

“分子剪刀”：病原菌攻城略地的“毒力武器”

■本报记者 李晨

如果把植物细胞想象成一座座古城，那么城外的护城河和城墙就相当于质外体——城墙为细胞壁，护城河则为细胞壁和细胞膜之间的空隙。当病原菌攻击植物时，质外体便成为双方交锋的首要战场。

南京农业大学教授王源超向《中国科学报》解释，植物细胞表面布满了多种充当“哨兵”的受体，而疫霉菌则携带一把精准的“分子剪刀”作用于质外体，切断植物免疫信号的传递链。

近日，王源超领衔的“大豆病害绿色防控”研究团队在《自然－植物》发表研究论文，揭示了疫霉菌胰蛋白酶样丝氨酸蛋白酶 PsTry1 作为“分子剪刀”，在质外体中直接切割免疫中枢受体激酶 BAK1，破坏免疫受体复合体的组装，从而阻断质外体免疫信号传递的作用机制。

这一发现不仅揭示了病原菌在质外体中切割植物免疫核心元件突破寄主抗性的新策略，也为设计广谱、持久的作物抗病新靶点提供了关键理论支撑。

质外体：植物细胞第一道免疫防线

植物在自然环境中持续遭受病原菌侵袭。效应子是病原菌攻击寄主植物的武器，病原菌分泌效应子攻击植物的免疫系统导致植物感病。而植物进化出了精细、复杂的免疫系统，能够识别病原菌效应子并激活植物抗性，从而免受侵害。

王源超表示，植物会通过质外体层面的免疫，加强对病原菌的抵抗。例如，植物细胞壁作为物理屏障抵御病原菌侵入；植物在质外体空间布置“哨兵”免疫受体，一旦检测到病原菌，便会拉响警报，启动免



大豆根腐病田间危害的场景。
南京农业大学供图

疫。可以说，质外体是植物免疫的第一道防线。

论文共同通讯作者、南京农业大学教授王燕在接受《中国科学报》采访时说，在哺乳动物系统中，已有研究揭示病原菌通过分泌蛋白酶切割宿主受体来促进感染，例如，人类致病菌铜绿假单胞菌分泌的金属蛋白酶 LasB，可通过切割尿激酶型纤溶酶原激活物受体来增强致病性。

“病原菌在侵染过程中也会产生大量蛋白酶，是不是植物也有类似的致病机制帮助自身侵染呢？”王燕说。此外，植物细胞膜上充满大量的“哨兵”受体，但病原菌却能突破防线，那植物病原菌是否也通过分泌蛋白酶切割植物的“哨兵”受体呢？

“在植物与病原菌的‘分子博弈’中，病原菌是否以及如何 在质外体空间直接攻击这些关键的哨兵受体元件，从而突破植物的第一道免疫防线？这一涉及植物免疫防御核心机制的关键科学问题，目前仍

存在诸多未明机制。”王源超说。

攻击“哨兵”受体元件

为破解疫霉菌在质外体空间抑制寄主免疫的谜题，研究人员对大豆疫霉菌潜在的质外体效应子进行了高通量的功能分析，并鉴定到其中一个关键的“破坏者”——胰蛋白酶样丝氨酸蛋白酶 PsTry1。

研究表明，效应子 PsTry1 作为大豆疫霉菌进攻植物细胞的“武器”，就像一把分子剪刀，能够抑制不同病原菌保守分子模式触发的免疫反应。

论文第一作者、南京农业大学博士后张思聪解释道，细胞膜上的“哨兵”受体，如 RXEG1 在细胞膜表面巡逻，当发现疫霉菌蛋白 XEG1 时，会招募“指挥官”BAK1，即核心共受体，两者相互作用后组装成一个“警报器”，并拉响警报，向细胞膜内继续传递免疫信号。

“指挥官”BAK1 与多种模式识别受体互作形成受体复合物，启动免疫防御反应。而生化实验表明，效应子 PsTry1 能与 BAK1 互作。“这把剪刀专门盯住免疫系统的指挥官 BAK1，并剪断它的‘手臂’，即胞外结构域。这种切割使 BAK1 失去功能，‘哨兵’无法组装成完整警报器，免疫信号被切断，病原菌便更容易趁虚而入。”张思聪说。

“我们在研究中发现，此类蛋白酶广泛分布于不同的病原菌中。除了大豆疫霉菌，辣椒疫霉菌、致病疫霉菌、禾谷镰刀菌等，都会分泌类似的蛋白酶切割 BAK1，并抑制寄主免疫。”王源超说。

