

终结多年争论，生物体核心“开关”启动机制解开

■本报见习记者 江庆龄

Wnt 信号通路是调控干细胞命运、胚胎发育和组织再生的核心“开关”。受精卵发育为完整个体、器官组织损伤后的再生修复、癌症等疾病的发生等，都与这条通路密切相关。然而，这个“开关”在结构上如何启动，近 30 年来一直困扰着结构生物学界。

2019 年，作为国际上最早利用结构生物学方法研究 Wnt 信号通路的科学家之一，许文青全职加盟上海科技大学，组建结构生物学与细胞信号传导研究组，并将长期关注的 Wnt 研究进一步推进到信号通路的最上游。

2020 年，岳丹加入许文青团队开展博士后研究工作，许文青将 Wnt 结构解析这一领域内公认的“硬骨头”课题交给了她。近 6 年后，岳丹和团队成员交出了一份关键答卷——首次解析了高分辨率的 Wnt 信号胞外复合物三维结构，系统揭示了天然 Wnt 配体启动经典 Wnt 信号通路的分子机制。近日，相关研究成果发表于《细胞》。

这项工作为理解发育、再生和疾病发生奠定了关键结构基础，也为 Wnt 通路相关重大疾病治疗与再生医学工具开发提供了重要蓝图。

算清“糊涂账”

“Wnt 蛋白长得就不像地球上的蛋白！”许文青的一句话，道出了全球众多实验室在相关研究上长期受阻的原因。

在经典 Wnt/ β -catenin 信号通路中，启动信号需要 3 个关键角色——Wnt 配体、卷曲受体 (Fzd) 和低密度脂蛋白受体相关蛋白 5/6(LRP5/6) 共受体。启动的过程可以理解为一个发生在细胞膜表面的会合，只有这些分子以正确方式聚到一起，细胞内部才会收到开始工作的指令。那么，这三类分子是如何结

合在一起的？学界尝试了很多方法，却始终得不到答案。

难点首先来自 Wnt 蛋白本身。由于 Wnt 蛋白形状“特别怪”，用常规方法很难制备出有活性的蛋白样品。“更棘手的是，它和受体之间的亲和力和弱，形成的复合物有多种聚合状态，高度不均一，就像一笔‘糊涂账’。”许文青说。

这也意味着，即便有冷冻电镜等先进设备的帮忙，依然难以获得清晰可靠的三维图像。最初两年，岳丹和团队成员几乎不停在试错。Wnt 蛋白如何表达、如何纯化、和受体之间如何组合……每一个环节都需要摸索。岳丹一边深挖文献寻找破解思路，一边在实验中反复优化蛋白制备方法，慢慢把“糊涂账”算清。

2023 年，在测试了百余种复合物组装方案后，研究团队终于迎来阶段性突破——成功制备并解析了 Wnt3a/Fzd8/LRP6 胞外三元复合物的高分辨率冷冻电镜结构。

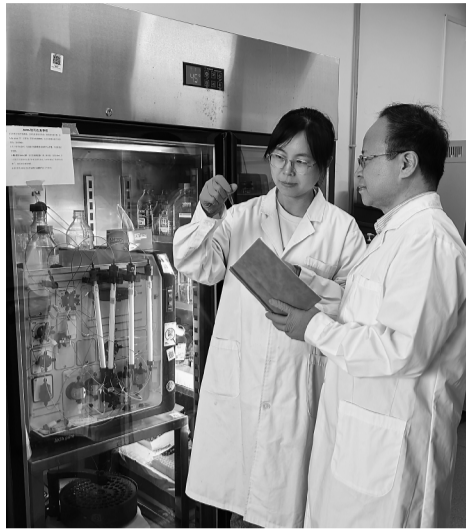
“LRP5 和 LRP6 的同源性很高。我们通过序列比对发现，Wnt 的关键结合位点在 LRP5 和 LRP6 中高度保守，因此在实验中选择了 LRP6。”岳丹表示，“我们也分析了关键结合位点氨基酸在 LRP5 中的情况。”

有了眼见为实的结果，团队又通过大量实验继续验证结构发现。最终，研究结果指向一个清晰的答案，即经典 Wnt 信号通路的启动，并不是依靠单个受体构象变化完成，而是通过多个受体在细胞膜上的有序聚集实现。

