



植物细胞“命运逆转”齿轮这样重启

■本报记者 李晨 通讯员 王静

一片叶子似乎本应永远是叶子，却能“变身”为一棵新植株，这种“命运逆转”是如何发生的？20年前，《科学》在创刊125周年之际提出了125个最关键的科学问题，“单个体细胞如何发育成完整植株”位列第9。20年过去了，9月16日，《科学》在线发表了中国科学院对这一世纪之问的回答。

山东农业大学教授张宪省和苏英华研究团队首次以确凿证据证实植物细胞全能性源于单细胞，揭示了植物的单个体细胞如何通过基因重编程“改变命运”，最终发育为完整植株的全过程。该成果不仅破解了困扰科学界百余年的“植物细胞全能性”机制之谜，也为作物遗传改良与高效再生提供了全新的理论支撑。

“重启”生命程序的植物细胞

“相对动物细胞而言，植物细胞具有更强的发育可塑性。在一定条件下，它们无需受精就能发育成胚胎，这种现象称为‘体细胞胚胎发生’。”论文共同通讯作者张宪省告诉《中国科学报》，植物细胞有着独特的“再生”能力。例如，叶片等任意一种体细胞在经历重编程后，能回到原始的干细胞状态，并进一步进入“体细胞胚胎发生”阶段，最终再生为一棵完整的植株。

早在1902年，科学家就提出了“植物细胞全能性”的概念，用以解释植物细胞上述独特的能力。“植物细胞全能性”即植物细胞可逆分化形成类似受精卵的全能细胞，进而发育为完整植株。

这一现象广泛存在于植物界，如多肉叶片能萌发新株。在农业领域，植物细胞“再生”在快繁、生物技术育种、脱毒培养等方面具有极为重要的应用价值。

但一个多世纪过去了，植物体细胞经过重编程，从“普通细胞”转变为“全能干细胞”进而形成胚胎的核心秘密一直未能揭开。

张宪省从事植物干细胞和分生组织研究近30年。“单个体细胞如何发育成完整植株”一直是他渴望探究的问题。2005年，他看到这一世纪难题出现在《科学》提出的125个最关键的科学问题中，心中激动不已。这证明他关心的科学问题非常重要，是“能写进教科书的”研究”。这让他下定决心挑战这一科学难题。

论文共同通讯作者苏英华恰在那时成了张宪省的学生，并接过了长达20年科研马拉松的“第一棒”。多年后，苏英华才体会到当初她拿到的这个选题如此有趣而重要。

从偶然发现到完美体系

尽管细胞全能性在植物中很常见，但随便找一片叶子给它上“实验手段”，搞清楚究竟是什么细胞变成了胚胎，怎么变的，却非常困难。

苏英华解释说，自然界中具备全能性的植物，由于基因组太过复杂无法进行基因编辑和分子机制研究。而科研常用的模式植物拟南芥并不存在天然的“叶片变胚”现象。

“我们必须要在拟南芥中‘复刻’自然界的奇迹。”苏英华说，摆在他们面前的最大挑战是构建单个体细胞直接发育成胚胎的实验技术体系。仅是建立实验技术体系，他们就花了将近两年时间。

2009年，苏英华首次在拟南芥中发现大量生长素积累是细胞全能性激活的“开关”。相关成果随后发表于《植物杂志》。

“但当时建立的实验体系还不完美。”苏英华解释说，当时仍需通过愈伤组织间接诱导，无法实现细胞的“直接变身”。“就像伤口先结疤，再从疤痕里长出新组织，过程复杂且难以追踪。”

