



# 植物生病怎么办？“免疫智慧”来护航

■本报实习生 葛家诺 记者 倪思洁

当流感来袭，人类可以选择接种疫苗，也可前往流感不严重的地区躲避。可扎根于土壤的植物，既无法接种疫苗，也不能逃离疫区，它们该如何抵御病原微生物的侵害？

在全球气候变化与粮食安全挑战加剧的当下，如何让作物拥有更强大的“自我保护”能力，成为科学家关注的焦点。

近日，西湖大学生命科学学院教授柴继杰团队在《自然》发表研究成果，首次揭示了植物辅助型抗病蛋白（Helper NLR）的激活与调控机制，不仅为理解植物如何应对病原体提供了关键线索，更标志着植物免疫研究迈出了重要一步。

## 植物也会“断尾求生”

柴继杰团队研究的内容与植物免疫系统里的“第二道防线”有关。研究的过程中，他们感受到植物自我保护的“免疫智慧”。

在微观世界里，可以把植物的免疫系统想象成“双层防线”。第一道防线的防御由细胞膜上的模式识别受体发起。这些“巡逻哨兵”的任务是识别病菌表面的“身份标签”，一旦发现入侵者，立即拉响警报，启动广谱免疫反应，将大部分“敌人”拒之门外。

然而，总有一些病菌极其狡猾，它们能向植物细胞分泌一种名为“效应蛋白”的“生化武器”，攻克植物的第一道防线，从而进入细胞。这时，魔高一尺，道高一丈，聪明的植物会自动启动第二道防线。

第二道防线是被效应因子触发的免疫，又被称为 ETI。ETI 的启动依赖于植物细胞中的“特种部队”——NLR 抗病蛋白。它的“火眼金睛”能识别病菌释放的“生化武器”，继而触发局部细胞的“自毁程序”。一旦程序启动，植物将不惜牺牲局部细胞阻止病原体扩散。

而这支时刻监视病菌入侵的“特种部队”，就是柴继杰团队此次研究的重点。

他们发现，当病菌突破第一道防线后，植物细胞内的“特种部队”会释放特殊的信号分子，它们像一把把“钥匙”，会改变细胞内的“门锁”——一类特定的蛋白复合体形状。一旦“门锁”的状态改变，就会被“辅助员”——辅助蛋白感应到，从而触发强烈的免疫反应。

有趣的是，植物免疫系统也有“刹车机制”。就像汽车需要刹车来避免失控，植物也需要一种机制来防止过度的免疫反应，以免对生长造成损害。研究发现，植物细胞内还有另一类辅助蛋白，它们像“守门员”一样抢先占据“门锁”，从而抑制免疫反应。

柴继杰表示，尽管他们还没有探明“守门员”出手干预免疫反应的时机，但可以肯定的是，它们会进行负向调控。而这种“激活-抑制”的平衡机制，是植物在长期进化中形成的“自我保护”策略。

“从宏观角度看，植物免疫的激活-抑制机制是长期进化适应的结果。免疫需要适度，过强会伤及自身。例如，流感时的细胞因子风暴并非由病毒直接引起，而是免疫反应过度导致。”柴继杰说，“植物通过这种平衡机制，既能有效抵御病原体，又能维持正常的生长发育。”

在柴继杰看来，这种平衡的艺术正是植物在漫长进化中形成的独特“免疫智慧”。

## 科研长跑中的平常心

植物有它们的免疫智慧，柴继杰团队也有他们的科研智慧。探明植物细胞中微小的分子变化，靠的就是该团队长达 20 年的积累与探索。

1998 年，柴继杰在美国普林斯顿大学的施一公实验室从事博士后研究，专注于研究一种特定的程序性死亡-细胞凋亡的机制。“虽然当时的研究方向与植物免疫不完全相同，但我们在研究中发现了一些与植物抗病蛋白相似的蛋白结构。”柴继杰说，“这些经历为我后来研究植物免疫机制奠定了基础。”

2004 年，柴继杰回国加入北京生命科学研究所，与专注于植物与微生物相互作用机理研究的周民展开密切合作。“我们在交流中发现，植物抗病蛋白在植物免疫中起着极为重要的作用。”柴继杰由此确定了未来的深耕领域——植物免疫。

在科研领域，植物免疫的研究经历了多个阶段。早在七八十年前，人们就已知晓抗病基因的存在。1993 年，首个抗病基因被成功克隆，此后更多抗病基因被陆续发现。然而，这些抗病基因如何识别病原体并触发植物免疫反应，依然是未解之谜。“而这正是我们团队的研究方向。”

