



解码植物的“化学武器”

樊晓丽

植物不会移动、不会逃避，也不会反击。但在亿万年的进化中，它建立了一套精密的化学防御体系，用以应对来自动物和微生物的持续威胁。

棉花在种子中积累棉酚，抵御动物取食；烟草在叶片中合成尼古丁，麻痹嗜食者的神经系统；药用植物红豆杉产生的紫杉醇，对多种真菌和昆虫具有毒性……今天，科学家正在向这些植物学习，利用合成生物学手段，将它们的化学防御产物转化成人治疗疾病、开发药物的新途径。

近日，2026年“活力中国调研行”上海站采访活动走进中国科学院分子植物科学卓越创新中心（以下简称“分子植物卓越中心”），科研人员向笔者讲述了这些来自田间和实验室的发现。

棉花的“生存兵法”

棉花植株表面分布着大量黑色腺体，这些腺体合成并储存棉酚——一种对昆虫具有显著毒性的倍半萜类化合物。棉铃虫取食后，生长发育会受到明显抑制。

值得注意的是，棉花的种子中也积累了高浓度棉酚。从进化角度看，这并非偶然。棉籽富含蛋白质和油脂，对动物来说是极具吸引力的食物来源。种子中积累的棉酚，实际上起到了抵御取食者的保护作用。正是这一化学防御机制，帮助棉花物种在自然选择中延续。

然而，这种防御机制给人类出了道难题。全球棉花年产量达数千万吨，棉籽约占棉花生物量的近六成。若能安全利用，将是重要的粮食和饲料资源。但棉酚对非反当动物具有生殖毒性，限制了棉籽的开发利用。

中国科学院院士、分子植物卓越中心研究员陈晓亚团队经过近30年的研究，找

到了破解之道。研究发现，棉酚具有轴手性，存在左旋和右旋两种对映异构体。左旋棉酚对人类和非反当动物具有生殖毒性，而右旋棉酚不影响哺乳动物精子的产生，但与左旋棉酚具有相似的抗虫、抗菌活性。

植物体内存在两条棉酚合成途径，分别受 GhDIR5 和 GhDIR6 两个引导蛋白基因控制。研究团队利用 CRISPR-Cas9 基因编辑技术敲除 GhDIR5 基因后，棉籽中的左旋棉酚合成被阻断，毒性显著降低，而右旋棉酚的合成未受影响，棉花植株的抗虫性得以完整保留。

更令人称奇的是，进化分析显示，GhDIR5 基因的出现时间大约在1300万年前至500万年前，这一时期恰好与地球上啮齿类动物的大爆发相吻合。这意味着，棉属植物可能在应对哺乳动物取食压力的过程中逐步演化出了这一针对性防御机制。

实际上，植物和动物间的博弈，从来不是单方面的，昆虫也在不断进化出应对策略。陈晓亚团队还发现，绿盲蝽在取食棉花时会向植物体内分泌一种名为 ASP1 的蛋白。这种蛋白能够激活棉花的防御反应，促使植物产生大量防御化合物。但这些防御化合物对绿盲蝽不构成威胁，却对棉铃虫具有显著的抑制效果。绿盲蝽借此间接压制了棉铃虫这一竞争物种。这一发现揭示了自然界中物种间相互作用的复杂性——植物的防御机制，有时会被“第三者”巧妙利用。

烟草的“自我防御”

烟草的“化学防御武器”是尼古丁。这种生物碱能够高效作用于昆虫的神经系统，导致其取食后迅速丧失活动能力。

但烟草是如何合成尼古丁的至今仍是未解之谜。在合成尼古丁的过程中还会产生多种有毒中间产物，部分中间体的毒性甚至高于终产物尼古丁。烟草如何“自我防

御”，一直是植物化学领域的重要科学问题，相关机制困扰了学界近80年。

今年4月，分子植物卓越中心研究员李大鹏团队在《细胞》发表了这一机制的解析结果。研究表明，烟草的尼古丁合成并非由单一的“尼古丁合成酶”完成，而是由5种蛋白质组装成一个定位于液泡膜上的动态代谢通道。

