

作物种质资源学理论框架与发展战略

刘旭, 黎裕, 李立会, 贾继增
(中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081)

摘要: 作物种质资源是保障全球粮食安全和绿色发展的基础资源, 是农业科技原始创新与现代种业发展的物质基础。作物种质资源学是以栽培植物起源中心理论、遗传变异的同源系列定律和作物及其种质资源与人文环境及社会发展的协同演变学说为基础, 依托遗传多样性、遗传完整性、遗传特异性与遗传累积性技术体系, 研究作物及其野生近缘植物多样性与利用的科学, 涵盖作物种质资源调查、保护、评价、研究、创新与共享服务的理论、技术、管理及其体系。本文构建了作物种质资源学理论框架, 对基本概念和特征特性进行了界定, 并提出了作物种质资源学的发展战略。

关键词: 作物; 种质资源学; 理论框架; 重点任务; 发展战略

Theoretical Framework and Development Strategy for The Science of Crop Germplasm Resources

LIU Xu, LI Yu, LI Li-hui, JIA Ji-zeng
(Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

Abstract: Crop germplasm are basic resources for global food security and sustainable development and material base for original innovation of agricultural science and technology and development of modern seed industry. The science of crop germplasm resources is a scientific discipline devoting to the research on diversity and its use of crops and their wild relatives. The three basic theories of the science include the theory of centers of origin of cultivated plants, the law of homologous series in variation and the synergistic evolution theory of crop germplasm resources and cultural environments and social development. The basic attributes of the science include genetic diversity, genetic specificity, genetic integrity and genetic accumulateness. The science covers theories, technologies, management and systems involving in survey, conservation, evaluation, research, germplasm enhancement and sharing service of crop germplasm resources. This paper establishes the theoretical framework of the science of crop germplasm resources, defines basic concepts and attributes related, and proposes development strategies of the science, esp. in China.

Key words: crop; the science of crop germplasm resources; theoretical framework; priority tasks; development strategy

十九世纪中叶达尔文进化论的问世和遗传变异理论的提出, 为探索栽培作物起源拉开了序幕^[1-2]。1882年, 瑞士植物学家康德尔出版了著名的《栽培植物起源》一书, 对作物种质资源学的萌芽有重要推动作用^[3]。但作物种质资源学真正发端于

20世纪初的全球种质资源考察收集。特别是20世纪20年代, 苏联著名科学家瓦维洛夫先后到达亚、欧、美、非四大洲 60 多个国家, 收集各类作物种质资源 15 万多份, 通过深入的表型多样性和地理分布研究, 提出了“栽培植物起源中心理论”和“遗传变

收稿日期: 2022-11-27 修回日期: 2022-11-27 网络出版日期: 2022-12-12

URL: <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20221127001>

第一作者研究方向为作物种质资源, E-mail: liuxu01@caas.cn

通信作者: 刘旭, 院士

基金项目: 第三次全国农作物种质资源普查与收集行动(19200354)

Foundation project: The Third National Survey and Collection Action on Crop Germplasm Resource(19200354)

异的同源系列定律”^[4-5]。至此之后,作物种质资源研究逐步发展成为一个独立的学科。

1898年,美国农业部成立植物引种办公室。自此之后,共派出专业考察队赴世界各地收集种质资源近200余次,收集各类种质资源60万余份(其中80%以上来自国外),为其成为世界植物种质资源第一大国奠定了基础。1946年美国通过《农业市场法案》,之后科学地建立了系列区域性植物引种站,进一步加强了全球种质资源收集,种质资源研究走上正轨。

在我国20世纪前半叶,只有少数农业科学家进行一些零散的主要作物地方品种的比较、分类及整理工作。1925年,中国作物种质资源学的先驱者金善宝从全国26个省790个县,搜集到900多个小麦品种,就其形态上作多年之精密观察,1928年5月发表了《中国小麦分类之初步》。在20世纪50年代农业合作化高潮中,农业部组织全国力量进行了全国性地方品种大规模征集,共收集各类农作物品种(或品系)21万余份,当时称之为“原始材料”。中国作物种质资源学奠基人董玉琛先生于1959年从苏联留学回国后,提出“作物品种资源”的概念,中国农业科学院作物育种栽培研究所组建作物品种资源研究室,重点开展小麦、水稻、玉米、高粱、谷子品种资源工作和国外引种。1978年经原农林部批准成立中国农业科学院作物品种资源研究所,作物种质资源学科在我国进入全面发展时期^[6]。

1 作物种质资源学基本概念与作用

1.1 基本概念

作物是指由野生植物驯化而来并为满足人类需要而栽培的植物。从植物学、农艺学和遗传学角度看,作物和它的野生祖先在形态、生育习性上有很大差别,但它在遗传上与其野生祖先仍可杂交结实,在现代植物分类学上有人建议归入同一个“种”。

由C. Nägeli在1884年命名的种质(Germplasm)最先是指生物体亲代传递给子代的遗传物质,现在又拓展到包括遗传物质的载体。种质资源是指具有实际或潜在利用价值的、携带生物信息的遗传物质及其载体,又称为遗传资源,俗称品种资源。当获得相关基因信息后,种质资源可被称为基因资源。

作物种质资源其表现形态包括植株、种子与根、茎、叶、芽等无性繁殖器官和营养器官,以及愈

伤组织、分生组织、花粉、合子、细胞、染色体、染色体片段、基因组区段、基因、核酸等。“份”为作物种质资源在保护和利用中的基本单元。一份种质资源一般具有遗传结构相对稳定、区别其他资源特征显著、可自我繁殖或复制等特点;在实际工作中,作物一个品种、野生植物一个居群或亚居群或新类型就是一份种质资源。种质资源库圃中保存的种质资源份数是指保存在种质库(圃)等保护设施中具有正式编号的种质资源数量,每一份种质资源具有特定的编号以及对应的实物。