因此，质外体丝氨酸蛋白酶类“分子

剪刀”切割 BAK1 的策略，是疫霉属病原菌以及真菌病原菌镰刀菌等普遍采用的进化上保守的“毒力武器”。

“我们证实了先前的猜想，即植物病原菌也存在攻击‘哨兵’受体元件的例子。”王源超说。

开发绿色新型农药靶点

“受体激酶 BAK1 的重要性体现在其作为共受体参与植物的生长发育和植物免疫。”张思聪说，一旦 BAK1 被破坏，植物多条免疫防线就会瘫痪。对病原菌而言，直接攻击 BAK1 如同实施“斩首行动”，能显著提高入侵效率。因此，BAK1 成为病原菌的头号攻击目标。

王源超表示，这是首次揭示病原菌通过质外体效应子直接切割模式识别受体核心元件的分子策略，为植物－病原菌质外体空间的“军备竞赛”理论提供了关键实证。对这一过程的深入了解是全面认识作物病害成灾机制和植物免疫形成机制的基础，不但对改良作物广谱、持久抗病性具有重要指导意义，也为未来开发绿色新型生物农药奠定理论基础。

王源超表示，未来可能找到新型药物靶点，设计如小分子抑制剂一样的“防护盾”，阻止病菌的“剪刀”切割；也可能实现广谱抗病育种，通过基因编辑强化 BAK1 关键位点，培育抗多种病害的作物，最终减少化学农药的使用，发展绿色防控技术。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1038/s41477-025-02039-0>

2025 国际通信大会在沪举行

本报讯(见习记者江庆龄)8月10日至13日，以“塑造融合连接的未来”为主题，由中国通信学会、电气电子工程师学会(IEEE)和 IEEE 通信协会联合主办，复旦大学承办的 2025 国际通信大会在上海举行。

大会由复旦大学副校长汪源源、中国工程院院士于全担任名誉主席，复旦大学教授高跃、英国萨里大学教授拉希姆·塔法佐利、澳大利亚新南威尔士大学教授张伟担任联合主席。

在主旨报告环节，中国工程院院士、北京邮电大学教授张平介绍了智简无线网络的核心原理与实践，并探讨了其广阔的应用前景与未来发展方向。德国德累斯顿工业大学教授格哈德·费特魏斯对无线电接入网各层所需的关键创新做了概述，指出 6G 不仅被视为一项技术成就，更是构建赋能个人、保护隐私并为社会带来切实利益的系统的基础。华为技术(加拿大)有限公司高级副总裁朱佩英则介绍了一个以感知辅助人工智能为核心的 6G-ISAC 框架，将为类机器人化的服务与应用开启全新领域，使 6G 成为大规模智能交互系统的平台。

本次大会共设置了 13 场分论坛，内容涵盖信息与通信理论、通信信号处理、移动与无线网络、天空地一体化网络、通感一体化和人工智能赋能通信与网络等关键领域。此外，大会同步进行了 19 场技术讲座、26 场研讨会、38 场特邀报告、16 场演示活动。

复刻 3000 多年前的青铜牛尊

■本报见习记者 李媛

3000 多年前的青铜牛尊，铸造过程复原了！西北工业大学文化遗产研究院青铜工艺研究团队联合中国社会科学院考古研究所、澳大利亚墨尔本大学等机构的研究人员，通过研究河南安阳殷墟出土的著名青铜器亚长牛尊的铸造工艺，成功复原了这一青铜器的浇注与凝固过程。

团队通过三维扫描技术与凝固模拟实验，首次揭示了商代工匠通过控制陶范型腔结构、优化浇冒口设置等工艺，实现青铜器等壁厚设计的科学逻辑。相关成果近日发表于《考古科学杂志》。

科学方法重现青铜器铸造工艺

西北工业大学文化遗产研究院副教授杨欢介绍，我国的青铜时代约始于距今 4000 年前，在大约 3000 年前，青铜器制作已成为最重要的手工业生产活动。商代晚期的工匠使用独特的块范法铸造了大量工艺精湛的“国之重器”，供当时的王室贵族祭祀天地、诸神与祖先，祈求丰收、胜利与健康，铸就了我国古代光辉灿烂的青铜文化。商代晚期的青铜器在材质、工艺和造型上均达到了青铜艺术的巅峰，是人类青铜文明的重要组成部分。

长期以来，学者们通过对青铜工艺的研究，了解我国青铜时代的社会结构、经济与技术等多方面情况。尽管前期研究已经很好地解决了诸如工艺流程、物料选择等重要问题，但目前中

外学者共同面临的问题是，如何通过科学方法准确还原 3000 多年前的青铜铸造工艺，从而更好地认知与诠释精湛的古代技艺。

为了解决这一考古学重要问题并准确认知我国古代冶金技术成就，自 2019 年起，西北工业大学文化遗产研究院青铜工艺研究团队结合该校材料科学等优势学科，与凝固技术全国重点实验室的研究人员合作，率先将凝固理论与模拟方法用于古代青铜器的研究之中，将青铜工艺研究提升至动态化、可视化、可计算化的新层面。研究开展 5 年来，取得了丰富的科研成果。