这一通道的工作机制可概括为“合成与偶联”：烟碱经糖基化修饰后，依次由还原酶、类小脑碱桥酶和葡萄糖苷水解酶催化，最终生成尼古丁，并通过 MATE 转运蛋白直接储存于液泡中。整个过程中，有毒的中间产物始终被酶复合体包裹，未进入细胞质基质。这种“边合成、边隔离、边储存”的模式，有效避免了中间产物泄漏对细胞造成的损害。

这套代谢通道同时实现了3个功能：底物高效转化、中间产物零泄漏、终产物及时隔离。在进化过程中，烟草以一套完整的分子机制解决了化学合成中“生产、储存、防毒”3个核心问题。

这一发现，就像找到了植物防御系统的控制面板。基于尼古丁等防御物质的合成与调控规律，未来该研究不仅能为培育自带“杀虫剂”、无需打药的抗虫作物提供基因资源；更能以此为灵感，开发出高效、低毒、易降解的新型绿色生物农药。

红豆杉的“意外贡献”

遇损伤迅速响应是红豆杉重要的防御策略。一旦遭受虫害、机械损伤或真菌感染，其体内的信号通路便会被激活，启动紫杉醇等防御物质的合成。

后来，这一对真菌和昆虫具有广谱毒性的防御产物被发现对人类癌细胞同样具有杀伤力。紫杉醇能够稳定微管蛋白，抑制细胞分裂，特别是对快速增殖的肿瘤细胞尤为有效，因此成为全球范围内应用最广

的天然抗癌药物之一。

然而，紫杉醇在红豆杉树皮中的含量极低，仅为干重的万分之一左右。提取一剂临床用量，需要消耗多棵数十年甚至百年树龄的红豆杉。20世纪90年代，全球红豆杉资源因此遭到严重破坏。

分子植物卓越中心研究员王勇团队另辟蹊径，不再依赖红豆杉提取，而是将紫杉醇的生物合成途径导入其他植物底盘中进行生产。

烟草作为植物界的“实验小白鼠”，具有生长周期短、遗传转化效率高、生物量较大等优势。2019年，团队首次在本氏烟草中实现了紫杉醇关键中间体5α-羟基紫杉二烯的异源合成，标志着植物底盘生产紫杉醇前体成为可能。

此后，团队将这一策略拓展至其他药用天然产物的生产。2025年，团队在本氏烟草中实现了抗菌药物小檗碱的完整生物合成；同年，在银杏中发现了裸子植物特有的 CYP90J 酶，并在大肠杆菌中实现了抗神经退行性疾病药物候选分子双黄酮的从头合成。

2025年，团队在研究过程中还发现一个“反常”现象：在烟草中生产小檗碱时，把“生产指令”转录因子 CjWRKY1 的强度调低，产量反而增加了222%。这表明，植物不是机器，过度施压会让它“启动自我保护机制”，关闭生产线。找到那个恰到好处的强度，比一味加码更有效。

回望这场植物与动物的“化学战争”：棉花通过棉酚的对映异构体选择，实现了对哺乳动物和昆虫的差异化防御；烟草通过代谢通道的区室化组装，找到了“自我防御”的操控开关；红豆杉产生的紫杉醇，则在数千年后被人类发现具有独特的药用价值。

从破解植物的生存密码，到改写植物的化学程序，中国科学家正在这条独特的赛道上，着力为粮食安全和人民健康寻找更多来自大自然的解决方案。

精准制备铂族催化剂有了新途径

天津大学教授胡文彬团队与合作者提出“瞬态组装”策略，研发出毫秒级周期热脉冲技术，实现铂族金属核壳结构催化剂的超快合成与精准调控，为铂族催化剂的原子级精准制备开辟了全新技术路径。近日，相关研究成果发表于《科学》。