2011年，一次意外的发现修复了实验体系的“不完美”。

当时苏英华已成为副教授，她的硕士生唐雨菲发现，一种诱导因子能使幼苗叶片表面直接长出胚胎结构，这种体细胞胚竟然直接来源于叶片表面的单个细胞。

“这个体系太完美了！叶片细胞不会形成愈伤组织，直接‘鼓包’成胚，干净且清晰。”苏英华立刻告诉张宪省，两人意识到“解决问题的‘钥匙’找到了”。

为重现这一现象，苏英华带领学生“像重启实验”一样“经过反复验证，终于建立了“诱导单细胞起源的体细胞胚胎发生”稳定体系。“这个体系能让我们清晰追踪细胞的每一步变化。”苏英华说。

下一个难题是寻找全能干细胞的分子标记。经过反复验证试验，他们找到了只在全能干细胞中发光的荧光标记。

有了稳定的诱导体系和全能干细胞标记，团队终于打开了这项研究的大门。为追踪细胞“变身”全过程，他们采用了当时最前沿的技术：用荧光标记锁定目标细胞，再通过激光共聚焦显微镜连续拍摄三四天。

他们首次捕捉到单个植物细胞的分裂全过程：从1个细胞分裂为2个，再以“3个1组”的特殊模式逐步形成12个细胞的胚体，直观证实了植物细胞全能性的“单细胞起源”，有力回答了学术界长期存在的疑惑。

苏英华激动地说：“每一张图片、每一段视

频，都是世界上独一无二的证据。”

两把钥匙共同开一把锁

2015年，在中国科学院上海植物生理生态研究所的实验室里，科研团队耗时3年成功分离出具有全能性的单细胞。

2020年，他们又借助单细胞转录组测序技术，与华大基因合作，补充不同发育时期的细胞数据，绘制出完整的细胞命运转变路径——逆境信号触发染色质松散，从而激活全能性基因，生长素与关键基因协同作用，推动细胞完成命运重编程。

论文第一作者、山东农业大学副教授唐雨菲介绍，体细胞胚来源于单个全能干细胞——原本注定要发育成气孔的“前体细胞”。它在全能性调控因子LEC2与气孔发育关键因子SPCH的协同作用下，激活生长素合成通路，导致生长素特异性大量积累，使前体细胞脱离“气孔发育之路”，转而成为能够孕育新生命的全能干细胞，走上胚胎发育之路。

叶片气孔前体细胞特有的基因SPCH与人工诱导高表达的基因LEC2协同作用形成“分子开关”，“就像转动一把锁需要两把钥匙，缺一不可。”张宪省说。

目前，该体系将这一关键过渡状态命名为“GMC-auxin”中间态。在这一状态下，细胞发生了深度染色质重塑，大量沉默基因被逐步激活，细胞命运轨迹由此岔分，为全能性的建立打开了大门。

进一步实验表明，阻断细胞内源生长素合成会使这一重编程过程完全停滞，体细胞胚无法形成；而单纯添加外源激素也无法替代这一过程，说明只有细胞自主合成并积累的生长素信号，才能真正触发全能性的开启。

张宪省说，这一理论的解析不仅有助于理解植物细胞发育根本规律，也为精准调控植物再生和定向改良作物性状提供了全新思路与技术工具。

论文审稿人认为，该研究揭示的GMC-auxin细胞中间态是“令人兴奋的突破”，首次定义了气孔前体细胞向全能干细胞转变的分子路径，原创性强、意义重大，为理解植物细胞发育命运改变和再生潜能提供了强有力的科学支撑。

目前，该体系在小麦、玉米和大豆等作物中的实验正同步推进。“未来或可通过精准调控细胞全能性，实现作物优良品种的‘快速克隆’，大幅度缩短育种周期，服务精准设计育种。”张宪省表示，“这也将为珍稀植物种质资源的高效保护、植物合成生物学注入新动力。”

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1016/j.cell.2025.08.031>

第五届世界生物圈保护区大会即将在杭州召开

本报讯(记者倪思洁)9月16日，记者从中国科学院、浙江省人民政府、教育部(中国联合国教科文组织全国委员会)、生态环境部、农业农村部、国家林草局联合举行的新闻发布会上获悉，第五届世界生物圈保护区大会将于9月22日至25日在浙江杭州举办。

