



主办：中国科学院 中国工程院 国家自然科学基金委员会 中国科学技术协会

总第 8735 期 2025 年 4 月 22 日 星期二 今日 4 版

新浪微博 <http://weibo.com/kexuebao>

科学网 www.sciencenet.cn

最完整植物单细胞图谱 解开叶片衰老“密码”

■本报记者 刁雯蕙



植物的生命时钟。 华大生命科学研究院供图

植物的衰老往往伴随着新生。在衰老过程中，叶片并非简单地枯萎掉落，而是悄悄进行一场资源大转移，将积累的碳、氮等营养物质分解，转运到花朵、果实甚至根部，“牺牲”自己，换来果实的茁壮成长。

在叶片衰老过程中，植物细胞如何进行时空协调？哪些关键基因参与了调控？一项近日发表于《细胞》的研究为这些问题提供了答案。来自武汉大学生命科学院、华大生命科学院基因组多维解析技术国家重点实验室、南方科技大学等单位的研究人员，利用单细胞组学技术和时空组学技术，构建了迄今植物取样阶段最全、数据量最大的单细胞图谱，揭示了叶片衰老的关键分子机制。

中国科学院院士朱玉贤评价说，该研究不仅在基础理论上深化了人们对植物衰老机制的理解，更为从模式植物向农作物的转化搭建了桥梁，其产生的数据和发现有望在未来的作物遗传改良中发挥重要作用。

破解叶片衰老的“分子密码”

叶片衰老直接影响植物的产量和养分利用效率。在农作物中，适当延缓叶片衰老一般有助于提高产量，但过度延迟可能导致养分无法有效转运至籽粒，影响最终产量。因此，如何精准调控衰老进程，在产量与品质间取得平衡，一直是育种学的一大难题。

为了揭示叶片的衰老过程，研究团队基于华大自主研发的单细胞组学技术 DNBelab C4 和时空组学技术 Stereo-seq，获得了覆盖拟南芥各组织全生命周期关键阶段共计 20 个组织样本的 913769 个高质量单细胞核转录组，构建了迄今植物取样阶段最全、数据量最大的单细胞图谱，并鉴定出 38 种细胞类型。

“基于这一图谱，我们解析了衰老过程中的关键细胞类型和基因的动态变化，对植物叶片的衰老状态进行了精准量化。”论文第一作者、武汉大学生命科学院植物多维组学与农业应用专项科学家郭兴介绍。

他们筛选出 1856 个核心衰老相关基因和 1875 个年轻相关基因，创新性提出“衰老指数”（SAG-index）和“年轻指数”（YAG-index），通过分析不同阶段叶片中的基因转录表达量差异，评估每个细胞的衰老程度，实现了在单细胞分辨率下对叶片衰老状态的定量评估。

研究团队发现，即使肉眼看似仍为绿色的叶片中，也有一部分细胞显示出较高的衰老指数，暗示叶片的衰老进程可能早已悄然启动。

基于衰老指数和年轻指数，研究团队构建了叶片发育的共表达基因调控网络，筛选出若干关键节点基因，这些基因可能在衰老过程中发挥了重要作用。这一创新性工具不仅为深入解析植物衰老的分子机制提供了有力支撑，还为监测和调控植物衰老进程开辟了新途径。

“该研究所鉴定的许多关键基因为我们提供了潜在的分子靶标。这些基因中有些可能在水稻、小麦等作物中同样发挥重要作用，未来若通

过分子育种手段加以调控，有望培育出叶片衰老节律优化、养分再分配效率更高的作物新品种。”朱玉贤评价道。

高效运行的营养物质“运输网”

碳和氮是植物的重要养分，主要储存在叶片、茎干、根系等组织中。那么，叶片衰老过程中，碳、氮这些营养物质到底是如何输送和分配的？

科研团队发现，叶片衰老过程中，营养物质的转移涉及一个复杂的碳氮“运输系统”。他们发现一些关键的基因充当了“搬运工”，比如糖转运蛋白 SWEET、SUC/STP 家族中的基因负责将糖从叶片输送到花朵和果荚，或者参与糖的回收；氨基酸转运蛋白 UmamiT、AAP 家族基因则负责将氨基酸从叶片输送到其他部位，或其回收回到叶片中。

