

# 第5代(5G)作物育种技术体系

应继锋<sup>1,2</sup> 刘定富<sup>3</sup> 赵健<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 中国水稻研究所,杭州 310006; <sup>2</sup> 华智生物技术有限公司,长沙 410125; <sup>3</sup> 武汉金玉良种科技有限公司,武汉 430064)

**摘要:**全球人口激增、气候持续变化、土地资源退化、生态环境污染等诸多问题给世界农业带来了巨大压力。作物育种技术的进步为粮食产量的增加作出了重要贡献,是解决世界农业困局和保障世界粮食安全的核心关键。但是近30年来的水稻单产增长缓慢,对农作物育种技术的改进和提高提出了新的要求。因此,需要研究和开发更加有效的育种技术体系。根据国内外的有关文献和作者的海外经历,简要回顾作物育种技术的现状及趋势,重点介绍第5代(5<sup>th</sup> Generation=5G)作物育种即智能育种技术系统。

**关键词:**分子技术育种;智能育种;第五代(5G)作物育种技术

根据预测,到2050年,全球平均气温将从2016年的14.7℃上升至16.0℃,因病虫害带来的作物产量损失将从2016年的10%~15%增加至20%~25%,而人口将从目前的75.79亿增长至88亿,土地人均占有量将从2016年的0.2hm<sup>2</sup>下降至0.15hm<sup>2</sup>[1],这意味着全球农业和粮食生产都面临着巨大压力。品种改良和栽培、生产技术的提升是保障农业和粮食安全的有效途径,作物产量的提高有50%来自品种的改良。但栽培、生产技术对作物产量的提升作用仍受限于作物的品种特性,可见解决以上问题的核心关键在于品种改良,即选育高产、稳产、优质、高效的优良品种。因此,研究作物育种发展方向,指导育种实践,对于应对病虫害侵扰、气候变化、水资源下降、耕地资源减少及不断增加的人口带来的粮食短缺及农业可持续发展问题具有重要意义。本文根据育种技术的发展阶段将作物育种技术分为5个时代育种体系。

## 1 第1代育种技术(1G):作物驯化技术

对作物进行驯化大约从1万年前开始,早期的农民并不懂得遗传多样性的理论,但是已经开始有意识或无意识地在利用其价值对植物进行偶然的选择,他们会选择在产量或其他性状表现好的单株作为下一季栽培的种子,并不断地繁殖下去。

在作物驯化阶段,世界范围内主要种植了约7000种作物[2],为现代栽培品种的培育奠定了遗传资源基础,但是这一时期主要通过耕作者对自然变异的肉眼观察做出主观判断,作物改良的进展非常缓慢。

## 2 第2代育种技术(2G):杂交育种

杂交育种始于19世纪中后期,以1865年为起点,孟德尔在发现了植物遗传定律后,数量遗传学理论被建立起来,育种家和专业的科学家通过人工杂交的手段,有目的地在选配不同的亲本进行杂交、自交、回交等,结合双亲的优良性状培育改良作物品种。

这一阶段主要利用了经典遗传理论、统计学和田间试验设计等理论和手段,具有一定的预见性,但是偶然性大,育种效率低。

## 3 第3代育种技术(3G):传统育种

这一时期的育种包括杂种优势育种及主动诱变育种。19世纪末至20世纪初,英国的一些种子公司开始对植物进行复合杂交,并从中选择突破性品种[3],以1926年先锋公司杂交玉米种为标志,玉米杂种优势和双杂交种在商业化上应用突出的表现带动了杂种优势在水稻、高粱、油菜、棉花等其他作物上的运用。1940年,物理、化学或太空诱变等手段在作物育种上开始应用,主动的诱变育种可以创造全新的变异,还能促进远缘杂交过程中染色体的变异,对于丰富遗传性状具有重要意义。

值得一提的是,按照Buckler等专家的观点,杂交育种、杂种优势育种及主动诱变育种这3种相继出现的育种技术可被统一归纳为传统育种[2],这些育种手段在过去近100年的时间里极大地提高了作物产量,推动了农业发展,缓解了“人口爆炸”带来的粮食紧缺问题,但是这一阶段仍依赖于育种家的经验来选择好的表型育种材料,且由于传统育种对于复

杂性状的选择有限,因此难以兼顾产量、品质及生物胁迫和非生物胁迫的抗耐性。目前,世界大多数育种项目仍处在传统育种(2G和3G)阶段,或处于从传统育种(3G)到分子技术育种(4G)过渡的阶段。

#### 4 第4代育种技术(4G):分子技术育种

得益于现代分子生物学、基因工程的发展,自20世纪80年代开始,以转基因(GMO, Genetic modified organism)、分子标记辅助选择(MAS, Marker assisted selection)、全基因组选择(GS, Genome selection)、等位基因挖掘等为代表的现代分子技术手段开始在作物育种上运用。

