

27 个物种，解开跨越数亿年的“心动”密码

■本报记者 廖洋 通讯员 曹馨月 宋俊瑜

显微镜下，一只果蝇的“心脏”正在跳动。这是个仅数百微米的管状结构，肉眼几乎难以辨识，却稳稳支撑生命运转。与之相比，人类拥有结构精密的四腔心脏，章鱼演化出 3 颗协同工作的心脏，海鞘心脏具备独特的双向泵血功能……亿万时光更迭，看似迥异的心脏结构背后是否藏着一套通用的演化底层密码？

中国海洋大学联合青岛市妇女儿童医院、广东省人民医院等单位，系统解锁了动物心脏亿万演化的分子基础与细胞机制。该研究建成国际首套高精度空间分辨率动物心脏单细胞整合图谱，是目前物种覆盖最广、演化跨度最大的成体心脏多维转录组数据集，同步搭建的开放共享数据库 HEART⁺，为全球动物心脏演化研究打造核心资源平台。相关研究近日发表于《科学》。

午餐会上的灵感和众筹的跨界科研

心脏是动物适配不同生态环境的核心器官，在漫长演化中形成了高度差异化的结构与功能。长期以来，心脏研究多局限于小鼠等少数模式动物，受技术限制，大尺度跨物种心脏演化规律始终缺乏系统性解析。

2019 年，从美国归来的赵龙入职中国海洋大学任教授，在深耕心脏再生研究的基础上，开启了心脏演化规律的探索。

团队初期研究规模较小，仅覆盖扇贝、蜗牛、斑马鱼 3 个物种，初步探索了两腔室心脏演化的分子特征。随着研究深入，赵龙萌生了更大胆的构想：如果扩大物种研究范围，能否挖掘动物心脏演化的通用规律，破解其宏观演化机制？

2022 年，一场学术会议的午餐交流让这一想法落地生根。

赵龙同青岛华大基因研究院研究员范广益、中国海洋大学教授王玮深入交流，三方一拍即合，随即联动中国海洋大学教授王师、广东省人民医院教授费继锋，正式启动项目。然而，经费成了“拦路虎”。结合物种筛

选、多组学测序成本测算后，各团队商议决定，从自在研项目中调剂经费，以“众筹”的方式支撑项目起步。

项目开始后，物种筛选是关键。项目组最初选定了斑马鱼、海鞘、蝶蛭、扇贝等 15 个已有研究基础的物种，但很快发现，有限的样本会降低研究结论的准确性。

“这并不是简单地‘多找几种动物’，而是要让样本尽可能覆盖不同的演化分支。”赵龙告诉《中国科学报》。

“珍珠鸟形体较小，心脏尺寸适合实验需求，成为核心样本之一。”赵龙介绍，实验切片需放置在 1 厘米×1 厘米的芯片上，心脏过大无法完整呈现结构。

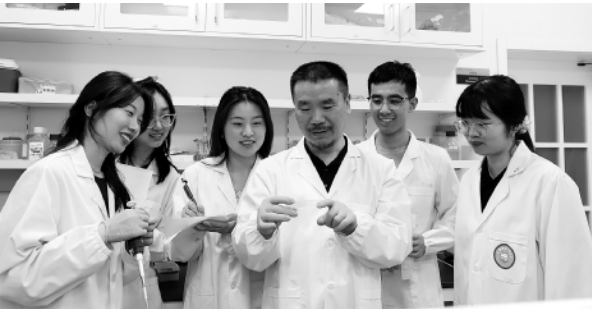
论文第一作者、辽宁师范大学教授凌越则将目光投向了七鳃鳗：“它是无颌类脊椎动物的代表，保留着原始演化特征，是研究心脏早期演化的关键样本。”

“原口动物这一核心支系为研究的重要切入点。其中，以鲎为代表的节肢动物类群保留了典型的管状心脏这一祖先形态。而以扇贝、蜗牛、章鱼为代表的软体动物，作为海洋中物种多样性最为丰富的第一大门类，其心脏的起源与演化特征尤为值得关注。深入解析该类群心脏的演化路径，有助于揭示软体动物在适应多样化复杂生态位过程中所实现的生理革新。”王师介绍。

