

· 专家观点 ·

# 强化无性繁殖作物育种基础研究 保障国家粮食和重要农产品稳定安全供给

黄三文<sup>1,2</sup>

1. 中国热带农业科学院,海口 571101
2. 中国农业科学院农业基因组研究所,深圳 518000

保障粮食和重要农产品稳定安全供给始终是建设农业强国的头等大事,我国作为人均耕地和水资源短缺的国家,需要从传统农作物和畜禽资源向更丰富的生物资源拓展。无性繁殖作物是农业生产的重要构成,但由于遗传背景复杂性,给新品种选育带来了重大挑战。从源头和底层攻克无性繁殖作物育种关键科学问题,充分利用无性繁殖作物种质资源,加快培育重大突破性新品种,可为保障国家粮食和重要农产品稳定安全供给、推进乡村全面振兴和构建人类命运共同体提供强有力的科技支撑。

## 1 无性繁殖作物对于保障粮食和重要农产品稳定安全供给意义重大

无性繁殖作物主要包括两类,一类是以块根、块茎和香蕉作物(Roots, Tubers and Bananas, 并称 RTB)为代表的多样化克隆作物,主要包括马铃薯、木薯、红薯、甘蔗、香蕉及其他块根和块茎作物;另一类是使用无性(营养)繁殖进行生产种植的非 RTB 作物,主要包括果树、橡胶树、咖啡、可可等。这些作物不仅为人类提供主食和关键营养成分,还在全球经济发展和战略物资供给方面发挥着重要作用。

### 1.1 保障战略物资安全供给

橡胶树和甘蔗等无性繁殖作物是重要的战略物资。天然橡胶是世界四大工业原料之一,只能从橡胶树中大量提取,其在国防装备、航空航海、轨道交通等高端制造领域具有不可替代的优异性能。主要分布在泰国、印度尼西亚、马来西亚、科特迪瓦、巴西等热带国家,种植面积约 2.1 亿亩,产量 1 512 万吨<sup>[1]</sup>。我国是全球第一大天然橡胶消费国和第四大种植国,植胶面积 1 693 万亩,年消费量超过 600 万吨<sup>[2]</sup>,自给率仅 13%,特别是用于高端制造的特种天然橡胶完全依赖进口。甘蔗是世界上最大的糖料作物,面积约 4 亿亩,总产量约 1.8 亿吨<sup>[1]</sup>,供给着全球 79% 的食糖。我国是第一大食糖进口国、第二



**黄三文** 中国科学院院士,中国热带农业科学院院长,中国农业科学院农业基因组研究所研究员,热带作物生物育种全国重点实验室主任,国家杰出青年科学基金获得者。长期致力于植物基因组学和遗传育种研究。曾担任国家 973 项目首席科学家,主持国家自然科学基金重大项目、国家重点研发计划等多项重大科研课题。获国家自然科学基金二等奖(第一完成人)、何梁何利科学与技术进步奖、周光召基金会基础科学奖和全国创新争先奖等奖项,发表 SCI 论文 150 余篇。

大消费国及第四大生产国,甘蔗种植面积 1 930 万亩,蔗糖产量 789 万吨<sup>[3]</sup>,30% 左右依赖进口。强化天然橡胶、甘蔗等无性繁殖作物研究,对于提高全球战略物资生产水平、确保我国供给安全具有重要意义。

