

R探一线

单个体细胞如何发育成完整植株？这是植物生命科学领域一个悬而未决的世界难题。2005年，《科学》杂志在其创刊125周年时列出了125个最具挑战的关键科学问题，它就是其中之一。

近日，山东农业大学牵头联合团队，首次完整揭示了单个植物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。该成果在线发表于《细胞》杂志。

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”。论文通讯作者、山东农业大学教授张宪省介绍，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，能回归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。

1902年，科学家就提出了“植物细胞全能性”概念，用以解释植物细胞的上述能力。即植物细胞可分化形成类似受精卵的全能干细胞，进而发育为完整植株。这一现象广泛存在于植物界，包括农作物、木本植物，例如，多肉叶片能萌发出新株。但其背后的分子机制始终未解。

为揭开谜团，2005年起，张宪省率领的科研团队以拟南芥为研究对象开启探索。

“一片叶子能‘变身’为一株新植物，我们想知道这种‘命运逆转’是如何发生的。”论文通讯作者之一苏英华说。

20年来，团队先后构建了单个体细胞直接发育成胚胎的实验技术体系，以及诱导单细胞起源的“体细胞胚胎发生”稳定体系，并首次发现大量生长素的积累是激活细胞全能性的“开关”。借助先进的科研仪器和前沿生物技术，团队首次捕捉到单个植物细胞的分裂全过程。

进一步研究后，团队找到了触发细胞全能性的“关键钥匙”：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LEC2，二者协同作用形成“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。

两个关键基因如何“点亮”全能性？论文第一作者、山东农业大学副教授唐丽萍介绍，体细胞胚来源于单个的全能干细胞，原本注定要发育成气孔的“前体细胞”，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，致使前体细胞脱离“气孔发育之路”，转而成为能够孕育新生命的全能干细胞。

在上述发现基础上，团队完整记录细胞命运重塑的完整路径，揭示了关键的命运分岔点。

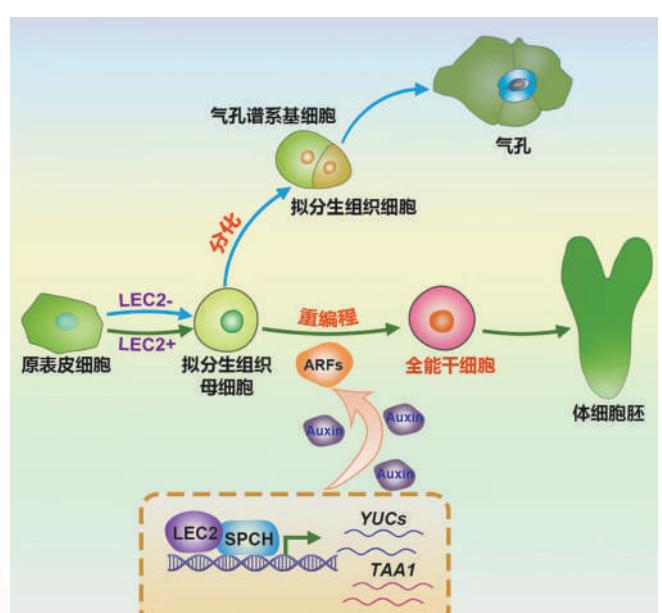
在从“普通细胞”转变为“全能干细胞”的关键过渡状态下，细胞发生了深度的染色质重塑，大量沉默的基因被逐步激活，细胞命运轨迹由此产生分岔，为全能性的建立打开了大门。

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

目前，该体系在小麦、玉米和大豆等作物上的实验正同步推进。“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。”

单个体细胞这样发育成完整植株

喻思南 王静



气孔前体细胞的两条发育路径的模式图。

山东农业大学供图

科学家揭示特定尺度下“推进力反转”现象

本报电（付春）近日，北京邮电大学丁阳教授团队在著名学术期刊《美国国家科学院院刊》发表研究成果，首次发现螺旋桨在特定尺度流体环境中出现的“推进力反转”现象，并对此进行了系统阐释。

研究发现，在毫米至亚毫米尺度下，顺时针旋转的螺旋桨不仅不会使微型潜艇向前推进，反而会使其向后运动。像是螺旋桨在吸着自己往后走，而不是推着向前。”丁阳介绍，物体在不同雷诺数环境下表现出截然不同的运动特性。普通尺度下，螺旋桨通过向后推水产生向前的推力；而毫米至亚毫米尺度下，螺旋桨旋转时，原本应该向后喷射的水流被偏折向四周，像一个小型离心水泵，把周围的液体往外甩开，反而在螺旋桨中心形成吸力，这种吸力把潜艇拉向反方向。

这一发现不仅挑战了人们对螺旋桨推进方式的传统认知，也对微型医疗机器人、管道检测设备等应用具有重要意义。“一些微型设备通常只有几毫米大小，传统螺旋桨推进装置可能失效，要研究如何调整参数，来抑制或利用这种离心吸力。”丁阳说。

本版责编：智春丽 管璇悦 陈世涵

版式设计：汪哲平

聚变能技术从科研向工程实践和应用迈进

“人造太阳”加速商业化意味着什么

李君强 蔡金曼 连 敏

R瞰前沿·大国重器

10月14日—18日，“世界聚变能资源集团”第2次部长级会议暨第30届聚变能国际大会在四川省成都市举行。会上，聚变能商业化成为热议的话题。

国家原子能机构主任单忠德表示，聚变能技术正在从科学研究向工程实践和商业应用的目标加速迈进。近年来，中国先后发布相关政策文件，将可控核聚变列为实现碳达峰碳中和目标、推进绿色低碳前沿技术攻关的重点方向，前瞻部署聚变能等未来能源科技创新和产业发展。