作物种质资源学是研究作物及其野生近缘植物多样性与利用的科学,涵盖作物种质资源调查、保护、评价、研究、创新与共享服务的理论、技术、管理及其体系。

1.2 作物种质资源学的作用

作物种质资源是实现农业可持续发展、保障粮食安全、绿色发展、营养健康安全以及种业安全的基础性资源,是人类社会生存与可持续发展不可或缺、生命科学原始创新、获得知识产权及生物产业的物质基础。一个国家所拥有的作物种质资源的数量和质量,特别是对其特性和遗传规律了解的广度和深度,是衡量和决定一个国家农业生物科学和作物育种水平高低的重要标志^[7]。因此,作物种质资源学的发展对国家、对人类具有极其重要的现实意义和战略意义。

1.2.1 作物种质资源是保障粮食安全的基础资源据统计,从1961年到2020年,水稻、小麦、玉米的世界平均产量分别增长了146.6%、219.1%和196.3%(分别达到4608.9 kg/hm²、3474.4 kg/hm²和5754.7 kg/hm²),遗传改良对增产起到了举足轻重的作用,种质资源在遗传改良过程中所发挥的作用至关重要。如20世纪50-60年代,国际玉米小麦改良中心(CIMMYT)利用矮秆小麦地方品种(含半矮秆基因*Rht1*),国际水稻研究所(IRRI)利用中国台湾水稻地方品种低脚乌尖(含半矮秆基因*sd1*),通过降低株高提高抗倒性和耐密性,使产量大幅度提高,从而产生了第一次“绿色革命”,使世界上饥饿人口大幅度减少^[8]。20世纪70年代中国发现水稻野生不育种质(含细胞质雄性不育基因*WA532*),其科学利用促成了中国杂交水稻的三系配套和推广,水稻单产得到大幅度提高^[9]。小麦矮孟牛和繁六、玉米黄早四等优异种质资源在育种中得到有效利用,使中国小麦和玉米育种取得了巨大突破,为保障中国粮食安全做出了重要贡献^[10-11]。

1.2.2 作物种质资源是支撑农业绿色发展的基础资源 发掘抗病抗虫、节水节肥的作物种质资源并培育资源高效的作物新品种,大幅度减少农药水肥用量,是支撑绿色发展的重要途径。例如,在一份尼瓦拉野生稻(*Oryza nivara*)材料中发现的抗水稻草丛矮缩病种质解决了70年代以来在东南亚各国流行的重大病害危害问题^[12]。20世纪90年代初期,赤霉病每年给美国小麦生产造成高达20亿美元的经济损失,后来利用中国种质资源苏麦3号(含抗赤霉病基因*Fhb1*)基本解决了小麦赤霉病所造成的危害^[13]。在美国,大豆胞囊线虫病每年造成经济损失12亿美元以上,科学家利用大豆地方品种北京小黑豆(含抗性基因*rhg1*和*Rhg4*),培育出系列抗病品种,挽救了美国大豆生产^[14]。

1.2.3 作物种质资源是保障健康安全的基础资源 挖掘优质专用优异种质资源是培育营养功能型突破性新品种、提升人民健康水平的基础。例如,发现玉米*Opaque-2*高赖氨酸基因后,已培育出一批比普通玉米杂交种赖氨酸含量高1倍的杂交种,色氨酸含量也有提高,显著提升了玉米食用和饲用价值^[15]。CIMMYT鉴定出锌含量高达96 mg/L的热带玉米种质,育成的11个高锌玉米品种部分解决了拉丁美洲锌缺乏的“隐性饥饿”问题^[16]。中国从上千份燕麦种质资源中鉴定筛选并选育出富含亚油酸和 β -葡聚糖功能成分的专用品种,证明有明显的降脂和调节血糖的功效。

1.2.4 作物种质资源是提升种业竞争力的基础资源 品种培育是种业发展的核心,而种质资源可看作是品种培育的关键基础。没有好的种质资源,品种培育就不可能成功^[17],种业创新就难以为继。科迪华等跨国公司的玉米杂交种在国际种子市场占有率有重要地位的主要原因就是它掌握了世界上大部分玉米种质资源,并且对其进行了深度挖掘与利用。此外,由于不断发现植物在医药、能源、人居、燃料、娱乐和文化等领域的新用途,创制专用的作物新品种成为多元消费升级的必然要求,因此作物种质资源在产业拓展中也具有十分重要的作用。

1.2.5 作物种质资源学的发展是作物种质资源保护与利用的重要保障 作物种质资源学主要聚焦作物及其野生近缘植物多样性及其利用。由于作物关乎农业、林业、渔业、牧业甚至工业的可持续发展,对多样性进行保护和开发利用关乎人类衣食住行,关乎人民对美好生活的向往,不仅关系到当下

的社会经济发展,而且关系到子孙后代的生存与发展。作物种质资源学通过解决种质资源保护与利用中的重大科学问题和技术难题,实现种质资源安全保护和高效利用,已成为保障粮食安全、支撑绿色发展和保障健康安全的科学保障。