### 1.2 支撑全球粮食产能提升和减贫减饥

马铃薯、木薯、香蕉和红薯等无性繁殖作物是重要的粮食作物,在维持全球粮食安全与平衡方面发挥着越来越重要的作用。全球无性繁殖粮食作物收获面积约 12 亿亩,是水稻收获面积的 50%,产量近 11 亿吨,折合干物质是水稻产量的 42%<sup>[1]</sup>。马铃薯是全球第三大粮食作物,全球收获面积约 2.7 亿亩,年产鲜薯 3.75 亿吨,主要分布在亚洲、北美洲、南美洲、欧洲等地区,我国收获面积和产量均占世界四分之一,稳居世界第一<sup>[1]</sup>。木薯是世界第六大粮食作物,收获面积 4.8 亿亩,年产鲜薯 3.3 亿吨,广泛收获于尼日利亚、泰国、巴西、印度尼西亚、刚果(布)等 100 余个发展中国家或地区<sup>[1]</sup>,我国收获面积 450 万亩<sup>[2]</sup>。香(大)蕉是全球鲜果贸易量和消费量最大的水果,也是热区主要粮食,全球收获面积约 1.9 亿亩,产量 1.8 亿吨,主要集中在拉丁美洲、加勒比海地区、东南亚和非洲<sup>[1]</sup>,我国收获面积 450 万亩,产量 1 178 万吨,是世界第二大香蕉生产国<sup>[2]</sup>。

消除贫困和饥饿是全球共同关注的问题。《经

济学人影响》(Economist Impact)发布的粮食安全指数(Global Food Safety Initiative, GFSI)显示,全球粮食不安全和极不安全人口24亿<sup>[4]</sup>。饥饿人口相对集中,10.3亿人集中在亚洲东部和南部,7.84亿人集中在非洲撒哈拉以南,2.48亿人集中在拉丁美洲及加勒比海地区<sup>[5]</sup>。我国作为超大人口规模和整体生活水平不断提高的国家,粮食需求量巨大,当前人均粮食占有量493公斤,略高于全球人均467公斤,远低于发达国家的人均650公斤。2022年,我国GFSI指数为74.2,全球排名25位,与发达国家相比仍有较大差距。强化无性繁殖作物研究,有助于提升全球粮食总供给,助力消除贫困和饥饿,可通过“两种资源、两个市场”保障我国粮食安全。

### 1.3 服务乡村全面振兴和农民增收

许多无性繁殖作物是高附加值农产品,如菠萝、荔枝、葡萄等水果,咖啡、可可、茶等饮料作物,胡椒、香草兰等香料作物,大蒜、生姜等蔬菜,在支撑乡村全面振兴和农民增收中扮演着重要角色。以咖啡和菠萝为例,咖啡是世界第一大饮料作物,全球收获面积1.83亿亩,产量约1000万吨,主要分布在巴西、印度尼西亚、埃塞俄比亚、越南、墨西哥等热带国家<sup>[1]</sup>。全球咖啡市场规模超过12万亿元,我国作为新兴咖啡市场,近10年年均增长率15%,目前市场规模超过3000亿元<sup>[6]</sup>。菠萝是全球第二大热带水果,有90多个国家或地区商业化种植,全球超40%的菠萝进入了国际市场<sup>[1]</sup>。强化无性繁殖作物研究,有助于满足市场多元化农产品需求,促进当地农业农村经济发展和农民增收。

## 2 基因组学等现代生物技术为解决无性繁殖作物育种研究瓶颈问题提供了新路径

### 2.1 无性繁殖作物基因组高度杂合、自交衰退严重,育种周期长、难度大

无性繁殖作物基因组常为高度杂合的二倍体或多倍体,存在后代严重分离、无法有效聚合优良等位点等显著缺点,导致种质资源创新和新品种培育面临巨大困难。改良品种的有效途径是芽变或选择骨干亲本进行杂交,通过对后代进行筛选,最终发掘出优良单株,成为新品种。芽变获得好品种的几率非常小,杂交也需要筛选大量后代,且获得性状优良单株的机率极低,导致育种相对滞后。无性繁殖作物的育种面临着不可预测、无法迭代、难以选育突破性品种困难,其育种方式急需变革。此外,无性繁殖的种薯和种茎等容易感染病虫害、体积大、难以储存和运输,也给无性繁殖作物带来发展障碍。

以高度纯合自交系为基础的杂交育种是现代作

物育种的基础,杂交水稻、杂交玉米取得的重大成功很好地说明了这一点。但杂交育种在无性繁殖作物中应用存在很大的困难,主要有两个原因:一是自交繁殖难,大多数无性繁殖作物存在自交不亲和问题;二是无性繁殖作物基因组高度杂合,有大量有害突变,自交过程中隐性有害等位基因纯合而产生严重的自交衰退。

