

实验室养“毒虫”，揭开水稻抗病毒秘密

■本报实习生 葛家诺 记者 倪思洁

在北京大学生命科学学院的一间实验室里，教授李毅穿着白大褂，戴着防护手套，将密密麻麻的小昆虫放进特制的透明虫笼，里面放着它们喜欢的食物——翠绿的水稻幼苗。这些小虫是农民眼中臭名昭著的水稻害虫，而李毅等人却养着它们，并有意让它们携带特定病毒。

在过去近20年里，李毅及团队成员最常做的事就是养这些小昆虫，包括带毒和不带毒的，然后让虫子去“祸祸”幼苗。他们这么做是为了确保水稻在实验室里感染病毒的情况与在自然界无限接近，终极目标则是找出启动水稻抗病毒机制的开关。

近日，研究人员的终极目标终于实现了。李毅团队联合福建农林大学等多个实验室，首次揭示了水稻感知病毒入侵并启动免疫反应的关键分子机制，发现了两个关键蛋白的作用，为培育广谱抗病毒水稻品种提供了全新路径。该成果以封面文章形式发表于《自然》。

让人头疼的困局

李毅出生在农村，从小就帮着大人种小麦、玉米，田里的那些事让他感到亲切。作为从农村走出来的大学生，他第一志愿就是植物保护专业。1988年，他在德国留学攻读博士学位时聚焦于甜菜病毒研究，1992年回国后又开始专注于水稻病毒研究。

在决定“要研究什么”时，李毅的判断标准是“农业需要什么”。“欧洲很少种植甘蔗，主要依赖于甜菜制糖，当时我就研究甜菜病毒。回到中国后，我知道水稻对国家太重要了，全国大概一半人以水稻为主粮，而病毒问题又十分严峻，所以我开始研究水稻病毒。”

李毅投身水稻病毒研究领域与我国水



期刊封面。受访者供图

稻病毒暴发事件有关。上世纪90年代，我国南方稻田频繁出现诡异景象：本应抽穗的水稻植株矮缩成团，叶片扭曲发黄，最终成片枯死。

“那是水稻病毒病大暴发的年代。”李毅回忆。正因为现实需求，国家启动了一项聚焦水稻病毒研究的国家高技术研究发展计划（原“863计划”），李毅也走上了这条长达30年的科研攻关路。

传统的防治手段依赖杀虫剂，但这种方式无法根除虫媒病毒。“总有漏网之虫会携带病毒在第二年卷土重来，引发新一轮污染和抗药性。”李毅说。

新的科技手段依赖于育种，但“育种家也很头疼，好不容易遇到个新品种，又好吃

又高产，结果只抗一两种病毒，另一种病毒来了，作物就大片死亡”，李毅说。

到2008年，大规模的水稻病毒再次暴发。李毅意识到，必须从分子层面找到水稻自身的“免疫开关”，帮助水稻“武装”起来，自行对抗多种病毒风险。

“如果能使水稻具备广谱抗病能力，将彻底突破这一困局。”李毅说。

“狼烟一起，抗病毒大军全面动员”

李毅团队从2007年开始研究水稻抗病毒机制。他们发现水稻的防御系统被一种叫茉莉酸(JA)的植物激素控制。顺着这条线索，他们找到了关键蛋白——RBRL及其作用目标NINJA3。

此后，李毅开始带着团队养带毒的虫子。通过带毒昆虫反复感染实验，他们观察到，病毒外壳蛋白与RBRL结合使后者被激活，随即标记并降解抑制抗病毒反应的蛋白NINJA3。

“RBRL就是‘开关’，病毒一来，立刻拉响警报。”李毅用长城烽火台打比方，“狼烟一起，抗病毒大军全面动员。”