2 作物种质资源学基本原理

栽培作物由野生植物驯化而来。在作物被驯化后,人类会将其带到新的地区进行种植。但由于新地区的环境条件(如温度、降雨量、日照、土壤、病虫害等)与起源地往往不同,因此通过自然选择与人工选择,新的生态类型的种质资源就会产生。同时,不同地区的居民可能有不同的生活、文化或宗教习俗,农民通过人为的有意识或无意识选择,也可形成有特殊用途的地方品种,甚至不同地区的农民有不同的作物栽培(如播种、收获等)和收后处理(如加工、贮藏、运输等)方法和习惯,也会由此带来丰富多彩的不同的地方品种类型。在孟德尔发现三大遗传学定律后,以专业作物育种家为主力军的科学育种成为品种改良的主要手段,其结果是作物改良速度大幅度加快,创制了适合不同目的和不同环境的新种质和新品种。由此可见,作物种质资源形成过程中,发生了三大关键事件:一是形成栽培作物(起源与驯化),二是形成地方品种(传播和农民选择),三是形成现代品种(引种与遗传改良)。在系统研究作物种质资源形成过程的基础上,栽培植物起源中心理论、遗传变异的同源系列定律、作物及其种质资源与人文环境及社会发展的协同演变学说成为作物种质资源学的理论支撑。

2.1 栽培植物起源中心理论

瑞士植物学家康德尔最早提出栽培植物都有起源中心,并认为大部分栽培植物起源于旧大陆^[3]。前苏联遗传学家瓦维洛夫1926年提出的栽培植物起源中心理论影响很大,认为世界上存在8个作物起源中心(包括中国、印度、中亚、近东、地中海地区、埃塞俄比亚、墨西哥南部-中美、南美),外加3个亚中心(印度-马来亚、智利、巴西-巴拉圭),这些中心有作物的野生近缘种存在,可称之为“原生起源中心”。瓦维洛夫还发现在远离原生起源中心的地方有时也会存在一些原生起源中心没有的变异,遗传多样性也很丰富,称之为“次生起源中心”^[4]。之后,作物起源中心理论得到不断修正,较为著名的包括1975年瓦维洛夫的学生茹科夫斯基和荷兰育种家泽文等在瓦维洛夫8个起源中心基础上增加了

4个起源中心,称之为“栽培植物基因大中心”,认为全球有12个大中心^[18]。美国遗传学家哈兰1971年认为瓦维洛夫提出的作物起源中心实际是农业发祥最早的地区,遗传多样性中心不一定是起源中心,有些物种可能起源于几个不同的地区,因此在1971年提出了“作物起源的中心与泛区理论”(近东、中国、中美洲三个中心和非洲、东南亚、南美三个泛区)^[19]。英国育种家郝克斯认为作物起源中心应该与农业起源地区区别开来,1983年提出了一套新的作物起源中心理论,在该理论中把农业起源地称为核心中心,把作物从核心中心传播出来后形成的类型丰富地区称为多样性地区^[20]。

虽然栽培植物起源中心理论(The Theory of Centers of Origin of Cultivated Plants)存在不同的说法,但共同点是作物驯化发生在世界上不同地方,并且有聚集现象,但作物多样性中心不一定是起源中心。作物起源中心理论可在理论上指导作物种质资源的调查与收集。例如,在作物起源中心和多样性中心开展深度和系统的调查收集,更容易获得多样性很高的原始种质资源。

2.2 遗传变异的同源系列定律

1922年瓦维洛夫提出遗传变异的同源系列定律(The Law of Homologous Series in Variation),认为在同一个地理区域,在不同的作物中可以发现相似的变异,即在某一地区如果在一种作物中发现存在某一特定性状或表型,那么也就可以在该地区的另一种作物中发现同一种性状或表型^[5]。例如,喜马拉雅山区域的鹰嘴豆、蚕豆等作物都具有小粒小荚特性,而地中海各国的亚麻、小麦、大麦都具有大粒的特性。现代比较基因组学和分子生物学研究结果也支持该理论,不同物种存在着直向同源基因,这些基因在同一环境下受到相同或相似的自然选择,从而产生了类似的表型^[21]。

遗传变异的同源系列定律现已有所拓展,即不仅在同一生态区不同物种呈现趋同进化现象,而且在不同生态区同一物种则呈现趋异进化现象。趋同进化是指不同物种在进化过程中,由于适应相同或相似的环境而呈现出形态、生理和分子水平的相似性^[22],而趋异进化则指来源于同一物种的不同类群,由于长期生活在不同的环境,产生了多个方向的变异特征或不同的生态型,甚至分化成多个在形态、生理上各不相同的种^[23]。趋同进化和趋异进化是自然界生物进化的普遍形式,是作物种质资源多样性产生的基础。

2.3 作物及其种质资源与人文环境及社会发展的协同演变学说

作物及其种质资源与人文环境的协同演变学说(Synergistic Evolution Theory of Crop Germplasm Resources and Cultural Environments)由刘旭等^[24]提出,是关于作物及其种质资源与人文环境相互影响、相互作用和相互发展的理论。一方面,在一个特定环境中种植不同的作物或不同类型的作物会导致形成相应的饮食习惯与人文环境;另一方面,饮食习惯与人文环境又会对作物及其种质资源产生深刻影响,甚至可以引领其演变。中国传统饮食文化习用体系中,以糯性为核心、以蒸煮为主体、以口味为特色、以多用为拓展等内容,可完美体现作物及其种质资源与人文环境协同演变的关系。

作物驯化开始于1万年前,在此后的传播和种植过程中,农民根据表型进行选择,从而形成丰富多彩的地方品种,这一阶段的种质资源与社会发展开始体现出协同演变的特征,但还不太明显。从19世纪末20世纪初开始,孟德尔遗传学、数量遗传学、基因组学、分子生物学等理论和方法用于遗传改良,育种效率逐步得到提高,品种应用速度加快,逐步能满足当时社会发展的需求。由于社会发展在不同时期不同阶段给农业特别是作物生产提出的要求不同,品种培育目标也在不断变化,例如先高产、后优质、再绿色高效,其间由于生产条件的改善(如化肥的施用和机械化的普及),为了防止倒伏,需要实现作物的矮秆化,由此形成的种质资源体现出与社会发展协同演变的典型特征。另一方面,由于科技水平的不断进步,遗传改良技术迭代升级,染色体工程、杂种优势利用、分子标记等技术得到普及,近年来基因编辑、全基因组选择、智能设计和合成生物学技术的创新应用,不仅使现有自然变异可得到快速高效聚合,而且可精准创制自然界本不存在的遗传变异,基因资源精准设计与创制成为未来种质创新的重要途径,这也是种质资源与社会发展协同演变的深度体现。

