

4 厘米小鱼藏“不死之心”

研究破译斑马鱼心脏再生密码

■本报记者 廖洋 通讯员 张慧

在中国海洋大学海洋生物多样性与进化研究所的实验室，一群蓝银相间的热带淡水鱼正在透明的实验水箱中游弋。这群看似十分普通、身形纤细、最长不过 4 厘米的观赏鱼，就是中国海洋大学教授苏颖和赵龙团队长期研究的核心对象——斑马鱼。

人的心肌细胞一旦受损或缺失，便难以补充、修复。可神奇的是，斑马鱼却拥有一个可再生的心脏。

“它们的心脏在损伤后，可通过一系列细胞生物学事件生成新的心肌细胞及其他类型的心脏细胞，实现结构和功能的完全恢复。”赵龙告诉《中国科学报》，“解析再生过程的细胞动态与分子调控网络，被视为破解心脏再生医学难题的关键突破口。”

为揭开心脏再生的奥秘，中国海洋大学团队联合青岛华大基因研究院潜心绘制了斑马鱼心脏再生单细胞与时空转录组图谱，开创性揭示了心脏再生的分子机制，被国际同行评价为“再生医学领域的重要突破”。近日，相关研究成果发表于《自然 - 通讯》，并被选为重点推荐文章，编入《临床与转化研究》特刊。

斑马鱼拥有心脏再生的“超能力”

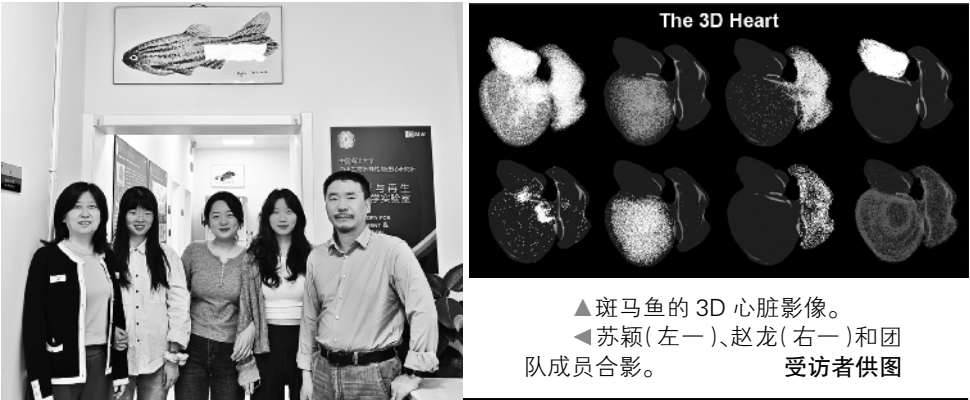
在心脏疾病研究领域，哺乳动物模型是主流。2002 年，斑马鱼非凡的心脏再生能力被《科学》报道。

赵龙说：“此次的研究方向就是基于这 20 多年的积累，并结合近年来飞速发展的空间组学和单细胞组学技术确定的。”

苏颖和赵龙最初接触斑马鱼，还是 20 多年前在清华大学读研究生时。“在导师孟安明院士指导下，我们当时研究斑马鱼的胚胎发育过程，其中就包括心脏的发育。”赵龙说，后来，他出国进行博士后阶段研究，转向斑马鱼再生方向。

2016 年和 2019 年，苏颖和赵龙先后入职中国海洋大学海洋生物多样性与进化研究所，带着几位研究生开展心脏再生研究。

团队成员或用剪刀切除斑马鱼约 20% 的心室部分，或用液氮局部冷冻损伤心脏（模拟



人类心肌梗死），再将这些心脏受损的斑马鱼放回养殖系统正常饲养。一段时间后，他们发现，前者的心室可以重新长出，并完全恢复心脏结构和功能，后者的心脏经过更长时间，也同样能再生并恢复如初。