先完成“虎符合璧”

关于经典 Wnt 信号通路如何启动，学界主要有两种假设。

其中，“变构激活模型”认为，Fzd 具有 G 蛋白偶联受体特征，Wnt 蛋白可能像“钥匙”一样插入受体“锁孔”，通过改变受体构象来传递



许文青(右)和岳丹在讨论。受访者供图

信号。“聚集激活模型”则认为，Wnt 蛋白更像“交联剂”，能够把多个受体组织到一起，让它们在细胞膜上形成聚集，由此触发信号传导。

研究团队此次解析出的结构，为第二种模型提供了直接证据。

复合物结构显示，两个 Wnt3a 蛋白形成同源二聚体，构成整个信号体的核心骨架。这一过程很像古代虎符合璧，只有两半虎符合璧，才能调兵遣将。在细胞世界里，Wnt3a 也必须先完成“合璧”，才能引发下游信号反应。

随后，两个 Wnt3a 蛋白伸出“双手”，分别“牵住”两个 Fzd8 受体和一个 LRP6 共受体，最终形成一个稳定的“2:4:2”复合物“工作群”。如果阻碍 Wnt3a 蛋白之间“牵手”，整个复合物便无法组装，下游信号也随之消失。

这一发现证实，Wnt 信号通路的启动需通过 Wnt3a 二聚体“牵线搭桥”，诱导受体在细胞膜上发生功能性聚集。“这完美诠释了聚集激活模型，为理解生命发育与修复的初始一刻提供了最直接的分子图像。”岳丹告诉《中国科学报》。

分子“作战地图”

这项工作不仅首次从结构层面回答了经典 Wnt/ β -catenin 信号通路“如何被打开”的核心问题，也是团队系统研究 Wnt 信号通路的关键一步。

“我们从细胞内信号传导机制进一步拓展到细胞膜外信号起始机制，形成了从信号如何被关闭、如何被读取一直到信号如何被启动的完整研究链条。”许文青表示。

从更长远看，这项工作为后续转化研究打开了新空间。

Wnt 信号通路的正常工作是组织再生修复的重要基础，而其异常激活则与结肠癌、肝癌等多种癌症密切相关。此次研究会绘制出一张精确的分子“作战地图”，清晰标注了 Wnt、Fzd、LRP 三者相互作用的关键“布局”和“界面”。

有了这张“地图”，科学家未来可以有针对性地设计小分子药物或抗体，精准抑制异常活跃的 Wnt 信号，为相关癌症治疗提供新思路。同时，该结构也有助于指导设计更高效的“Wnt 替代蛋白”，用于促进肺、肝、肾等器官和心脏的损伤修复与再生，以及多种类器官的构建，为再生医学和精准医疗提供新工具。

目前，许文青正带领团队继续向临床应用方向推进。他希望，未来围绕 Wnt 信号体结构与功能进一步拓展系统的研究方向。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1016/j.cell.2026.05.006>

我国首本英文数据期刊《数据快报(英文)》创刊

本报讯(见习记者樊晓丽)6月23日,我国首本英文数据期刊《数据快报(英文)》(Data Express)正式创刊。期刊定位为顶级综合性数据出版平台,主编由中国科学院院士于贵璋担任。

《数据快报(英文)》由中国科学院主管,中国科学院计算机网络信息中心与国际科学理事会数据委员会中国全国委员会合作创办,旨在发表高质量、可重复、具有长时效价值的科学数据,推动各领域科学数据的规范出版、广泛共享与高效复用。目前,期刊已获预分配 ISSN 号,官网与投稿系统已正式启用,第一批原创论文已进入审稿阶段。

长期以来,科研数据主要依附于传统论文发表,缺乏独立发布、引用与评价体系,大量高质量数据“沉睡”在实验室中。数据论文通过规范化出版和同行评审,使科研数据从“附属成果”转变为“独立可溯源、可引用的学术产出”,为人工智能驱动科学发现提供可复用的基础素材。

