

解码植物的“化学武器”

■本报见习记者 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,麻痹啃食者的神经系统;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类治疗疾病、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),科研人员向记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菌、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”:烟酸经糖基化修饰后,依次由还原酶、类小檗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。上世纪 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。



近日,由中交第四航务工程局有限公司投资、中交四航局江门通航业有限公司承建的全国最大全回转半潜起重船“四航永盛”号在广东江门正式交付。

“四航永盛”号突破传统装备功能局限,将起重设备与半潜驳功能合二为一,实现起重作业与货物运载双重功能集成,兼具“大力水手”的力量与“海上大货车”的承载能力。其建成投用将有力支撑粤西及环北部湾区域重大工程建设,显著降低工程成本,在深远海风电开发、海洋牧场规模化建设、深海资源勘探等新兴领域发挥关键作用。

图为“四航永盛”号。
本报记者朱汉斌 通讯员肖明葵报道
项目团队供图

丘成桐:AI 尚无法解决真正的数学难题

■本报记者 江庆龄

近日,第三十六届国际弦理论大会(Strings 2026)在上海举行。来自世界各地的弦理论、量子引力、量子场论、数学物理及相关领域知名学者齐聚一堂,分享基础理论物理前沿研究成果。

弦理论诞生于 20 世纪 60 年代末,最初与强相互作用研究有关,后来逐渐发展为量子引力和统一理论的重要候选框架之一。它试图将广义相对论与量子力学置于同一理论框架中,为理解基本粒子、基本相互作用、黑洞以及宇宙起源等问题提供新的思路。

国际弦理论大会正是连接相关领域学者的重要平台。自 1988 年创办以来,该会议已发展为弦理论与量子引力领域规模最大的年度国际系列会议之一。

本届大会是继 2006 年、2016 年之后第三次在中国举办,并首次落地上海。20 年前,国内关注弦理论者寥寥,相关研究者屈指可数。如今,一批年轻学者逐渐成长起来,国内弦理论研究呈现蓬勃生机。

大会开幕当天,国际弦理论大会主席、菲尔兹奖得主、上海数学与交叉学科研究院理事长丘成桐接受媒体采访。以下是主要访谈内容。

为基础研究留出空间

问:时隔 10 年,国际弦理论大会再次在中国举行。你期待这次大会产生哪些影响?

丘成桐:国际弦理论大会可以说是理论物理领域最重要的会议之一。每年,世界上很多知名的理论物理学家都会参加,分享过去一年取得的重要成果。

同时,大会也吸引了很多数学家。原因在于,弦理论过去几十年对数学产生了深远影响,很多重要数学突破都与它有关。比如此次参加大会的爱德华·威滕,他是理论物理学家,却在 1990 年获得菲尔兹奖。这正是因为他将弦理论思想引入数学,为几何、拓扑学等提供了洞见。

国际弦理论大会也带动了国内弦理论学



上海数学与交叉学科研究院供图

科发展。

2006 年大会第一次在中国举办时,霍金、戴维·格罗斯、威滕、安德鲁·斯特罗明格等学术大家都来了。当时国内做弦理论研究的人很少,很多年轻人是通过大会才了解到这个方向的重要性。此外,2006 年到 2016 年的 10 年间,一批学生到海外学习,接触国际前沿的弦理论。2016 年以后,情况发生变化。我们自主培养的一批年轻人逐渐成长起来,国内相关研究开始积累。

第三个 10 年,我们期待中国本土成长起来的学者,不只学习和追赶,更能够真正创造世界一流的学问。需要强调的是,我们的使命并不局限于会场之内,更要面向大众。本次大会专门设置了面向大众的科普讲座,我们希望借此机会向公众展示基础物理的奇妙之处,让大家认识到基础科学无可替代的核心价值。

问:说到基础研究,你在近期的一个采访中提到应给“从 0 到 1”的探索性、原创性研究留出空间。对于弦理论这样距离应用较远的基础研究,应该如何留出空间?

丘成桐:很多真正重要的学问都源于好奇

心——想知道自然界为什么这样运行、背后的规律是什么。这种探索往往在短期内看不到应用的可能,但把时间进一步拉长后,将对科学技术产生深远影响。

科技史中有很多这样的例子。比如牛顿、爱因斯坦、麦克斯韦等,最初都是为了理解自然界最基本的规律才开展科学探索。2022 年诺贝尔物理学奖表彰的量子纠缠实验研究同样如此。至于量子纠缠衍生的量子信息科学,则是后面的事情了。

我始终认为,真正的创新根植于好奇心驱动的基础研究。这类研究优先探寻宇宙最底层的运行规律,而非一味追求即时产业应用。值得一提的是,这类基础研究需要的投入并不多,更多的是需要耐心。

问:卡拉比-丘流形是弦理论中的重要数学框架。你当年证明卡拉比猜想,是否也受到了好奇心的驱动?你预想过它后续的影响吗?