这种再生能力，正是人类心脏缺失的“超能力”。

为更加透彻了解这种“超能力”，苏颖和赵龙进一步明确了研究内容，即从时间尺度和空间尺度上，对斑马鱼心脏再生全过程全器官层面的细胞动态与基因表达变化进行系统刻画。

就此，他们走上了对斑马鱼心脏再生“超能力”的探索之路。

破译心脏再生的时空密码

2020 年左右，空间转录组技术得到蓬勃发展。在青岛华大基因研究院的支持下，研究团队从 2021 年起进行初步技术摸索，并陆续产出各个时间点的多组学数据，2023 年他们正式进入集中研究阶段。

“我们的研究分 3 步：厘清斑马鱼心脏损伤前后细胞类型及其分子特征——刻画这些细胞在关键时间点出现的变化，找出对心脏再生特别重要的细胞类型和基因，探究其功能和生物学运行机制。”苏颖告诉《中国科学报》。

研究中，团队借助空间转录组和单细胞转录组这两项“黑科技”，首次构建了斑马鱼心脏再生全过程全器官的、包含时间和空间维度的高分辨率细胞与基因表达动态图谱。

这就像给心脏做了一个动态的“3D 基因地图”，不仅能显示损伤修复过程中有哪些细胞和基因活跃或沉默，也能精确定位它们发生这些变化的时间和位置。

依照图谱，结合分子、细胞实验，研究团队锁定了一个名为 *tpm4a* 的关键基因。而这个 *tpm4a* 基因，恰巧是赵龙的博士论文研究对象，当时他已经解析了其在斑马鱼胚胎期心脏发育中的功能。

研究人员迅速联系孟安明，获得了突变体品系。他们分析发现，心脏受损后，该基因的活性降低，斑马鱼的新生心肌细胞再分化功能显著下降。

为更直观展示心脏再生过程，研究团队利用研究数据构建了具有时间序列的虚拟三维斑马鱼心脏，首次使斑马鱼心脏再生过程中细胞类型、基因表达的时空演变规律得到了数字化呈现。这些数据被收录到公共平台，可供领域内研究人员随时使用，为再生医学研究提供了强大工具与资源支撑。

中国海洋大学团队负责科学问题提出、整体研究方向把控、部分数据的处理及全部的实验验证，青岛华大基因研究院团队则高效完成了数据处理分析工作和三维心脏的构



“Idrilling 应龙”科学钻井系统发布

本报讯(记者计红梅)近日,记者从中国石化新闻办获悉,中国石化石油工程“Idrilling 应龙”科学钻井系统发布会在山东青岛举行。

该系统构建了“感知 - 决策 - 执行”三位一体的智能控制体系,犹如为“钻地龙”装上“精准眼”和“智慧脑”,实现钻井全流程智能协同、自主优化,达到国际先进水平。同时,通过全自动化钻机与远程决策中心之间的高速网络联动,该系统可以实现地下和地面高效协同,大幅提高效率和准确性。前期试验阶段,该系统已在非常规油气藏累计应用近 400 口井,应用井段平均机械钻速提升 19.34%,平均钻井周期缩短 12.93%,复杂故障率大幅降低,为钻井科学提速增效找到新途径。

该系统由中国石化旗下的中石化石油工程技术服务有限公司主导研发,中石化经纬有限公司、中石化胜利石油工程公司联合攻关研发。

北京脑科学与类脑研究所基因组学中心主任张力：国产算力硬件已能很好支持基因组学科研工作

■本报记者 赵广立

高端芯片进口受限、核心基因数据库禁止国内用户访问……诸多外部事件，让基因组学的国产科研方案从备选成为必选。但面对未充分运转的国内基因组学生态体系，科研人如何切换国产科研环境成为新问题。

近日，北京脑科学与类脑研究所基因组学中心主任张力在接受《中国科学报》专访时表示，国产算力硬件已能很好地支持基因组学科研工作。而面对国内海量基因测序与分析需求，国产软件将迎来快速发展的机遇，并逐步实现基因组学计算生态的自主与可控。

