

11枚宝珠“作证”，三星堆文明曾北上交流

■本报记者 冯丽妃

红玉髓是一种含有氧化铁的隐晶石英，在古代常被视为身份与财富的象征。在三星堆，红玉髓仅出现在最高等级的祭祀坑中，与青铜重器、黄金、象牙和海贝共存。

科学家对这片遗址出土的11枚红玉髓珠的研究表明，古蜀人曾向北交流，构建起跨越千里的物质交换网络。相关研究近日发表于美国《国家科学院院刊》。

身世之谜

“红玉髓不只是饰品，更是古蜀高层汇集远程资源、构建社会身份的核心道具。”四川省文物考古研究院院长、三星堆遗址考古发掘总领队唐飞研究员对《中国科学报》说。

然而，由于中国史前缺乏红玉髓的使用传统，在很长一段时间里，学界普遍认为东亚早期的红玉髓主要通过长途贸易由西亚或南亚传入。

为解开红玉髓珠的“身世之谜”，一个跨学科、跨地域的攻关团队诞生了。中国科学院地质与地球物理研究所（以下简称地质地球所）与四川省文物考古研究院联合三星堆博物馆、珠饰博物馆、中国地质大学（北京）、甘肃省文物考古研究所、陕西省文物考古研究院、北京市考古研究院和美国威斯康星大学等国内外机构，“科技与人文”并重，合力开展溯源研究。

论文共同第一作者、地质地球所硕士研究生闫美婷和四川省文物考古研究院副研究员刘建成向《中国科学报》介绍，研究人员引入激光剥蚀电感耦合等离子体质谱技术，在不破坏文物外观的前提下，通过测定标本中极微量的化学元素组成，对三星堆祭祀坑出土的红玉髓珠进行溯源。

“指纹”归宗

为了解红玉髓珠的“出身”，研究团



三星堆祭祀坑出土的11枚红玉髓珠。 地质地球所供图

队率先构建了东亚首个大规模、标准化的红玉髓地球化学数据库，覆盖了黑龙江、河北、内蒙古、甘肃至四川、云南等国内区域，以及蒙古国、印度、孟加拉国等国际区域的27个矿源、300多个地质样本。

针对每一个样本，研究团队测量了包括锂、铍、钛、铁、铀等在内的57种微量元素。他们利用典范判别分析，将复杂的化学成分转化为地理特征，不同的地理区域具有独特的化学元素“指纹”。结果显示，该模型能精准区分出南亚、华南、中亚造山带和燕山四大矿源区，归类准确率高达90%以上。

“这是目前中国乃至东亚最完整的红玉髓矿源数据库，为溯源三星堆红玉髓珠、解析三星堆的外部联系奠定了坚实的科学基础。”合作团队负责人、地质地球所副研究员唐自华说。

据介绍，长期以来，有观点认为三星

堆的珍贵红玉髓珠可能经由长江中游或南方丝绸之路进入四川盆地。然而，此次微量元素分析彻底推翻了这一假设。

研究团队通过对三星堆红玉髓珠进行“指纹比对”，发现样本中铀和锂等元素的分布特征与印度德干高原及华南凉山、保山等地的矿源完全不符。11颗珠子中，有7颗的成分特征指向了燕山造山带，另有3颗指向了更广阔的中亚造山带，涉及从黑龙江大小兴安岭至河西走廊北部或内蒙古西部等地的矿源。

“这意味着，3000年前四川盆地的古蜀人就已经与千里之外的北方草原、黄土高原建立了稳定且持久的物质交换渠道。”唐自华说。

研究团队还对比了同时期甘肃磨沟、陕西寨沟及北京新官等遗址出土的红玉髓珠。令人意外的是，这些相距千里遗址点上的文化面貌完全不同的考古

学文化人群所使用的红玉髓，竟然“共享”相似的“北方指纹”，从而揭示了一个覆盖蒙古高原、黄土高原、华北平原、青藏高原东缘直至四川盆地的巨大物质交换网络。

基于此，合作团队还原了一幅古蜀人对外交流的图景——在那个缺乏文字记录的时代，红玉髓珠犹如地图上闪烁的坐标，可能沿着成都平原西缘的山地，跨越岷江上游，最终与甘青地区、黄土高原乃至更北方的交换体系交汇。

