



迈向育种5.0: 智能品种的智能培育

余泓^{1,2}, 白世伟¹, 李家洋^{1,2*}

1. 崖州湾国家实验室, 三亚 572024;

2. 中国科学院遗传与发育生物学研究所, 北京 100101

* 联系人, E-mail: lijiaoyang@yzwlab.cn

粮食安全一直是世界人口增长面临的最严峻挑战。1927年世界人口首次达到20亿, 2022年突破80亿。在这100年人口的快速增长背后, 育种技术的快速发展以及作物单产的大幅提高起到了决定性的支撑作用^[1,2]。根据联合国数据, 预计2050年世界人口将达到97亿, 现有粮食增长率将无法满足人口增长的需求^[3], 亟需下一代的育种革命进一步提升粮食产量, 那么下一代育种技术核心是什么呢?

纵观作物育种技术发展史, 基础研究的发展与科学技术的进步推动了育种技术的世代演进, 可以主要分为4个世代^[4](图1): 育种1.0“驯化选育”, 指从新石器时代人类文明起源开始, 人类在漫长的发展过程中不断地对较好野生物种一代代的选留, 通过缓慢积累有益于农业生产的自然变异, 以驯化综合征为育种目标, 使植物落粒性降低、从匍匐变为直立生长、降低种子休眠性等, 逐渐成为栽培农家品种的过程。育种2.0“杂交育种”, 指在遗传学和统计学建立的基础上, 育种者开始有意识地基于遗传规律去杂交选育, 使得双亲的优良性状能够在后代中聚合的育种方法。以矮化育种为目标, 通过将矮秆品种与高产品种杂交培育出“绿色革命”高产矮秆品种; 以杂种优势利用为育种目标, 成功开发杂交制种技术体系培育出杂交玉米^[5]和杂交水稻^[6], 使得全世界水稻、小麦和玉米产量大幅度提升, 保障了世界粮食安全。育种3.0“分子育种”, 是指在1953年发现遗传物质DNA结构开启分子生物学时代后, 利用辐射与化学诱变以及转基因技术, 人为地产生随机突变增加遗传多样性, 直接进行利用或通过分子标记辅助将调控特定性状的目的基因导入育种材料进行育种的方法。利用这些技术培育出的抗虫棉花和玉米、抗除草剂大豆、抗白叶枯水稻等, 为提升农业生产效率与产量、减少病虫害造成的减产损失作出了重要贡献。育种4.0“设计育种”, 是指在作物参考基因组的建立、主效基因的克隆鉴定、自然群体变异解析的基础上, 阐明重要农艺性状形成的分子机制, 设计优异基因的理想组合, 高效指导育种亲本选择和杂交后代全基因组选择的育种过程。与此前的育种技术相比, 设计育种技术能够大大减少育种中的盲目性, 大幅提高育种效率, 缩短育种周期, 协同改良多个农艺性状, 例如水稻新“绿色革命”基因*IPAI*的克隆与应用使得矮秆杂交水稻的产量实现进一步突破, 高



李家洋 崖州湾国家实验室主任, 水稻创新团队首席, 中国科学院院士。长期从事高等植物生长发育与代谢途径调控和水稻品种设计研究, 率先提出并实践品种分子设计理念, 建立了水稻分子设计育种技术体系, 育成高产优质高抗高效的系列水稻新品种并大面积推广。研究成果获国家自然科学奖一等奖(2017)等。

产优质性状的分子机制解析以及协同改良解决了长期难以解决的“优质不高产”的育种难题^[7,8]。四个育种世代的发展为保障全球粮食安全作出了重要贡献。然而, 随着人口持续增加和全球环境变化, 未来作物品种培育面临新的挑战。

全球变暖, 气候状况的不断极端化, 干旱、洪涝、极寒、高温等极端天气频发^[9], 人口不断增长、耕地资源与水资源紧张^[10], 以及人类生活水平与需求的不断提高^[11], 这些都对培育下一代的品种提出了新的要求^[12]。未来, 育种5.0世代的主要特征与核心技术是什么? 目前国际上还没有统一的标准。2023年7月20日, 作者在江西省上高县“中科发早粳”品种千亩示范田的现场会上^[13], 提出“智能作物的智能培育是未来育种5.0世代的特征与关键”。