为验证这一机制，李毅等人又用带毒昆虫感染了上万株水稻。“昆虫传毒必须‘保真’——带毒率超90%，感染成功率85%以上，数据才可靠。”李毅说。

实验历时十余年，其间两次遭遇重大方向调整。团队最初以为RBRL是“病毒杀手”，会直接降解病毒蛋白，结果发现它根本不解病毒外壳蛋白。随后研究转向一种茉莉酸信号通路抑制因子JAZ蛋白，他们推测RBRL通过识别JAZ蛋白启动抗病毒，然而JAZ蛋白也不是正确答案。

两次“推翻—重来”后，团队最终发现，RBRL标记的是可以抑制病毒反应的另一

种茉莉酸信号通路抑制因子NIN-

JA3。“科研就是不断试错，光验证这一发现就用了3年。”李毅说。

2019年，团队用转基因技术提高水稻中RBRL的表达量。结果显示，改造后的植株对条纹叶枯病毒、矮缩病毒和黑条矮缩病毒的抗性显著增强。“传统品种最多抗两种病毒，而它能同时抵御3种，这就是广谱抗病的希望。”李毅说。

开启新课题

目前，李毅正在尝试将论文中的研究成果推广到农田。“我们正在自然界寻找RBRL高表达或NINJA3低表达的作物。”李毅说，“如果能找到天然高表达RBRL或低表达NINJA3的作物，育种家就可以利用抗病性优异的自然变异位点进行水稻改良育种，培育广谱抗病毒的良种。”

李毅表示，RBRL基因的应用前景并不止于水稻。“RBRL基因和NINJA3基因同样存在于玉米和小麦中，未来有望推广到这些主粮作物上。”他强调，广谱抗病品种能够有效减少对农药的依赖，“水稻会更安全，产量也会更稳定”。这既有助于保障粮食安全，也对环境保护具有深远意义。

《自然》审稿人评价称，该研究通过系统性探索阐明了一个全新的病毒蛋白感知级联通路，其核心创新点在于首次发现RBRL对病毒外壳蛋白的特异性识别，并成功构建了独特的信号转导级联模型。

对李毅来说，还有很多问题没有找到答案，例如，为何病毒对传毒昆虫几乎无害，对植物却是致命的。目前，该团队已开启新课题——怎样阻断昆虫传毒。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1038/s41586-025-018706-8>

人类智能的进化史，本质上是一部“试错文明史”。从石器时代的工具打磨到现代科技的精密设计，每一次认知跃迁都源于对未知的探索与修正。具身智能作为人工智能的下一代范式，其核心在于“具身性”——通过物理“身体”与环境的交互，在试错中积累经验、提升认知，最终实现智能涌现。

2025年政府工作报告首次将具身智能列为国家未来产业培育重点，其战略意义不仅在于技术突破，更在于构建一种“试错—认知—进化”的闭环逻辑，为智能体赋予适应物理世界复杂性的能力。

然而，正如生物智能体的试错需要长期不断探索、量变引起质变一样，具身智能的“试错—认知—进化”也面临着“达尔文进化困境”。

物理试错的“达尔文进化困境”

自然界中，猎豹为提升捕猎成功率需经历数百次失败的追击，人类婴儿学会行走平均要跌倒2000次。对具身智能而言，这种在物理环境中试错的成本太高。

首先，硬件损耗与安全风险突出。机械臂碰撞、机器人跌落等意外可能造成精密传感器、驱动单元损坏，单次维修成本可达数万元，工业场景中更可能引发生产事故。

其次，环境复杂性导致试错效率低下。物理世界存在光照变化、动态障碍物等不可控变量，智能体需应对无限长尾场景，远超算法预设边界，如自动驾驶路测百万公里仍难覆盖极端天气。

最后，知识迁移存在“仿真鸿沟”。虚拟训练依赖理想化建模，与真实物理参数（摩擦系数、材料形变等）的细微偏差可能导致技能迁移失败，如家庭服务机器人常因地面材质差异导致避障失败。

此外，伦理与法律风险不容忽视。在医疗、公共安全等场景中试错可能威胁人身安全，易引发责任归属争议。

硬件的高昂损耗与场景的不可逆性，共同构成具身智能物理试错的核心限制。然而，试错又是认知提升的必经之路。正如生物学中“自然选择”通过大量试错筛选最优解，具身智能的发展也需经历类似的迭代过程，只是需要寻找破解物理试错困境之道。