“这证明当时存在一个由精英阶层主导的红玉髓资源管控系统。这些高价值物资通过贡赋、长途贸易或战争向下渗透，最终进入古蜀社会的最高层。”唐飞说。

“迷宫”指針

唐飞表示，玉髓揭示的传播路径，与中国考古学家童恩正提出的我国史前从东北到西南的边地半月形文化传播带高度契合。精英阶层对远程稀有资源的高度垄断，是早期国家形成过程中巩固政治权威的重要策略。

“没有科学证据作为‘指針’，我们很难想象三星堆如此繁荣的文明社会是如何奠基的。”唐自华说，每一颗红玉髓珠，都承载着那个时代精英阶层的宏大视野。它们证明了在3000年前的中国，资源的流通远比想象得更为广泛和复杂——此前有学者提出，三星堆玉石和青铜器源自长江中下游地区，而红玉髓的研究开辟了三星堆“北向联系”的新视野。

唐自华表示，三星堆红玉髓珠研究采用的基于微量元素数据库的溯源方法，未来可向全球推广，用于玛瑙、碧玉等隐晶石英文物的溯源研究。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1073/pnas.2524563123>

发现·进展

中国科学院南京地理与湖泊研究所

「精准水文调控」提升湿地固碳能力

本报讯(记者袁一雪)湿地是地球生态系统中至关重要的碳库，但在气候变化与人类活动的双重影响下，其水文连通性正持续发生变化。中国科学院南京地理与湖泊研究所(以下简称南京地湖所)科研团队以中国最大淡水湖——鄱阳湖为研究对象，利用自主研发的水文连通性评估工具CAST，对湖内77个碟形湖的连通性进行了系统分类与定量分析。研究结论颠覆了“水文连通性越强，湿地固碳能力就越强”的传统认知。相关成果近日发表于《水资源研究》。

此次研究不仅通过记录鄱阳湖碟形湖与主湖的连通时长，将其划分为高、中、低3类连通类型，还获得了3项科学发现。

论文第一作者、南京地湖所副研究员谭志强表示，首先，“此次研究聚焦湿地植被碳储量变化，我们发现低连通性碟形湖的植被年均固碳量显著高于高连通性碟形湖，单位面积固碳能力高出约29%，由此得出‘低连通’反而‘高固碳’的结论”。另外，研究人员发现，退水期的水文连通性格局是驱动湿地固碳变化的最关键因素，也意味着退水期是关键水文窗口期。研究还进一步解释了人类活动对碳储量的影响。

研究人员分析2000年至2020年间的发现，鄱阳湖湿地植被碳储量以年均0.09太克(1太克等于10⁶克)的速率增长，且三峡工程运行后，碳汇能力提升更为显著。“三峡工程运行后，退水提前延长了秋季生长期，促使更多生物量积累，这是鄱阳湖湿地植被碳储量增加的关键机制。同时，枯水期水位持续偏低，使得更多洲滩裸露，生产力更高的洲滩植被逐步取代沉水植被，这也推动了碳储量的增加。”谭志强说。

基于研究结论，研究人员建议，湿地保护与修复应避免“连通即优”的单一思路，转而实施基于生态过程的水文时序精准调控。具体而言，需综合考虑碟形湖功能定位、植被物候与水文节律的动态匹配。在涨水期，可适度延缓碟形湖水位上升，减少淹没对春季植被生长的抑制；在退水期，则应通过优化碟形湖闸门调度，模拟自然退水过程，为秋季植被生长延长光合作用窗口，进而提升固碳效率。这一“因时制宜”的调控策略，有助于在复杂水文条件下协同提升湿地生态功能与固碳潜力。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1029/2024WR039631>

推出全新声音主题展 广东科学中心



体验现场。

广东科学中心供图

本报讯(记者朱汉斌 通讯员李早花)2月6日，广东科学中心推出的“回响·Beyond Sound”声音特展正式面向公众开放。此次全新声音主题展突破传统听觉展览边界，将科学原理与情感体验深度绑定，创新构建“惊奇—探索—共鸣”的递进式参观路线，让观众从客观感知浩瀚宇宙的声音开始，转向聆听身边的

自然环境、动物及人类社会的声音，进而探索声音与情感甚至行为的关系，最终步入个体声场，落脚于个人的内在感受，完成“由外到内”的独特感知之旅。

据介绍，展览分为惊奇、探索、共鸣3个展区，以及28个互动展项。在惊奇展区，观众可通过互动设备倾听身体的心跳频率、呼吸节奏甚至打鼾

声，在宏大声场与个体声场的强烈对比中完成对声音认知的首次颠覆。在探索展区，观众不仅可以看见声音，还可触摸声音，体验声音对视觉、触觉乃至行为决策的影响，探索感官联觉的内在逻辑。在共鸣展区，观众可以通过聆听时代的声、世界的声音及岭南的声音，进一步感受和反思声音可以留下怎样的记忆或联想。