这是首次在亚洲举办的世界生物圈保护区大会，也是联合国教科文组织成员国参与范围最广的一届大会，将有全球150多个国家和地区约4000名代表参会。

中国科学院副院长、党组成员何宏平表示，党的十八大以来，在习近平生态文明思想的指引下，我国生态文明建设取得了举世瞩目的成就。作为中国人生物圈国家委员会的主席单位，中国科学院联合相关部门，依托“中国生物圈保护区网络”，在濒危物种保护研究、生态系统和物种的科学监测、新技术集成应用以及科技战略咨询等方面，为生物多样性保护与可持续发展提供了强有力的科技支撑。

他强调，在“两山”理念提出20年之际，中国将以第五届世界生物圈保护区大会为契机，汇聚全球生态治理智慧，进一步深化国际科技合作，聚焦生物多样性保护与生态治理关键技术攻关，为国际社会提供更多普惠性成果及可复制、可推广的经验，为共建地球生命共同体作出更大贡献。

发布会上，其他部门代表从不同维度介绍了中国生物多样性保护与可持续发展实践。

在中国参与联合国教科文组织国际科学计划方面，中国联合国教科文组织全国委员会秘书长秦昌贵介绍，中国科学家牵头发起的“深时数字地球”等数十个科学计划成功入选联合国教科文组织有关行动计划。

在生物多样性保护方面，生态环境部自然生态保护司司长张玉军介绍，中国积极推动“昆明-蒙特利尔全球生物多样性框架”任务的落实，加强科技支撑体系建设，持续深化生物多样性保护工作。

在水生生物资源保护与可持续利用方面，农业农村部渔业渔政管理局局长肖放介绍，农业农村部开展调查监测评估，建设管理水产种质资源保护区，实施休渔禁渔制度等，推动实现生态保护、渔业发展和渔民增收的有机统一。

在自然保护地体系建设方面，国家林草局自然保护地管理司司长袁继明指出，中国着力建设自然保护地“天空地”一体化监测体系和生态网络感知系统，有力提升了保护建设管理效能。

在地方生态实践方面，浙江省林业局局长董旭斌介绍，作为本届大会的承办单位以及联合国教科文组织践行绿色办会理念的首批试点，浙江省已建立总面积约1.47万平方公里自然保护地体系，建成全国首个生态省。

据悉，大会将发布《联合国教科文组织人与生物圈计划及其世界生物圈保护区网络战略行动计划(2026—2035)》，制定未来十年发展蓝图，并将发布《杭州宣言》。

M87* 黑洞新图像 证实爱因斯坦广义相对论预言

本报讯(见习记者江庆龄)事件视界望远镜(EHT)合作组发布了M87星系中心超大质量黑洞(即M87*)的新图像，揭示了黑洞附近偏振辐射随时间的演化，并首次在EHT数据中发现了连接黑洞环状结构与喷流底部的延伸辐射的迹象，为人们理解黑洞周围极端环境下的物理过程提供了新视角。相关研究9月16日发表于《天文学与天体物理学》。

M87星系距地球约5500万光年，其中心黑洞质量是太阳的60亿倍以上。EHT是由全球射电望远镜联合组网的“地球般大小的望远镜”，2019年发布的首张黑洞照片拍摄于2017年，其偏振结果于2021年公布。值得一提的是，2021年的观测新增了两部望远镜，即美国亚利桑那基特峰望远镜和法国NOEMA阵列，显著提升了EHT的灵敏度和成像清晰度。由此，合作组首次成功约束了M87星系相对论喷流底部的辐射方向——这类喷流正以接近光速的速度远离黑洞。