### 2.2 基因组设计等现代生物技术为实现无性繁殖作物种子繁殖和杂交育种开辟了新路径

以马铃薯为例,马铃薯是全球13亿人口的主粮作物,主栽品种均为四倍体,只能以薯块无性繁殖,育种进展缓慢,实现种子繁殖和杂交育种是马铃薯育种的世纪难题。马铃薯的四倍体异型杂合基因组包含大量变异,并可能增加杂种优势,杂合性也可以掩盖有害的隐性等位基因。杂交育种需要重点解决二倍体来源、自交不亲和与自交衰退等问题。前期通过基因组设计等现代生物技术,已破解了马铃薯杂交育种中的这些难题。

(1) 揭示了马铃薯基因组变异和演化规律,阐明了自交衰退的遗传机制,为实现马铃薯种子繁殖“铺平了道路”。一是从分析马铃薯基因组结构特征入手,揭示了单倍体基因组之间存在巨大差异,发现栽培种和野生种之间存在广泛的种间杂交和不完全谱系分选,系统阐明了马铃薯基因组变异和演化规律<sup>[7]</sup>;二是利用基因组编辑技术敲除了控制自交不亲和的S-RNase基因,并筛选到自交亲和的天然突变体材料,创制出马铃薯自交亲和遗传材料,从而解决了自交系培育的第一个瓶颈问题<sup>[8,9]</sup>;三是通过对二倍体马铃薯自交群体的遗传分析,发现有害突变以杂合状态镶嵌模式分布在基因组中,且具有个体特异性,阐明了自交衰退的遗传基础<sup>[10,11]</sup>。

(2) 通过基因组设计和“进化透镜”高效淘汰有害突变,培育了高度纯合的马铃薯自交系和杂交一代原型品种,为植物基因组设计提供了蓝图。一是基于对马铃薯基因组变异规律和自交衰退机理的深入研究,利用基因组大数据进行育种决策,建立了杂交马铃薯设计育种体系,在国际上率先培育了高纯度的自交系(>99%)和杂种优势显著的原型品种“优薯1号”<sup>[12]</sup>;二是通过“进化透镜”鉴定出约37万个有害突变,其中50%位于原来难以预测的非编码区域;根据有害突变图谱,创造性地提出了“不选壮苗选弱苗”的反直觉自交系选育方法,大幅提高了产量性状的选择准确率<sup>[13]</sup>。

近期,本研究团队选育了第二代杂交马铃薯优良品系“优薯2号”,在保持“优薯1号”高干物质含量、高类胡萝卜素含量的基础上,解决了薯块休眠的

问题,提高了商品性。这些成果证明了“种子化”马铃薯在理论和实践上是可行的,形成了马铃薯有性杂交育种的理论和技术体系,被评价为“马铃薯的重新发明”“是马铃薯育种的里程碑”,也为其他无性繁殖作物杂交育种提供了范式。袁隆平先生曾评价“颠覆性创新,将带来马铃薯的‘绿色革命’”。

### 3 建 议

无性繁殖作物“有性化”是作物育种的重大新方向,将对全球粮食安全产生重大且深远的影响。但无性繁殖作物的基础研究远远落后于有性繁殖作物,建议我国全面布局无性繁殖作物杂交育种的基础研究,加快培育作物育种的新“生长点”。

一是揭示无性繁殖作物基因组演化和优异性状形成规律。在全球范围内收集保护无性繁殖作物种质资源,应用多组学方法进行评价利用;开发复杂基因组分析新算法,大规模精准解析无性繁殖作物的基因组;开展无性繁殖作物的表型评价,建立基因高效发掘工具,发掘一批具有重大育种价值的自有知识产权新基因;以高质量的参考基因组和泛基因组为基础,揭示无性繁殖作物微核心种质和重大品种系谱材料的全景多维组学特征,系统研究重要基因、单倍型、结构变异、表观变异等在驯化和重大品种培育过程中的演变路径,阐明无性繁殖作物平行驯化的遗传基础。