中国科学院在数据出版领域已深耕十余年。2015 年,中国科学院创办了我国首本中文数据期刊《中国科学数据》,在此基础上,牵头完成多项国家标准的研制工作。目前,中国科学院已具备覆盖数据成果出版、传播、存储、溯源与再利用的全链条支撑能力。2026 年,除《数据快报(英文)》旗舰外,中国科学院还将在数理、生态环境、海洋大气等领域启动建设 19 种领域数据期刊,组成“1 种综合旗舰刊+19 种领域专业刊”的数据期刊集群。



为保护野生鸳鸯,今年以来,保护工作志愿者团队在黑龙江哈尔滨太阳岛风景区(以下简称太阳岛)太阳湖周边树林,陆续架设了 25 个搭载太阳能供电的智能鸟巢,为野生鸳鸯提供安全隐蔽的孵卵场所。

据悉,目前太阳岛区域内的成年鸳鸯种群已近 90 只,共有 8 巢小鸳鸯顺利自然孵化,出生总数达到 106 只。再加上此前救助后安置到此处的 10 只幼鸟,眼下共有 116 只小鸳鸯在太阳湖周边栖息成长。图为 6 月 22 日,一只雌鸳鸯站在太阳岛的智能鸟巢上。

图片来源:视觉中国

电动飞机要起飞,先算清这笔“能量账”

■本报记者 朱汉斌

当一架电动飞机降落机场,它不仅需要一套停机位,还需要一套能快速补能的电力系统。这个看似简单的场景背后,隐藏着航空业绿色转型最棘手的系统性问题:未来的机场电网能否承受瞬时高负荷?哪些航线应优先“油改电”?回答这些问题,需要清晰描绘航空运输网络中能量需求的时空流动轨迹,即一张预见性的“能量地图”。

近日,华南理工大学、香港理工大学、大连理工大学、澳门大学等机构的研究人员提出了一套面向航空运输网络的时空能量流预测框架,能够同步预测未来航线的“新增”“保留”或“移除”状态,并量化其对应的能量消耗变化,为机场设施改造和电网协同规划提供了数据驱动的决策工具。近日,相关成果发表于《细胞报告-物理科学》。

论文共同通讯作者、华南理工大学教授朱继忠对《中国科学报》表示,该框架有望为航空绿色转型中的关键决策提供支撑,尤其是为“机场改造优先级”“航线电动化排序”“机场与电网供需协调”等实际问题提供前瞻性的科学参考。

航空业减排,机场用电面临挑战

航空业减排是全球交通绿色转型中一块公认的“硬骨头”。在国际能源署“2050 年净零排放”目标下,航空电气化被视为提升能效、降低温室气体排放的重要途径。其中,电动飞机是主要的技术方向之一。

然而,电动飞机的大规模应用远非简单的

能源替换。电动飞机一旦进入规模化运营,机场将面临充电、换电和电力调度的复杂挑战。尤其在多个航班集中充电的时段,机场用电负荷将急剧攀升,对区域输电线路、变电站及电网协同能力提出更高要求。

“实现机场与电网的供需平衡,前提是准确预判不同航线、不同机场未来的能量需求分布。”朱继忠解释道。

正是基于这一现实需求,研究团队着手从航空网络的历史演化规律中构建预测模型。依托我国 2014 年至 2024 年的航班运行数据,研究人员搭建了多输出机器学习框架,对航空运输网络中的能量使用流进行长期预测。

研究发现,随着网络演化,枢纽机场趋于持续集聚高强度能量流,而非枢纽机场的航线则更容易流失。这一趋势对电动飞机的未来航线布局 and 地面充电资源配置具有重要的指导意义。

提出数据驱动预测框架

以往的航空网络研究多聚焦于静态网络中的枢纽识别、关键航线排序或客流量预测,即便涉及航线预测,也常止步于判断某条航线是否存在,较少进一步估算其承载的能量需求。然而,现实中的航空网络始终处于动态演化中,新航线持续涌现,既有航线不断退出,不同时段的需求、效率与能耗差异显著。

针对这一研究空白,团队提出了一种“双任务、分阶段”的数据驱动预测框架,首先利用模型对航线连接状态进行分类,判定其在下一阶段为“新增”“保留”或“移除”;然后,对

保留或新增航线的能量需求进行回归预测。简言之,不仅回答“该航线是否存在”,还量化“该航线将消耗多少能量”。

为实现该目标,团队收集并分析了 2014 至 2024 年间约 200 万条月度航班记录,构建了中国航空运输网络的月度机场级网络。

结果表明,引入能量需求等权重信息后,模型对航线新增与移除的识别准确率显著提升。进一步分析显示,从全国尺度到广州市等城市尺度,航空能量流均呈现明显的“枢纽-辐射”结构——主要机场承担高密度航线,反映出航空网络日益增强的中心化趋势。