研究发现，2017年至2021年间，M87星系中心超大质量黑洞的偏振方向发生翻转，2017

年磁场分布由里向外呈逆时针方向，2018年相对稳定，而到2021年则完全反转为顺时针方向。合作组分析推测，这种偏振方向的明显变化可能源于内部磁结构与外部效应的共同作用。偏振的演化反映出黑洞周围湍动不同的环境，而其中的磁场在物质落入黑洞方式以及黑洞向外释放能量机制方面发挥着关键作用。这一发现挑战了现有模型，也说明在事件视界附近还存在许多学界尚未理解的事情。

研究共同负责人、美国哈佛-史密斯森天体物理中心的Paul Tiede指出，M87星系中心超大质量黑洞环的大小在4年内保持一致，证实了爱因斯坦广义相对论预言的黑洞阴影，其偏振模式却发生了显著变化。这表明，事件视界附近磁化等离子体并非静止不变，而是时刻变化且极其复杂的，正在逼近现有理论模型的极限。

最新发现对解答宇宙极端现象的形成机制提供了至关重要的一块拼图。

相关论文信息：
<http://doi.org/10.1051/0004-6361/202555855>

科学家破解细菌信号“解码”新机制

本报讯(记者刁雯雯)中国科学院深圳先进技术研究院研究员金帆团队联合中国科学院成都文献情报中心副研究员杨帅团队，首次破解了细菌频率调制信号处理的物理密码。在三基因调控系统中，频率调制可比传统振幅调制提升约两个比特的信息熵，从而实现了对多基因系统的精确协调控制。该研究显著提升了人工生命系统的理性设计能力，为合成生物学开辟了全新的设计维度。9月15日，相关研究成果发表于《自然-物理学》。

研究团队采用合成生物学工程化手段，利用基因编辑技术在铜绿假单胞菌中重构了简化的细菌信号分子环磷酸腺苷(cAMP)信号传递通路，并利用光合成系统替代内源性cAMP合成机制，用组成型启动子替代天然的反饋调节系统，成功构建出可精确控制和定量监测的“频率解码cAMP电路”(FDCC)。

通过严格的时间尺度分析，研究团队发现FDCC天然呈现3个功能明确的模块：“波形转换器”负责将周期性光刺激转化为cAMP的锯齿波浓度变化；“阈值滤波器”借助分子间的协同结合，实现对不同频率信号

的选择性过滤；“积分器”则将动态频率信息转化为稳态的蛋白表达水平。该分层架构设计的精妙在于每一模块均在自己的“最佳工作频率”区间运行，三者协同运作实现了从频率到振幅的完美转换。

研究团队构建了从微观分子反应到宏观系统行为的多层次理论框架。数学分析发现，关键的无量纲参数如同“频率开关”，控制系统优先传递高频或低频信号。该理论预测与实验数据相关性达99.2%，这一精度在复杂生物系统研究中尤为难得。

研究发现，频率调制可极大提升细菌的信息处理能力。“这意味着通过频率调制，细菌的信息处理能力从‘单车道’变成‘多车道’，能够精确控制更多基因的表达，最终实现更复杂、精细的生物功能。”金帆表示。频率调制以更简洁的遗传结构，为合成生物学带来了更精准、复杂的调控新维度，将显著提升代谢工程中多通路协调优化与细胞治疗中响应性设计的能力。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1038/s41567-025-03030-4>

白垩纪时期兽脚类恐龙能跑多快?

本报讯(记者崔雪芹)近日，中国科学院古脊椎动物与古人类研究所研究员汪筱林团队和沈阳师范大学、内蒙古鄂尔多斯国家自然保护地(鄂托克恐龙遗迹化石国家自然保护地)管理局合作，发现并研究了白垩纪奔跑速度最快的兽脚类恐龙行迹，其速度可达45千米/小时，为深入了解中兽脚类恐龙的奔跑能力提供了最新实证。相关研究成果发表于《中国科学:地球科学》。