铂族金属是支撑现代能源、化工、环境等产业的关键催化材料。高效精准地构建铂族与非贵金属核壳结构，是兼顾高催化活性与低贵金属用量的关键技术。该结构通过核壳界面原子耦合，诱导精细晶格应变和配体效应，激发铂族金属的超高催化活性。然而，传统合成技术依赖长时高温条件下多个热力学平衡态的逐步转化，工艺复杂、能耗高但精度低，成为铂族金属催化领域的技术瓶颈。

科研团队经过数年攻关，创新提出非平衡瞬态组装策略，通过周期热脉冲技术实现毫秒级精准供能，驱动纳米晶在非平衡高能瞬态演变中完成核壳结构组装，同步实现铂壳原子层厚度的精准调控。合成机制上的底层创新，带来催化剂制造工艺的跨越式突破：传统工艺需要数小时跨设备的制备流程，可缩短至数分钟内完成；新技术实现三原子层的精准铂壳厚度，获得最优化的几何电子效应和催化活性的充分释放；合成时间的极致压缩与能量的精准汇聚，降低90%单位质量催化剂合成所需能耗。新技术合成催化剂在氢燃料电池中实现15.2千瓦每克铂的额定功率，兼具优异的耐久性。

该技术有望应用于依赖高性能铂族催化剂的高端化工、环境催化、精细化学品和医药合成等重要领域。

陈彬

湖北秭归智守锚地兴航运



近日，湖北宜昌秭归县归州镇旧州河，危化品船舶停靠在无人值守智能锚地。

周仕伟

山东即墨缝纫技能展风采



近日，缝纫工在山东省青岛市2026年即墨区针织职业缝纫技能大赛上参加比赛。

梁孝鹏

浙江舟山全力抢修保安全



7月12日，受台风“巴威”影响，浙江省舟山市金塘岛出现多处电力故障，供电部门组织人员全力开展抢修工作，保障岛内生活生产所需。

姚峰

科学家首次实时捕捉海底“分裂”瞬间

地球物理学家首次实时捕捉到一个海底裂缝的扩张过程。研究团队在印度洋一片总长100公里的海域布设了20余个观测站，从而完整记录了这次地质活动——约1.6亿立方米的岩浆喷涌至海底，并在短短数天内使两侧海洋地壳分离了至少两米。相关成果7月8日发表于《自然》。

论文第一兼通讯作者、法国国家科学研究中心的Jean-Yves Royer表示，这一事件的规模“完全超出预期，令人震惊”。

海洋地壳覆盖了地球近2/3的面积，而洋中脊是其形成的原因。随着板块运动将现有地壳从山脊处撕裂，从地核深处涌出的岩浆在冷却后凝固形成新的地壳。科学家从20世纪中期就对这一过程有了大致的理解，但始终未能实时观测到它。

英国国家海洋中心的Isobel Yeo表示，尽管洋中脊在塑造地球表面方面发挥着重要作用，但“我们对火山喷发时板块运动的发生频率、规模与动态机制依旧知之甚少”。

Royer团队将观测目标锁定于东南印度洋海脊。该洋中脊大致呈东西走向，横亘印度洋海底，并将南极洲板块与澳大利亚板块分隔开来。这两个板块分别承载南极洲、大洋洲大陆及周边海洋地壳。

Royer解释，此次地壳的瞬间运动一次性释放了这部分洋中脊积累了30~60年的构造应力，而后者来自澳大利亚板块北移带来的持续拉伸作用。Yeo评价称，这项研究“罕见、直观地展现了板块扩张的真实动态过程”。

王方



板块互相分离时，岩浆会沿洋中脊喷涌至海底

资料图

天王星海王星可能不是“冰巨人”



天王星内部可能充满了熔融的岩浆，而非水冰

资料图

一项研究提出，长期被归类为“冰巨星”的天王星和海王星，内部可能存在熔融岩石构成的“海洋”。近日，相关研究成果公布于预印本平台arXiv。

天王星和海王星最初被称为冰巨星，是因为它们的轨道位于太阳系所谓“冰线”之外——在这里，水、氨、一氧化碳和其他挥发性分子以固态而非气态存在。在太阳系早期，如果该区域富含水冰，那么天王星和海王星的内部可能主要由水构成，并在行星引力下被压缩成一种高温的“超临界”混合物。