论文共同通讯作者、大连理工大学副教授杨浩森表示,研究还揭示了航线网络的持续演化特性:2014 至 2024 年间,航线的新增与移除始终并存,并呈现周期性波动;总能量需求总体呈增长态势。

此外,研究表明,航空能量消耗并非线性增长,而是受网络结构调整、外部冲击和区域枢纽效应共同影响。

论文第一作者、华南理工大学博士研究生董瀚江认为,考虑到未来电动飞机的应用,需从网络演化的动态视角理解航空能量流的空间重构,而非简单沿用静态分布图。

机场可能演变为区域“能源节点”

除航空网络自身的演化预测外,研究团队还着眼于粤港澳大湾区,考察了未来航空网络与铁路、港口、公路等交通基础设施的空间协同关系。预测显示,未来大湾区主要城市

的机场、铁路站点、高速公路及港口之间将呈现更紧密的空间叠加与协同趋势。

航空与铁路协同方面,随着高铁网络持续延伸,部分短途航空出行有望被替代,从而减少高碳排放的短程航线,优化交通用能结构。航空与公路协同方面,机场未来不仅需满足飞机充电,还可能兼顾地面服务车辆及周边电动车的充电需求,逐步演变为区域能源服务节点。航空与港口协同方面,随着多式联运体系的完善,部分长距离货运有望实现以海运替代高能耗空运,提升整体物流链的能效表现。

“未来机场不仅仅是交通节点,应该纳入区域能源系统和综合运输系统筹规划。”论文作者、香港理工大学学者崔梓铎表示。这一视角将航空用能预测从单一行业问题拓展为区域能源-交通协同优化的系统性课题。

朱继忠表示,下一步研究可纳入机场容量、天气与空域限制、区域经济指标、电网约束及电价等外生变量,提升模型的泛化能力与实际适用性。同时,可探索动态图神经网络等新方法,在能源层面引入更细粒度的飞行阶段模型,并将电动飞机机构成、充电物流与机场电力系统约束耦合,深化“航空-电网”一体化优化研究。

该研究不仅提供了预测工具,还揭示了一个核心事实——电动飞机的未来不只是技术命题,更是系统工程命题。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2026.103339>

发现·进展

中国科学院西安光学精密机械研究所等

纳米技术无创缓解慢性疼痛

本报讯(记者李媛)中国科学院西安光学精密机械研究所科研团队与合作者在上述转换纳米粒子(UCNPs)介导的慢性疼痛精准调控领域取得重要进展。近日,相关成果发表于《美国化学会-纳米》。

光遗传技术凭借高时空分辨率与细胞特异性调控的独特优势,为神经疾病精准干预开辟了全新路径。但传统光遗传技术依赖植入式光纤传导可见光,不仅存在手术创伤与长期植入的感染风险,而且可见光在生物组织中穿透深度有限,难以实现外周深部神经的无创、长效调控。

研究团队以痛觉信号传导的关键枢纽——背根神经节(DRG)为核心调控靶点,构建了一种基于 UCNPs 的无线近红外光遗传系统。该系统可将组织穿透能力更强的近红外光转换为蓝光,在无需植入光纤的条件下,实现对 DRG 神经元活动的精准无创调控。实验表明,具有核壳结构的 UCNPs 在 980 纳米近红外光激发下能够稳定发射 470 纳米蓝光,有效激活光敏蛋白 ChR2 和抑制型光敏蛋白 SwiChR2ca。UCNPs 介导的近红外光刺激能够有效抑制 DRG 神经元异常动作电位的产生,实现对痛觉信号传导的远程光学抑制。在炎症性疼痛模型的动物行为学实验中,该系统的镇痛效果得到充分验证,且镇痛效果随着近红外光功率增加而增强。