国产算力能够很好支持基因测序

“国产 CPU(中央处理器)和 GPU(图形处理器)在某些直接性能测试中可能不如国外最新产品，但在实际应用中，硬件参数并非决定因素，更重要的是算力设施对整个基因组学软件生态的支撑与持续优化能力。”张力强调，基因组学是数据密集型的，其研究核心是海量数据的处理和分析，而高性能计算是支撑这一过程的关键技术。

以全基因组测序为例，每 1 万人的原始数据就达到 1PB(1PB=10⁶GB)，经初步处理

后数据量通常会达到 5PB。而对这种规模的数据进行处理，某些国产高性能计算平台已可支撑。

尽管国产算力设施已能较好支持基因组学研究，但要实现基因组学的自主可持续发展，生态建设仍是关键。

“软件大多用的是国外产品，国产软件不是没有，但严格说，从顶层设计到应用没有形成一个体系。”张力介绍，依托国内海量基因测序与分析需求，基于国产硬件完善基因组学软件工具链，可以应对可能出现的极端情况。

生态缺失导致科研成果转化难

建立基因组学的国内生态体系，除能防范供应链风险外，更重要的是可推进基因组学产业化应用，加快科研成果转化。

张力介绍，北京脑科学与类脑研究所基因组学中心建设时，从样本采集到数据处理的整个流程都使用国产解决方案，但研究成果落地却面临产业化“鸿沟”。

目前，北京脑科学与类脑研究所承担着由北京师范大学牵头的中国学龄儿童脑智发育队列的基因组学子任务。截至今年 5 月，该中心已完成 6000 名儿童横断队列全基因组

测序，但这些测序数据如何与第三方同步、进行产业化应用，却面临一系列包括安全、产权、技术、运营等在内的问题。

“我们的数据集不仅在國內领先，在全球范围内也非常有竞争力，已有多家药企表示感兴趣。但如何实现数据安全共享，国内并没有标准化的解决方案。”张力表示，产业化难题与基因组学生态体系不完善密切相关。

目前，我国正在努力推进建立人类遗传资源保护和利用体系，通过完善的顶层设计，综合产权、技术、运营等方面打造创新模式，力图在人工智能加速药物研发的机遇窗口实现我国药物研发的“弯道超车”。

生态发展需兼容国际主流研究环境

对于如何加快国内基因组学生态体系建设，张力表示，需从兼容性、完善性和人才培养多方面入手，在兼容国际主流研发环境的情况下，逐步构建并优化国产软硬件生态。

“兼容国际主流生态并不意味着被动跟随，而是要在保证兼容性的同时，逐步构建起具有中国特色的国产生态，并培养一批能够熟练使用国产软硬件的技术人才。”张力说。

他举例，在与国内某厂商合作中，对方曾

建。双方通过资源与技术互补，合作完成了这一研究。

心脏也能“长回来”？

别看现在研究团队取得了“再生医学领域的重要突破”，但实验室初创时困难重重。

当时，团队里几位研究生都是刚接触再生生物学的新人，生物信息学基础薄弱，心脏再生领域知识匮乏……面对心脏再生领域最前沿的时空组学技术研究，他们只能硬着头皮，一边学习新知识，一边尝试分析数据，摸索研究方法。

论文作者之一、中国海洋大学博士生卢美娜回忆说：“当时遇到最棘手的问题，是把数据分析和相关科学问题结合起来。这不仅需要掌握复杂的分析技术，还得熟悉大量相关的专业知识。”为攻克这个难关，课题组所有人都阅读了海量的文献，从文献洪流中“打捞”出有用的内容。

论文作者之一、中国海洋大学博士生张雪娇负责空间转录组的制样，尤其是在构建 3D 心脏样品时，需要将一个心脏通切成连续的近 200 个切片。为最大限度利用空转的芯片，她需要在每一张芯片上贴 6 至 9 个心脏切片。由于切片位置不可二次调整，当时刚入学半年的张雪娇反复练习一个多月，最终成功实现 191 个心脏切片的零失误切割，且全部精准贴在空转的芯片上。