柴继杰说。

从 2004 年开始的合作，到 2007 年的初步突破，再到 2013 年的重要进展，团队走过了漫长的探索之路。2019 年发现抗病蛋白在激活之后形成的“抗病小体”被认为是植物抗病领域的里程碑事件；2020 年进一步揭示了 TNL 类抗病蛋白的激活机制。如今，团队终于解开了抗病蛋白激活与抑制的双重密码，在传统“守卫模型”基础上提出“修饰自我”模型，将植物免疫研究推向新高度。

科研就是一场长跑。“1 年、5 年甚至 10 年没有成果，都是科研常态。要想做好科研就要有一颗平常心。”柴继杰说。

## 从实验室到田间地头

这项研究的意义在于理论创新，更在于为抗病作物的育种提供重要指导。目前，柴继杰团队已在水稻中展开探索。“通过基因编辑技术调控辅助蛋白的表达比例，有望培育出兼具抗病性与高产性的作物品种。”

联合国粮农组织估计，每年有高达 40% 的全球作物因病虫害而减产，造成的经济损失超 2200 亿美元。历史上的爱尔兰马铃薯饥荒、北美小麦绝收等悲剧，均与作物抗病性缺陷密切相关。

“在作物驯化过程中，人们追求高产优势，却在某种程度上牺牲了抗病性能。”柴继杰说，“我们的研究为找回这些‘丢失的盔甲’提供了科学地图。”

柴继杰表示，未来，该团队将深入探究温度、湿度等环境因素对植物免疫的影响。

“实验室的结果能否在复杂田间环境中重现？如何让作物既不过度‘敏感’也不‘迟钝’？”柴继杰认为，只有解开这些谜题，才能真正实现“智能抗病”——让植物根据威胁等级动态调整防御策略。

论文评审人认为：“这一发现对于深入理解植物免疫机制具有极其重要的意义，因为该信号通路是双子叶植物中最为关键的免疫信号传导途径之一，其功能数十年来一直未被揭示。”

“我们希望未来通过基因编辑优化抗病蛋白，培育出抗病性与产量兼具的新品种，推动农业可持续发展。”柴继杰说。

相关论文信息：  
<https://doi.org/10.1038/s41586-024-08521-7>

# “拉索”新发现：中老年脉冲星的“尾巴”不一般

本报（记者倪思洁）记者从中国科学院高能物理研究所获悉，国家重大科技基础设施——高海拔宇宙线观测站（LHAASO，简称“拉索”）又出新成果。科研人员发现，中老年脉冲星产生的风云尾部很可能是一类可以将粒子加速到超高能量的“拍电子伏特宇宙线加速器”。日前，该成果发表于《创新》。

记者了解到，该研究以高显著性探测到一颗中老年脉冲星——脉冲星 PSR J1740+1000 的风云尾部区域的超高能伽马射线辐射。这是科学家在世界上首次探测到弓形激波脉冲星风云尾部的伽马射线辐射，对弓形激波脉冲星风云尾部的粒子输运机制提出了挑战，预示着尾部区域存在强劲的粒子加速过程。

按照以往的理论推断，脉冲星步入中老年

阶段后，自转能会显著降低，在其产生的风云中，高能粒子的数量和最高能量随之降低，而它曾经加速出的粒子会弥漫在周围，形成尺度达上百光年的伽马射线晕。同时，有部分脉冲星还会离开超新星遗迹，直接和星际介质相互作用，形成类似蟹状云的弓形激波脉冲星风云。

此次，“拉索”观测到的脉冲星 PSR J1740+1000 正是一颗中老年脉冲星。它距离地球 4500 光年，特征年龄 11 万年。在 X 射线波段，人们清楚观测到这颗脉冲星的蟹状星云，但与其他中老年脉冲星被观测的情况一样，它的伽马射线辐射未曾被观测过。

科研人员基于“拉索”1200 天以上的观测数据，在远离该脉冲星约 16 光年处，发现了一个点状超高能伽马射线源，其显著性达到 17 倍标

准偏差。他们将它称为“拉索源”。

从对“拉索源”的测量结果中，科研人员排除了理论预期中的大尺度伽马射线晕的存在。他们发现，可能受该脉冲星周围环境影响，并非所有的中老年脉冲星都会像理论预期那般，形成可观的伽马射线晕。同时，经过仔细排查，科研人员还发现，“拉索源”附近并不存在其他已知的天体可加速的高能粒子，而十分巧合的是，“拉索源”恰好处于脉冲星 PSR J1740+1000 的弓形激波风云尾部的延长线上。

