



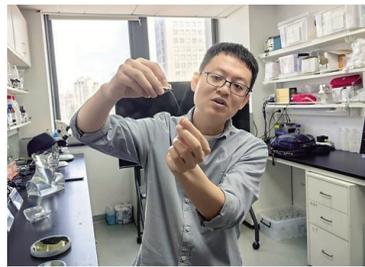
我国首例侵入式脑机接口系统临床试验完成近 3 个月——把先进技术装进大脑里

■本报记者 倪思洁

“24 岁的时候，一次高压电事故让我失去了四肢，那正是一个人步入社会的时候……”36 岁的受试者背对镜头回忆着他的经历。

此时，他的颅骨上一枚硬币大小的脑机接口系统已经植入近 3 个月，目前，其系统运行和信号传输稳定，受试者也没有出现感染问题。靠着意念，受试者不仅可以灵活控制电脑光标，还能和家人畅玩《马里奥赛车》电子游戏。下一步，科研人员将让他尝试操控机械臂。

这套侵入式脑机接口系统由中国科学院脑科学与智能技术卓越创新中心（以下简称脑智卓越中心）两名“90 后”科研人员带领团队研制完成。通过与复旦大学附属华山医院及相关企业合作，他们将技术推进至临床试验阶段，这标志着我国成为继美国之后全球第二个侵入式脑机接口系统进入临床试验阶段的国家。



赵郑拓介绍柔性电极和脑机接口植入。倪思洁/摄

训练，他开始用意念下象棋、玩赛车游戏。术后近 3 个月来，脑机接口系统运行稳定，未出现感染或电极失效的问题，受试者脑控的熟练度达到了与普通人控制电脑鼠标相近的水平。

植入大脑的“世界之最”

受试者脑中植入的设备，包含了多项世界领先的技术。

首先，他颅骨上的脑机接口植入体，是目前全球最小尺寸的脑机接口植入体。

植入体直径为 26 毫米，厚度不到 6 毫米，与埃隆·马斯克创办的企业 Neuralink 的侵入式脑机接口系统相比，它只有其一半大小，因此不需要为了植入设备而整体贯穿受试者颅骨，不仅减少了植入损伤，还缩短了术后康复周期。脑智卓越中心研究员李雪说：“该系统是国内唯一获得注册型检报告，可以长期稳定采集到单神经元 Spike 信号的脑机接口系统。”

其次，伸进他脑神经中的柔性电极，是目前全球尺寸最小、柔性最强的神经电极。受试者脑中的柔性电极截面积仅为 Neuralink 植入体产品所用电极的 1/5 至 1/7，柔性则超过百倍，可以让脑细胞几乎“意识”不到旁边有异物，最大程度降低电极对脑组织的损伤。

“超柔性神经电极已相继完成在啮齿类、非人灵长类和人类中长期植入和稳定记录验证，具备高密度、大范围、高通量、长时间的稳定在体神经信号采集能力。”脑智卓越中心研究员赵郑拓说。

最后，受试者能用意念玩赛车游戏，与脑机接口系统的毫秒级实时在线解码算法有关。

“该系统可以在十毫秒窗口期内，完成神经信号的特征提取、运动意图解析及控制指令生成全流程。”赵郑拓说。

赵郑拓所在研究组通过自主研发的在线学习框架，解决了传统静态解码模型难以适应神经信号时变特性的问题，实现了低延迟、高鲁棒性、跨天稳定的实时在线解码。

“在神经外科手术中，这属于微创手术，成本相对较低。”路俊锋说。

5 天后，受试者在试验人员的指导下，用意念移动了屏幕上的光标。之后，通过两三周的

（下转第 2 版）

首个史前母系氏族发现背后

■本报记者 冯丽妃 廖洋

证实了！中国最早成功实施开颅手术的傅家遗址是母系氏族社会。

近日，这一重大发现发表于《自然》并冲上热搜。一个由北京大学、中央民族大学、山东省文物考古研究院等机构组成的跨学科团队，首次在世界范围内为史前母系社会组织存在提供了直接证据。

这一判定有何依据？又有何学术与现实意义？《中国科学报》记者就此采访了研究团队成员，窥探这一发现背后的故事。

强强联手破谜题

故事始于 2021 年 8 月。从德国马普学会访学归来的宁超，带着分子遗传学的研究背景加入北京大学考古文博学院。从自然科学跨界到人文科学，他的目标很明确：用古 DNA 技术破解考古中长期悬而未决的问题。