有趣的是，植物其他器官中，也表现出类似的碳氮分配机制。研究团队发现，在根、茎、花和果荚等器官中，特定的碳和氮转运蛋白组合在营养物质输送、回收和再分配中起着重要作用。这些研究结果揭示了植物在叶片衰老过程中如何高效转运碳、氮营养，为理解植物营养分配机制奠定了重要的分子基础。

“该研究不仅绘制了首个拟南芥单细胞全图谱，还将植物叶片衰老研究提升到了单细胞精度。未来，随着更多植物单细胞图谱的构建和多组学数据的融合，有望对植物叶片衰老形成更加系统、精确的理解，并为作物育种和栽培管理提供理论支持。”中国科学院分子植物科学卓越创新中心研究员王佳伟说。

“该研究不仅增进了我们对植物营养分配策略的理解，也为优化作物养分利用效率、推动绿色农业发展提供了重要理论依据，从单细胞层面系统解析了植物发育与环境适应机制，为植物科学领域带来了新的研究范式和应用前景。”郭兴表示。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1016/j.cell.2025.03.024>

哪怕自己垫钱，他们也要做好产业化

■本报记者 温才妃

春天的贵州，微风不燥。烟叶地里，农民起垄，覆膜春耕忙。

技术员小叶拿来一批新地膜，兴致勃勃地向大家推广、介绍。去年他亲眼见证了这款地膜的神奇之处。“使用这款地膜，不需要人力或机械回收，到了第六个月它会自动消失在土壤中，没有任何污染。”

“真有这么神奇吗？我不信。”人群中有人起哄道。

“真的有，这可是中国科学院长春应用化学研究所（以下简称长春应化所）研制的产品，大家要相信科学。”小叶爽朗地回答道。

这款由中国科学院院士陈学思团队研发的可降解地膜，不仅“可消失”，而且“寿命可调”。例如，叶菜等短周期植物的可降解地膜寿命是 2 个月，土豆等长周期植物的可降解地膜寿命是 4 个月。

日前，新款地膜产品依托的高性能聚乳酸产业化关键技术获中国科学院杰出科技成就奖。

做“中国人自己的聚乳酸生产线”

说到可降解，绕不开本世纪初全球瞩目的“明星”环保材料——聚乳酸。它取材于玉米、木薯、纤维素等材料，将其埋入土里或植入人体内，经过几个月到几年时间，便会降解为小分子，最终成为水和二氧化碳。而且，其生产过程中排放的二氧化碳量仅为传统塑料的一半甚至更低，对环境、人体影响甚小。

这样的环保材料吸引了陈学思的目光。当他刚结束美国宾夕法尼亚大学医学院生物化学和生物物理专业博士后研究归来，与浙江海正集团董事长白骥一拍即合，立志要做“中国人自己的聚乳酸生产线”。

白骥此前找过不少大学、研究机构，可几乎每次都无功而返。因为聚乳酸的单体丙交酯当时在中国没有人能做出来，更不用说下一步的聚合了。

最后这一难题被陈学思团队拿下。经过 3 年攻关，他们提出了有工业化前景的技术总体方案，将丙交酯的产量由几克稳定在几百克，使中国在生物可降解塑料领域迈出关键一步。“当时丙交酯 1 公斤市场售价为 1 万元左右，我们将价格打了下来，如今 1 公斤仅售 15 元左右。”陈学思回忆道。

虽然聚乳酸在科研界大热，但实验室获得的成功却没有马上换来国内市场的认可。



聚乳酸生产车间。 长春应化所供图

上世纪初，团队成员边新超扛着一麻袋原料到浙江一家知名文具厂，当场制作了一把聚乳酸尺子。老板夸了一句“东西真好”，就再无下文。

陈学思并没有放弃从最开始就坚持的产业化路线。这与他的父亲陈文启的科研理念不无关系。陈文启也是长春应化所的研究员。“父亲做科研一直瞄准的是产业化，曾主导尼龙-11 的研发。他动手能力很强，很多别人做不出的实验，他都能做出来。”受到父亲的熏陶，陈学思认为“科研的一个重要价值在于走入百姓家”。

陈学思把目光对准了 30 吨中试生产线。2003 年，边新超领命前往浙江省台州市。当时他是刚工作 3 年的小年轻，带着一个 8 人小团队。4 年后，长春应化所与企业建成了 5000 吨/年产能的示范线。这是国内第一条聚乳酸示范线，也是全球第二条聚乳酸生产线。