国际首套单机功率最大的压缩空气储能压缩机研制成功

本报讯(记者陈欢欢)近日，中国科学院工程热物理研究所(以下简称工程热物理所)在压缩空气储能技术研发方面取得重大突破。由该所联合中储国能(北京)技术有限公司研制的国际首套单机功率最大的压缩空气储能压缩机通过了具有中国合格评定国家认可委员会(CNAS)资质的第三方测试。测试结果表明，该压缩机最高排气压力达10.1兆帕，最高功率101兆瓦，变工况范围为38.7%~118.4%，最高排气压力下的效率为88.1%，达到国际领先水平。

压缩机是压缩空气储能系统最重要的核心部件之一，其作用主要是在储能时将常压空气压缩至高压状态，并储存至储气装置中，将电能转化为空气压力能和热能。工程热物理所通过自主创新，突破了总体设计优化、



先进压缩空气储能系统压缩机。 工程热物理所供图

全三维流动优化、长转子复杂轴系结构设计、高效变工况控制等关键技术难题，研制成功了国际首套单机功率超过100兆瓦的压缩空气储能压缩机，具有完全自主知识产权。相比已有压缩空气储能压缩机，其单机功

率提高100%以上，单位成本大幅降低，具有效率高、压力大、运行范围宽等优点。

据悉，工程热物理所从2005年起在国内最早开展压缩空气储能技术研究。经过20余年努力，首次提出先进压缩空气储能新原理，突破了系统全工况设计、宽负荷压缩机、高效紧凑型换热器、高负荷膨胀机等关键技术；建成了涵盖“系统设计—关键部件—集成控制”的完整压缩空气储能研发设计体系；率先建成了1.5兆瓦—10兆瓦—100兆瓦—300兆瓦先进压缩空气储能国家示范项目。单机功率最大的压缩空气储能压缩机的成功研制，是世界压缩空气储能技术领域的重要里程碑，将推动压缩空气储能技术迈上新台阶。

蜜蜂大小的无人穿梭探测，手术机器人在人体血管内精准巡航，新一代超声影像可捕捉细胞早期病变，虚拟现实交互拥有真实皮肤触感……

此前，由于缺少能够将“力”与“电”进行超高效、超灵敏转换的“超级材料”，这种科幻场景很难实现。如今，中国科学家将它变成了现实。

由浙江宁波甬江实验室上席研究员、西安交通大学讲座教授任晓兵领衔的联合团队，成功将一类经典且低成本的多晶压电陶瓷核心性能指标——压电系数，提升了近10倍，创制出前所未有的“超级压电陶瓷”。不仅如此，团队更开创了“主动压电器件”全新范式，使得这种材料能够在以往被视为“性能禁区”的理论极限区稳定工作。

这项近日在线发表于《科学》的突破性研究成果，被审稿人评价为一项“革命性发现”。它不仅刷新了一项世界纪录，更有望重塑高端传感器、精密驱动器、下一代智能交互系统等关键领域的技术格局。

从600到6850

压电材料是智能时代的关键功能材料之一，作为实现力-电信号转换的核心元件，被广泛应用于各类精密智能设备的底层架构。

压电材料是灵敏的“神经”，手机指纹识别中的触觉反馈、医疗超声探头探测的体内回波，都依赖它将机械或声学信号转换为电信号。它也是精密的“肌肉”，高端相机镜头的快速对焦、光刻机平台的纳米级位移，皆由它实现精准控制与驱动。

衡量材料“敏感度”与“驱动力”的核心参数是压电系数。这一数值越高，材料的力电耦合转换性能就越优异。然而，过去70余年，这项指标的提升几乎陷入停滞。

在主流陶瓷材料中，自20世纪50年代锆钛酸铅(PZT)多晶陶瓷问世以来，其性能始终定格在200~600皮库仑每牛顿区间，数十年未有实质性突破。而高端单晶材料方面，在上世纪80年代出现的弛豫铁电单晶虽然可将性能提升至2000皮库仑每牛顿量级，但成本高昂、稳定性差且机械脆弱，始终难以走向规模化应用。