自1983年第1例转基因植物开始,GMO已经发展成最快、应用效率最高的精准育种技术之一<sup>[4]</sup>,GMO是针对作物单个或多个性状进行遗传改良的分子技术,它打破了物种界限,将具有目标性状的新基因直接插入到作物基因组中,通过选择不同的启动子,可以改变基因时空表达模式和强弱。目前已在作物的抗病、抗虫、抗除草剂上得到应用并取得了商业化成功,在北美地区,90%以上的玉米、大豆、棉花、甜菜和油菜是GMO品种。

MAS是20世纪80年代兴起的DNA标记技术,以QTL作图和RFLP、SSR、SNP等分子标记为基础,经历了标记开发、遗传图谱、功能和比较基因组连锁分析及基因组测序等不同发展时期<sup>[3]</sup>。其基本原理是利用与目标基因紧密连锁或表现共分离的分子标记对选择个体进行目标以及全基因组筛选,从而减少连锁累赘,获得目标个体<sup>[5]</sup>。

GS是MAS的延伸,是近年来动、植物分子育种的全新策略,已成为分子技术育种的热点和趋势。GS以连锁不平衡理论为基础,相比于MAS依赖于QTL定位的准确性及其附近标记,仅选用少量分子标记预测少量的QTL效应,GS采用覆盖整个基因组的分子标记来捕获整个基因组上的变异并对育种值进行有效预测<sup>[6]</sup>。

分子技术育种是对传统育种理论和技术的重大突破,实现了对基因的直接选择和有效聚合,大幅度缩短了育种年限,极大地提高了育种效率。目前,各国对QTL、MAS、GS和基因定位等精准育种的理论和试验研究很多,但在实际育种中应用十分有限,仅有拜耳-孟山都和科迪华等跨国种业巨头的主要作物育种真正处在分子技术育种(4G)阶段。

#### 5 第五代育种技术(5G):智能育种

智能育种(Smart breeding)技术体系,基本定义为利用农作物基因型、表型、环境、遗传资源(例如水稻上的品种系谱信息)等大数据为核心基础,通过人工生物智能技术,在实验室设计培育出一种适合于特定地理区域和环境下的品系品种。而传统上的大田仅仅作为品种测试和验证的场所。从而节省了大量的人力、物力、财力、环境压力等资源。智能育种是依托多层面生物技术和信息技术,跨学科、多交叉的一种育种方式。

智能育种以基因型大数据(Genome information)为核心之一。基因型数据主要来自5种基因技术利用数据,巧合的也是5G,但是这个G是技术,而不是代数。主要包括:(1)种质资源鉴定(Germplasm characterization)。(2)基因编辑(Gene editing)。基因编辑是应用先进的基因组学和分子生物学工具对功能已知的重要基因序列进行定向敲出、单碱基替换、同源区段替换等操作,创造新的有益遗传变异,从而实现作物的定向精准改良,在农作物抗病、抗逆性、园艺作物的花色、保存性等农业性状的改良上发挥作用<sup>[7]</sup>。基因编辑技术具体分为3种典型的工具即锌指核酸酶(ZFN, Zinc finger nucleases)、转录激活样效应因子核酸酶(TALEN, Transcription activator-like effector nucleases)、成簇规律间隔短回文重复序列(CRISPR, Clustered regularly interspaced short palindromic repeats),其中CRISPR-Cas9(CRISPR-associated protein 9)因其操作的简便性、通用性,已成为目前最广泛应用的基因编辑技术<sup>[8]</sup>。(3)基因功能鉴定(Gene function identification)。(4)基因组组装(Genome assembly)。(5)基因组育种方法(Genomic breeding methodologies)技术。这些基因型技术的相似点是通过二代测序、SNP芯片等不同通量的基因型检测手段,挖掘株型、产量、抗逆性等性状相关的重要基因与自然变异。

智能育种的核心之二为表现型数据大数据。也就是说大多数是平常可以看得到的东西,例如水稻上的稻谷大小、米粒长短等。传统上都是用眼、笔、纸人工测定,但是随着20世纪90年代的自动化,高通量表现型数据的实施技术(Automatic high throughput phenotyping)的突飞猛进,表型数据搜集基本已经进入数字化阶段。室外主要以卫星、飞机、

高密度摄像机高空摄像机、地面小型机器人、红外仪、紫外仪等;室内表型技术以德国 LemnaTec® (全球最大的室内室外型植物表型系统)以及原杜邦-陶氏化学的 FAST-CORN® 为代表。

智能育种的核心之三为环境大数据。主要包括:(1)地上部分的数据(AG-above ground),主要内容为温度、相对湿度、降雨量、降雪量、日长、日照强度等。(2)地面上面的数据(OG-on the ground),病菌:生理小种、群体、分布等;昆虫:生物型、群体、分布等;杂草:类型、群体、分布等。(3)地下部分的数据(UG-Under ground),土壤特性:类型、结构、肥力、水分等;土壤微生物:类型、群体、分布等。