2022 年底，27 个物种名单敲定，涵盖原口与后口两大类群动物，覆盖水生、两栖、陆生多元生活环境，囊括管状、两腔室、三腔室、四腔室等主流心脏演化形态，一项跨领域、跨物种的大规模合作研究正式拉开帷幕。

微米级实验破译心脏通用密码

科学构想最终要落到显微镜下毫厘之间的实验。那么，如何获取高质量的样本呢？



赵龙（右三）与学生讨论实验结果。受访者供图

研究人员需将心脏组织做成超薄切片，精准转移至测序芯片检测。由于不同物种心脏腔室结构差异极大，切片方向直接决定实验数据的完整性，是决定实验成败的关键。

“单张测序芯片成本高达数万元，绝不能浪费。正式实验前，我们会反复研读文献、开展大量解剖练习，确认样本合格后再上机检测。”论文第一作者、赵龙团队博士后芦美娜回忆。

王玮介绍：“海鞘心脏仅有单层细胞，切片过程中极易变形，团队博士生李昱儒几经摸索，才拿到完整形态的切片。”

最让芦美娜印象深刻的是果蝇单细胞转录组取样。

果蝇心脏仅 300 微米×50 微米。常规动物 2 至 3 个样本即可完成检测，果蝇却需要 300 至 400 个。研究人员需在显微镜下精准剥离微型心脏，在其维持活性的状态下快速保存，锁定分子特征。

“之前我们很喜欢吃鸡心，但处理太多样本后，现在几乎吃不下任何心脏类食物。”芦美娜苦笑。

历经多轮精准取样，项目终于进入检测阶段。

“研究主要采用空间转录组和单细胞转录组技术。前者保留基因空间表达信息，后者则区分不同细胞类型特征，二者互补完善。”青岛华大基因研究院研究员刘群解释。

2023 年下半年，27 个物种的检测工作

全部完成，项目正式进入难度最大、周期最长的数据分析阶段。

搞定最难啃的“硬骨头”

海量多维数据的整合分析是研究最难啃的“硬骨头”。

2023 年 9 月，团队成员从各地集结，全力破解数据分析难题。

跨物种数据整合是摆在他们面前的第一道难关。

刘群和中国海洋大学副教授韩文韬主动担起了这一重任。面对跨原口动物与后口动物的多个物种及其不同平台的基因组、转录组数据，他们在算法参数间反复调试，在基因注释文件中逐一核对，逐步建立起跨物种的整合注释框架。

心脏腔室演化轨迹的推演也在同步进行。

传统的演化分析多停留在组织层面，而中国海洋大学副教授谢姗姗创造性地将 TAI（转录组年龄指数）算法首次应用于单细胞水平，试图在单细胞分辨率下追溯不同细胞类型的演化年龄，让演化故事有了“细胞尺度”的时间轴。中国海洋大学硕士研究生骆佳鑫则利用多种算法精细拆解细胞类型，识别出保守的细胞类群核心基因标记，并分析水陆适应的分子基础。广东省人民医院博士研究生刘耀新集中攻克腔室边界的精准界定与跨物种细胞类型相似性比较难题，最终实现了跨物种层面细胞水平的系统评估。

从深秋到初冬，他们在海量数据的“密林”中艰难开路。每一条被成功注释的基因、每一个被精准定位的细胞类型，都为他们试图讲述的那个关于心脏演化的宏大故事“添砖加瓦”。

“每天一睁眼，大家就到小屋工作。”连姗姗回忆，“遇到问题集体讨论，有新进展随时分享。”

王玮还记得，他与赵龙每半个月就会去参加线下研讨。远在广州的费继锋全程线上联动，保障研究推进。

历经一年深耕，一张跨越数亿年的物种心脏演化图谱成型。

研究证实，不同物种心脏形态虽千差万别，但两侧对称动物的心脏共享一套核心基因谱系，超 60% 核心基因高度保守。在此通用遗传基础上，各类动物通过逐步叠加特异性基因的阶梯式演化模式，分化出适配自身生存环境的心脏结构与功能。原始心脏的泵血功能由心室样心肌细胞主导，心房是后续依托多种非心肌细胞逐步演化形成的。