传统古 DNA 研究常聚焦“人群从哪儿来”，而宁超想突破这一单一研究框架，回答“社会结构如何”“文化模式怎样”等更深层次的问题。

“古 DNA 技术能为考古学提供新解释维度；而考古学样本丰富，且能聚焦具体学术问题，可避免纯技术导向的‘数据堆砌’。”宁超认为。

他与“老搭档”——北京大学考古文博学院长聘副教授张海波，很快锁定一个极具挑战性的问题——史前中国是否存在母系社会组织？

这个问题在学术界争议已久。1861 年，瑞士人类学家巴霍芬提出人类早期社会普遍存在母系阶段；1871 年，美国人类学家摩尔根构建了母系向父系过渡的社会进化模型；1884 年，恩格斯在其著作《家庭、私有制和国家的起源》中进一步强调母系氏族是原始共产主义社会的重要特征。

然而，百余年来，这些理论一直缺乏直接的考古证据。

傅家遗址为此提供了机遇。该遗址位于山东省广饶县，隶属于黄河下游一带新石器文化——大汶口文化，曾出土大量石器、陶器、玉器，并发现了中国最早的成功开颅手术实例。尽管主流观点认为大汶口文化属于等级式父权社会，但傅家遗址的特殊性令人瞩目——随葬品极少、生产力水平低下、几乎不见贫富差距。这些特征与现代民族学对母系社会组织的认知高度契合。

但傅家遗址是否属于母系社会始终未有定论。为攻克难题，新的“战友”不断加入，一个“古 DNA+ 考古学+ 民族学”跨学科研究团队迅速组建。

傅家遗址距今约 4750 至 4500 年，最早发掘于 20 世纪八九十年代，样本高度碎片化且



▲傅家遗址南区墓地 1995 年发掘现场。



▶傅家遗址全景。受访者供图

污染严重。北京大学化学与分子工程学院教授黄岩团队主攻微量核酸分析，团队中的副研究员庞玉宏在该方向已积累了十余年经验，他们凭借精湛的技术攻克了难题。“头部颞骨和听小骨是 DNA 质量最高的部位，若缺失则无法提取、测序、分析。”论文第一作者、该团队的王劲成博士解释说。

与研究人类迁徙不同，聚焦社会结构的研究不能仅对若干基因位点的变异，而是需要更多更加精细的位点。黄岩团队向《中国科学报》解释，线粒体只从母亲遗传，相同线粒体可建立母系成员的系统发育树；Y 染色体仅男性拥有，可判断是否继承自同一父系祖先；常染色体则父母双侧遗传，可追踪血缘亲疏关系。

“通过对比遗传特征，就能为破解社会结构提供信息。”中央民族大学副教授严实说。他负责分析父系遗传特征及提供人类学和民族学的理论支持。

很快，研究团队分析发现，傅家遗址南区的 46 个个体中，有 44 例（29 名女性、15 名男性）属于线粒体单倍群 D5b1b，占比 95.65%。这种单一化的遗传模式强烈暗示其源自单一母系祖先。而 10 例男性样本分属 6 种不同单倍型，其高度异质性与母系遗传的一性形成强烈反差。

然而，仅线粒体一致，并不能简单证明其是以母系为纽带的社会组织。“假设它不是一个社会组织，而是来自同一家系——一个血缘上有关联的老祖母的后代呢？”张海回忆说。

由于缺乏参照体系，研究一度陷入论证僵局。

事实上，此前山东大学考古学院教授董豫等也曾通过古 DNA 和同位素研究，提出傅家遗址大概率属于母系社会的结论，但受限于当时的 DNA 测序精度，未能获得学界广泛共识。

转机来临了。为配合广饶济高路以北傅家片区环境整治提升工程建设，山东省文物考古研究院对傅家遗址进一步发掘——另外一片北区墓地现身了。

揭开庐山真面目

2021 年 10 月，雨季刚过，山东省文物考古研究院研究馆员孙波、管金国等从济南奔赴广饶，赶在高速公路建设前对傅家遗址北区进行保护性发掘。

“田野考古铲头功夫要过关，不能用‘挖’，那太粗糙；要用‘刮’，一铲一刮刮出来。”管金国说。

从当年秋季“刮”到年底，工地结冰后，他们用毛毡布、草苫子覆盖和保护遗址，每天抢在下午土壤冻结前提取人骨和器物，并拍照、摄像记录每个细节。有时来不及归库，这些千年古物就“住”在管金国的床底下。

这片北区墓地发掘面积约 300 平方米，墓葬 58 座，其中大汶口文化墓葬 38 座。尽管它与 20 世纪八九十年代发掘的南区墓葬规模不可同日而语——南区总面积达 37 万平方米、墓葬 508 座，但北区却成为破解谜题的关键。

