

# 我国玉米生物育种技术体系发展与应用探讨

张红伟<sup>1</sup>, 李 林<sup>2</sup>

(1. 中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081; 2. 华中农业大学植物科学技术学院, 武汉 430070)

**摘 要:** 玉米作为我国最重要的农作物, 对我国的粮食安全至关重要, 我国玉米产量和育种技术体系与西方国家仍然存在差距。本文在综述玉米育种技术体系的基础上, 分析我国玉米生物育种技术体系与西方国家的不同, 讨论我国不能照搬套用西方育种技术体系的原因, 结果表明, 走出一条独立自主的具有中国特色的玉米育种技术体系是在种质资源创新和新品种培育上赶超西方国家的关键。目前, 我国玉米育种单位以中小型的企事业单位为主, 建立一个开放、共享、合作、共赢的精准智能设计育种平台体系是适应现阶段中小型玉米育种单位需求的适宜之路。

**关键词:** 玉米; 育种技术; 智能设计; 育种平台

**中图分类号:** S513.035.1

**文献标识码:** A

## Development and Application of Maize Breeding Technology System in China

ZHANG Hong-wei<sup>1</sup>, LI Lin<sup>2</sup>

(1. Institute of Crop Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081;

2. College of Plant Sciences & Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** Maize is the highest-yielding crop in China and plays a crucial role in national food security. However, there is still a gap in maize yield and breeding technology system between China and Western countries. On the basis of summarizing the maize breeding technology system, this article analyzes the gap of maize breeding technology system between China and Western countries, explaining why China cannot simply adopt Western breeding technology systems. It discusses that creating an independent and distinctive maize breeding technology system with Chinese characteristics is the key to catching up with Western countries in germplasm resource innovation and new variety development. At present, maize breeding units in China are mainly small and medium-sized enterprises and institutions. Establishing an open, shared, cooperative, and win-win precision intelligent design breeding platform system is a suitable way to meet the needs of these small and medium-sized maize breeding units.

**Key words:** Maize; Breeding technology; Intelligent design; Breeding platform

习近平总书记多次强调, 中国人的饭碗任何时候都要牢牢端在自己手上, 饭碗里面主要装“中国粮”。农业是国民经济的基础, 生物种业是农业的根基, 我国乡村振兴离不开生物种业的振兴。玉米是全世界杂种优势应用最早、全球种业市值占比(约40%)最大的作物, 也是我国种植面积最大、总产量最高的农作物。玉米生物种业的发展对于我国生物

种业的振兴至关重要。

## 1 我国玉米生物育种现状

世界玉米生产主要集中在美国玉米带、中国玉米带及欧洲玉米带。2021年, 美国和中国玉米总产量位列全球第1、2位, 占全球总产量的56.2%, 同时中美两国也是全球玉米消费前两名<sup>[1]</sup>。我国玉米2021年进口量达到了历史峰值, 超过2 800多万t, 是第一大进口国, 美国是全球玉米第一大出口国(出口超过6 400多万t)。由此可知, 我国玉米具有巨大的产业需求, 同时存在巨大的消费需求缺口, 因此玉米的生产和供给与我国的粮食安全息息相关。

过去几十年, 国家对农作物遗传育种和分子生物学基础理论研究高度重视, 每年都通过国家自然

录用日期: 2024-05-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFF1000100)

作者简介: 张红伟(1981-), 男, 河南汝南人, 研究员, 博士, 主要从事玉米生物育种技术和工具的开发和应用。

Tel: 18518460283 E-mail: zhanghongwei@caas.cn

李 林为本文通信作者。

E-mail: hzaulilin@mail.hzau.edu.cn

科学基金等项目进行大量的科研投入<sup>[2]</sup>。我国科学家在玉米生物学的理论研究方面进展迅速,克隆了大量的玉米性状功能基因,每年发表大量的高水平研究论文<sup>[3-7]</sup>。玉米生物种业并没有受益于理论研究的进展,除了极少数育种单位采用DH育种技术加速育种进程外,我国少数具有研发实力的育种公司和各级农业科学院仍然以传统育种为主进行玉米杂交种的培育。2020年统计数据表明,我国玉米高产纪录(24 948.75 kg/hm<sup>2</sup>)比美国(37 950.00 kg/hm<sup>2</sup>)低了13 001.25 kg/hm<sup>2</sup>,全国平均产量只有美国的60%。我国平均产量并没有随着玉米基础理论发展而缩小与美国的差距,反而以60 kg/hm<sup>2</sup>的速率在扩大<sup>[8]</sup>。由此可知,我国玉米基础研究与玉米产业应用存在严重脱节,基础研究的快速进步并未有效推动玉米品种研发水平的升级。