对于整个团队来说，发现 *tpm4a* 在心脏再生中的功能只是开始。通过进一步研究，他们找到了两个可能直接关联心脏可再生能力的关键基因——*ifid1* 和 *asp6ap2*。这些基因的发现“为临床心血管疾病治疗研究提供了潜在靶标”，也提示后续或许可以通过药物等方式“激活”人类心脏中类似的修复基因，让受损心脏实现再生。

“我们希望进一步挖掘鉴定更多潜在的功能基因和细胞类型，重点关注这些基因与细胞的功能分析与机制研究，寻找并鉴定可能的提高心脏再生能力的靶标，助力心脏再生医学的发展。”赵龙说。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1038/s41467-025-59070-0>

日前，以“从高山到大海 助力濒危鱼类回家”为主题的 2025 年全国放鱼日湖南长沙公益放流站科学放生活动在湘江之畔的长沙公益放流站启动。

在长沙开福区生态修复基地，通过专业人员的指导，青年志愿者及近百组亲子家庭等将一尾尾珍稀物种胭脂鱼顺着滑道放归湘江。在活动现场，通过“鱼课堂”，生态导师详细讲解了胭脂鱼等珍稀鱼类的生存现状。现场还发布了《水生生物科学放生护生倡议书》，设置了“共绘美丽大长江”亲子绘画区。

本次活动由湖南省生态保护志愿服务联合会、长沙市绿动社区环保服务中心、长沙市礼湘环保志愿服务中心等联合主办。

本报记者王昊 通讯员谭彬彬报道 刘科/摄



受访者供图

派出三四十人的团队就北京脑科学与类脑研究所 500 多款生物学专业软件进行优化，以适应该公司提供的算力平台。

虽然迁移最终完成了，但生物学软件都在持续迭代，若不能兼容国际主流生态或开发出国产硬件的软件版本，每个海外软件新版本迁移都需要投入大量人力和时间，这将导致使用成本大幅上升。

“在当前窗口期，需要在国产兼容生态上加快完善国产工具链，抓住人工智能加速药物研发的历史机遇，逐步建立和推广中国标准与软硬件生态。”张力说。

发现·进展

中国科学院生物物理研究所等

揭示精子为何“跑不动”

本报讯(记者孟凌霄)中国科学院生物物理研究所研究员孙飞研究组联合北京师范大学教授陈苏仁,重庆市妇幼保健院教授黄国宁、林婷婷,中国科学技术大学教授张志勇等团队,共同揭示哺乳动物精子轴丝中央微管原位结构及其引发育精症的分子机制。日前,相关论文发表于《细胞研究》。

不孕不育影响着全球约 1/6 的育龄夫妇,其中男性因素占比接近一半。弱精症作为最常见的男性不育原因,主要表现为精子运动能力受损。精子尾部的鞭毛通过典型的“9+2”轴丝结构实现运动,其中中央微管是调控鞭毛摆动的关键。然而,中央微管结构复杂、动态性强,长期以来难以在原位获得高分辨率信息,阻碍了对弱精症分子机制的深入理解。

在这项研究中,孙飞研究组应用先进的冷冻电子断层成像技术,结合 AlphaFold2 结构预测,成功解析出小鼠精子中央微管的原位结构,局部分辨率高达 5.5 埃。研究团队建立了包含 466 个蛋白亚基的三维结构模型,识别出 39 种组成蛋白,其中 8 种为首次发现。研究揭示了 CFAP47 和 HYDIN 两种关键蛋白的完整结构与功能,明确其通过桥梁状连接稳定 C1 与 C2 微管的作用机制。