因此,作物及其种质资源与人文环境及社会发展的协同演变学说对现代作物种质资源研究和遗传育种均有指导作用,如在作物种质资源保护和利用中要强化地方品种的安全保护与高效利用,要重视收集保护现代育种进程中创制的育种材料和品种,以及重视农民权利与作物传统生境保护等。

3 作物种质资源的特性特征

3.1 作物种质资源的基本特性

作物种质资源的基本特性包括遗传多样性(Genetic Diversity)、遗传特异性(Genetic Specificity)、遗传完整性(Genetic Integrity)和遗传累积性(Genetic Accumulativeness),其中遗传多样性是核心与基础。遗传多样性和遗传特异性分别从总体和个体角度来描述遗传变异的总体情况和特殊情况,个体的遗传特异性构成整体的遗传多样性,这是调查与评价的主要对象;遗传完整性是种质资源收集和保护的根,要求不能丢失遗传多样性;遗传累积性是种质创新的根,要求实现原有遗传特异性的最优组合后创造新的特异性。

3.1.1 遗传多样性 广义的遗传多样性指地球上生物所携带的各种遗传信息的总和,而狭义的遗传多样性主要是指生物种内遗传变异^[25]。遗传多样性可用遗传变异程度的高低来衡量,遗传变异是生物体内遗传物质发生变化而造成的一种可以遗传给后代的变异。因此,遗传多样性可从全基因组、基因组区段、基因等不同水平来进行评估。近年来发现,还有一种包括DNA与组蛋白甲基化、乙酰化等的表观遗传变异,基因表达发生改变但不涉及DNA序列的变化。需要注意的是,由个体构成的群体或居群是进化的基本单位,因此遗传多样性不仅包括遗传变异大小,还包括遗传变异分布格局即群体遗传结构。

若干研究表明,从野生近缘植物到地方品种再到现代品种,遗传多样性呈降低趋势^[26]。一般来说,野生近缘植物和地方品种的多样性很高,特别是对玉米和珍珠粟等异花授粉作物来说地方品种的多样性非常高,水稻、小麦和大麦等自花授粉作物、马铃薯和香蕉等营养繁殖作物的单个品种之间变异相对较小但品种数量极多。但需要注意的是,野生近缘植物的遗传多样性也有可能降低,其原因在于生境发生改变;由于广泛种植现代品种,很多地区的地方品种在生产上逐步消失,生产中应用品种的遗传多样性大幅度降低;现代品种遗传一致性往往有增加趋势,特别是如果重大品种的衍生品种过多,遗传多样性会大幅度降低。

遗传多样性是作物种质资源保护与利用的基石,开展遗传多样性研究贯穿种质资源收集、保护、鉴定与创新全链条,其研究对象是全域范围内种质资源、库圃保存的种质资源,以及能代表库存

资源的核心种质等。

3.1.2 遗传特异性 不同种质资源之间,甚至同一份种质资源(如地方品种)不同个体之间,它们在遗传组成或基因组构成上均可能存在差异。遗传特异性是指不同种质资源针对不同目的基因具有的等位变异或等位变异组合,并进而影响到外在的性状表型。然而,任何一种表型均是基因与基因之间、基因与环境之间互作的结果,在评估遗传特异性的同时,有必要阐明基因与基因、基因与环境的互作特点,从而深刻理解从基因型到表型的内在关系。遗传特异性与遗传多样性既有联系又有区别,二者有内涵上的显著差别,前者强调个体,后者强调总体。

种质资源收集保护的实质是对有遗传特异性的不同种质资源进行有效保护^[27];鉴定评价的实质是鉴别种质资源的遗传特异性,筛选出在特定环境下单一或者多个目标性状突出的优异种质^[28];种质创新的实质是转移特异资源中的突出性状到主栽品种中,并得到进一步改良和利用。

3.1.3 遗传完整性 遗传完整性指种质资源收集或保护对象携带的所有遗传信息^[27]。一般来说,作物的野生近缘植物和地方品种具有遗传异质性特征,即野生近缘植物居群间和居群内,或地方品种的个体间,存在遗传变异,在遗传上处于杂合状态,因而在种质资源收集过程中科学采样至关重要,必须保证所获得样品的遗传多样性能代表保护对象的遗传多样性,即保持其遗传完整性^[29]。

在种质资源异生境保护中,不管保护时间有多长、繁殖更新怎么做,要求受到保护的种质资源在遗传上没有变化,至少基因组突变在合理的范围里,没有发生显著的遗传漂变。对于原生境保护的种质资源来说,野生近缘植物或地方品种与环境的共进化是必然的,也会出现一定程度的基因组突变,但不能因人为或自然灾害出现显著的遗传完整性下降(如部分居群丢失)。因此,为确保遗传完整性,在种质资源收集前,需开展种质资源广泛调查,研究科学的采样技术方法;在种质资源保护中,需开展有效保护技术研究,建立高效的监测检测与预警技术,研发科学的繁殖更新技术方法,从而实现种质资源的有效而安全的保护^[30]。

3.1.4 遗传累积性 在植物基因组中,一般有5万~6万个基因,在遗传改良(包括种质创新和育种两个阶段,前者也称作前育种)时,对这些基因的不同等位基因进行广泛重组和聚合,即遗传累积性。针对