我国也在生物种业产业上积极布局。2017年6月,中国化工成功收购瑞士先正达,并与中化集团农业业务板块合并重组,形成先正达集团,成为我国种业的龙头企业,从而提升了我国在种业等农业领域的全球竞争力。但是全球种业也在巨变,拜耳与科迪华分别整合孟山都和先锋,逐步形成了以农化为基础的世界种业格局。先正达全球种子行业市场占有率约7%,落后于拜耳与科迪华<sup>[9]</sup>。我国生物种业产业也需要破局之策。

## 2 当前玉米生物育种的主要技术

美国著名遗传学家E D Buckler教授与其合作者总结了生物种业的技术,并根据工业的模式标准,将作物育种划分为育种1.0~4.0共4个阶段<sup>[10]</sup>。1.0:经验式育种,主要就是靠育种家大田观察,根据自己的经验进行组配与测试,主要是考验育种家的眼光—艺术创作的能力;2.0:半经验式育种,是将经验育种与遗传学基本规律、大田试验设计与育种家的艺术创作相结合;3.0:分子标记辅助育种或转基因育种,是指利用分子标记筛选或者转基因等技术手段进行玉米性状的改良,可有效地提升育种效率;4.0:全基因组选择育种,该技术利用统计模型建立全基因组分子标记与表型的回归关系,从而根据分子标记信息预测表型,进行作物性状的综合改良,从而提高了选择的准确性和育种效率,提高了每一代的遗传增益<sup>[11]</sup>。

## 3 中国特色种业振兴之路

西方育种技术体系源自西方科学与技术的沃土,同时反哺了西方发达国家的生物种业的发展,为

西方发达国家的种业蓬勃发展提供了支撑。我国生物育种技术起步较晚,主要学习西方技术。虽然西方育种技术体系在很大程度上促进了我国过去几十年作物种业的发展,但是在西方技术体系的方向上超过西方难度很大,只有另辟蹊径才能实现并跑和领跑。

经验与半经验式育种的传统育种缺乏优异种质,且效率较低,即将退出历史舞台。研究发现,21世纪以来郑单958和先玉335及其衍生品种的种植面积占我国玉米种植面积的85%以上,含美国玉米种质品种的种植面积占我国玉米生产面积的77%<sup>[12]</sup>。我国玉米种业缺乏核心种质和原创性理论,导致玉米品种同质化严重,育种家往往只是在西方种质的基础上的“二次创作”,不能有效利用丰富的种质资源是限制利用经验与半经验式育种进行产量持续提升的瓶颈。

分子标记辅助育种或转基因育种是生物技术在育种中应用最为成功的领域。分子标记辅助育种依赖于功能性基因的发现,在抗病、抗虫及品质等遗传基础相对简单的性状上应用有较好的表现。目前,我国克隆了大量的功能基因,为分子标记辅助育种的产业应用奠定了基础。但是,无论是分子标记技术体系还是转基因及CRISPR技术都为西方科学体系发明,存在技术壁垒与专利限制,特别是在抗虫和抗除草剂技术的应用上。此外,这些育种技术体系对复杂性状选择效率较低。玉米产量和抗性性状非常复杂,通过对单一或者少量功能基因进行选择不能实现对复杂性状进行系统提升和改良。