如今，这一僵局被该团队彻底打破。

任晓兵团队基于廉价的多晶锆钛酸铅陶瓷，通过独创设计，成功研制出压电系数达6850皮库仑每牛顿的压电陶瓷材料。这一性能不仅是传统压电陶瓷的10至30倍，更显著超越了所有已知的顶级单晶材料。这标志着一种兼具超高性能与工程实用性的“超级压电陶瓷”正式诞生。

这项突破有望为下一代微型机器人、细胞级超声成像、高保真触觉交互等前沿领域提供关键材料支撑。其提出的主动压电器件新范式，也将为整个功能材料领域带来深远启示。

长达15年的探索

这一突破，源自团队对理论极限15年的执着探索。

2009年，任晓兵便在《物理评论快报》上提出前瞻性理论：在压电材料的相图多相交汇区域，存在一个“三临界点”，即热力学奇点。在该点附近，各相之间的能量壁垒趋于消失，材料对外部激励的响应理论上可接近无限大，堪称压电性能的“珠穆朗玛峰”。

然而，一个看似无解的困境使得该理论长期停留于猜想：这座“性能珠峰”的坐标，恰恰位于传统压电材料的“死亡温度”——居里温度上。这是因为传统压电材料需通过强电场进行极化，使内部偶极子排列一致以产生宏观响应；然而一旦温度接近居里温度，热扰动便会迅速破坏这种有序性，导致压电性能完全丧失。

因此，在长期的普遍认知中，这一热力学奇点被视为“理论上存在，工程上却无法实现”。



任晓兵(左)和团队成员在实验室。

为压电材料穿上『智能宇航服』

■本报记者 李媛

面对“接近性能极限即失效”的困境，任晓兵团队提出了颠覆性的逆向思路：能否设计一种方法，使材料在传统认知中的“失效温度”下不仅“存活”，还能高效工作。

为此，他们首次提出压电器件的“主动工作模式”，其核心在于两项关键调控技术：一是微区精准控温——通过集成局部热管理模块，将压电材料的工作温度精确稳定在理论奇点附近；二是偏置电场维持——施加一个微小而持续的约20伏每毫米偏置电场，以引导材料内部的电偶极子保持有序排列，从而抵消热扰动带来的性能退化。

任晓兵介绍：“这一机制可形象地比喻为攀登珠穆朗玛峰——不仅要选拔出具备卓越潜力的登山者，即高性能压电陶瓷，更需配备可靠的保温与供氧系统，确保在极端环境下持续发挥最佳状态。”

最终，基于此模式构建的主动压电器件，在室温至350摄氏度的宽温范围内，实现了压电系数>6000皮库仑每牛顿的稳定输出，且该性能理论上可进一步拓展至超低温或超高温环境。这直接回应了工程应用中最关键的挑战——在温度波动下保持性能稳定与长期运行可靠性。对于高温工业、航空航天等极端工况而言，“高灵敏度”与“高稳定性”缺一不可。

打造“宇航服系统”

传统的压电材料研发，如同在“舒适区”内精雕细琢，科学家竭力优化材料本身的性能，却难以克服其“怕冷怕热”的天性，一旦环境温度偏离室温，性能便大幅波动。而任晓兵团队开创的“主动工作模式”，则为超级材料穿上了“智能宇航服”——通过微区精准控温与触觉交互等前沿领域提供关键材料支撑。其提出的主动压电器件新范式，也将为整个功能材料领域带来深远启示。

“这就像人体必须维持在37摄氏度左右才能正常活动一样。”论文共同第一作者、西安交通大学前沿科学技术研究院教授王栋形象地比喻道：“有了宇航服和空间站，人类就能在太空极端环境中长期工作，而新技术就相当于给超级压电材料打造了一套‘宇航服系统’。”

这种能够“主动适应环境”的智能器件，不仅实现了超灵敏、超稳定的性能，更具备了传统材料难以企及的环境稳定性。

“这一突破意味着，在高端传感器、精密驱动器、下一代超声成像、微型机器人、光刻机乃至太空探索装备等领域，我们有望获得一种全新的核心材料支撑。”论文共同第一作者、西安交通大学电气学院教授高景晖进一步解释，它像信息时代的芯片、工业时代的钢铁，有望成为智能时代关键功能部件的基础元件，助力相关产业的技术升级与跨越发展。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1126/science.acc5660>