“这揭示了弓形激波脉冲星风云尾部区域可以产生超高伽马射线辐射。”中国科学院高能物理研究所研究员陈松战说。

相关论文信息：  
<https://doi.org/10.1016/j.xinn.2025.100802>

# 中性原子量子计算机研发获 2.3 亿美元投资



本报 一项曾经被认为错误率过高而不能作为量子计算机基础的技术——中性原子技术有望取得重大进展。据《自然》报道，近日，美国中性原子量子计算机公司 QuEra 宣布已经获得 2.3 亿美元投资，这是迄今所有量子计算机公司中最大的一笔投资。

QuEra 是一家由美国哈佛大学和麻省理工学院孵化的公司，利用原子和激光对量子比特进行编码。其他公司也在使用类似技术构建中性原子量子计算机，以追赶美国 IBM 等行业领军企业。

美国全球量子情报公司的计算机科学家 Doug Finke 表示，中性原子技术“正在迎头赶上”。“据我们所知，这是对于中性原子技术类公司数额最大的风险投资。”

中性原子比较稳定，无需庞大的冷却系统

就能保持其量子态。这些特性使它们成为理想的量子比特。而量子比特是量子计算机的基本组成单元。但多年来，中性原子量子计算的进展一直受制于物理学家精确操控这些粒子进行计算的能力。

自 2019 年以来，研发人员在配置和控制原子方法上取得了进步，这意味着如今的操作精度已接近其他硬件类型。“过去几年里，我们见证了重大突破，这无疑令人非常兴奋。”瑞士苏黎世联邦理工学院的物理学家 Wencho Xu 说。

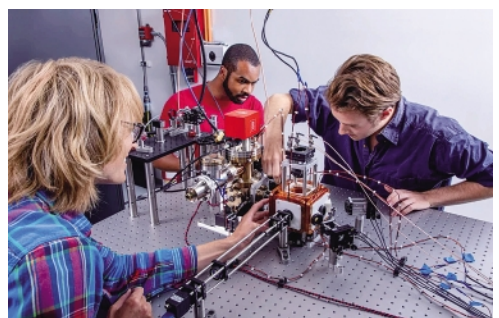
基于原子的量子计算机正在追赶谷歌公司制造的量子计算机，该量子计算机使用囚禁离子或微型超导电路来表示量子态。QuEra 并非唯一一家钻研中性原子技术的公司，美国的 Atom Computing、Infleqion 以及法国的 Pasqal 等公司都已制造出拥有数百个量子比特的计算机。

物理学家认为，如果让量子比特在 99% 以上的时间内可靠地相互作用，就能通过在多个量子比特上编码信息纠正这些错误，这一过程被称为纠错。在中性原子中，改进的实验设计，例如使用更快的激光脉冲序列激发原子，已将操

作精度大幅提升至纠错阈值以上。

QuEra 联合创始人、哈佛大学的物理学家 Mikhail Lukin 表示，在哈佛大学及其他地方，研发团队正在推进“复杂程度前所未有的”中性原子量子计算机原型的研发。

不过，挑战依然存在。有专家认为，现在就断言中性原子量子计算会成为最终赢家还为时尚早。（王方）



QuEra 公司已经获得 2.3 亿美元投资。  
图片来源：QuEra Computing Inc.

# 近 3 年已有 17 家国际科技组织在华成立

本报讯（记者高雅丽）2 月 17 日至 18 日，中国科协第十届全国委员会第九次会议在京召开。中国科协主席万钢在工作报告中指出，近 3 年已有 17 家国际科技组织在华成立，目前科协体系 2000 多位专家在国际组织任职。

在搭建国际民间科技交流平台方面，中国科协围绕高质量共建“一带一路”，从科普教育合作、国际工程师互认、农业技术推广、青少年科技创新活动等方面切入，与重点国家加强对口合作。2024 年，中国科协持续打造世界科技与发展论坛、世界新能源汽车大会等 4 个主场平台，全年各学会在华举办国际会议上千场，巩固扩大“朋友圈”。

同时，中国科协积极配合《中华人民共和国科学技术普及法》修订，推动设立“全国科普月”。目前，全国科协系统管理 1127 所科技馆、749 个流动科技馆、1418 辆科普大篷车，2024 年服务公众近 1.5 亿人次。