控制重要性状的绝大多数基因,都能找到或获得满足人类不同需求的所谓“有利的”等位基因。种质创新的实质就是使有利等位基因发生不同程度的聚合,在保持优良性状的同时,通过消除遗传累赘来克服不良性状,如果要转移来自野生近缘种的外源基因,必须首先攻克杂交不亲和与后代不育两大难题。对同一性状来说,不同有利等位基因的聚合产生累积效应,对不同性状来说,不同等位基因的聚合产生综合效应。

强化重要性状基因资源挖掘,针对关键基因发掘和创造优异等位基因或单倍型,最终实现等位基因最优组合的智能设计,创制出新型基因资源和优异种质,是高效利用种质资源的重要途径^[31]。

3.2 作物种质资源的外延特征

作物种质资源安全保护是手段,有效利用是目的。与种质资源利用有关的有五个外延特征:种质资源可共进化,这是种质资源原生境保护和农田保存的基础,也是不定期调查收集的理论指引;种质资源可更新,这是种质资源实物共享利用的基础;种质资源大数据可增值,这是强化种质资源信息共享利用的基础;由于种质资源可价值化、可法制化,因此可对种质资源进行价值评估,依法管理。

3.2.1 可共进化 种质资源原生境保护是指作物野生近缘种在原栖息地不受外界人为干扰状态下的保护方式,种质资源农田保存是指作物地方品种在原产地农田中由农民自繁自育进行保护的方式^[27]。在这两种方式下作物种质资源均受到自然选择,农田保存方式下还受到人工选择,作物中由于选择而产生的自然突变会不断积累,种质资源与环境呈现共进化现象^[32]。种质资源的可共进化强调的是变,即在保护过程中遗传多样性有提高或降低,会出现携带适应自然环境或人文环境的表型,这是原生境保护、农田保存和不定期调查收集的理论基础。

3.2.2 可更新性 种质资源异生境保护主要是保存种子、植株、试管苗、组织或器官(如块根、块茎、鳞茎、茎尖、休眠芽、花粉、种胚等),这些种质可通过有性繁殖、营养繁殖或组织培养等方式产生后代的新个体,从而扩大个体数量,满足后续种质分发的需求。种质资源的可更新性强调的是不变,即在更新过程中遗传多样性不能提高和降低,确保种质资源的遗传完整性,这是种质资源共享利用的前提^[27]。

3.2.3 可增值性 在种质资源收集、保护、鉴定、研究和创新过程中,会产生创新种质与海量信息。种

质资源的可增值性指种质资源通过种质创新和海量信息形成的大数据具有强大的增值功能。但要指出的是,种质资源大数据本身不能产生价值,只有对大数据进行科学有效的专业化分析和深度挖掘,揭示各个变量之间可能的关联,解读大数据分析的结论,制定出解决问题的方案,才能彰显数据价值^[33]。

3.2.4 可价值化 可价值化是指可采用经济学方法对作物种质资源进行价值评估^[34]。通过构建作物种质资源价值模型,对作物种质资源的使用价值和非使用价值进行系统评估,突出其对社会经济和人文科技发展的重要作用;通过建立和完善作物种质资源产权制度,加强对作物种质资源基本权、知识产权和财产权的认知、实施和管理,以维护国家利益和作物种质资源安全;通过价值化的市场运作,合理配置各种优异资源,最大限度地发挥作物种质资源的效用,提高种质资源利用效率,促进种业创新发展,保障国家粮食安全。

3.2.5 可法制化 1992年《生物多样性公约》、2001年《粮食和农业植物遗传资源国际条约》,以及2022年3月1日实施的《中华人民共和国种子法》规定,国家对种质资源享有主权。明确了种质资源中携带有什么样的基因/等位基因或找到其标记,在此基础上创制出新的基因资源,均可获得专利或植物新品种权等知识产权。由此可见,种质资源管理实现法制化,对促进种质资源的有效保护和合理利用具有重要意义^[35]。

4 作物种质资源学发展战略

4.1 总体思路

围绕农业科技原始创新和现代种业发展的重大需求,以“广泛调查、全面保护、充分评价、深入研究、积极创新、共享利用”为指导方针,以安全保护和高效利用为核心,突出系统性、前瞻性和创新性,统筹规划,分步实施,集中力量攻克种质资源保护和利用中的重大科学问题和关键技术难题,进一步增加我国种质资源保存数量、丰富多样性,发掘创制优异种质和基因资源,为选育农作物新品种、发展现代种业、保障粮食安全提供物质和技术支撑。

4.2 基本原则

4.2.1 坚持异生境保存与原生境保护相结合 加强农作物种质资源库(圃)保存,提升种质资源保存水平;开展原生境保护,对大宗农作物野生近缘植物以及具有重要经济价值的野生种质资源集中分

布区进行重点保护。

4.2.2 坚持保护与利用相结合 加强农作物种质资源收集保护与深度发掘的协同研究,推进种质资源在保护中利用、在利用中保护的协调发展,切实发挥种质资源在解决农业科技重大问题中的支撑作用。

4.2.3 坚持能力建设与管理创新相结合 完善农作物种质资源保护与利用条件平台建设,健全种质资源收集、保存、鉴定、创制等管理制度,创新绩效评价与人才激励机制,切实提高农作物种质资源保护与利用的能力和效率。

4.2.4 坚持资源共享与产权保护相结合 建立农作物种质资源登记制度,实行差别化管理、权益化激励。对公共资源依法向全社会开放,对创新资源依规赋权交易,按规定或约定实现有效共享。