生成式人工智能：突破试错的时空限制

近年来，以生成式人工智能作为试错“场景加速器”的研究已成为热点之一。科技部“新一代人工智能”重大项目已将生成式人工智能列为具身智能核心支撑技术。

本质上，生成式人工智能通过创造高保真、高覆盖、高风险的虚拟场景，融合自主评估与智能试错机制，可有效突破物理试错的时空与成本局限。例如，利用扩散模型合成现实罕见的极端工况，消除传统仿真无法覆盖的“认知盲区”；通过神经辐射场(NeRF)技术构建可微分物理环境，使虚拟试错能反向优化世界模型参数；基于GAN网络可在稀疏数据场景下合成高密度训练样本，支撑强化学习算法的快速收敛，等等。特别是通过生成对抗网络与强化学习的结合，人工智能系统可主动探索人类预设规则之外的潜在场景，发现传统方法难以捕捉的系统性风险。

不过，生成式人工智能虽能创造海量虚拟试错场景，但若缺乏对物理规律的深层理解，这些场景可能沦为无序的“数字游乐场”。

世界模型的价值正在于此——它为生成式人工智能的虚拟创造提供认知框架，将随机生成的场景转化为可解释、可迁移的“认知燃料”。

世界模型：试错的“认知罗盘”

以“世界模型”为认知框架的系统工程，有望打破试错于“无序探索”的困境。世界模型基于人类对物理规律的抽象表征，为试错提供方向性约束与因果推理能力，进而将试错从“行为—结果”的简单表象关联，升级为“变量—机制—现象”的因果推演。正如人类依靠大脑额叶预判行为后果，具身智能可通过世界模型预测动作链的影响。

试错机制与“世界模型”的协同演进，本质上是智能系统从“被动响应”向“主动认知”的范式转变。传统智能系统依赖预设规则或大数据训练，仅能被动响应已知场景。而具身智能通过试错主动探索环境边界，世界模型则将这些经验抽象为物理规律与因果关系的知识图谱，形成“预测—验证—校正”的认知闭环。

例如，自动驾驶系统在虚拟试错中遭遇人工智能生成的极端暴雨场景，世界模型不仅预测轮胎打滑概率，更反向推算路面摩擦系数与制动策略的关联，生成新的安全驾驶规则。这种协同突破了“数据喂养”的被动逻辑；试错机制负责在虚拟场景中主动暴露认知盲区，世界模型则通过物理引擎与神经符号推理，将离散经验升华为可泛化的因果逻辑链，进而推动现有智能系统摆脱“刺激—反应”的被动链条，转向以世界模型为基底的“假设—验证”主动认知范式。

试错驱动认知跃迁：重构智能进化新范式

试错机制与生成式人工智能、世界模型的协同，标志着智能系统从“被动触发”到“主动认知”的范式跃迁。这种协同机制，本质上是对生物进化逻辑的数字化重构：生成式人工智能如同“基因突变”的加速器，不断拓展试错边界；世界模型则扮演“自然选择”的裁判角色，基于物理规律对试错结果进行因果评估与知识提炼。唯有二者耦合，虚拟试错才能超越单纯的数据堆砌，进化出指导现实行动的认知体系。

可喜的是，我国正以国家战略牵引这场认知革命：将具身智能作为认知革命的核心抓手，构建起以国家重大专项为引领、区域创新平台为支撑、产学研深度融合的新质生产力培育体系。

安徽大学具身智能研究院的成立正是对这一战略图景的落实举措。该院依托光电信息获取与防护技术国家重点实验室、自主无人系统技术教育部工程研究中心、安徽省无人系统与智能技术工程研究中心等，联合江淮前沿技术协同创新中心、科大讯飞、中科星驰等行业领军企事业单位，打造思维“立交桥模式”，有机组织各方力量，协同推进教育、科技、人才一体化合作，形成“锚定国家战略方向、突破高校平台瓶颈、加速产业协同创新”的产学研合作新模式。我们期待这种“立交桥式”产学研合作新模式，能为具身智能认知进化、技术转化应用、区域产业高质量发展贡献科技与人才力量。