此外，团队还首次鉴定出全新的心肌细胞瞬时状态 CMs（trans.），它与心脏发育、环境适应以及疾病响应密切相关。

这些成果为解析心脏遗传调控机制、研究心脏疾病，提供了新的科学依据与思路。

“科研不仅需要发现问题的耐心，更需要面对未知时持续探索的耐心。”在赵龙看来，科研的价值不仅在于获得一个答案，更在于发现新的未知。未来，团队将继续深挖动物心脏演化的内在规律，描绘出更完整的科学图景。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1126/science.adw0855>

发现·进展

中国科学院深圳先进技术研究院等

新型 AI 框架破解低计数 PET 成像难题

本报讯（记者刁雯蕙）中国科学院深圳先进技术研究院研究员胡战利等与合作者提出了计数感知扩散与门控自回归推理的新型人工智能（AI）框架，针对性解决了低剂量、超快速正电子发射计算机断层扫描（PET）中有效信号不足引发的图像噪点多、细节模糊、定量数据偏差等关键问题，提升了 PET 图像清晰度与检测准确度。相关研究近日发表于《医学图像分析》。

PET 能够观察人体代谢和分子活动，在肿瘤诊断和疗效评估中发挥重要作用。临床希望在保证图像质量的同时，尽可能降低示踪剂用量并缩短扫描时间。但采集时间缩短或注射活度降低后，可利用的信号随之减少，容易造成图像噪声增加、细节模糊和定量结果不稳定。

针对这些问题，研究团队提出了“计数感知扩散与门控自回归推理”新型 AI 框架。简单来说，第一步是给扩散模型加上一把反映 PET 采集条件的“计数尺”。模型不再只依赖通用的噪声设定，而能够根据不同低计数程度选择更合适的恢复路径。第二步是让图像恢复过程具备“记忆能力”。模型在恢复图像时不再“每一步都从头判断”，而是能够参考前面已经找到的结构和对比信息，逐步减少噪声、恢复细节，使生成的 PET 图像更加稳定地接近标准计数参考。

该研究共纳入了 4 家医院的全身 PET/ 计算机断层扫描（CT）数据，并通过不同采集时长构建不同程度的低计数 PET。结果显示，对于 3 秒采集的低计数图像，该方法能够明显降低噪声、改善图像清晰度和定量准确性；即使面对训练阶段未使用过的 1 秒极低计数图像，也保持了较好的增强效果。在山东、广东珠海和湖北武汉 3 个独立中心的测试中，该方法在不同采集时长下同样表现稳定，显示出一定的跨医院、跨数据分布适应能力。

未来，研究团队将进一步在真实低注射活度 PET 数据、不同型号扫描设备以及不同示踪剂中开展验证，并继续提升三维图像处理和推理速度，让低计数 PET 在减少辐射剂量、缩短检查时间的同时，能提供稳定可靠的影像信息，为更加安全、高效的 PET 检查提供技术支持。

相关论文信息：<https://doi.org/10.1016/j.media.2026.104265>

西安交通大学第二附属医院皮肤病院

蛋白协同致病环路使银屑病炎症持续加重

本报讯（记者李媛）西安交通大学第二附属医院皮肤病院教授刘亚乐、夏育民团队首次阐明了脂质运载蛋白 2（LCN2）与肿瘤坏死因子超家族成员 TWEAK 在银屑病中的协同作用机制。该研究提出创新性假说，为研究银屑病发病过程中的细胞间交互网络提供新思路。相关成果近日发表于《细胞与分子免疫学杂志》。

银屑病是一种慢性炎症性皮肤病疾病，全球患者超 6000 万，成人与儿童均可发病。其皮损表现主要为皮肤表面边界清晰的鳞屑性斑块。角质形成细胞、中性粒细胞与巨噬细胞之间的细胞互作网络共同构成了银屑病发生发展的基础，但调控三者相互作用的具体机制有待阐明。

研究团队近年发现 TWEAK 与受体 Fn14 结合后，启动皮肤组织炎症反应。LCN2 与 Fn14 都是银屑病发病的关键调控因子，促进表皮增殖、炎性细胞趋化及细胞因子释放等过程。然而，两者间的交互机制长期未被阐明。研究团队发现银屑病皮损中 TWEAK、LCN2 及 Fn14 的表达显著升高且具有相关性。通过分析银屑病皮损单细胞测序数据进行多色荧光免疫组化证实了 TWEAK、LCN2 的主要细胞来源。

