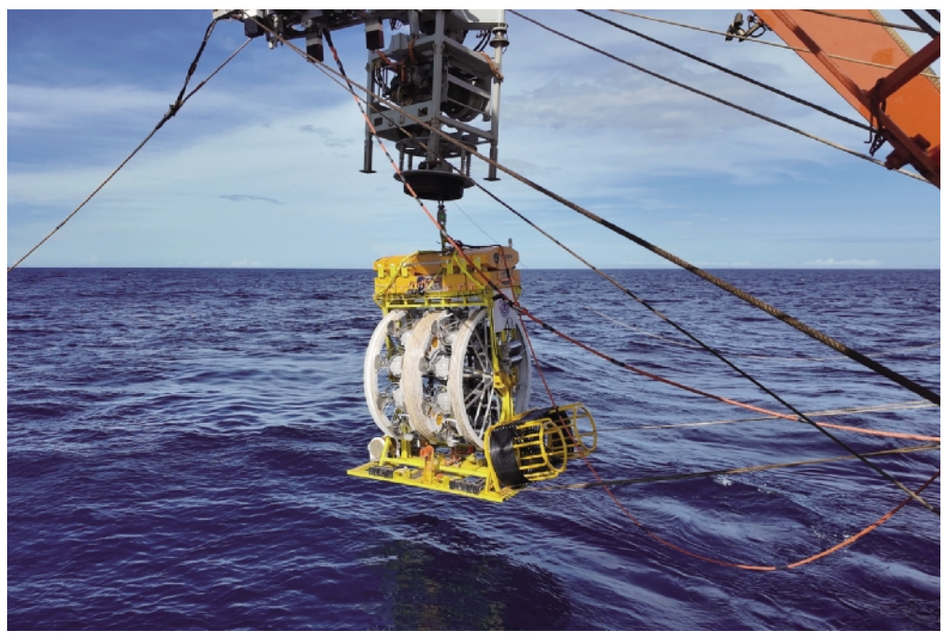
研究人员指出，虽然两类患者在接受首次磁共振扫描前出现病征的时间相符，但关节损伤模式却截然不同。该研究证实，类风湿关节炎的病情可分为两大类型，一类患者的结构会日渐恶化，另一类则不同。磁共振检查有助于准确预测患者日后出现长期结构性损伤的可能性。

研究团队建议，在诊断阶段为类风湿关节炎患者提供高分辨率磁共振扫描。医生可借此尽早识别渐进型患者，制定合适的介入方案，从而延缓甚至阻止病情恶化，尽可能降低类风湿关节炎患者的残障及长期功能受损风险。

相关论文信息：

https://doi.org/10.1007/s00330−025−11493−5

深海精密仪器柔性布放装置“蜘蛛系统”完成全功能海试



近日，上海交通大学自主研制的深海中微子探测潜标专用载具——深海精密仪器柔性布放装置“蜘蛛系统”（SPIDER）顺利完成全功能海试。

在此次海试中，SPIDER 在 1300 米深海环境中严格按照预设程序顺利完成“轻”“重”两种载荷模式的稳定释放，先后实现近底悬停、水下机器人辅助解锁、串列自主上浮与展开等一系列高难度动作。此外，系统在 10 分钟内连续稳定旋转 90 圈，成功安全释放出 20 个光电探测球舱模型与 4 个浮力块，所有球舱姿态均达到中微子探测要求，充分验证了 SPIDER 系统的稳定性和可靠性。

此次成果为“海铃计划”的深海工程建设奠定了坚实基础。“海铃计划”是上海交通大学发起的深海中微子望远镜建设计划，旨在通过捕捉来自天体和地球大气核反应过程产生的高能中微子，探索驱动极端宇宙现象的深层规律，解答宇宙射线起源之谜，加速我国完备多信使天文网的建设。

图为海试入水前的 SPIDER。

本报见习记者江庆龄报道

上海交通大学供图

旷野中最亮的光——野外台站巡礼

30 年，三代科学家与一条河

——走进中国科学院赤水河观测研究站

（详见第 4 版）