2015 年，陈学思团队将这条生产线扩产至 1.5 万吨/年，帮助企业首次在国内实现了万吨级聚乳酸稳定生产。至此，美国、中国、欧洲在全球聚乳酸行业形成了三足鼎立的态势。

基础科研与产业化路线齐头并进

一粒粒状如莹白米粒的聚乳酸，并非天然完美。

最开始，用聚乳酸制作的 T 恤腋下总是最先破口，用聚乳酸制作的文具放置时间一久便容易破碎，用聚乳酸制作的婴儿奶瓶最开始连一次蒸汽消毒都扛不过去……望着一堆堆失败的产品，团队成员也曾陷入困顿。

“我们以产业需求为导向，提前做好基础研究，不为发论文做科研，而是为了让产品能够上货架，坚持基础科研与产业化路线齐头并进。”

陈学思说，“首先你要有创新思想，解决技术难点，让产品的技术含量达到国际领先。”

面对聚乳酸的“不完美”，陈学思鼓励团队成员大胆想象，努力发掘聚乳酸的“潜能”。团队总结聚乳酸的三大不完美之处，分别为耐热差、韧性差、货架期短。为此，团队开发了成核剂、增韧剂体系，完美解决了前两大不完美。而货架期短，让团队犯了难。如何在可降解与长货架期之间保持适度的平衡成为考验团队智慧的难题。

“通过设计特定结构的抗水解剂，我们可以控制聚乳酸的水解速率，进而调控聚乳酸使用寿命，且不破坏聚乳酸的可降解性。”团队成员、长春应化所研究员刘焱龙介绍。汽车后视镜等塑料配件的使用周期一般是 15 年，聚乳酸原本达不到这么长的寿命，但他们将这一不可能完成的任务变为现实，极大减少了汽车报废后的污染，废弃产物可以分解为水和二氧化碳等对环境无害的小分子物质。

为了聚乳酸顺利研发、生产，陈学思的父亲“老陈老师”一直工作到住院的前一刻。“有一次，我和‘老陈老师’因工作上的事吵到互不理睬，可没想到第二天他就笑盈盈地拿着西瓜来找我。”团队成员、长春应化所研究员庞焱回忆道。

2020 年，“老陈老师”因病去世。清明节前，大家来到“老陈老师”墓前，一坐就是大半天，陪老爷子“唠唠”项目进展，仿佛他从未离开。

拒绝“哪个热门做哪个”

聚乳酸单价曾一度从每吨 1.8 万元飙升至 4 万元。那时，找陈学思团队要材料的厂商络绎不绝。旁人笑道，“不用干别的，光倒腾原材料就可以实现财富自由”。

但“躺平”从来不是陈学思团队追求。更何况，聚乳酸发展经历的起伏，远不止人们看到的那么简单。欧洲推广可降解材料代替传统塑料的步伐缓了下来，美国也从纸吸管又退回塑料吸管时代，而国内全面推广限塑令的时代还未到来。就连边新超在台州市的示范生产线，也被人挪掉过“快倒闭了吧”。（下转第 2 版）



4 月 20 日，以金龙鱼为原型的智能仿生观赏鱼“金鳞”在上海海洋大学正式亮相。

据介绍，“金鳞”深度融合了人工肌肉驱动、人工智能算法等核心技术，能够高度逼真地模拟真实金龙鱼的游动姿态和行为习性。精准姿态控制系统让“金鳞”在水中游动时，尾鳍的摆动频率、身体的弯曲弧度都与真实的金龙鱼如出一辙，达到了“以假乱真”的视觉效果。在水族馆、主题公园等场所，“金鳞”不仅具备观赏性，还能为游客带来新奇的互动体验。未来，游客可以通过遥控器与“金鳞”互动，控制仿生鱼群的游动。

此外，“金鳞”所积累的先进技术，具备广阔的应用前景，不仅可以应用于水族馆等场所，还能迁移至水产养殖、环境监测等领域。

图为在水中游动的“金鳞”。

本报见习记者江庆龄报道
上海海洋大学供图



最精准太空时钟发射



本报 4 月 21 日，最精准的太空时钟在美国佛罗里达州肯尼迪航天中心搭乘美国太空探索技术公司的“猎鹰 9”号火箭发射升空，将利用地球上最好的时钟建立一个高度同步网络。然而，这个准备了数十年的项目只能运行几年，将随国际空间站在几年后迎来“终结”。