当北区墓地 14 具人骨（11 名女性、3 名男性）的全基因组数据出炉，整个团队为之振奋——所有个体均属于线粒体单倍群 M8a3，与南区的 D5b1b 完全不同，证实存在两个独立母系氏族！

随着南北两区基因与发掘信息的拼合，一个原始村落的面貌逐渐清晰：村落由两个相距约 400 米的母系氏族组成，氏族拥有公共墓地，且长期保持通婚关系——两区之间相同的 Y 染色体单倍型，以及两区内部和之间存在的 1-6 级亲缘关系都证明了这一点。

（下转第 2 版）

研究发现树木也懂“节能减排”

本报讯（记者陈彬）你知道吗？树木不仅会呼吸，还会根据温度自动调节呼吸强度。近日，清华大学地球系统科学系副教授王焱团队联合澳大利亚、英国、美国等多国科研人员，首次提出基于生态进化最优性原则的理论模型，解释和预测了树干呼吸的热适应性，同时构建了全球植物树干呼吸数据库。相关研究证实了树干呼吸存在普遍的热适应现象。相关成果近日在线发表于《科学》。

研究发现，到 2100 年，树干呼吸热适应有望降低陆地生态系统 24% 至 46% 的碳排放，对缓解气候变化具有重大意义。

近年来，王焱团队基于生态进化最优性原则，将树干呼吸与叶片水分供应动态关联，提出了水分黏滞阻力和蒸腾速率驱动调节全球树干

呼吸时空变异的全新理论模型。在该理论中，树干呼吸速率应与蒸腾速率呈正比并受水分黏滞阻力的影响，从而确保植物碳利用效率的最大化。基于该理论模型，研究团队作出关于树干呼吸热敏感性的关键预测，即环境温度每升高 1 摄氏度，单位质量的基础呼吸速率下降约 10.1%，生长温度下的呼吸速率下降约 2.3%。

为进一步验证理论，研究团队构建了全球植物树干呼吸数据库。该数据库涵盖了全球各气候区 68 个野外站点、187 个物种的 8782 组观测数据以及一项升温实验数据。观测结果证实了理论模型的可靠性。

随后，研究团队通过季节性观测和温室升温实验，在个体尺度验证了树干呼吸的热适应现象。此外，在 5 项树种幼苗的升温实验中，所

有实测结果均与理论预测值高度一致。

研究团队进一步评估了树干呼吸热适应对全球陆地生态系统碳通量的影响。结果显示，当前全球树干呼吸年碳排放量约为 270 亿吨，相当于人为排放的 2 至 3 倍。应用于未来气候变化情景分析，在考虑热适应的机制下，至 2100 年，树干呼吸预测将降低 24% 至 46% 的碳排放。

研究表明，现有地球系统模型忽略树干呼吸热适应机制，可能显著高估气候—碳正反馈效应。这一发现为修正全球碳预算和气候预测提供了关键理论基础和数据支持。

下一步，研究团队将深入探究土壤水、二氧化碳浓度等环境因子及植物水力特征等内在因素的影响，阐明树干呼吸热适应的具体机制，并将生态进化最优性理论框架及树干呼吸的热适应特性整合到地球系统模型中。这些工作将显著提升全球碳循环动态模拟的准确性，助力气候治理决策。

相关论文信息：

<https://doi.org/10.1126/science.adr9978>

免了传统方法制备的小晶体所带来的缺陷问题，极大提升了 LED 的稳定性和亮度。

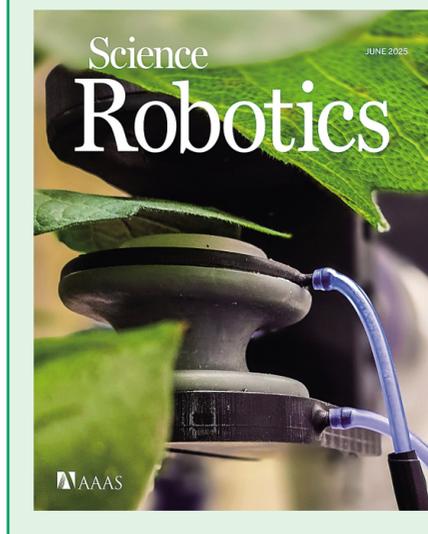
研究表明，在效率方面，这种新型钙钛矿 LED 的发光效率超过 22%，与商业化显示产品的发光效率持平。与目前市场上的主流商用有机发光二极管（OLED）或 LED 屏幕相比，新型钙钛矿 LED 的极限亮度达到 116 万尼特。人们日常使用的显示屏最高亮度通常在数千尼特以内，所以按照正常亮度 100 尼特计算，新型钙钛矿 LED 理论上能使用超过 18 万小时，已经达到商业化 LED 产品的一般标准。