二是加快突破无性繁殖作物前沿育种工具。优化基因编辑技术,建立引导编辑、碱基编辑等高效创制优异等位变异的技术体系,快速聚合多基因形成有利变异,引入现有育种材料;利用植物病毒载体、发根农杆菌、纳米颗粒等手段,探索基因递送新途径,研发不依赖组培和无转基因的新型基因编辑工具;建立成熟的染色体降倍和加倍技术体系,实现优异性状在不同倍性材料中的转移;突破合成生物学技术,构建高效细胞工厂和合成生物体系;突破全基因组选择育种技术,构建适合不同作物的全基因组选择育种平台,加快培育重大突破性新品种。

三是建立无性繁殖作物有性生殖研究和育种体系。建立无性繁殖作物自交可育的技术体系,为开展基于自交系的杂交育种提供可能;提出无性繁殖

作物基因组中有害突变的鉴定、清除和修复理论,建立克服自交衰退的方法体系;研究无性繁殖作物雌雄配子形成的分子机制,平衡营养生长和生殖生长的关系;通过有性生殖体系,拓宽无性繁殖作物栽培品种的遗传多样性,整合不同的育种手段选育目标性状特异的突破性种质;探索基于杂交优势育种的新方法,实现无性繁殖作物的“绿色革命”。

### 参 考 文 献

- [1] Food and Agriculture Organisation of the United Nations. FAOSTAT. [2024-03-02]. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/RL>.
- [2] 农业农村部农垦局. 全国热带、亚热带作物生产情况(2022). [2024-03-02]. <http://www.nkj.moa.gov.cn/>.
- [3] 国家统计局. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2023.
- [4] 经济学人智库. 2022年全球粮食安全指数(GFSI). [2024-03-02]. <https://impact.economist.com/>.
- [5] Food and Agriculture Organization, International Fund for Agricultural Development, World Food Programme, et al. The state of food security and nutrition in the world. [2024-03-02]. <https://www.fao.org/publications/home/fao-flagship-publications/the-state-of-food-security-and-nutrition-in-the-world/2022/en>.
- [6] International Coffee Organization. coffee report and outlook. [2024-03-02]. <https://icocoffee.org/>.
- [7] Tang D, Jia YX, Zhang JZ, et al. Genome evolution and diversity of wild and cultivated potatoes. *Nature*, 2022, 606(7914): 535—541.
- [8] Ye MW, Peng Z, Tang D, et al. Generation of self-compatible diploid potato by knockout of S-Rnase. *Nature Plants*, 2018, 4(9): 651—654.
- [9] Ma L, Zhang CZ, Zhang B, et al. A nonS-locus F-box gene breaks self-incompatibility in diploid potatoes. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 4142.
- [10] Zhang CZ, Wang P, Tang D, et al. The genetic basis of inbreeding depression in potato. *Nature Genetics*, 2019, 51(3): 374—378.
- [11] Zhou Q, Tang D, Huang W, et al. Haplotype-resolved genome analyses of a heterozygous diploid potato. *Nature Genetics*, 2020, 52(10): 1018—1023.
- [12] Zhang CZ, Yang ZM, Tang D, et al. Genome design of hybrid potato. *Cell*, 2021, 184(15): 3873—3883. e12.
- [13] Wu YY, Li DW, Hu Y, et al. Phylogenomic discovery of deleterious mutations facilitates hybrid potato breeding. *Cell*, 2023, 186(11): 2313—2328. e15.

## Strengthening the Fundamental Research on Breeding of Asexually Propagated Crops for a Reliable Supply of Food and Other Key Agricultural Products for China

Sanwen Huang<sup>1, 2</sup>

1. Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou 571101

2. Agricultural Genomics Institute at Shenzhen, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Shenzhen 518000