丘成桐:卡拉比猜想是一个数学问题,但受到了广义相对论的影响。因此,我一开始就知道它应该和物理有关,只是当时还没有找到合适的框架。1971 年,我还是研究生时就对没有物质的引力场非常感兴趣。后来,我在图书馆读到了卡拉比教授的论文,对其中的问题产生了浓厚兴趣。之后几年,我屡败屡战,最终在 1976 年证明了卡拉比猜想。

在证明卡拉比猜想时,我引进了一个方案,用以寻找满足卡拉比方程的空间。这一思路引发了物理学家的兴趣。1980 年前后,我和加里·霍罗威茨、安迪·斯特罗明格开始讨论卡拉比-丘模型,但当时弦理论还没有完全成熟。到 1984 年,弦理论进一步发展起来,卡拉比-丘流形很快被用到弦理论中。

用学术环境吸引一流人才

问:你在 20 年前曾表示,弦理论是“众妙之门”,但国内做的没几个。如今国内弦理论的人才队伍和研究水平发生了哪些变化?

丘成桐:过去 10 年间,尤其最近 5 年,国内

弦理论研究进步很大。一方面,我们聚集了一批优秀学者,他们中既有华裔,也有非华裔,都在持续开展高水平研究。另一方面,我们自主培养的年轻学者也在快速成长,他们的学术思维非常活跃,也带着学生们共同成长。

必须承认的是,和美国普林斯顿大学、麻省理工学院、哈佛大学、斯坦福大学等世界顶尖高校相比,我们仍有差距,但这个差距在慢慢缩小。我希望未来 5 到 10 年,我们能够继续追赶。

对此,我也有一定信心。我们看到,国内对基础研究科研经费投入在增加,同时有越来越多优秀的学生选择留在国内深造。好的导师、好的学生、好的博士后聚在一起,才可能形成真正有创造力的学术环境。

问:近几年,国内引进了不少世界一流的科学大家,但其中非华裔的比例并不高。我们是否可以采取一些措施,像上世纪三四十年代的美国一样,汇聚全球顶尖学者来华长期发展?

丘成桐:美国科学的发展并不是这个阶段才开始的。早在 19 世纪后期,美国就开始重视科技发展。由于当时美国缺乏高水平人才,其间派了大量学生到欧洲学习。到 20 世纪初,随着一批留学生回到美国,美国开始重视自主培养人才。

举例而言,图灵、维纳、香农、冯·诺依曼这 4 位对现代信息科学发展起到了奠基性作用的学者中,只有冯·诺依曼未接受过美国的高等教育。

同时,该时期的美国也以开放的姿态招揽全球顶尖学者,钱学森的导师冯·卡门便是典型代表。1920 年,美国加州理工学院校长亲自带队乘船远赴德国,路上耗时一月,专程登门邀约冯·卡门。

我想,这是值得国内学习的。

问:在你看来,当下吸引世界一流人才,最关键的是什么?

丘成桐:很多人谈人才引进,首先想到的是待遇。但真正一流的学者,不会只因为钱就改变学术道路。

要吸引真正优秀的人才,生活保障当然重要,但更重要的是学术环境。我们要让学者相

发现·进展

中国科学院金属研究所

“过弛豫”改写材料世界应变“剧本”

本报讯(记者张楠 通讯员刘言)

材料界中,利用一种材料对另一种材料施加“压力”(压应变)或“拉力”(拉应变),称为应变工程。但中国科学院金属研究所研究员唐云龙团队的一项新研究,却在一个本应受压的体系中通过“过弛豫”机制,最终让材料处于“拉伸”状态。相关研究成果近日发表于《先进材料》。

研究团队设计出一种超晶格——钛酸钡和钛酸锶以原子层精度交替堆叠的纳米结构,其生长在钨钨氧衬底上时,室温下超晶格的晶格略大,理论上会受到约-1.0%的压应变,这本应抑制材料内部的“极化涡旋”结构形成。然而,实验结果出人意料,最终存留在薄膜中的并非压应变,而是约+0.7%的等效拉应变。

实现反转的关键藏在制备温度里。超晶格在约 720℃高温下生长,此时钛酸钡的相变膨胀程度远大于衬底,室温下-1.0%的失配在高温下急剧增加至约-2.3%。同时,钛酸钡在约 490℃发生铁电-顺电相变,晶格参数突变进一步加剧失配。面对“巨变”,薄膜无法弹性应对,便在界面处

“生长”出间距为 23 纳米的失配位错阵列,密集程度明显超出理论预测的 39 纳米,进而剧烈释放应力,这就是“过弛豫”。冷却至室温后,位错网络将超晶格锁定在了等效拉应变状态。