（作者系安徽大学校长、中国人工智能学会自主无人系统专委会主任，本报记者赵广立整理）

具身智能如何进化？关键在于如何「试错」

■孙长根

发现·进展

中国科学院合肥物质科学研究院

开发出空气中自组装乳液气溶胶体系

本报讯(记者王敏)近日,中国科学院合肥物质科学研究院的研究人员与美国加州大学河滨分校教授殷亚东合作,构建出新型瞬态乳液气溶胶体系,实现了不对称结构自组装。相关研究成果发表于《先进材料》。

在乳液体系中引入不对称性,有望显著增强结构复杂性,乃至构建出具有突破性能的新型超结构。研究团队创新性提出将两相液体雾化后交汇融合,成功构建出全新的瞬态乳液气溶胶体系。

该体系具有三大突出优势——无表面活性剂,利用两相界面动态扩散特性,实现界面张力自然趋近于零,完全避免了传统乳化剂的污染问题,保障功能单元的“本征性能”;空气中自组装,气溶胶环境中实现了快速、清洁的合成过程,易于规模化;尺寸与形貌可调,通过调控雾滴尺寸、浓度等参数,可设计超结构的几何特征与物理化学性质等。

基于该体系,以嵌套的瞬态乳液液滴为模板进行限域自组装,可以制备出传统球形乳液无法实现的各向异性超结构。

研究团队进一步深入揭示了该体系的自组装机理。水相因密度差异沉降于正丁醇液滴底部,形成动态不对称界面;随后,纳米粒子在快速扩散的两相界面处自发富集,通过溶剂的不对称输运引发类似金属扩散中的“柯肯达尔效应”,导致超结构内部发生选择性空腔化;最终,形成不对称球形、中空或多级的复杂超结构。

基于这项技术,研究团队成功制备出放大倍数可调的二氧化硅微透镜超结构。这种新型微透镜可显著提升光通量数值孔径,有望突破传统光学显微镜的分辨率极限;且独特的可移除特性,使其在珍贵生物样本观测等特殊场景中展现出优势。

此外,该瞬态乳液气溶胶展现出的连续自组装能力,可直接在基底表面构建富含复杂微米级凹凸结构的涂层。这些涂层展现出优异的光扩散性能——低雾度、高亮度,在微型发光二极管显示、光学器件等多领域具有应用价值。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1002/adma.202420269>



蜜蜂在石楠花中采蜜。于咏晴/摄

气味一言“楠”尽,石楠花功能可不少

本报讯 每年4至5月是石楠花的盛花期。连日来,湖南长沙街头巷尾开满石楠花,但其“鱼腥味和杏仁味”的混合气味让市民直呼一言“楠”尽。石楠花气味难闻还多次登上热搜。

石楠花虽“臭”,但功能可不少。湖南农业大学园艺学院观赏园艺系教授于晓英告诉《中国科学报》记者,石楠是野外生存“达人”,喜阳但也耐寒,喜湿润也耐

干旱,种植土壤宜微酸;花期一般为15至20天;不用喷施农药,环健康;根系发达,能固土护坡,尤其适合在长沙等南方多雨地区种植。

石楠浑身都是宝,树皮中含有丰富的鞣酸,是制造皮革的好原料;果实富含油脂,榨油后可用于各类工业合成;石楠花富含维生素、矿物质,也有一定的药用价值。(王昊昊 覃茜)

阅读：通往未来的桥梁

■胡翌霖

4月23日为世界读书日,今年的主题是“阅读:通往未来的桥梁”。

仔细想来,这个说法似乎有些奇怪,因为未来总会到来,无论我们做什么,时间总会流逝,我们总会走向未来。相反,阅读是在在及“过去”,成为书籍的东西都是在过去产生并沉淀下来的。

