

中国科学院学部 科学与技术前沿论坛简报 第 152 次

学部工作局院士服务与管理处 编报
《中国科学》杂志社

2024 年 1 月 26 日

“植物生殖发育与种子创新”论坛综述

一、背景

植物生殖发育生物学是研究植物配子发生、传粉受精、胚胎发生和种子发育调控规律的学科，是支撑种子创新、种业发展和粮食生产的基础性学科。在过去 30 年中，得益于拟南芥和水稻等模式研究体系的建立，植物生殖发育取得了巨大进步，许多新的遗传和分子机制得到阐明，人工合成无融合生殖技术的突破更是为种业发展注入了新的希望。近年来，我国科学家在该领域的研究发展迅猛，在多个方向上取得了突破，涌现出一批优秀青年科学家。

二、论坛概况

2023 年 12 月 12~13 日，“植物生殖发育与种子创新”科学与技术前沿论坛在海南省三亚市举办，论坛由中国科学院学部主办，中国科学院生命科学和医学学部、学部学术与出版工作委员会承办，崖州湾国家实验室、中国科学院遗传与发育生物学研究所、《中国科学》杂志社、中国科学院青年创新促进会共同协办。

本次论坛旨在分析研讨当前国内外植物生殖发育生物学的最新资讯，凝练植物生殖发育与种子创新领域的核心科学问题，组织开展系统化和问题导向的基础研究，以推动多学科交叉合作和应用，促进青年人才培养。

杨维才院士担任论坛执行主席。曹晓风、种康、李家洋、钱前（以姓氏拼音首字母为序）4位院士以及来自中国科学院遗传与发育生物学研究所、中国科学院植物研究所、北京大学、复旦大学、上海交通大学、武汉大学、兰州大学、中国农业大学等20余家科研院所的60位植物生殖发育领域专家受邀参加了论坛，其中超过一半人员为活跃在科研一线的45岁以下优秀青年学者。

论坛上，7位专家作了主题报告，内容涵盖植物生殖发育的多个方向，从不同角度进行了深入阐述。报告引起热烈反响，与会专家围绕报告内容并结合自身研究领域提出了各自的观点与见解。论坛就植物生殖发育领域如何进一步持续发展达成共识。

三、报告及研讨

（一）专题一：配子体发育机制

中国科学院遗传与发育生物学研究所杨维才研究员围绕“配子体发育机制”这一关键科学问题，作了题为“植物配子发育：现状、应用和未来”的报告。报告指出，配子发育是植物产生种子的基础，配子发育异常会直接导致作物结实降低，从而严重降低粮食产量，因此，对植物配子发育过程进行研究，对于保障粮食安全乃至人类的生存和可持续发展至关重要。植物的配子发育包含雌配子发育和雄配子发育，二者都是从孢原细胞起始，经过一系列分裂、分化等过程最终完成发育，形成成熟的配子。由于雌雄配子结构的差异，雌雄配子发育的调控机制差异较大。报告对已知的配子发育调控通路进行总结，着重介绍了近几年发现的调控关键基因和关键因子。紧接着从进化的角度，对植物配子发育的研究进展，特别是对一些低等植物的配子发育的研

究进行了介绍，并与高等植物的发育调控机制进行了比较。报告最后对植物配子发育研究的未来进行了展望，并指出，基础理论的创新以及新技术的利用能够为配子发育研究提供新的助力，而研究成果也能为植物应对日益频发的极端天气提供解决方案。

讨论：

植物生殖发育领域未来的发展方向是什么？

首先，在已有的研究模式和材料的基础上，需要一些更创新的工作，加强对新的植物材料和研究模式的工作。对重要的经济作物或者其他物种的生殖发育调控的研究，可以为新物种的驯化及重要经济作物的利用带来很大的帮助。第二，注重技术发展和学科交叉，随着单细胞测序技术的发展，以及大数据计算分析能力的提高，生殖发育领域可以广泛和数学、化学等学科交叉，建立一些新的研究体系，探索过去技术上不能解决的难题。第三，在植物中做一个“调节模块”，可以智能地应对各种极端条件的变化。第四，在整个生殖发育的全周期，利用时空组学技术，在不同的研究纬度和不同发育命运转换节点上，研究生殖过程的调控机制。