近年来,人工智能技术,特别是图形成像技术(Image technology)、数字化技术(Digital 图形成像技术)等现代技术的快速发展将作物育种引向了新的阶段。目前世界上如拜耳-孟山都和科迪华等跨国种业巨头基本上能够实现作物性状调控基因的快速挖掘与表型的精准预测,从而建立智能组合优良等位基因的自然变异、人工变异、数量性状位点,具有多基因与多性状聚合的育种设计方案,实现智能、高效、定向培育新品种<sup>[9-10]</sup>。

智能育种的基本技术路线是智能设计适合特定环境的、用于构建育种分离群体的杂交组合;在田间重复产量测试之前,应用基于基因型大数据、表型大数据、环境大数据已建立和验证的基因型-表型-环境模型,对优异品系和试验性杂交种的适应性、产量、品质性状进行大量计算机模拟,模拟在不同环境条件下的表现和稳定性;对单个个体在同一世代进行大规模、多位点的精准基因组编辑,同时创造多个优异等位基因;在全基因组水平上对已知的不同位点等位基因的最佳组合进行多基因与多性状的聚合;培育出像聪明蛋(SmartStack®)玉米品种为代表的真正的高科技农作物品种。智能育种需要生物育种大数据中心和高度信息化应用方面的支撑。深度融合了生命科学、信息科学和育种科学的智能育种是科技发展带来的新机遇,预计在未来10~20年,智能育种发展的快慢势必成为种业核心价值 and 竞争力的体现,而由传统育种到分子育种,再到智能育种,育种的“科学”成分含量越来越多,而育种的“艺术”成分含量越来越少;实验室基因型分析的个体、品系数目越来越多,而需要在田间测试的个体、品系数目

越来越少。从而,育种的预见性、准确性、效率越来越高,实现的经济、社会和环境效益也越来越高。

## 6 展望

由近现代的杂交育种、杂种优势育种到分子育种,到正在孕育发展中的智能育种(5G),育种技术越来越依赖于多项科技的融合发展。育种的遗传增益也越来越高。目前我国大部分作物育种仍然处在传统育种(2G和3G)阶段,仅少部分作物已经处于传统育种(3G)向分子技术育种(4G)的转变阶段,而世界种业巨头凭借着雄厚的资本、先进的技术基础等优势,已加速朝智能育种(5G)阶段迈进。我国面临着种业技术全面革新、国际跨国种业垄断、种业产业对外依存度高的威胁,这给我国作物育种带来新的挑战,迫使育种科技亟需革命性的改变。我国必须紧抓全球新一轮科技革命和产业革命迭代的机遇,整合和引导科技资源及人才向育种5G技术靠拢,加快原始创新,抢占种业技术制高点,确保我国种业具有持续竞争力,保障我国粮食安全、食品安全和生态安全。

## 参考文献

- [1] ISF. Plant breeding helps us to produce more with less, improving resource-use efficiency and reducing pressure on the environment. <https://www.worldseed.org/our-work/plant-breeding/>
- [2] Wallace J G, Rodgers-Melnick E, Buckler E S. On the road to breeding 4.0: unraveling the good, the bad, and the boring of crop quantitative genomics. *Annual Review of Genetics*, 2018, 52 (1): 421-444
- [3] 盖钧镒, 刘康, 赵晋铭. 中国作物种业科学技术发展的评述. *中国农业科学*, 2015, 48 (17): 3303-3315
- [4] 王红梅, 陈玉梁, 石有太, 李静雯, 王立光. 中国作物分子育种现状与展望. *分子植物育种*, 2020, 18 (2): 507-513
- [5] 关淑艳, 费建博, 刘智博, 金栋梁, 马义勇. 分子标记辅助选择(MAS)在玉米抗逆育种中的应用. *吉林农业大学学报*, 2018, 40 (4): 399-407
- [6] 王亚琦, 孙子淇, 郑峥, 黄冰艳, 董文召, 汤丰收, 张新友. 作物分子标记辅助选择育种的现状与展望. *江苏农业科学*, 2018, 46 (5): 6-12
- [7] 王维佳, 李萌鑫. 基因编辑技术在农业育种中的应用. *安徽农业科学*, 2020, 48 (3): 18-25
- [8] 石伟佳, 刘芳. CRISPR 基因编辑技术及其应用与检测方法. *农业与技术*, 2020, 40 (4): 18-20, 35
- [9] 李鹏, 白永新, 张润生, 魏振飞, 张建华. 浅议我国玉米育种发展现状与方向. *种子科技*, 2019 (2): 18-19
- [10] Varshney R K, Sinha P, Singh V K, Kumar A, Zhang Q F, Bennezen J L. 5Gs for crop genetic improvement. *Current Opinion in Plant Biology*, 2020, 56: 190-196 (收稿日期: 2020-07-16)