瑞士苏黎世大学的行星科学家Ravit Helled表示，冰巨星“有点误导性”，“我们真的不知道这些行星是由什么构成的”。

对天王星和海王星的唯一近距离观测是40年前由美国国家航空航天局(NASA)的“旅行者2号”任务完成的，而那些数据不足以证实上述推测。最近，对冥王星和海王星轨道外的其他小型天体的研究表明，它们内部所含的“冰”——水和氨等化合物

的超临界混合物，远少于科学家的预期，最多仅占这些天体岩石含量的一半。

美国加州大学圣克鲁兹分校的行星天体物理学家Jonathan Fortney表示，证明天王星和海王星由冰构成的证据“全是间接的”。“人们心里一直都有这种想法：这些行星的构成可能比想象的要复杂得多。”

了解太阳系最外层行星的构成，或许能揭示太阳系早期及最外缘区域存在的物质，并为太阳系外的世界提供线索。Helled表示，比海王星略小的行星在银河系中是最常见的行星。“太阳系中就有这类行星的代表，但我们却不知道它们由什么构成。”

美国加州大学洛杉矶分校的行星科学家Edward Young说，当他将比海王星略小的“亚海王星”建模为拥有铁核、岩石地幔和气态氢包层时，这些物质开始混合，并降低了岩石的熔点，从而形成了由熔融岩浆构成的世界。

由于亚海王星围绕母星的轨道比天王星和海王星更近，因此，Young和同事调整了模型，使其与观测到的天王星和海王星的引力和密度相匹配。模拟结果显示，由此产生的星球拥有岩浆海洋而不是冰。这种岩浆与地球上火山喷出的岩浆完全不同，它是在极端压力下封存的流体，其中溶解了大量的氢和少量的氨。在行星厚重且富含氢的大气层的隔绝下，这种混合物可以保持高温达数十亿年之久。

Young说，这种对天王星和海王星的构想，实质上是“对其天体物理学和形成环境的重新思考”，其中外行星盘中的冰含量可能远低于以往估计。

Young的理论并非唯一。美国普

林斯顿大学的博士生Roberto Tejada Arevalo对天王星和海王星的内部进行了建模，以解释为什么海王星比天王星释放了更多的内部热量。他发现，一种内部混合了水、氨、甲烷和氨的超临界岩浆结构，可以与这些外行星的热测量数据和其他观测属性相吻合。

以色列理工学院的行星科学家Uri Malamud认为，这些行星的内部可能仍然富含冰，但主要是甲烷冰，而非水冰。他和同事改变了早期太阳系中化学组分的数量，并模拟数十万颗类海王星行星的形成过程，发现当大量煤烟（碳质颗粒）与氢基大气混合时，模拟的结果在半径和质量上最接近天王星和海王星。碳和氢反应生成甲烷，最终以液态存在于行星内部。由于行星内部物质难以充分混合，因此未形成岩浆海洋，导致岩石呈层状分布。“这些只是关于可能情况的不同设想。”Malamud说。

荷兰莱顿大学的博士生Vanesa Ramirez通过建模发现，天王星和海王星的岩石成分应超过60%。但最近利用阿塔卡马大型毫米/亚毫米波阵列望远镜对天王星进行的观测显示，其一氧化碳含量很高，表明内部充斥着这种气体。Ramirez表示，许多不同的内部结构都可能解释这一观测结果。“我们仍在探索这些行星。”

研究人员表示，解开这一谜团的唯一方法就是前往这些天体，近距离测量它们的引力、磁场和大气层。事实上，在美国国家科学院2023年发布的优先事项十年调查中，行星科学家将针对天王星的轨道器与探测器任务列在了愿望清单之首。“我们确实需要一项旗舰任务把所有的拼图拼起来。”Helled说。

文乐乐