全基因组选择育种(GS),主要是利用覆盖全基因组的高密度分子标记或随机标记及大规模群体系谱与历史表型数据,通过构建参数或非参数预测模型,实现对作物表型的预测。Meuwissen等在2001年发表关于GS技术的研究论文<sup>[13]</sup>,引领了GS技术在动植物生物育种领域的应用。目前,西方种业公司已经利用GS技术进行生物育种超过20年,我国还处于起步阶段。此外,在西方种业体系中,由于其资本雄厚,且历史数据丰富,GS技术体系已经逐步成为主流育种模式。近些年生物大数据技术以及人工智能技术等前沿技术的发展,进一步推动了GS技术在西方育种产业中的应用<sup>[14]</sup>。GS在我国的发展存在巨大挑战,第一,GS技术体系需要大规模基因型、历史表型和环境型数据,大规模基因型数据的产出成本高,表型数据和环境型数据的积累也需要长期大量投入<sup>[15-16]</sup>;第二,我国种业公司种质单一、数量少,存在种质和数据的双重“孤岛”,数据极其缺乏,

导致不同育种单位构建的GS模型不具有广泛的适用性;第三,我国育种单位以少数育种公司和农业科学院系统为主,有限的资金投入和缺乏系统的育种技术限制了我国育种单位建立和优化GS育种技术体系;第四,GS育种技术体系具有自身的缺陷,主要是预测精度有限且技术成本高。

#### 4 CropGPT为我国生物种业搭建一个公开、公平、共享、高效的精准智能设计育种平台

我国农业要发展,生物种业势必优先破局。由于不能在西方育种技术体系的基础上实现赶超,需要打造出独特的具有中国种业自身特色的作物育种自立自强之路。我国在生物育种领域具有以下优势,第一,改革开放后,在国家的大力支持与投入下,我国科学家系统解析了重要农艺性状的遗传与分子机制解析,克隆了一批重要性状的功能基因;第二,拥有200多家注册资金在3 000万以上具有育种能力的育种企业;第三,各级农业科学院也进行大量的育种工作,每个企业和育种单位都拥有独立的育种材料资源;最后,我国是农业大国,具有广阔的和多元化的种业消费市场需求。

基于以上的优势,提出了一种有机融合生物技术(BT)、信息技术(IT: Information Technology)及育种家育种艺术(AT)的开放、共享、合作、高效的精准智能设计育种策略CropGPT(=BT+IT+AT)<sup>[17]</sup>。CropGPT集合种质资源学家、生物学家、数学家、计算机学家、

育种公司及生物技术公司的力量(图1)。首先,种质资源专家提供优质的基础种质资源(elite founder),育种公司基于这些种质资源,根据产业需求和育种目标,利用DH等工程化技术构建育种群体;其次,生物学家基于产生和收集的生物大数据,构建基因网络,结合AI技术系统调查基因-性状的调控关系,快速批量克隆重要性状的功能基因集合;第三,基于全基因组重要性状的全局功能基因,利用包含特定功能基因集合的精准智能育种芯片对育种群体进行低成本高通量基因分型。由于育种芯片只聚焦功能基因,而非全基因组基因型,因此,成本大幅降低,而且可以有效解决“大p小n”问题,精度与效率大幅提升;第四,利用智能表型平台对群体进行高通量表型鉴定,降低大规模表型鉴定的成本;第五,数学家整合基因型、表型及环境数据,建立适合的大数据模型,计算机学家通过模型生成最优数字植物、合理优化组配方式及最优改良路径,并生成科学合理的育种方案和建议;最后,育种家根据育种建议进行杂交组合的配制、产量鉴定和抗逆性鉴定等。优质的组配材料可直接进行商业化应用,同时也可以加入新的基础种质中,通过迭代循环,不断优化大数据模型,提高预测的准确性,强化CropGPT智能设计育种能力。CropGPT通过建立一个开放、共享、低成本的人工智能设计育种平台,为众多中小型育种单位提供低成本的人工智能设计育种工具,从而赋能中小型育种单位发挥其独特的种质资源优势。



图1 CropGPT架构

Fig.1 Design of CropGPT system

在全球气候不断变化和西方国家不断对我国实施贸易制裁等背景下,我国粮食安全问题并非高枕无忧。为了振兴我国种业,必须走出一条具有中国特色的开放、共享、包容、合作、共赢的生物育种之路,才能安稳地端好自己的饭碗。