或许这个比喻的重点是“桥梁”——我们总会进入未来,但究竟是从桥上昂首挺胸,闲庭信步地迈向未来,还是被时代的巨浪裹挟着稀里糊涂地冲向未来,还是在时间长河中历经沉浮最后筋疲力尽地游向未来,这是不同的结局。

在这个时代,越来越多的人对未来的到来感到茫然失措,我们感觉到时代不断加速更迭,但越来越难以把握自己的命运,只能随波逐流。

人工智能(AI)的发展加剧了这种无力感,甚至有极端者开始怀疑人类“没有未来”。AI领军者OpenAI曾在官网上发布一篇论文,渲染人类的危机:“超级智能的巨大力量也可能变得非常危险,导致人类失去权力乃至灭绝。”该文甚至说人类灭绝的危机可能在10年内到来。当然,OpenAI宣称可以通过对齐主义的工作化解人类灭绝的危机,但讽刺的是,他们连自己的董事会都“对不齐”,上演了各种“宫斗”戏码。

乐观的加速主义者相信未来是美好的,但他们同样认为人类做不了什么事情,只需要放任技术的发展就行。乐观者和悲观者在人类的无力感方面达成一致,都认为人类什么也做不了,只能随波逐流,区别

只是一方认为人类最终被巨浪抛入的地方是乐园,另一方认为终点是地狱。

“桥梁”被冲毁了,我们直接置身于时代的洪流之中,失去了和过去与未来的联结感,失去了走走停停的闲适感,失去了一步一个脚印的踏实感。

在这个意义上,阅读,特别是阅读历史、阅读过去的经典,并不一定是为了让我们加速冲向未来,反而是为了能够因步漫游乃至驻足片刻,确认我们所处的位置,并重新瞄准我们的方向。

当代诸多科学进步都是重审历史的结果,例如数学家重新审查欧几里得的公理体系,发展出非欧几何;重新审视柏拉图的理念论和亚里士多德的逻辑学,发起了数学基础之争。物理学家重新审视牛顿的绝对空间,回到伽利略的相对性原理,然后爱因斯坦又通过阅读法拉第的场论,重新诠释物质和力,用光速不变原理重新审查麦克斯韦方程。

维纳那人也受益于广博的阅读。他7岁就熟读达尔文和柏拉图的作品,后来阅读了大量哲学和社会科学读物,研究领域涵盖科学哲学、生物学和生理学。维纳不仅提出了引领AI发展的控制论思想,也对自动机器未来对人类社会可能带来的冲击有所预见。他在1950年就预见到了自动化带来的失业危机并提出了深刻见解,今天仍值得我们阅读。

对于普通科研工作而言,麦克斯韦的工作是法拉第的升级版,甚至麦克斯韦的文献也不必看,只需要牢记麦克斯韦方程组就够了。但是对爱因斯坦来说,他在法拉第身上找到了更多共鸣,对麦克斯韦方程的意义也作出了新的阐发。更不用说在爱因斯坦之前,马赫、庞加莱等科学家已经在物理学思想史中建立了桥梁。

AI的历史也是某种对经典的回归。AI曾经在符号主义的逻辑和语义学的道路上迷失了方向,陷入瓶颈而难以推进。于是开始有人回归20世纪50年代的控制论思想,在诺伯特·维纳那里我们就已经看到了“机器学习”的概念,看到了把进化论结合进机器训练的思想,看到了“神经网络”的类比。于是,当命题逻辑的方向陷入困局时,像维纳那样拥抱不确定性的进化论模式取得了突破。

维纳那人也受益于广博的阅读。他7岁就熟读达尔文和柏拉图的作品,后来阅读了大量哲学和社会科学读物,研究领域涵盖科学哲学、生物学和生理学。维纳不仅提出了引领AI发展的控制论思想,也对自动机器未来对人类社会可能带来的冲击有所预见。他在1950年就预见到了自动化带来的失业危机并提出了深刻见解,今天仍值得我们阅读。