4.2.5 坚持政府主导与多元投入相结合 建立以政府资金主导,社会资金广泛参与的多元化投入机制,为种质资源保护与利用提供稳定支持。

4.3 发展目标

围绕国家重大战略需求,建立完善农作物种质资源保护与管理服务创新体系;加强农作物种质资源收集保存,资源保存总量跃居世界第一,使我国珍稀、野生资源得到有效保护;挖掘一批有重要育种利用价值的优异种质与基因资源,创制一批育种急需的新种质;全面构建由种质资源保存库(圃)、原生境保护点、鉴定评价(分)中心、信息网络平台组成的全国农作物种质资源研究与共享利用平台;打造并稳定一支高素质的人才队伍。到2035年,建成世界一流的农作物种质资源保护、研究与利用体系,全面支撑我国的新型育种体系和现代种业;到2050年,使我国由种质资源大国转变成为基因资源强国,为农业农村现代化和社会经济发展提供有力保障。

4.4 重点任务

“广泛调查、全面保护、充分评价、深入研究、积极创新、共享利用”是作物种质资源工作的二十四字方针,也是种质资源学研究的重点任务。作物种质资源研究可分为基础性工作、应用基础研究、基础研究等相互衔接、相互融合的三个部分。作物种质资源学的理论与实践贯穿于作物种质资源工作全链条,解决种质资源保护利用的重大科学问题、攻克关键技术难题以及推动工作体系正常运行是其核心任务。

4.4.1 广泛调查 广泛调查指开展作物种质资源的全面和深入调查,并采集样本。调查的目的是探

明作物及其种质资源的种类、分布区域与多样性状况,揭示其时空动态变化规律,并提出总体保护方案;种质资源普查属于调查的一种方式,指针对某一特定行政或地理区域上门登记相关信息。种质资源收集的有三类,一是为研究遗传多样性进行样本收集;二是为保护和利用种质资源进行的广泛收集;三是针对珍稀濒危临亡种质资源进行抢救性收集。收集包括特定区域内的种质资源收集,以及从其他国家的种质资源引进。在种质资源调查的同时,可从农民或资源拥有者手中征集种质资源,或从现场采集样本(特别是从自然环境中采集样本对野生近缘植物保护尤为重要)。

作物种质资源调查与收集工作是在多样性和共进理论指导下,在全面掌握保存资源及其数据的基础上,开展系统调查、了解农民认知,并实地取样或异地引进,实现保存种质资源数量与质量的同步提升。信息、数据资料的完整性与可信性是保障农作物种质资源收集质量的核心要素。

未来的重点任务与研究方向:全面收集(引进)向针对性收集(引进)转变,其中,国内应收尽收,国际广泛合作;科学取样策略研究;新物种、新类型的发现与研究;物种及其种群分布规律与起源演化研究;作物种质资源多样性富集中心与演化趋势研究;农民、环境与作物种质资源协同演变规律和有效保护机制研究;开展种质资源登记。

4.4.2 全面保护 全面保护指在广泛调查的基础上,提出作物种质资源整体保护总体方案,进行顶层设计和科学规划,采用各种保护方式和技术对野生近缘植物、地方品种、创新种质、育种品系、育成品种、育成材料等所有种质资源类型进行安全保护,做到应保尽保。

作物种质资源保护是以遗传多样性和完整性理论为指导,在编制种质资源目录与创建数据库基础上,采取科学的方法,保障存入库(圃)种质资源有足够生活力和原始种性。作物种质资源收集与保护的核心目的,一是预防在自然环境下物种、品种等各类种质资源灭绝;二是当发生重大灾难或特殊需求时,人类可以从种质库(圃)中重新获取战略储备。

未来的重点任务与研究方向:种质资源安全保护的生理生化与遗传基础研究;种质资源保护的数量与质量同步提升规律研究;延长种质资源寿命的保存技术研究;种质资源保护和更新过程中的遗传漂变研究;种质资源保护预警技术研究;不同保存/

保护方式的协同效应研究;开展国家级种质资源保护单位建设。

4.4.3 充分评价 充分评价指在对种质资源重要性状表型和基因型进行鉴定的基础上,对种质资源进行全面充分评价,科学评估种质资源遗传多样性和遗传特异性,挖掘出目标性状突出的优异种质资源。鉴定和评价在含义上有所区别,一般来说,鉴定是指对单一性状或基因组区段/基因进行评判,而评价是指围绕该性状或基因组区段/基因还要做多份种质资源进行综合分析,或对多个性状或多个基因组区段/基因进行整合分析。鉴定评价包括两大类对象,第一类是对表型进行鉴定评价,第二类是对基因型进行鉴定评价。

充分评价是在遗传多样性和特异性理论指导下,科学评判每份种质资源实际或潜在利用价值,并为在基础研究或应用研究中如何实现其利用价值提供科学依据。种质资源的精准鉴定是指“精”选目标性状突出的种质资源,通过建立大群体、多生态区、多年、全生育期表型与全基因组扫描相结合的综合鉴定技术,“准”确评估并提出以遗传构成为基础的有效利用技术路径;简单地说,就是“精”选鉴定材料,“准”确评判可利用性。精准鉴定的核心是揭示优异目标性状/基因与产量等其他综合性状/基因间的协调表达网络,打通种质资源与育种密切协作与有效利用的最后一公里。

未来的重点任务与研究方向:全面鉴定向精准鉴定转变;智能化鉴定评价关键技术研发;规模化精准鉴定,深度发掘优异资源/基因/等位基因;重要目标性状与综合性状协调表达及其遗传基础研究;地方品种、骨干亲本、特殊类型种质资源遗传构成与利用效应基础研究。

4.4.4 深入研究 广义的深入研究指应用现代遗传学、生理生化、组学和分子生物学等理论和方法,攻克种质资源收集、保护、鉴定、创新等过程中涉及的科学问题和技术难题;狭义的深入研究则指基因资源挖掘,把种质资源转变为基因资源,这是未来种质资源深入研究的核心。应用系统生物学理论和方法整合分析多组学大数据的种质资源全景组学研究,是解决种质资源保护与利用中的重大科学问题的重要途径。