此外,通过 Cfp47 基因敲除小鼠实验以及临床弱精症患者的基因数据分析,研究进一步证实 CFAP47 蛋白缺陷可导致精子鞭毛运动障碍,直接关联弱精症发生。

该研究在国际上首次揭示哺乳动物精子中央微管的原位组装细节,并结合动物模型与临床数据,系统阐释了结构缺陷与疾病之间的因果联系,为弱精症的精准诊断与治疗提供了重要科学依据。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1038/s41422-025-01135-2>

中国科学院大连化学物理研究所

为构建高性能水系电池提供新方案

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陈志伟、窦浩楠团队提出了一种基于 π 电子离域的添加剂分子筛选策略,解析了添加剂分子结构和界面功能的构 - 效关系,通过微量功能化有机分子的界面自组装机行为,在锌负极表面构筑柔性有机亲疏水平衡界面层(HHIL),有效提升锌负极的界面稳定性与电化学可逆性,为构建高性能水系电池提供了新方案。近日,相关成果发表于《德国应用化学》。

水系锌离子电池因其高安全性、低成本和环境友好等优势,被认为是新一代大规模储能领域的重要候选技术之一。然而,锌负极在高倍率、长循环等实际应用条件下,面临析氢副反应、锌枝晶生长等界面问题。

在这项工作中,研究团队筛选出具有刚性准平面结构、强 π 电子离域能力、高正静电势的 N- 羟基邻苯二甲酰亚胺作为功能性电解质添加剂,并利用 $\pi - \pi$ 和离子 - 偶极的相互作用在锌负极表面原位自组装形成 HHIL。HHIL 在循环过程中可诱导形成富含 ZnS 和 ZnF₂ 的无机内层,实现柔性分子自组装层 - 刚性无机内层协同,有效提升 Zn²⁺ 的沉积可控性,抑制副反应和枝晶生长。

团队利用该体系所构建的 Zn/ /Zn 对称电池在大电流密度下稳定循环超过 900 小时,并且 Zn/ /NVO 全电池在 10Ag⁻¹ 下可实现超 2.5 万圈循环,容量保持率达 85%。此外,该体系在软包电池中展现了出色的倍率性能和良好的实用性。

该工作建立了分子结构调控 - 界面构建 - 电池性能提升的全链路机制,为水系锌离子电池添加剂分子设计与界面调控提供了理论指导和实验验证。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1002/anie.202506984>

西安电子科技大学

开发更快更安全 穿透血栓的纳米马达

本报讯(见习记者李媛)西安电子科技大学教授王忠良团队开发了一种新型纳米马达用于血栓的机械治疗。近日,相关成果发表于《先进材料》。

心梗、脑卒中等血栓性疾病是全球主要死因之一。传统溶栓药物存在半衰期短、靶向性差、出血风险高等问题,亟须开发新型的非药物溶栓策略。尽管使用纳米马达的非药物血栓治疗表现出很高的生物安全性,但其治疗效果受到渗透不足的限制。

王忠良团队开发出一种磷脂酰胆碱脂质体包裹的铂纳米马达(PLANEs),能够通过更快的速度和更小的摩擦力实现深层血栓渗透。

PLANEs 包括一个由铂纳米马达构成的不对称核心和一个磷脂脂质体外壳。后者能够提高速度并减少摩擦力,在激光照射和过氧化氢的作用下,PLANEs 的速度远高于传统铂纳米马达。与传统铂纳米马达相比,PLANEs 穿透血栓能力显著增强,可实现血栓机械治疗,而无需药物干预。这一技术为血栓治疗提供了更安全、非药物的策略,并有望拓展至其他纳米载体的优化设计。

为增强其体内治疗潜力,研究人员开发了靶向血栓的 cPLANEs,能够有效靶向并破坏血栓,同时在近红外激光照射下清除过量的活性氧,可实现高效的血栓机械治疗。

研究提供了一种提高纳米马达穿透血栓能力的策略,从而在不需要溶栓剂的情况下,增强纳米马达的运动行为和疗效效果,进而为血栓性疾病治疗提供全新思路。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1002/adma.202418590>