（二）专题二：雌雄配子体识别机制

北京大学瞿礼嘉教授作了题为“通过远缘杂交创制新的植物种质资源——未来农业育种的必由之路”的报告。远缘杂交是植物通过有性生殖方式产生新物种的重要途径，而新物种的产生对地球上生物多样性的产生和维持具有重要意义。不同种/属的植物之间进行杂交，必须克服合子前和合子后的多重生殖障碍。合子前种/属间生殖障碍主要源自花粉/花粉管与雌蕊之间的识别和相互作用过程，其中以下三个过程最为关键：（1）柱头对花粉的识别和互作，例如自交不亲和识别、花粉水合、花粉管穿入柱头等；（2）花粉管在雌蕊中向胚珠导向生长的过程；（3）胚囊中助细胞对花粉管的识别，例如花粉管接受、花粉管爆裂等。报告综述了近年来国际上对雌蕊-花粉/花粉管识别与互作

机制研究的重要进展，聚焦于识别过程中受体和信号的功能研究。这些重要的进展为未来利用“分子钥匙”精准打破植物合子前生殖障碍、获得远缘杂交胚提供了坚实的理论依据和创新策略。将这些研究成果与克服合子后生殖障碍的手段相结合，有望实现远缘植物间的高效杂交，为未来农业、园艺等育种工作提供全新的种质资源。

讨论：

(1) 合子形成前的生殖隔离的三个障碍，它们之间是如何协调的？在不同类型的植物里面，是不是具有一定保守型？

合子形成前的生殖隔离的三个障碍，目前认为不同亲本材料的杂交中，其重要性是不一样的，也就是说，这三个障碍的重要性因不同的物种之间的杂交而不同。这种生殖障碍机制在不同的植物之间，例如在拟南芥和水稻中是不一样的。

(2) 在通过远缘杂交创制新的植物种质资源时，如何防止产生有害的“超级植物”的产生？

突破种属间的生殖障碍，利用远缘杂交产生新的植物物种，对地球上生物多样性的产生和维持具有重要意义。从技术上讲，产生有害的“超级植物”是有可能性的。因此，如何避免这种情况的发生至关重要。植物科学领域应该提前谋划，通过制定相关的行为准则，甚至法律条文，从制度上来杜绝有害“超级植物”的产生。

(三) 专题三：双受精机制

武汉大学孙蒙祥教授作了题为：“被子植物双受精：主要进展，存在的问题与展望”的报告。双受精是被子植物在长期演化中所形成的特有现象，即花粉管递送到雌配子体的两个精细胞分别与卵细胞或中央细胞融合的过程。这一过程快速且短暂，却涉及极其复杂的发育生物学事件和精巧的分子调控机制。由于受精作用是植物世代交替的关键节点，也是作物形成产量的必要前提，长期以来备受研究者关注。然而，由于这一发育过程深埋在植物组织之中，难以观察，更难以获

得细胞材料，使得相关研究十分困难。近年来，有关技术的突破以及新的观察手段的建立，推动了受精机制研究的快速进展，取得了一系列可喜的成果。报告从以下几个方面详细介绍了双受精过程及调控机制，包括：（1）花粉管导向的调控机制；（2）配子间相互作用的机制；（3）双受精过程的行为差异；（4）防止多精入卵分子机制；（5）受精恢复系统的发现与新认识；（6）卵细胞激活的机制；（7）父母亲本基因在受精卵中的表达；（8）受精中自主细胞器的动态调控。报告指出，我国科学家在双受精机制研究的快速发展中作出了突出的贡献，提升了我国在该领域的应有地位。但目前仍面临着严重的发展困境，如缺乏强有力的资金支持，缺乏有组织的协作攻关、研究人员流失等，对持续发展造成不可忽视的影响。

讨论：

如何整合植物生殖发育领域的人才和力量，让生殖发育这个领域走在国际的前列？

目前国内生殖发育领域取得了巨大的进展，但现在也面临着巨大的挑战。要产生突破性的发现，靠一两个实验室不行，需要一个协同组织。我国应该组织一个大的项目团队开展集中攻关，结合生殖发育和种子创新，争取国家重大研究计划的支持，通过5~10年的持续支持和努力，培养和储备生殖领域人才，产生一系列原创性、突破性的重大发现，让我国在这个领域继续走在国际前列。

（四）专题四：胚胎发育调控机制

广州大学黎家教授作了题为“类受体激酶与种子发育”的报告。种子是裸子植物和被子植物特有的繁殖器官，对物种延续和散播起重要作用。种子的大小、数量和品质作为农业生产中重要的产量性状，是决定我国粮食安全的关键因素。成熟种子一般包括胚胎、胚乳和种皮三部分，分别由受精卵、受精中央细胞和胚珠珠被发育而来。在此过程中，细胞与细胞之间的信号交流对不同细胞的命运决定与组织间