太空原子钟组合（ACES）是欧洲航天局（ESA）的一项任务，它将产生具有前所未有的精度的时间信号。当它以每小时 2.7 万公里的速度经过 9 个地面站时，可通过激光将信号传输至地面。这个时钟网络将非常紧密地同步，并在全全球范围内提供高精度的计时。

ACES 将以极高的精度测试爱因斯坦的广

义相对论。该理论认为时间的流逝受引力强度影响。ACES 还将协助研究暗物质、弦理论等。

ACES 一旦到达国际空间站，加拿大航天局的机械臂——加拿大 2 号将把它连接到 ESA 哥伦布实验室的外部，在那里它将留在太空的真空中。

该设备包含两个时钟，一个名为 SHM，具有短期稳定的能力，将帮助校准另一个名为 PHARAO 的时钟。一旦结合，这两个时钟将非常精确，在 3 亿年内误差不到一秒——比 GPS 卫星上的时钟精确 10 倍。

PHARAO 主要基于位于法国巴黎的一个占满整个房间的原子钟。但将其小型化，使其体积小于 1 立方米，并经受住火箭发射和太空生活的严酷考验，并不容易。

为产生精确的时钟信号，PHARAO 喷出接近绝对零度的铯原子喷泉，后者与微波场相互作用。在地球上，这需要一个高达 3 米的设备，但在

微重力环境中，这些原子可以形成一个移动较慢且较小的喷泉，从而使装置大幅缩小。

ESA 的 Simon Weiberg 表示，该设备极其敏感，以至于在它附近放一把茶匙产生的电磁场就足以破坏时钟精度。“而我们试图测量的精度优于千万亿分之一秒。”Weiberg 说，“所以，这绝对是项极具挑战性的工作。”

ACES 的概念可以追溯到 20 世纪 90 年代，最初计划在 2011 年退役的航天飞机上发射。一旦它进入太空，第一个信号要一年半的时间才能返回地面时钟——设备调试需要大约 6 个月，然后需要一年的测量以隔离噪声并将其从时钟信号中去除。

之后，ACES 将运行到 2030 年，届时国际空间站将撞入地球大气层并烧毁。那时，被称为光学钟的新型超精确计时设备可能会淘汰地球上使用的原子钟，尽管光学钟可能还不够小或不够坚固，无法在太空中使用。（文乐乐）

23.8%！柔性钙钛矿电池效率刷新纪录

本报（记者张楠）日前，中国科学院宁波材料技术与工程研究所与合作者成功制备出 1 平方厘米认证效率为 23.8% 的柔性钙钛矿/铜铟镓硒（CIGS）叠层太阳能电池。电池在连续工作 320 小时后，仍能保持 90% 以上初始性能。相关研究成果近日发表于《自然-能源》。

柔性钙钛矿/CIGS 叠层太阳能电池因兼具钙钛矿优异的光电性能和 CIGS 出色的机械柔韧性，在轻质柔性光伏领域展现出广阔的应用前景，成为低空飞行器、近地轨道卫星等对重量敏感的应用场景的重要技术选择之一。

然而，开发适用于粗糙表面的钙钛矿顶电池均生长技术，是实现高效、稳定柔性钙钛矿/CIGS 叠层电池亟待解决的核心难题。研究团队在前期钙钛矿/叠层太阳能电池研究的基础上，开发了一种反溶剂种子层策略，解耦 SAMs 吸附与溶解过程，并同步整合钙钛矿晶种诱导生长。在溶解过程中，高极性溶剂可抑制 SAMs 中团聚；在吸附过程中，低极性反溶剂可引入 SAMs 吸附层提供良好的热力学环境。通过引入预混晶种，研究人员提升了钙钛矿的润湿性、结晶质量和界面黏附力。



柔性钙钛矿/CIGS 叠层太阳能电池示意图。 受访者供图

研究团队最终制备了 1 平方厘米认证效率为 23.8% 的柔性钙钛矿/CIGS 叠层太阳能电池，是目前 1 平方厘米柔性钙钛矿/CIGS 叠层太阳能电池效率的最高值，制备出的电池在连续工作 320 小时后仍保持 90% 以上初始性能，并可在 1 厘米弯曲半径下耐受 3000 次弯折循环。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1038/s41560-025-01760-6>