内蒙古鄂托克是全国唯一一个以保护恐龙足迹为主的国家级自然保护区。团队发现了一个新的足迹化石地点，识别出大型和中型两种类型足迹化石，共组成4条行迹和2个孤立足迹。

其中一条中型兽脚类恐龙行迹由5个连续足迹组成，单个足迹平均长为25.25厘米，复步长达5.3米，显示造迹者正处于高速奔跑状态。研究人员利用目前常用的两种方法，计算出其奔跑速度分别高达45千米/小时和41±4.9千米/小时。它刷新了全球范围内白垩纪时期兽脚类恐龙的最快速度纪录。

另外3条行迹和2个孤立足迹为大型兽脚类恐龙所留，单个足迹平均长44.92厘米，复步长为2.5米。造迹者处于正常行走步态，对应速度为6至8千米/小时。研究者近期对行迹

起始位置覆盖的表面泥土进行清理，已露足迹69个，行迹长度增加至81米。为目前国内兽脚类恐龙最长行迹纪录。

新发现的快速奔跑行迹与大型兽脚类恐龙行迹共存，研究者推测造迹者之所以会快速奔跑，一方面可能是为了捕猎食物，另一方面不排除躲避大型兽脚类恐龙的捕杀。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1007/s11430-025-1657-7>



足迹生态复原图。巴西国家博物馆毛里奥·奥利维拉绘

9月16日，在中国科技馆新馆开馆16周年之际，历时3年精心设计制作海洋展厅焕新亮相。全新改造的海洋展厅位于展馆四层B厅，划分为“源·敬畏”“近·认知”“融·感悟”“梦·归途”四大分区，展览面积约1000平方米，总计25件展品。

新的海洋展厅呈现几大特色：创新主题叙事的展览语言，以海洋科学研究为基础，融入多元化的海洋文化艺术，展品突出互动体验。图为公众参与展厅互动活动。

本报记者高雅丽报道 中国科技馆供图



由可再生能源供电的欧洲E级计算机上线



本报讯 当前，各国在人工智能(AI)领域的竞争相当激烈，欧洲稍显弱势。据《自然》报道，近期，欧洲超级计算机JUPITER的启用为推动欧洲相关领域发展注入了动力。它使欧洲研究人员不必依赖美国和其他国家的超级计算机。

JUPITER是E级(百亿亿次级)计算机，每秒运算量超过10¹⁶次，是目前全球第四快的计算机，其设计运行时间至少为6年，主要目标是推动AI、天气建模、天体物理学和生物医学领域

研究能力的提升。美国弗吉尼亚理工大学的Kirk Cameron表示，这一里程碑的实现对于欧洲来说是了不起的事，特别是在AI和大语言模型方面。

在欧盟委员会和德国的资助下，JUPITER于2018年开始建造，安装地点是德国于利希研究中心。于利希研究中心的JUPITER项目负责人Thomas Lippert表示，JUPITER于今年7月首次运行，当达到性能峰值时，其每秒运算量超过10¹⁶次。而一台普通笔记本电脑的运行速度为每秒10¹²次。

当JUPITER满负荷运行时，将耗费1兆瓦电力，相当于为1.1万个家庭提供的电量。对此，欧盟表示，JUPITER可以完全由可再生能源供电，减少了对环境的影响，在超级计算机能效方面排名第一。

据悉，研究人员每年最多可以申请使用JUPITER两次，目前已有30个申请项目被选定，包括AI应用的研究领域，如视频生成、气候模型建立、粒子物理学研究、能源应用、药物开发，以及与疾病控制相关的生物医学研究等。

欧洲中期天气预报中心的Peter Dueben说：“我们正在建立天气预报模型，这需要超级计算机支持。”JUPITER将使模型分辨率提高到公里级。“这对于欧洲‘目标地球’计划的实现尤为重要，我们希望建立数字孪生地球，从而更好地开展世界范围的气象研究。”

德国马克斯·普朗克天体物理研究所的Volker Springel希望利用JUPITER研究早期宇宙。他表示，JUPITER使欧洲科学家可以依靠自己的超级计算机开展项目，从而减少对其他国家的依赖。(徐锐)