的协同发育至关重要。LRR-RLK 是具有细胞外结构域和细胞内激酶结构域的单次跨膜蛋白激酶，在植物中广泛分布且数量众多，在植物可塑性发育的复杂调控网络中往往扮演着信号感知的作用。报告总结了种子发育过程中涉及的类受体激酶，以及一些由受体激酶介导的关键信号转导途径。其中拟南芥体细胞胚胎发生类受体激酶（SERKs）家族隶属于 LRR-RLK 第二亚家族，SERKs 成员可以与 ERECTA 家族成员形成受体复合体，共同感知 EPFL 家族小肽信号，来调节珠被的伸长。另一方面，SERKs 还与 GSO1/2 形成受体复合体，通过感知小肽信号 TWS1 来介导种子发育过程中胚胎和胚乳细胞之间的信号交流，监测胚胎表皮角质层的发育完整性。

讨论：

（1）胚胎发生粘连后，种子产生皱皮。这是胚乳发育的问题还是胚胎发育问题？

拟南芥胚胎发生粘连以后，胚胎整体发育出现缺陷，胚胎变小，但没有发现胚乳的发育有缺陷。胚乳降解后胚胎不能充满种子，因此种子就产生皱皮表型。

（2）类受体激酶 SERKs 突变以后能看到胚胎和胚胎后的苗期有表型。这种特异性是如何维持的？

类受体激酶 SERKs 的特异性是依赖于和它结合的另外一个共受体。在不同的发育阶段以及不同的组织中，SERKs 结合不同的共受体从而维持其功能的特异性。

（五）专题五：胚后发育调控机制

山东农业大学张宪省教授作了题为“植物干细胞重塑与良种育繁”的报告。植物体的形态建成主要在胚后发育阶段完成。干细胞是植物生长发育的源头，它形成于胚胎发育早期，在胚后发育过程中产生各种组织器官，最终完成整个植物体的形态建成。干细胞形成于胚胎发育早期，随着胚胎发育，WOX 家族基因表达、生长素和细胞分

裂素对干细胞的形成发挥了重要作用。植物干细胞的活动与再生在农业生产上具有重要应用价值。调控作物茎尖干细胞的活动，可以提高产量、改善品质。离体诱导干细胞的形成，可用于植物育种，无性快繁、单倍体诱导，基因转化和编辑等。

北京大学焦雨铃教授作了题为“植物单细胞再生中的调控机制”的报告，介绍了以模式植物拟南芥叶肉细胞为对象开展的再生研究。叶肉细胞在原生质体化之后能够形成愈伤组织，愈伤组织可以产生芽点，进而形成可育的植株。研究发现，分化细胞借助细胞壁消化诱导的基因随机表达得以转换命运，但各个细胞的基因表达和命运并不相同，极少数重编程为干细胞并在适宜的培养基中再生为愈伤组织，即原生质体化创造了转录组变异，培养条件选择了再生细胞。进一步的研究发现，愈伤组织具有异质性，仅部分愈伤组织具有成芽能力，而更多愈伤组织向维管束细胞分化，无法成芽。这些发现解释了再生率难以提升的原因，也说明通过操控基因表达能够提高再生效率，还为提升再生率和成芽率、富集成芽细胞和愈伤组织指明了方向。

讨论：

(1) 利用病毒作载体进行作物的基因编辑，这个技术在育种中使用情况怎么样？

利用病毒作载体进行作物的基因编辑。在木本植物的快繁脱毒中经常使用。同时在小麦的基因编辑中也得到很好的利用。病毒应该是用基因枪打到植物的干细胞区域，或者从其他植物组织运输到干细胞的区域后对其基因组进行编辑。

(2) 单细胞再生中，表观和遗传谁的作用更大？

这是一个很大的科学问题。在单细胞再生中能够选择性的打开一些基因，因此可能基因表达的变化更加重要。

(六) 专题六：育性和育种调控机制

上海师范大学杨仲南教授作了题为“雄性不育与杂交育种”的报

告。杂种优势的利用是提高农作物产量与品质的一种重要途径。杂种优势利用高度依赖作物的雄性不育系。用于杂交制种的雄性不育系可分为细胞质雄性不育系（CMS）和细胞核雄性不育系（GMS）。CMS需要进行三系配套生产杂交种子：与保持系杂交繁殖不育系的种子，与恢复系杂交生产商业化的杂交种子。P/TGMS 光温敏不育系低温条件下可育，从而进行不育系种子繁殖，高温条件下与其他水稻进行杂交制种，可用于两系法杂交制种。报告全面介绍了雄性不育及杂交育种的进展，包括：（1）水稻及玉米细胞质雄性不育基因及恢复基因；（2）水稻光温敏不育的遗传基因，以及育性恢复的细胞学机制；（3）水稻湿敏及其他环境调控育性的机制；（4）智能不育系 SPT 技术及可能的应用。