未来的重点任务包括:(1)开展农作物起源与种质资源多样性研究,阐明野生种、地方品种和育成品种的演化关系,以及地方品种和骨干亲本形成的遗传基础。(2)开展种质资源基因组结构多样性

和功能多样性研究,构建遗传变异图谱。(3)加强基因发掘,发掘重要性状新基因并对其进行功能分析,对控制目标性状的基因组区段进行作图、进一步的精细定位、基因克隆、功能验证等是基因发掘的重要内容。(4)强化等位基因挖掘,阐明目标性状基因在种质资源中的等位变异大小、分布及其遗传效应,挖掘有利等位基因或单倍型,并提出高效利用方案。需要指出的是,基因资源发掘的核心任务是等位变异挖掘,但其基础是基因发掘。

4.4.5 积极创新 种质创新是以遗传累积与基因重组理论为指导,利用各种自然或人工变异,创造新作物、新类型、新材料的科研活动。通过远缘杂交、物理或化学诱变、现代生物技术等途径,向栽培种和主推品种引入新基因且稳定表达。种质创新的核心是为基础研究或应用研究提供自主知识产权的核心材料。针对育种而言,必须是育种家手里没有的,且能够极大拓宽育种的基因源基础。种质创新既是一个原始创新过程,也是一个优异基因累积与重组过程,能够影响明天和引领后天的种业发展。

未来的重点任务与研究方向:规模化种质创新新技术体系研发;基因组/基因重组的遗传与生物学效应研究;创新目标性状/基因的高效检测/追踪与遗传效应研究;创新目标性状与综合性状协调表达及其育种效应研究。

4.4.6 共享利用 种质资源的共享利用是在资源可更新、可增值基础上,依据国家相关法律法规,种质资源工作者从国家库圃保存的种质资源中向全社会提供公共产品和公益服务。信息共享和种质分发是共享利用的主要技术途径,核心是保障供给。用户得到种质资源后,依据其目的开展相关科学研究,其利用效果应该反馈至共享服务平台,以便提高优异种质利用效率。

未来的重点任务与研究方向:建立完善种质资源高效分发体系,提高种质资源利用效率;围绕粮食安全、健康安全、产业安全、生态安全以及人民对美好生活向往、乡村振兴和科学发展的不同需求,逐步实现广泛利用向定向利用转变,开展定向服务;知识产权保护与农民权益保护研究;完善国家农作物种质资源共享利用体系与管理体制。

参考文献

- [1] 达尔文.物种起源.谢蕴贞译.北京:科学出版社,1972
Darwin C. On the origin of species. Translated by Xie Yunzhen.