结果显示，TWEAK 主要由角质形成细胞和巨噬细胞分泌，而 LCN2 高表达于角质形成细胞和中性粒细胞。表面等离子共振技术及免疫共沉淀实验首次揭示了 LCN2 与 Fn14 蛋白的结合能力，免疫荧光染色进一步验证了两者在细胞表面的共定位。

研究还发现，LCN2 调控巨噬细胞向 M1 型分化并促进 TWEAK 的表达和分泌，同时能够激活角质形成细胞中 MAPK 信号并促进 TWEAK 和 Fn14 的表达，而 TWEAK 能诱导中性粒细胞表达 LCN2。

转录组测序分析结果显示，LCN2 与 TWEAK 可协同增强角质形成细胞释放炎性因子，并显著放大 MAPK 通路活性。在咪喹莫特诱导的小鼠银屑病模型中，敲除 Lcn2 基因可降低皮损中 Fn14 的表达及血清中 TWEAK 的水平，而 Fn14 基因缺失未能减弱 TWEAK 和 LCN2 对表皮增生的促进作用。尤为重要的是，角质形成细胞中 Fn14 的过表达会放大 LCN2 对 TWEAK 表达的刺激作用，从而持续加剧炎症反应。

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41423-025-01292-9>

中国农业科学院烟草研究所

新型人工水解酶可高效杀灭农业病原菌

本报讯（记者李晨 通讯员李晓娟）中国农业科学院烟草研究所烟草病虫害绿色防控创新团队成功研发一种新型双金属人工水解酶，可高效降解细菌生物膜并杀灭病原菌，为细菌性病害绿色防控药剂创制提供了全新设计策略。相关成果近日发表于《德国应用化学》。

细菌生物膜是病原菌通过群体感应分泌形成的“保护壳”，主要骨架由糖类物质交织而成，可显著削弱药剂渗透与免疫清除，导致田间防治效果大幅降低，是病害反复暴发的核心诱因。针对制约农业细菌性病害防治的技术瓶颈，研究团队将高活性铈引入金属有机框架，构建双金属人工水解酶，并阐明其区别于天然酶的独特催化路径。该酶具有良好的生物安全性与环境稳定性，可精准切断细菌生物膜多糖骨架的化学键，瓦解细菌防御膜，清除率超 80%，杀菌率超 85%。该成果突破传统杀菌剂依赖，首次将人工水解酶应用于细菌生物膜靶向清除，打破了细菌性病害缺乏特效药的产业困境，为农作物绿色防控开辟了新路径。

相关论文信息：<https://doi.org/10.1002/anie.9481237>



南极冰川融化正在激活“历史汞库”，海鲜还能放心吃吗？

■童银栋

冰川不只是固态淡水库，也可能是污染物的长期储库。

近日，北京大学团队在美国《国家科学院院刊》发表研究，发现气候变暖与大气汞沉降正在共同加速南极半岛“大气—冰川—陆地—海洋”汞循环。研究发表后，“冰川释放历史汞”“南极海鸟汞超标”等话题受到关注，一些公众由此担心汞会不会沿食物链不断富集，最终影响餐桌上的海鲜。

弄清这个问题，首先要区分 3 件事：冰川消融是否正在改变南极汞循环、汞进入环境后能否形成生态风险以及市场上的海产品是否安全。三者相互关联，却不能画等号。

南极冰川正由储库转为活跃环节

汞是唯一能够在常温下以气体形式存在的重金属元素、可远距离迁移的全球性污染物。燃煤、金属冶炼和采矿等人类活动会向大气排放汞，自然界的火山活动和岩石风化也会释放汞。大气中的汞能够随环流沉降到远离工业区的南极，并被积雪、冰川、土壤、植被和海洋长期储存。

尽管南极冰冻圈中的汞并非全部来自人类活动，但工业化以来不断增加的大气沉降，显著改变了这里的汞储备量 and 循环。过去，人们通常把冰川视为污染物的“终点仓库”，而气候变暖可能让这个相对稳定的仓库重新参与环境循环。