讨论：

（1）玉米的细胞质雄性不育系（CMS）的三种类型发现已经几十年，t型的因为与感病有关被淘汰，而c型和s型在实践中使用的也不好，具体原因是什么？

玉米的 CMS 中，c型和s型有其明显缺陷存在。首先，玉米的恢复基因很慢，恢复率不够，因此制种麻烦。其次，人工去雄也是一个重要的问题，需要的劳动力较多，而机械去雄则会伤害叶片从而影响产量。

（2）不育系育性恢复蛋白不够稳定，能否能够通过改造蛋白更加稳定的恢复育性？

可以改造不育系育性恢复蛋白，但是水稻中三系杂交法现在存在的问题，实际上是一个资源利用度的问题。它的不育系、保存系有特定的背景要求。有的不能作保存系，有的不能作不育系，因此，如何发现更多的有用基因位点，创制成材料，并将其利用起来才是主要问题。

（七）专题七：植物生殖发育与种子创新领域的关键科学问题

与会专家经过深入的研讨，总结提炼出植物生殖发育与种子创新领域的关键科学问题，这些问题代表未来的学科研究方向，将为学科发展战略的制定提供支撑。问题包括：（1）雌配子中央细胞、反足细胞的功能；（2）雌配子助细胞与中央细胞之间的信号交流；（3）雄配子营养细胞与精细胞之间的信号交流；（4）配子发育过程中的细胞命运决定；（5）远缘植物间的高效杂交；（6）植物受精机制深刻认识；（7）双受精机制在演化中的整合；（8）配子相互作用机制研究；（9）核融合的调控机制；（10）父母亲本基因的整合与互作；（11）合子分裂的启动；（12）种子发育过程中胚胎、胚乳和种皮细胞之间的信号交流；（13）单细胞再生的调控机制；（14）杂交制种的不育系、恢复系的资源利用；（15）如何提高再生效率；（16）智能不育系技术。

四、共识与建议

本次论坛在优化学科发展建设方面达成以下共识并提出建议：

1. 形成大团队的协同研究体系

根据学科布局和各自优势，形成大团队协作体系。尽量把大家的力量集聚起来，分工合作。不同地方的优势和条件不同，要整合基础研究团队、育种团队、智慧农业团队等各种团队的力量，形成一种良性的合作竞争机制，共同推动植物生殖发育学科的快速发展。

2. 加强学科交叉和技术突破

植物生殖发育是种子创新的理论基础，而种子创新则涉及到多学科的交叉合作。从生殖发育机制的基础研究，到种质资源的挖掘利用、大数据的开发、自动化农业设施等，需要不同方向的科学家协同合作，打破学科间的界限，才能有较大突破。此外，各种新技术的研发和利用，如基因编辑、人工智能、单细胞技术、时空组学及多维组学的开发利用也将极大地促进学科的快速发展。

3. 促进学科发展和产业结合

学科的发展需要面向国家现实的发展和需求。植物生殖发育和种子创新要顺应国家战略需求，为保障国家粮食安全作出贡献，就需要科研与产业发展并行，而不能只做基础研究与产业脱节。应该推动科研院所、中间转化企业以及下游产业公司联合，让科学研发端、技术转化端和产业端有机协作，推动植物生殖发育的学科创新和分子育种的产业化应用。

4. 建立植物有性生殖学科可持续发展和人才培养计划

该领域如何能持续走在国际的前列？当前迫在眉睫的是需要解决学科可持续发展和人才培养问题，需要关注，一是如何在基础领域获得国家持续支持；二是人才培养，希望国家自然科学基金委员会重大研究计划持续支持本领域的研究人员尤其是青年研究者，为他们提供平台，这对人才的储备和培养至关重要。

五、小结

本次论坛圆满完成了既定任务，与会专家深入研讨了我国植物生殖发育与种子创新领域的发展现状，提出了学科领域需要解决的关键科学问题，同时倡议建立学科可持续发展和人才培养计划，这些都将成为学科的高质量发展起到积极的推动作用。

（作者：杨维才，中国科学院院士，中国科学院遗传与发育生物学研究所；贾鹏飞，高级工程师，中国科学院遗传与发育生物学研究所）

联系方式：010-59358006