“人造太阳”如何从实验室走向产业界？全球范围内聚变能技术商业化的加速意味着什么？还面临哪些挑战？本期“瞰前沿”揭秘这一热点话题。

——编者

我国聚变科研装置加速向“产业枢纽”转型

近年来，我国聚变装置矩阵持续扩容，形成覆盖不同技术路线、衔接不同发展阶段的多元支撑格局，为工程化、产业化突破筑牢硬件基础。

仅今年以来，我国聚变科研装置就频频取得突破，加速从“实验工具”向“产业枢纽”转型。这既为工程化、商业化突破提供技术验证，更搭建起连接全球的开放合作平台。

新一代人造太阳“中国环流三号”（HL-3）国内首次实现原子核温度1.17亿摄氏度、电子温度1.6亿摄氏度，综合参数聚变三乘积实现大幅跃升，挺进燃烧实验。在实现“双亿度”等离子体运行基础上，日前，研究团队自主设计并建成了用于聚变能量导出研究的工程性液态金属和氦气工质热工研究台架，并已全面投入运行，为未来聚变堆的工程化应用奠定了关键实验基础。

中国聚变能源有限公司总经理、核工业西南物理研究院院长张立波表示，“2027年，我们期待能开启聚变能燃烧实验，2030年左右，具备中国首个工程实验堆的研发设计能力，2035年左右，建成中国首个工程实验堆，到2045年左右，能建成我国首个商用示范堆。”

尽管进展显著，聚变能商业化仍面临多重挑战。技术层面需突破等离子体稳态燃烧、耐强场高温负荷材料、超导磁体、氚燃料自持等难题；产业生态上，还需解决产业链成熟性、经济可承受性、投资可持续性、监管可适配性等问题。

构建支持聚变能工程化产业化发展的“生态体系”

为推动“人造太阳”的梦想加速照进现实，我国从政策引导、国际合作、机制创新等多个层面，构建起支持聚变能工程化产业化发展的“生态体系”。

2021年，《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》首次将可控核聚变列为“低碳前沿技术攻关”的重点领域。2022年，《“十四五”现代能源体系规划》提出，支持受控核聚变的前期研发，积极开展国际合作。2024年，《关于推动未来产业创新发展的实施意见》提出，要加强以核聚变为代表的未来能源关键核心技术攻关。2025年9月，原子弹法经全国人大常委会审议通过，明确规定：“国家鼓励和支持受控核聚变的科学研究和技术开发”。

多地出台相关配套政策。安徽合肥依托“东方超环”，打造聚变能源产业集群，吸引上下游企业入驻，形成百亿元级产业规模；四川聚变科创城致力建设“可控核聚变全球性技术创新高地、产业发展集群、对外交流中心”。

国际合作拓宽工程化全球视野。国家原子能机构秘书长黄平介绍，作为ITER计划的关键合作伙伴，我国高质量完成18个关键部件和系统的设计制造任务，2025年主导



的ITER核心安装段真空室模块组件成功吊装入位，磁体支撑系统、包层屏蔽模块等大型装备如期交付，为全球聚变堆工程化贡献中国经验。

同时，我国与50多个国家的140余家核聚变科研机构建立合作，发布聚变能领域首个ISO国际标准——《聚变堆热氦检漏技术》，推动技术标准“全球共用”。

机制创新激活产业化市场活力。2025年7月，中核集团在核工业西南物理研究院基础上牵头组建中国聚变能源有限公司，重点布局大科学实验、聚变堆材料研制等领域。技术研发联合体——可控核聚变创新联合体的成员单位扩充至38家，涵盖央企、民企、高校、科研院所。“我们通过‘产学研用’深度融合，让科研机构的技术优势与企业的市场优

势形成互补。”中国聚变能源有限公司负责人刘叶表示，目前联合体已启动“聚变堆超导磁体产业化”等重点项目，吸引社会资本参与。

展望未来，“人造太阳”点亮万家灯火，为人类提供丰富、清洁的理想能源，或将从科幻走向现实。国家原子能机构主任单忠德表示，中国将与各国携手合作，不断推进全球能源创新可持续发展，促进人与自然和谐共生，为共建清洁、美丽、可持续的世界贡献中国智慧、中国方案、中国力量，让聚变能更好造福人类。（李仪 参与采写）

置，一方面，经过多年对“东方超环”的研究，我们逐渐摸清了相关原理；另一方面，在聚变堆主机关键系统综合研究设施“夸父”的研发过程中，我们逐渐突破了一系列技术和工程方面的瓶颈。”郑磊说，“未来真正建设聚变堆，还需要进一步探索。为此，我们要进一步建设属于我们自己的聚变能实验装置。”

紧凑型聚变能实验装置能够提供接近未来聚变堆参数的集成环境，为聚变示范电站建设提供燃烧等离子体物理、关键工程技术等核科学技术基础，探索大规模聚变燃烧等离子体稳态运行，发展超导强磁场技术、高功率加热、氘工厂等一系列聚变能开发和应用的关键技术。

紧凑型聚变能实验装置成功“落座”

本报记者

徐 靖

求和实物保护需求，被放置在这口“深井”中，最后进行密封。”郑磊说。

“杜瓦底座是紧凑型聚变能实验装置主机的第一个真空大部件，设计工况复杂，接口有数百个；结构尺寸大，直径约18米，高约5米，重400余吨，是紧凑型聚变能实验装置主机系统中最重的部件。”郑磊说，虽然是个“大家伙”，但它的吊装精度极高，表面水平高差需控制在15毫米以内，落位位置偏差不得超过正负2毫米；作业空间极度

“之所以建设紧凑型聚变能实验装置