在扶持青年人才方面，2024 年，中国科协启动实施青年人才托举工程博士生专项计划，首批入选 3226 人，全国 180 个学会参与此次

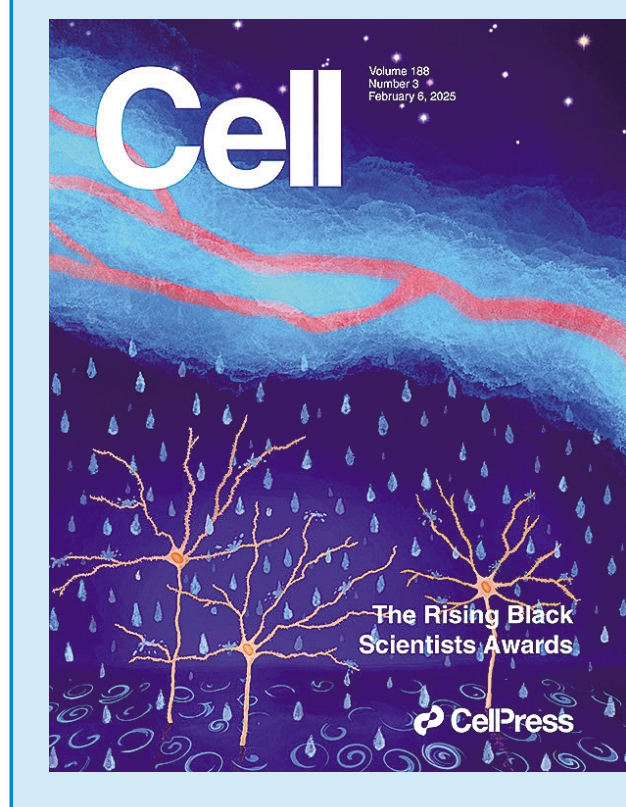
托举工作。

万钢介绍，中国科协还牵头实施了科技期刊卓越行动计划，5 年来扶持我国近 300 种科技期刊进入一流行列，国际影响力名列本学科前 5% 的期刊较 2018 年增长 6 倍，二期建设将 450 种期刊纳入支持行列。

此外，中国科协依规对 9 个学会作出警告、撤销团体会员资格处理，同时清理规范评比表彰，改革学术会议、科技竞赛举办方式，大力精简无实质意义的活动。较 5 年前，评比表彰等由 21 项减至目前的 3 项，主办、共同主办论坛由 63 项减为 10 项。

万钢表示，2025 年是“十四五”规划收官之年，中国科协将进一步健全人才工作体系，推动健全科技社团管理制度，加强一流学会建设，打造多元开放、充满活力的科技社团体系，扩围建设高水平科技期刊；提升“科创中国”平台桥梁创新资源能力，研究编制《全民科学素质行动规划纲要实施方案（2026—2030 年）》，优化科技社团对外专业交流管理机制，拓展国际民间科技合作，深度参与全球科技治理。

## 看封面



## 睡眠与大脑“清洁”

当大脑从清醒状态过渡到睡眠状态时，外部信息处理减少，而像清除“废物”这样的内部过程则被激活。在最新一期《细胞》的封面论文中，研究人员指出，非快速眼动睡眠期间去甲肾上腺素水平的波动和血管动态变化是胶质淋巴系统清除大脑“废物”的关键因素，因此也是恢复睡眠功能的关键因素。

本期杂志封面图片展示了一条动脉，其周围血管空间和脑脊液被描绘成云和雨，雨滴落在呈树状的神经上。

（赵宇彤）

图片来源：Cell

# 国际首个“双环路”脑机接口系统解决方案问世

本报讯（记者陈彤 通讯员焦德芳）近日，天津大学与清华大学的研究团队联手开发了一款基于忆阻器神经形态器件的新型无创脑机接口系统。这项发表于《自然-电子》的研究成果，首次揭示了脑电发展与解码器演化在脑机交互过程中的协同增强效应，成功实现了人对无人机的四自由度操控。

据介绍，脑机接口能实现大脑与机器的直接信息交流，促进生物智能与机器智能的融合，被认为是新一代人机交互和人机混合智能的核心技术。如何通过脑机之间的信息交互实现“互学习”，进而促进脑机智能的协同演进，是突破脑机性能瓶颈的重点和难点。但目前脑机交互过程中大脑与机器的动态耦合机制尚未厘清，导致脑机协同的长期互适应能力较弱，工作性能随时间的推移下降严重。