“智能作物的智能培育”是指通过发展和使用智能的技术培育智能的品种, 主要包含两方面的内涵。第一是“智能品种”, 指能够自主应对环境变化的作物品种, 可以根据外界环境的变化, 启动与之相应的分子调控通路, 从而使得作物能够抵抗生物胁迫以及未来气候变化带来的非生物胁迫, 在不同的发育阶段最优化的动态调整株型, 提升光能、肥料、水等农业资源的利用效率, 实现作物能量转化利用的动态调控以及在生长与抗性之间的协同优化, 增加粮食产量, 提高食物食味与营养品质, 减少化肥农药等农业资源的使用, 减少自然灾害损失, 从而实现“两增两减”的育种目标(图2)。第二是“智能培育”, 指开发与利用不断发展的前沿生物技术以及信息技术, BT与AI融合, 通过性状组、泛基因组、蛋白质修

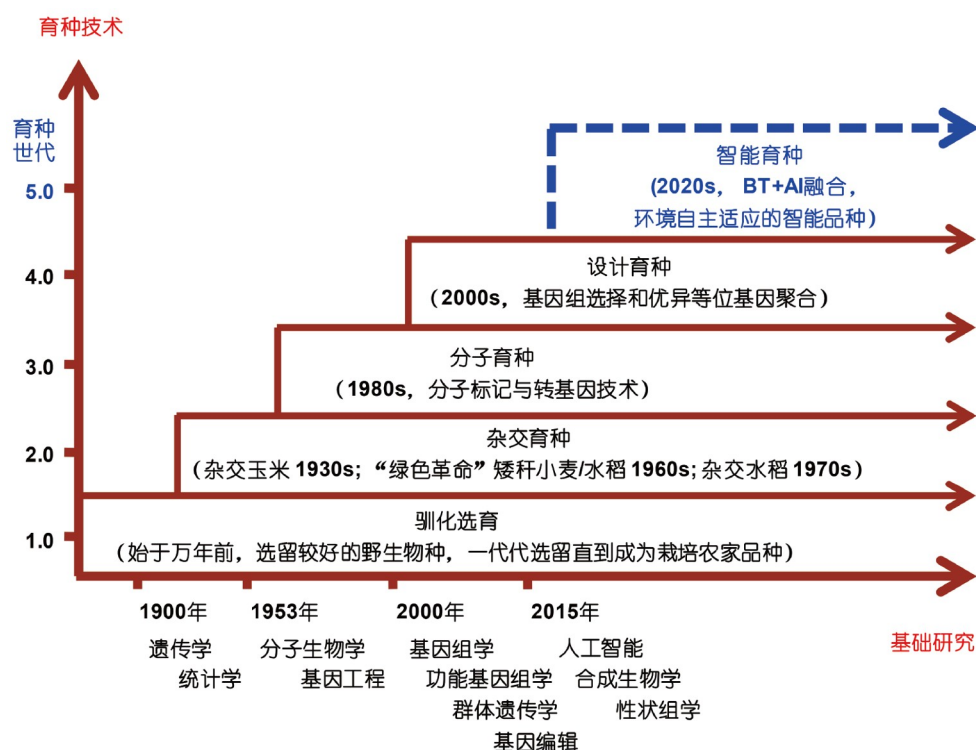


图 1 基础研究的发展推动育种技术的世代演进

Figure 1 The development of basic research drives the evolution of breeding technology from generation to generation

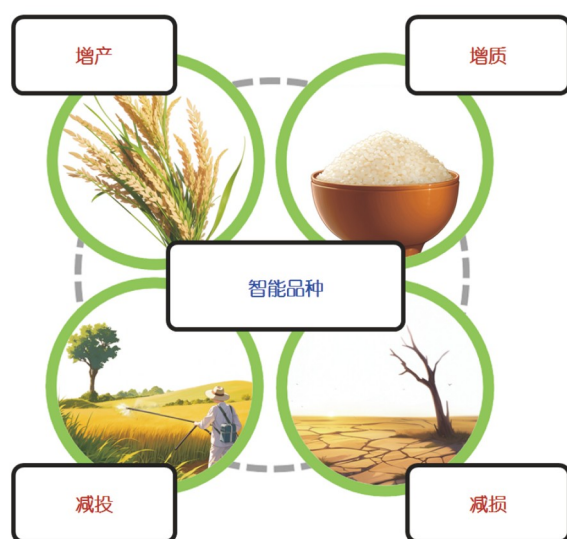


图 2 “两增两减”是智能品种培育的核心目标。“两增两减”，即增加作物产量，增强食味与营养品质，减少农药化肥等农业资源投入，减少生物胁迫与非生物胁迫造成的灾害损失