论文作者、中国科学院西安光学精密机械研究所博士生郭泽晋介绍:“我们采用一种特殊的纳米材料,把穿透能力很强的近红外光转换成光敏蛋白能够识别的可见光,相当于在体内搭建了一个‘光的翻译器’。这样一来,只需要从体外照射近红外光,就能在体内精准控制负责疼痛传导的神经细胞活动,从而达到缓解疼痛的效果,而且小鼠在实验过程中可以完全自由活动,无需有线连接。”

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1021/acsnano.5c20272>

中国地质大学(武汉)等

改写珊瑚“生存法则”演化史

本报讯(记者李思辉 通讯员王俊秀)中国地质大学(武汉)陈中强团队联合德国埃尔朗根-纽伦堡大学、英国布里斯托大学团队,通过系统收集并修订显生宙珊瑚化石大数据,结合先进的贝叶斯生灭模型,模拟揭示了珊瑚与光合微生物之间的共生关系在长达 5 亿年地质历史中的演变规律。近日,相关研究成果发表于美国《国家科学院院刊》。

生物的成功离不开有利性状的创新与演化。对于现代热带海洋中的珊瑚而言,与虫黄藻建立互惠共生关系是其占据生态优势的关键。虫黄藻通过光合作用为珊瑚供给能量,支撑珊瑚快速造礁、抢占海洋生态优势。但该研究证实,珊瑚的光共生生态优势存在明显的阶段性,并非贯穿整个演化历史。

研究还原了数亿年来珊瑚种群的演化动态。结果显示,珊瑚生态格局曾发生重大转折。古生代海洋中,不依赖光合作用的非光共生珊瑚占据绝对主导地位;直至中生代,光共生珊瑚才逐步崛起,并在新生代彻底成为海洋珊瑚群落的主流类群。

陈中强解释,中生代是珊瑚演化的关键分水岭。在此之前,海水温度、海水化学条件等外部环境是决定珊瑚存亡的核心因素,环境剧变可直接重创珊瑚种群。在此之后,海洋环境趋于稳定,种间竞争、群落生态结构等生物内部相互作用成为主导因子,珊瑚与虫黄藻的共生优势才真正被激活,推动光共生珊瑚大规模扩张。

该研究还发现,显生宙内珊瑚灭绝率与海水温度的关联发生系统性反转。古生代时期,海水高温会显著提升珊瑚灭绝风险,温度与灭绝率呈正相关;进入中生代后,二者关系逆转为负相关,温和升温反而成为珊瑚繁衍扩张的有利条件。这也证明,珊瑚本身适配温暖海洋环境,却无法承受快速极端升温。

该研究强调,不同珊瑚类群应对环境胁迫的能力差异显著,珊瑚生存筛选规则会随环境动态变化。从深时地质视角厘清珊瑚适应规律,能够为珊瑚礁生态修复与海洋气候保护提供关键理论支撑。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1073/pnas.2532242123>

中国农业科学院郑州果树研究所

揭示 4 种猕猴桃代谢密码

本报讯(记者李晨 通讯员赵倩)猕猴桃是一种兼具良好风味与丰富营养的重要经济水果。中国农业科学院郑州果树研究所猕猴桃资源与育种创新团队系统比较了主要猕猴桃栽培种的风味及代谢组学特征。近日,相关研究成果发表于《食品化学》。

研究人员利用挥发性成分分析与广泛靶向代谢组学技术,对中华猕猴桃、美味猕猴桃、软枣猕猴桃和毛花猕猴桃 4 种主要栽培种进行了系统比较,鉴定出 234 种挥发性有机化合物。其中酯类为最主要的香气贡献物质,且不同物种间的风味活性化合物含量存在显著差异。研究还揭示了 1184 种代谢物,它们的组成结构深受遗传背景影响。值得关注的是,软枣猕猴桃表现出富含黄酮类化合物的代谢特征,并含有可用于物种鉴别的关键成分。

研究人员还借助中药数据库及相关分析平台,从 4 种猕猴桃中系统鉴定出 80 余种中药活性成分,并对其 6 种代表性化合物进行了含量验证。从日常水果到潜在的功能原料,猕猴桃的药用价值首次被系统揭示,为其“药食同源”的深度开发提供了重要支撑。

该研究为猕猴桃在功能性食品开发及药用原料利用方面奠定了科学基础。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2026.150053>