研究人员介绍，这项突破性技术成功突破了以往钙钛矿 LED 在效率和稳定性上难以兼得的技术瓶颈，有望广泛应用于高端显示屏、超高亮度照明等领域，推动 LED 技术进入一个崭新阶段。

相关论文信息：

<https://doi.org/10.1038/s41586-025-09137-1>

看封面



新款柔性软体机器人夹具亮相

最新一期《科学—机器人》封面展示了一款柔性软体机器人夹具，其正准备对棉花植株的叶片进行按压处理。

该夹具能够实现大面积的按压式加压渗透操作，与传统的无针注射器方法相比，能显著减少对叶片的损伤。研究人员借助这一技术，成功推送了追踪叶片水势的水凝胶纳米颗粒和可编辑叶片 DNA 并使叶片变色的基因物质。（蒲雍杰）

图片来源：《科学》

报告建议美国建缪子对撞机



本报讯 美国国家科学、工程和医学院（NAEM）在近日发布的报告中表示，为了重振粒子物理学研究的领先地位，美国应在本世纪中叶建造全新的“原子对撞机”——缪子对撞机。

据《科学》报道，缪子是自然界的基本粒子之一，质量介于电子和质子之间。建造缪子对撞机是近年来物理学家的梦想。尽管技术要求很高，但这种对撞机理论上可以产生前所未有的能量，从而能以低于传统加速器的成本寻找新粒子和新现象。

理论物理学家、上述报告委员会的联合主席 Michael Turner 表示，建造前沿对撞机“是我们希望看到的、能够反映美国领导力和创新力的事项之一”。

其他相关人士则持不同看法。他们认为，建造价值 200 亿美元的缪子对撞机的想法可能会面临政治阻力。

欧洲核子研究中心（CERN）的大型强子

对撞机是目前最大的粒子加速器，通过质子对撞开展研究。不过，由于质子是复合粒子，每次碰撞时仅有部分能量参与反应。相比之下，缪子作为基本粒子，在碰撞时能将所有能量投入到新粒子制造中。此外，由于缪子的质量只有质子的 10% 左右，它们可以在更小、更便宜的环形加速器中加速至较高能量。

不过，如此优秀的缪子对撞机实现起来有一大难点。缪子会迅速衰变，对撞机必须在几分之一秒内实现粒子的产生、收集、加速和碰撞，而现在这一点很难做到。因此，上述报告建议美国立即启动相关研发计划，开发缪子加速技术和加速器。

此外，该报告还指出，美国应参与 CERN 新的 91 公里正负电子对撞机建设，同时支持该国的暗物质、暗能量、中微子探测及其他宇宙学项目。

但美国能源部前实验室主任 William Mardia 指出，在研究经费削减政策下，特朗普政府可能对这项花费数百亿美元的建议“充耳不闻”，而且该项目可能也不在特朗普政府划定的研究重点里，“政府讲话没有提到高能物理学、核物理学、中微子之类的研究”。

（徐锐）

使用寿命超 18 万小时

超稳定钙钛矿 LED 研制成功

本报讯（记者王敏）中国科学技术大学教授肖正国团队在延长钙钛矿发光二极管（LED）寿命方面取得了重要进展。他们提出一种被称作“弱空间限域”的新方法，制备出晶体颗粒更大、更耐高温的全无机钙钛矿薄膜，成功将 LED 亮度提高到 116 万尼特，使用寿命超过 18 万小时。近日，相关研究成果发表于《自然》。

钙钛矿是一种性能优越的新型材料，具有发光效率高、成本低廉和制作灵活的优点，在太阳能电池、LED 和探测器中应用前景广阔。然而，由于传统钙钛矿材料中电子和空穴（负责发

光的电荷）难以有效碰撞发光，因此科研人员之前多采用“强空间限域”的方法，例如制作非常小的纳米颗粒或极薄的材料层提高发光效率。但这种方法的缺点是 LED 很难达到高亮度，而且使用寿命短，通常只能持续工作数小时，相关产品很难应用在实际生活中。

为破解这一难题，肖正国团队提出一种完全不同的策略——“弱空间限域”。他们在钙钛矿材料里添加了特定的化合物，即次磷酸盐和氯化铵，通过高温退火工艺，制备出晶体颗粒更大、缺陷更少的新型钙钛矿薄膜。这种新材料内部更加有序，避