#### 参考文献:

- [1] 智研咨询. 2022–2028年中国玉米行业竞争现状及投资策略研究报告[R]. 北京:博思数据研究中心, 2022.
- [2] 魏珊珊, 蒋金金, 刘卫娟, 等. 作物学十年:国家自然科学基金项目资助、成果产出与未来展望[J]. 中国科学基金, 2022, 36(6): 972–981.
- WEI S S, JIANG J J, LIU W J, et al. Decade of crop science: funding, outcomes and future prospects of national natural science foundation of China[J]. China Science Foundation, 2022, 36(6): 972–981. (in Chinese)
- [3] 宋伟斌, 赵海铭, 杨爽, 等. 2016年度中国玉米生物学研究进展[J]. 玉米科学, 2017, 25(3): 1–10.
- SONG W B, ZHAO H M, YANG S, et al. Progress on the maize biology research of China in 2016[J]. Journal of Maize Sciences, 2017, 25(3): 1–10. (in Chinese)
- [4] 宋伟斌, 赵英男, 赵海铭, 等. 2017年度中国玉米生物学研究进展[J]. 玉米科学, 2018, 26(4): 1–9.
- SONG W B, ZHAO Y N, ZHAO H M, et al. Progress on the maize biology research of China in 2017[J]. Journal of Maize Sciences, 2018, 26(4): 1–9. (in Chinese)
- [5] 宋伟斌, 赵海铭, 赖锦盛. 2018年度中国玉米生物学研究进展[J]. 玉米科学, 2019, 27(2): 1–9.
- SONG W B, ZHAO H M, LAI J S. Progress on the maize biology research of China in 2018[J]. Journal of Maize Sciences, 2019, 27(2): 1–9. (in Chinese)
- [6] 宋伟斌, 赵海铭, 赖锦盛. 2019年度中国玉米生物学研究进展[J]. 玉米科学, 2020, 28(3): 15–30.
- SONG W B, ZHAO H M, LAI J S. Progress on the maize biology research of China in 2019[J]. Journal of Maize Sciences, 2020, 28(3): 15–30. (in Chinese)
- [7] 宋伟斌, 赵海铭, 赖锦盛. 2020年度中国玉米生物学研究进展[J]. 玉米科学, 2021, 29(5): 1–14.
- SONG W B, ZHAO H M, LAI J S. Progress on the maize biology research of China in 2020[J]. Journal of Maize Sciences, 2021, 29(5): 1–14. (in Chinese)
- [8] 严建兵, 赵久然. 密植高产——我国玉米育种的最核心目标[J]. 生物技术通报, 2023, 39(8): 1–3.
- YAN J B, ZHAO J R. Dense planting for high yield – the key goal of maize breeding in China[J]. Biotechnology Bulletin, 2023, 39(8): 1–3. (in Chinese)
- [9] 东兴证券. 先正达(A04996)系列之二: 种业篇: 种业巨头的新征程[R]. 北京: 东兴证券研究所, 2022.
- [10] 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[J]. Annual Review of Genetics, 2018, 52: 421–444.
- [11] CROSSA J, PÉREZ RODRÍGUEZ P, CUEVAS J, et al. Genomic selection in plant breeding: methods, models, and perspectives[J]. Trends Plant Science, 2017, 22(11): 961–975.
- [12] WU X, LI Y, LI X. Analysis of genetic differentiation and genomic variation to reveal potential regions of importance during maize improvement[J]. BMC Plant Biology, 2015, 15: 256.
- [13] MEUWISSEN T H L, HAYES B J, GODDARD M E. Prediction of total genetic value using genome-wide dense marker maps[J]. Genetics, 2021, 157: 1819–1829.
- [14] ALEMU A, ÅSTRAND J, MONTESINOS LÓPEZ O A, et al. Genomic selection in plant breeding: Key factors shaping two decades of progress[J]. Molecular Plant, 2024, 17(4): 552–578.
- [15] ZHU W, LI W, ZHANG H, et al. Big data and artificial intelligence-aided crop breeding: Progress and prospects[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2025, 67(3): 722–739.
- [16] GAO S, XU T, RASHEED A et al. Fast-forwarding plant breeding with deep learning-based genomic prediction[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2025, <https://doi.org/10.1111/jipb.13914>.
- [17] ZHU W, HAN R, SHANG X, et al. The CropGPT project: A call for a global, coordinated effort in precision design breeding driven by AI using biological big-data[J]. Molecular Plant, 2023, 22: 1674–2052.

(责任编辑: 朴红梅)