- Beijing: Science Press, 1972
- [2] 达尔文. 动物和植物在家养下的变异. 叶笃庄, 方宗熙译. 北京: 科学出版社, 1957
- Darwin C. The variation of animals and plants under domestication. Translated by Ye Duzhuang and Fang Zongxi. Beijing: Science Press, 1957
- [3] de Candolle A. Origin of cultivated plants. LLC: Kessinger Publishing, 2006
- [4] Vavilov N I. Centres of origin of cultivated plants. Bulletin of Applied Botany of Genetics and Plant Breeding, 1926, 16: 1-248
- [5] Vavilov N I. The law of homologous series in variation. Journal of Genetics, 1922, 12(1):47-89
- [6] 刘旭, 李立会, 黎裕, 方涛. 作物种质资源研究回顾与发展趋势. 农学学报, 2018, 8(1):1-6
- Liu X, Li L H, Li Y, Fang W. Crop germplasm resources: Advances and trends. Journal of Agriculture, 2018, 8(1):1-6
- [7] 娄希祉, 陈叔平, 方嘉禾, 郑殿升, 胡荣海. 作物种质资源. 农学基础科学发展战略. 中国农业科学院编著. 中国农业科技出版社, 北京, 1993:1-20
- Lou X Z, Chen S P, Fang J H, Zheng D S, Hu R H. Crop germplasm resources. Development Strategies for Agricultural Sciences, edited by Chinese Academy of Agricultural Sciences. Beijing: China Agricultural Science and Technology Publishing House, 1993:1-20
- [8] Khush G S. Green revolution: The way forward. Nature Review Genetics, 2001, 2:815-822
- [9] Ma G H, Yuan L P. Hybrid rice achievements, development and prospect in China. Journal of Integrative Agriculture, 2015, 14(2):197-205
- [10] 何中虎, 夏先春, 陈新民, 庄巧生. 中国小麦育种进展与展望. 作物学报, 2011, 37(2):202-215
- He Z H, Xia X C, Chen X M, Zhuang Q S. Progress of wheat breeding in China and the future perspective. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(2):202-215
- [11] 曾三省, 任蕤, 刘新芝. 黄早四在我国玉米育种和生产中的重要地位. 玉米科学, 1996, 4(1):1-6
- Zeng S X, Ren R, Liu X Z. The important position of Huangzaosi in maize breeding and production in China. Maize Science, 1996, 4(1):1-6
- [12] Beachell H M, Khush G S, Aquino R C. IRRRI's international program // Rice Breeding. LosBanos, Philippines: IRRI, 1972: 89-106
- [13] Ma Z, Xie Q, Li G, Jia H, Zhou J, Kong Z, Li N, Yuan Y. Germplasms, genetics and genomics for better control of disastrous wheat Fusarium head blight. Theoretical and Applied Genetics, 2020, 133(5):1541-1568
- [14] Mitchum M G. Soybean resistance to the soybean cyst nematode *Heterodera glycines*: An update. Phytopathology, 2016, 106:1444-145
- [15] Sofi P A, Wani S A, Rather A G, Wani S H. Quality protein maize (QPM): Genetic manipulation for the nutritional fortification of maize. Journal of Plant Breeding and Crop Science, 2009, 1(6):244-253
- [16] Prasanna B M, Palacios-Rojas N, Hossain F, Muthusamy V, Menkir A, Dhliwayo T, Ndhlela T, San Vicente F, Nair S K, Vivek B S, Zhang X, Olsen M, Fan X. Molecular breeding for nutritionally enriched maize: Status and prospects. Frontiers in Genetics, 2020, 10:1392
- [17] Hallauer A R, Carena M J, Filho J B M. Quantitative genetics in maize breeding. New York: Springer, 1988
- [18] Zeven A C, Zhukovsky P M. Dictionary of cultivated plants and their centers of diversity. Wageningen, the Netherlands: PUDOC, 1975
- [19] Harlan J R. Agricultural origins: Centers and noncenters. Science, 1971, 174:468-474
- [20] Hawkes J W. The Diversity of Crop Plants. Cambridge: Harvard University Press, 1983
- [21] Chen W, Chen L, Zhang X, Yang N, Guo J, Wang M, Ji S, Zhao X, Yin P, Cai L, Xu J, Zhang L, Han Y, Xiao Y, Xu G, Wang Y, Wang S, Wu S, Yang F, Jackson D, Cheng J, Chen S, Sun C, Qin F, Tian F, Fernie A R, Li J, Yan J, Yang X. Convergent selection of a WD40 protein that enhances grain yield in maize and rice. Science, 2022, 375: eabg798
- [22] Donald C M, Hamblin J. The convergent evolution of annual seed crops in agriculture. Advances in Agronomy, 1983, 36: 97-143
- [23] Pressoir G, Berthaud J. Population structure and strong divergent selection shape phenotypic diversification in maize landraces. Heredity, 2004, 92:95-101
- [24] 刘旭, 李立会, 黎裕, 谭光万, 周美亮. 作物及其种质资源与人文环境的协同演变学说. 植物遗传资源学报, 2022, 23(1):1-11
- Liu X, Li L H, Li Y, Tan G W, Zhou M L. Synergistic evolution theory of crop germplasm resources and cultural environments. Journal of Plant Genetic Resources, 2022, 23(1): 1-11
- [25] Ellegren H, Galtier N. Determinants of genetic diversity. Nature Reviews Genetics, 2016, 17: 422-433
- [26] 黎裕, 李英慧, 杨庆文, 张锦鹏, 张金梅, 邱丽娟, 王天宇. 基于基因组学的作物种质资源研究: 现状与展望. 中国农业科学, 2015, 48(17):3333-3353
- Li Y, Li Y H, Yang Q W, Zhang J P, Zhang J M, Qiu L J, Wang T Y. Genomics-based crop germplasm research: Advances and perspectives. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(17): 3333-3353
- [27] 辛霞, 尹广鹏, 张金梅, 陈晓玲, 何娟娟, 刘运霞, 黄雪琦, 卢新雄. 作物种质资源整体保护策略与实践. 植物遗传资源学报, 2022, 23(3): 636-643
- Xin X, Yin G K, Zhang J M, Chen X L, He J J, Liu Y X, Huang X Q, Lu X X. Strategies and practices of the integrated conservation system for crop germplasm resources. Journal of Plant Genetic Resources, 2022, 23(3):636-643
- [28] 王晓鸣, 邱丽娟, 景蕊莲, 任贵兴, 李英慧, 李春辉, 秦培

- 友, 谷勇哲, 李龙. 作物种质资源表型性状鉴定评价: 现状与趋势. 植物遗传资源学报, 2022, 23(1): 12-20
- Wang X M, Qiu L J, Jing R L, Ren G X, Li Y H, Li C H, Qin P Y, Gu Y Z, Li L. Evaluation on phenotypic traits of crop germplasm: Status and development. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2022, 23(1): 12-20
- [29] 高爱农, 杨庆文. 作物种质资源调查收集的理论基础与方法. 植物遗传资源学报, 2022, 23(1): 21-28
- Gao A N, Yang Q W. Theory and methods for survey and collection of crop germplasm resources. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2022, 23(1): 21-28
- [30] Astley D. Preservation of genetic diversity and accession integrity. *Field Crops Research*, 1992, 29(3): 205-224
- [31] 武晶, 黎裕. 基于作物种质资源的优异等位基因挖掘: 进展与展望. 植物遗传资源学报, 2019, 20(6): 1380-1389
- Wu J, Li Y. Mining superior alleles in crop germplasm resources: Advances and perspectives. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2019, 20(6): 1380-1389
- [32] Pankin A, von Korff M. Co-evolution of methods and thoughts in cereal domestication studies: A tale of barley (*Hordeum vulgare*). *Current Opinion in Plant Biology*, 2017, 36: 15-21.
- [33] 刘海洋, 方泐, 陈彦清, 曹永生. 区块链在农作物种质资源数据管理中的应用初探. 农业大数据学报, 2019, 1(2): 105-113
- Liu H Y, Fang W, Chen Y Q, Cao Y S. Preliminary study on the application of blockchain in data management of crop germplasm resources. *Journal of Agricultural Big Data*, 2019, 1(2): 105-113
- [34] 朱彩梅, 张宗文. 作物种质资源的价值及其评估. 植物遗传资源学报, 2005, 6(2): 236-239
- Zhu C M, Zhang Z W. Review of research on valuation of crop germplasm resources. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2005, 6(2): 236-239
- [35] 武晶, 郭刚刚, 张宗文, 王述民. 作物种质资源管理: 现状与展望. 植物遗传资源学报, 2022, 23(3): 627-635
- Wu J, Guo G G, Zhang Z W, Wang S M. Management of crop germplasm resource: Advances and perspectives. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2022, 23(3): 627-635