Figure 2 Two-increases and two-decreases are critical targets for smart crop breeding. Two-increases and two-decreases indicate the increase of crop yield, the increase of taste and nutritional quality, the decrease of the agricultural input such as fertilizers and pesticides, and the decrease of the losses caused by biotic and abiotic stresses

饰组、新型遗传资源创制、野生遗传资源挖掘利用，解析重要性状形成的分子机制与多性状协同调控的分子网络，利用新型传感器与信息技术，建立大规模作物信息数据库，对作物发育过程进行建模，对基因和蛋白质的结构、网络和功能进行预测，利用人工智能算法构建模型，实现对作物表型的精准预测，根据“两增两减”的育种需求，改造设计并创造新型蛋白质、基因调控元件、调控网络以及基因组合，将基因编辑、染色体工程、倍性技术、细胞器基因组编辑、快速育种技术、合成生物学、野生植物从头驯化、植物物质交互与操控等新技术与前4个世代的育种技术有机结合，大幅提升育种效率，进而实现培育智能品种的目标。

种子是农业的芯片。若要真正实现“智能品种智能培育”的设想，迈向育种5.0，仍需多方面的努力。一是不同作物的生长发育及生产模式不同，育种需求也存在差异，回顾前四个育种世代，不同作物的育种历程既有共性也有突出的特性。同时，不同作物的研究基础与发展阶段也不一样，这些都需要针对性地开展研究。二是农业科学研究受限于作物的生长周期，科研周期较长，同时农业的创新链条很长，要完整地实现从理论创新到品种突破，需要冷板凳精神、长期稳定支持和新型科研组织模式。三是作物表型是遗传信息与外界环境互作产生的复杂结果，但表型数据获取周期长成本高，高质

量表型数据积累困难,需要在不同的地理位置和环境条件下针对性地开展研究。四是新的育种体系需要生物技术与信息技术融合,需要建立跨领域的合作模式与机制,培养复合型的新型种业人才和研究团队,支撑学科交叉与原始创新。五是要注重生物安全,生物技术日新月异,可以通过开辟生物

安全实验区,建立完善的审定推广管理体系等方式,将新技术优势利用在未来作物育种中。同时,育种5.0的发展一定是与前四个世代的育种技术进行有机的组合和交融,从而高效培育出下一代“两增两减”优异新品种,保障世界粮食安全。