该研究分析了南极半岛陆架沉积物岩芯中的地球化学和同位素记录，重建约 200 年来的汞源—汇变化，并建立观测约束的多介质汞收支模型。沉积物像一本按时间排列的环境档案，记录着不同时期到达海底的汞及其积累速率。

结果显示，南极半岛陆架现代汞积累速率达到每平方米每年 93±58 微克，约为全

球陆架平均值的两倍。工业化以来，该区域沉积物汞积累速率平均上升 160%。同位素混合模型表明，大气沉降和陆源输入对陆架沉积物汞的平均贡献各占一半。

通过模型模拟发现，气候变暖从两条路径有效加速了这一过程。一方面，海冰和冰架退缩扩大开放水域，增强海洋对大气沉降汞的吸收，并通过生物泵把颗粒结合态汞输送到海底；另一方面，冰川消融、侵蚀和径流重新动员了冰雪及陆地环境中长期储存的汞，将其带入近岸海洋。模型还显示，工业化以来，变暖驱动的冰源汞释放通量增加了 550%，海—气汞交换通量增加了 350%。这就是所谓“二次污染源”，即并非南极产生了新的工业汞，而是过去已经排放、迁移并储存在极地环境中的汞，在变暖作用下被再次释放和输送。

汞会沿食物链富集但不必谈海鲜变色

近期，有些报道把“62% 的南极海鸟汞超标、25% 的物种面临中毒风险”与北京大学团队的研究放在一起。实际上，这组数字来自欧洲学者在 2025 年发表的一篇南极海鸟汞污染研究，并非北京大学团队的观测结果。在欧洲学者研究所纳入评估的南极海鸟物种中，约 62% 的物种血汞水平超过文献采用的“无不良健康效应”毒理学参考值，25% 的物种被归入中度至高度潜在汞毒性风险类别。这里的“62%”指纳入综述的物种比例，并不是 62% 的海鸟个体；“超过参考值”也不等同于超过某项法定污染标准；“存在潜在风险”更不代表这些物种已经中毒。

那么，冰川释放的汞进入海洋后会不会使海鲜变得不安全？

汞进入海洋环境后，在适宜的微生物、氧化还原和有机质条件下，部分无机

汞可能转化为甲基汞。与无机汞相比，甲基汞更容易被生物吸收，并沿食物链逐级富集——浮游生物被小型鱼类摄食，小鱼又被大型鱼类和海鸟捕食。通常来说，食物链位置越高、寿命越长的生物，长期积累甲基汞的可能性越大。

因此，南极海鸟以及鲨鱼、剑鱼、大型金枪鱼等高营养级、长寿命捕食者，往往比生命周期较短、食物链位置较低的鱼、虾、贝类容易积累更多的甲基汞。海鸟体内的汞负荷可以反映极地生态系统长期承受的污染压力，但不能简单推导为“海洋已经普遍受到严重污染”或者“所有海鲜都不能吃”。

我们需要把野生动物生态监测和普通餐桌食品安全两件事分开看待。

首先，富集效应高度依赖食物链位置和消费结构。海鸟、大型鲨鱼、旗鱼、大型金枪鱼，属于海洋食物链顶层，甲基汞会在体内长期积累，浓度很高。一些欧美国家居民常食用金枪鱼、剑鱼等大型远洋鱼类，相关风险评估也更关注这些高营养级、长寿命鱼类。我国居民的水产品消费结构有所不同，常见的虾、扇贝、黄花鱼、带鱼等，处在食物链中下层，生命周期短，甲基汞积累水平比较低。

其次，我国对海产品甲基汞有明确、严格的食品安全国家标准。国内市场常态化抽检结果表明，绝大多数市面流通的普通鱼、虾、贝类符合国标要求。海产品的实际风险同样与物种、体形、年龄、产地和食用频率有关，需要依据具体监测数据进行判断。

总之，冰冻圈历史汞释放不等于甲基汞增加，也不等于暴露风险增加，未来还需要更多研究。而从正规渠道购买产品，保持食物种类多样，孕妇、儿童等敏感人群遵循权威膳食建议，是科学的应对方式，没有必要“谈海鲜色变”。