唐云龙表示,传统观念中位错是“捣蛋鬼”,但这次它成了“指挥官”。界面位错引入的局域应变场成功诱导并调控了极化涡旋阵列,甚至驱动其向周期性偶极子波转变。缺陷由此成为操控纳米尺度极化状态的新工具。

这一发现颠覆了认知,表明压应变衬底上同样能构筑极化拓扑结构,大大扩展了材料选择范围。同时揭示的“热膨胀-相变协同过弛豫”新机理,为应变工程提供了新维度,提醒人们在涉及高温和相变的薄膜制备中,热力学因素至关重要。

更重要的是,该研究证明了晶体缺陷可“变废为宝”,通过精确控制位错,未来或能“定制”出特定极化网络,应用于超低功耗、超高密度的新一代存储器或逻辑器件。

相关论文信息:
<https://doi.org/10.1002/adma.73779>

安徽师范大学

揭示凹耳蛙同性性行为声学调控机制

本报讯(记者王敏)

安徽师范大学教授张方团队首次从声学层面揭示了中国特有物种——凹耳蛙同性性行为(雄雄抱对)的形成机制,以及如何主动规避同性抱对的发声策略。该研究为解析动物同性性行为进化理论、拓展无尾两栖类声通信系统复杂性的理解,以及探讨动物主动信号策略的进化和同性性行为起源提供了全新实证。相关研究近日发表于《当代生物学》。

凹耳蛙是我国特有两栖物种,也是全球首个被证实具备超声通信能力的蛙类。野外雄性凹耳蛙依靠鸣叫声吸引雌性前来交配,但偶然会发现雄雄抱对的凹耳蛙。

研究团队首次从声音入手,通过系统比较雌雄个体的声信号结构、开展声信号回放与行为学验证等实验,发现个别雄蛙会对其他雄性发出的带有雌性声学特征的低音产生明显的声学偏好,进而表现出趋近响应,这是同性抱对形成的核心诱因。

为何野外很少看到雄雄抱对的凹耳蛙?研究进一步分析表明,绝大多数雄性凹耳蛙已经演化出一套主动规避的办法,即绝大多数雄蛙在发出类似雌蛙的长音后,接着再发出数个短音鸣叫,依靠长短音组合的时序结构,快速向同类传递自身是雄性身份的信号,这样就可以有效阻止其他雄蛙的抱对企图。

传统学界普遍认为,蛙类仅会在被同性误抱后被动发出“释放鸣叫”以表明自身性别。此次研究颠覆这一固有认知,证实凹耳蛙可主动调整鸣叫序列时序结构,提前发出警示声学信号,实时纠正性别识别偏差。研究同时证明,蛙类分辨同类性别不单依靠声音频谱特征,鸣叫序列的时间排布同样是关键识别依据,这一发现填补了无尾两栖类多组分声信号解码机制研究空白。

相关论文信息:
<https://doi.org/10.1016/j.cub.2026.05.009>

信,来到中国后他的学问可以得到进一步发展,他能招到好的学生、博士后,周围是志同道合的同事。只有这样,他们才会愿意留下来并持续产出成果。

AI 尚无法解决真正的数学难题

问:近期,人工智能(AI)在解决数学问题方面受到了很多关注,你如何看待这一趋势?

丘成桐:AI 可以被认为是从数学发展出来的一个重要方向,主要的思想和方法都来源于数学。毫无疑问,数学强,AI 才可能强。

至于 AI 能不能真正解决数学家最关心的问题,我目前还没有看到 AI 展现出这样的能力。数学是一门非常古老的学科,从古至今产生的数学问题可能超过 1000 万个。其中,确实有相当数量的问题长期都没有被解决,但它们未必是重要的问题。

我们关注的是那些能够推动学科核心发展的重大问题。如果有一天,AI 能够对黎曼猜想、希尔伯特问题等产生影响,我会非常佩服,但目前来看,还没有到这个阶段。

当然,这并不意味着不去使用 AI。查资料、找文献、归纳总结,都是 AI 可以帮到我们的。

问:从学生培养的角度看,为什么要强调数学与 AI 结合?

丘成桐:如前所说,AI 是很有用的工具,学生尽早学习是好事。

我们现在还在布局另一件事。我们计划从高中阶段开始,挑选一批有潜力的学生,让他们接触数学研究。

在上海,我们计划以上海数学与交叉学科研究院为载体,请在职的青年老师或者博士生作为导师,对入选的高中生进行一对一辅导。学生每周末花两个小时,来研究院和导师进行交流。长期坚持下来,他们能够逐渐了解什么是学术研究。

问:对于中学生而言,这样的训练是否为时过早?

丘成桐:我并不这么认为。我们现在也在一些中学开展试点工作,给初中生讲初等数论等内容。孩子们大多听得非常认真,而且能够提出很好的问题,课后也很愿意钻研一些有趣的数学方程。这些孩子不过十二岁,已然展现出出色的能力。我们希望能够呵护他们的兴趣,帮助他们稳步成长。