以缺陷控制实现完美器物

2023 年，受中国社会科学院考古研究所安阳工作站合作委托，团队展开了对殷墟出土著名青铜器亚长牛尊的凝固过程复原。这件商代晚期的青铜牛尊出土于殷墟花园庄 54 号墓，墓主人为高等级武将亚长。

作为殷墟出土的唯一牛形青铜器，牛尊以其生动的造型和精美的纹饰，自出土以来便备受研究者与公众的关注。

商人重酒，尊因此成为当时最重要的酒器。牛尊作为安阳殷墟出土的代表性青铜器，其动物造型的铸造难度远高于普通的尊。对其铸造工艺的研究，将有助于学术界深入了解商周时期青铜铸造的

精湛技艺。

团队通过对古代陶范材料的热物性参数进行测量、计算，以及对关键边界条件如青铜与陶范界面换热系数的长期研究与攻关，获取了关键材料数据。结合牛尊本体与陶范的三维建模，成功复原了这一著名青铜器的浇注与凝固过程。

对牛尊凝固过程的观察，揭示了商代晚期铸造工艺的多项成就，如浇冒口设计与金属垫片的应用。“当时工匠对浇冒口的选择，做到了今天材料科学视角下的最优解，展现了工匠的高超智慧。”杨欢解释，团队在模拟时，曾经尝试将之前根据考古观察得出的浇冒口进行互换，结果发现器物的整体缺陷增加了一倍不止。

此外，牛尊的整体造型严格遵守了壁厚均等设计原则。除了腹腔之外，牛尊的角与四足均为中空，整体保持约 3 毫米的壁厚，仅在牛蹄接触地面的部位厚度为 5 毫米，为整件器物提供了很好的支撑。

值得一提的是，牛尊的右后足与腹腔连接部位壁厚略厚，达到了 7 毫米左右。研究发现，这并非设计失误，而是工匠为

“象”往的生活怎么样？



小朋友给亚洲象做“足疗”。
邓泳怡供图

本报讯(记者朱汉斌)8月12日是第14个“世界大象日”，今年主题为“象往家园 中国守护”。当天，广州长隆野生动物世界(以下简称长隆)举行“让山看见海之走进‘象’往的生活”公益活动。

据介绍，长隆自 2000 年引进亚洲象以来便开启了积极的保育之路。2005 年，首头亚洲象“隆隆”出生。2008 年，长隆实现小象“五子登科”。2020 年，首头“子二代象”“卷卷”的出生，使长隆的亚洲象群实现了三代同堂。目

前，长隆生活有 30 多头亚洲象。

在非洲象保育方面，长隆同样表现突出。非洲象是陆地上最大的哺乳动物，已被列入《世界自然保护联盟濒危物种红色名录》。根据中非动物保护合作相关计划，2015 年 7 月，20 多头被遗弃的非洲小象被救护到清远长隆国家级世界珍稀野生动植物种源基地安家。目前，该基地生活着 30 多头非洲象，形成国内最大、最活跃的非洲象迁地保护种群。

适应浇冒口功能而进行的巧妙调整，体现了高超的技术创造力。这样的器物设计，使得器物在充型的过程中铜液流畅，极大地减少了铸造缺陷的产生。这一研究成果生动还原了商代工匠“以缺陷控制实现完美器物”的智慧。



杨欢正在观察青铜牛尊细节。

“这些技术，比如等壁厚设计，至今仍拥有很强的生命力，甚至成为今天铸造行业的重要原则，显示了我国古代金属技术的强大生命力。”杨欢进一步解释说，正因为有 3000 多年前的商代晚期，工匠熟练掌握了铸造核心技术，并将其运用到青铜器的铸造工艺中，一件件青铜精品才得以诞生，从而缔造了古代中国独特的青铜时代。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1016/j.jas.2025.106243>

发现·进展

中国科学院东北地理与农业生态研究所

中国湿地将持续快速变绿

本报讯(记者沈春蕾)中国科学院东北地理与农业生态研究所湿地遥感研究团队基于 1087 个湿地植被地上生物量样点数据和中国湿地分布数据，解析了气候变化影响下的湿地植被地上生物量的时空变化特征。近日，相关研究成果在线发表于《自然》系列期刊《通讯－地球与环境》。

植被是湿地生态系统的基本组成部分，监测其地上生物量的变化对于准确认知湿地生态系统对全球气候变化的响应至关重要。在全球植被绿化趋势的背景下，由于原位观测不足，湿地植被生长与局地水文关系复杂等因素限制，已有研究缺乏对大尺度、长时间序列的湿地植被地上生物量时空格局的准确解析，限制了湿地植被碳汇等研究进展及生态系统可持续管理。