研究团队发现，脑电信号中的非平稳特性不仅来源于传统观点认为的背景脑电变异，而且与闭环脑机交互引导下的任务脑电演变密切相关。

基于这一发现，团队首次提出“双环路脑机协同演进框架”，并通过忆阻器神经形态器件构建了全新的脑机接口系统。在双环路框架下，“机器学习”环路中的忆阻器解码器通过适应脑电信号波动完成解码参数更新，“脑学习”环

路中的任务相关脑电特征在“决策-反馈”循环的引导下不断正向演化。相关算法基于 128kb 规模的忆阻器神经形态器件实现了硬件化部署，将脑电信号的多步计算过程优化为单步计算。

相比传统纯数字硬件方案，忆阻器新方案的归一化解码速度提高了 2 个数量级（百倍）以上，能耗降低了 3 个数量级（千分之一）以下，高效支撑了四自由度脑控无人任务目标的成功实现。在连续 6 小时的长时程脑机交互实验中，大脑和解码器的贡献比例呈现动态变化，并呈现出脑机协同演进的过程：初期以解码器自适应更新为主，随着时间推移，大脑贡献逐步增加，最终脑机接口性能不仅没有下降，其准确率还提升了约 20%。

“这项研究首次提出了脑机协同演进的概念，为研发未来实用型脑机接口系统提供了重要的理论基础与技术支撑，也为脑机融合智能的发展开辟了新方向。”天津大学脑机交互实验室教授敏鹏表示，“这款系统未来计划拓展到更多便携式或可穿戴脑机接口设备中，服务于消费级、医疗级等各类智能人机交互应用场景。”

相关论文信息：  
<https://doi.org/10.1038/s41928-025-01340-2>

# 科学家破解辐射损伤细胞机制

本报讯（记者朱汉斌 通讯员胡冰鑫）中国科学院广州生物医药与健康研究院副研究员孙益嵘团队与美国加州大学洛杉矶分校的研究人员合作，首次证实了干扰素基因刺激因子（STING）蛋白可以通过一个全新信号通路（PARP1-PAR-STING）直接完成细胞的生死。近日，相关成果在线发表于《细胞死亡与分化》。

孙益嵘表示，该信号通路的确立，是继发现环鸟苷酸腺苷酸酶-干扰素基因刺激因子（cGAS-STING）经典的细胞免疫信号通路后的又一重要突破。

核泄漏或肿瘤放疗等高剂量辐射会像分子炸弹一样击碎 DNA，导致肠道细胞大规模凋亡，患者常因胃肠道综合征死亡。然而，目前辐射造成的胃肠道综合征尚无有效治疗药物。因此，加强 DNA 损伤修复的基础研究并开发抗辐射损伤药物，对保障核工业从业人员健康以及癌症放疗防护具有重要意义。

STING 蛋白此前以激活免疫抗病毒著称，然而在辐射损伤中所介导的细胞死亡通路却未被报道。破解 STING 的“死亡密码”，成为抗辐射损伤或优化癌症放疗的关键突破口。

鼠接受腹部辐射后，存活率提高 5 倍，肠道绒毛高度是正常小鼠的 2.3 倍，如同为肠道穿上“防辐射盔甲”；二是通过体内外分子追踪及互作技术首次捕捉到 STING 与 PAR 的“死亡之握”——STING 激活的 PARP1 酶生成 PAR 分子链，而 STING 酶磁铁般与之结合，激活细胞凋亡信号；三是使用精准剂量 PARP 抑制剂 PJ34，可减少 80% 的 PAR 生成，将辐射后细胞的死亡率从 45% 降至 12%，相当于为细胞配备了“分子灭火器”。

“该‘开关式’疗法，即基于 STING 蛋白的新发现所开发的疗法，在辐射损伤预防、癌症放疗保护和癌症治疗增效方面均展现出巨大的应用潜力。”孙益嵘表示，该团队通过辐射损伤模型发现，STING 通过“捕获”DNA 修复信号分子 PAR，触发细胞“自杀程序”。用特定抑制剂阻断这一过程后，小鼠肠道损伤减少 70%，存活率从 11% 跃升至 67%。这一发现为核事故急救和癌症放疗防护提供了全新策略。

未来，研究团队将进一步开展这一全新信号通路在神经退行性疾病、自身免疫性疾病中的拓展研究。

相关论文信息：  
<https://doi.org/10.1038/s41418-025-01457-z>