致谢 崖州湾国家实验室2023基本科研项目、中国科学院战略性先导科技专项(XDA24030504)和海南省院士创新平台科研专项资助。

推荐阅读文献

- 1 Bai S W, Yu H, Wang B, et al. Retrospective and perspective of rice breeding in China. *J Genet Genomics*, 2018, 45: 603–612
- 2 van Dijk M, Morley T, Rau M L, et al. A meta-analysis of projected global food demand and population at risk of hunger for the period 2010–2050. *Nat Food*, 2021, 2: 494–501
- 3 Hickey L T, Hafeez A N, Robinson H, et al. Breeding crops to feed 10 billion. *Nat Biotechnol*, 2019, 37: 744–754
- 4 Jing H C, Tian Z X, Chong K, et al. Progress and perspective of molecular design breeding (in Chinese). *Sci Sin Vitae*, 2021, 51: 1356–1365 [景海春, 田志喜, 种康, 等. 分子设计育种的科技问题及其展望概论. *中国科学: 生命科学*, 2021, 51: 1356–1365]
- 5 Crow J F. 90 Years ago: The beginning of hybrid maize. *Genetics*, 1998, 148: 923–928
- 6 Li J M, Luo X H, Zhou K L. Research and development of hybrid rice in China. *Plant Breed*, 2024, 143: 96–104.
- 7 Wang B B, Wang H Y. *IPAI*: A new “Green Revolution” gene? *Mol Plant*, 2017, 10: 779–791
- 8 Ren D Y, Ding C Q, Qian Q. Molecular bases of rice grain size and quality for optimized productivity. *Sci Bull*, 2023, 68: 314–350
- 9 Heino M, Kinnunen P, Anderson W, et al. Increased probability of hot and dry weather extremes during the growing season threatens global crop yields. *Sci Rep*, 2023, 13: 3583
- 10 Cao X X, Wang H J, Zhang B, et al. Sustainable management of land use patterns and water allocation for coordinated multidimensional development. *J Clean Prod*, 2024, 457: 142412
- 11 Willett W, Rockström J, Loken B, et al. Food in the Anthropocene: The EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *Lancet*, 2019, 393: 447–492
- 12 Chinese Academy of Sciences. Strategies for Academic Discipline Development in China: Breeding by Design for Future Crop (in Chinese). Beijing: Science Press, 2021 [中国科学院. 中国学科发展战略: 未来作物品种设计. 北京: 科学出版社, 2021]
- 13 Chen M J, Liu G F, Xiao Y Q, et al. Breeding of ZhongKeFaZaoGeng1 by molecular design (in Chinese). *Hereditas*, 2023, 45: 829–834 [陈明江, 刘贵富, 肖叶青, 等. 中科发早梗1号分子设计育种. *遗传*, 2023, 45: 829–834]

Summary for “迈向育种5.0: 智能品种的智能培育”

Towards Breeding 5.0: Smart variety by intelligent breeding

Hong Yu^{1,2}, Shiwei Bai¹ & Jiayang Li^{1,2*}¹ Yazhouwan National Laboratory, Sanya 572024, China;² Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China* Corresponding author, E-mail: lijiaayang@yzwlab.cn

Food security is the most serious challenge for the growing world's population all the time. The world's population for the first time exceeded 2 billion in 1927, reached 8 billion in 2022, and will increase to 9.7 billion in 2050. The current growth rate of food productivity is insufficient to meet the demand for the world population growth. Meanwhile, we are facing new challenges in agriculture, such as global warming, more frequent extreme weather of droughts, floods, extreme low and high temperatures, the continuous growth of population, and the shortage of arable land and fresh water resources, all of which have put forward new requirements for the cultivation of a next generation of agricultural varieties. Due to the speeding advances in basic research in biology and other related disciplines since entering the 20th century, the breeding technologies have undergone rapid development with four generations, including domestication, hybrid breeding, molecular breeding, and breeding by design, all of which have significantly increased worldwide crop yield to ensure food security. However, what is the most featured characteristics of the next generation of breeding? On July 20, 2023, Jiayang Li proposed that the intelligent breeding of smart crops should be the core features of the future Breeding 5.0 generation. Here, we introduce the concept of intelligent breeding and the critical targets for smart crops. Smart crops refer to the crops that can smartly respond to environmental changes according to the external environments, so that crops can resist biotic and abiotic stresses at different developmental stages to improve the synergistic optimization between growth and resistance. This requires the understanding of molecular bases of important agronomic traits in crops, which allow us to optimize the dynamic adjustment of plant architecture at different development stages and improve the use efficiencies of agricultural resources. The goal of breeding smart crops is to increase grain production, improve the taste and nutritional quality of food, reduce the use of chemical fertilizers and pesticides, and reduce losses from abiotic and biotic stresses, thereby achieving the “two-increases and two-decreases” breeding goals. Intelligent breeding refers to the comprehensive use of the cutting-edge biotechnology and information technology to elucidate the molecular mechanisms of important agronomic traits and the establishment of a large-scale crop information database to achieve accurate prediction of crop phenotypes, which will greatly improve the breeding efficiency and achieve the goal of cultivating smart crops. The successful development of Breeding 5.0 depends on AI-powered biotechnologies on the basis of integrating the breeding technologies of the previous generations, thus to cultivate the next generation of elite new varieties to ensure world food security.

smart crop, intelligent breeding, Breeding 5.0, breeding technology, breeding generationdoi: [10.1360/TB-2024-0794](https://doi.org/10.1360/TB-2024-0794)