此次研究结果表明，2020 年中国湿地植被地上生物量密度平

均为 352.23 ± 32.67 克 / 平方厘米，中国湿地植被地上碳储量约为 5750 万吨。近 20 年来，中国湿地植被地上生物量呈现逐渐增加特征，绿化趋势显著。在未来不同的气候变化情景下，中国湿地将持续快速变绿，但变绿程度呈现明显地理差异。

该研究从国家尺度湿地植被地上生物量数据库的构建和高精度的空间预测方法入手，对中国湿地植被地上生物量进行了优化创新研究，准确揭示了气候变化背景下湿地植被地上生物量现状特征、历史变化及未来趋势。选择地上生物量为指标，弥补了已有研究对中国湿地植被绿化趋势研究的不足，将有助于加深对于国家和全球尺度湿地碳循环的理解。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1038/s43247-025-02628-z>

海南大学等

揭示火龙果进化与着色机制

本报讯(记者温才妃)海南大学教授王华锋团队与澳大利亚莫道克大学的研究人员合作，在火龙果基因组研究方面取得新进展。该联合团队完成高质量燕窝果染色体水平基因组组装，揭示了火龙果基因组进化及甜素合成途径，为火龙果育种提供科学依据。近日，相关成果发表于《基因组生物学》。

火龙果隶属仙人掌科蛇鞭柱属，起源于约 6500 万年前，富含维生素、抗氧化剂、矿物质、膳食纤维等。其中四倍体燕窝果和二倍体火龙果最具商业和消费价值。

该团队介绍，解析基因组结构影响植物性状的机理是作物研究的前提。随着火龙果需求的日益增长，尽管基因组工具取得巨大进步，但由于缺乏火龙果参考基因组，对燕窝果的分类存在争议，其与二倍体火龙果在基因组结构上的差异研究也不深入，火龙果的品种创新受到严重阻碍。

为解决上述问题，王华锋团队利用高保真分子实时测序技术和高通量染色体构象捕获技术完成燕窝果染色体水平基因组组装，结合比较基因组学、高通量染色体构象捕获技术互作、共线性及转座酶可及性染色质测序分析等多种分析方法，首次从基因组



火龙果。
课题组供图

层面证实了燕窝果为同源四倍体，发现了二倍体与四倍体在三维基因组结构、基因组变异、染色质可及性等方面存在显著差异，同时揭示了因基因表达差异导致二倍体呈红色、四倍体燕窝果呈黄色的分子机制。

该研究首次成功完成了同源四倍体燕窝果的染色体级别基因组组装，为解析多倍化进程及三维染色质重构如何调控基因差异表达，进而导致表型分化提供了理论支撑。这不仅为燕窝果的育种研究奠定了理论基础，也为多倍体作物的改良和可持续园艺创新提供了新思路。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1186/s13059-025-03695-3>

中国热带农业科学院香料饮料研究所

酵母发酵如何调控咖啡风味

本报讯(记者李晨 通讯员赵慧阳)中国热带农业科学院香料饮料研究所的研究人员结合广泛靶向代谢组学与感官评价技术，系统揭示了不同酵母菌株发酵对海南罗布斯塔咖啡非挥发性代谢物谱和感官品质的调控规律，为定向选育发酵菌株、开发高品质咖啡产品提供了理论依据。近日，相关研究成果发表于《食品化学：X》。

筛选能够产生优质风味化合物的发酵菌株和优化发酵工艺的研究一直是咖啡产业的重点。现有的研究多通过感官评价等方法，比较单一发酵或混合发酵对咖啡香气化合物的影响。该研究以海南罗布斯塔咖啡为对象，系统探究了 4 种单一酵母菌株(HK、JK、GK、ZK)、混合酵母(MK)及自然发酵(CK)对咖啡代谢物组成与感官属性的影响，并阐明了差异代谢物与感官属性的相关性。

结果显示，从 6 种发酵咖啡中共鉴定出 805 种非挥发性化合物，筛选出 127 种关键差异代谢物，包括有机酸、酚类酸、黄酮类和生物碱等。

GK 发酵使咖啡液颜色显著变化，并提升了口感、余味和平衡



咖啡果。中国热带农业科学院供图

度 3 项评分。所有酵母发酵均显著增加了木犀草素的含量，其中 HK 处理组含量提升 1147 倍，该物质具有抗氧化与抗糖尿病潜力。此外，五羟基黄酮、原儿茶醛、5- 苯基乙酸及柚皮素被确定为影响平衡感官属性的关键代谢物。仅 HK 降低木脂素与香豆素含量，而 GK 处理显著增加咕嗒烯及有机酸，并通过下调苦味前体降低咖啡涩感。分析表明，黄酮与黄酮醇生物合成途径是酵母调控的关键通路，菌株的差异影响糖苷水解与酚酸转化效率，进而改变风味。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1016/j.foc.2025.102781>