



从种质创新到株型优化: 中国超级稻三十年育种实践与启示

赵慧博^{1,2†}, 彭友林^{3†}, 杨宇球¹, 张光恒^{1,2*}, 钱前^{1,2,3*}

1. 中国水稻研究所水稻生物育种全国重点实验室, 杭州 310006

2. 三亚中国农业科学院国家南繁研究院, 三亚 572024

3. 崖州湾国家实验室, 三亚 572024

† 同等贡献

* 联系人, E-mail: qianqian188@hotmail.com; zhangguangheng@126.com

收稿日期: 2025-01-02; 接受日期: 2025-04-02; 网络版发表日期: 2025-07-02

国家自然科学基金(批准号: 32188102, 32372125, W2412006)、浙江省自然科学基金(批准号: LD24C130001)、海南省院士创新平台科研项目(批准号: YSPTZX202502)、海南省国际科技合作研发项目(批准号: GHYF2025029)、三亚中国农业科学院国家南繁研究院南繁专项(批准号: YBXM2527)和中国农业科学院人才专项(批准号: NKYCLJ-C-2021-015)资助

摘要 水稻是世界上最重要的粮食作物之一, 依靠科技提升水稻产量是解决全球粮食安全的重要途径. 我国不仅是人口大国, 也是水稻生产和稻米消费大国. 然而, 随着未来人口增多、水资源短缺和耕地减少, 粮食缺口逐年加大, 水稻生产面临严峻挑战. 为了保证我国14亿人口的长期有效粮食供给, 保持我国在水稻育种领域的领先地位, 并推动水稻产量的第三次飞跃, 我国于1996年正式启动了“中国超级稻育种计划”. 随着超级稻育种理论的不完善和亲本种质资源的创新, 我国超级稻的单产纪录不断刷新, 为解决我国粮食安全问题做出了巨大贡献. 本文主要围绕对我国超级稻育种历程产生重大影响的骨干亲本种质的创制与利用, 以及优质常规超级稻的品种选育与推广, 对我国超级稻的发展重要历程进行综述, 以期能为进一步推动超级稻种质的创新和技术集成提供参考, 加速实现中国水稻生产中的第三次产量飞跃.

关键词 超级稻, 骨干亲本, 理想株型, 杂种优势, 育种历程

我国作为全球最大的稻米消费市场, 拥有14亿人口, 其中超过60%的人口以稻米为主食, 水稻生产对国计民生具有举足轻重的意义^[1]. 然而, 在人口持续增长与耕地面积不断缩减的双重压力下, 确保粮食安全必须依靠技术进步来大力提高水稻的单产量. 水稻育种历史可以追溯到数千年前, 经历了从传统育种到现代分子育种的演变. 早期育种主要依赖自然选择和人工

驯化, 形成了丰富的地方品种. 20世纪初, 杂交育种技术的引入标志着水稻育种的现代化. 20世纪60年代, 国际水稻研究所(IRRI)培育的“IR8”通过引入半矮秆基因(*SD1*), 实现了水稻的矮化和高产, 开启了“绿色革命”. 20世纪70年代, 中国科学家袁隆平为首的团队成功培育出杂交水稻, 大幅提高了产量^[2]. 然而, 我国水稻单产量在经历了矮秆育种和杂种优势利用两次大幅

引用格式: 赵慧博, 彭友林, 杨宇球, 等. 从种质创新到株型优化: 中国超级稻三十年育种实践与启示. 中国科学: 生命科学

Zhao H B, Peng Y L, Yang Y L, et al. From germplasm innovation to plant type optimization: three decades of breeding practice and enlightenment of super rice in China (in Chinese). *Sci Sin Vitae*, doi: [10.1360/SSV-2025-0003](https://doi.org/10.1360/SSV-2025-0003)

度提高后, 呈现出长期停滞不前的情况. 为了早日实现水稻单产的第三次突破, 我国农业部于1996年正式启动了“中国超级稻育种计划”. 经过近30年的探索和实践, 我国科学家在继承历史育种经验的基础上, 积极借鉴国际先进育种理念, 在理论方法创新、育种材料创制、优异品种培育、配套技术研发等方面取得了重大突破^[3]. 超级稻产量目标的稳步提升为稻作科技的发展和粮食安全做出了巨大贡献.

1 超级稻育种计划的缘起与实施

日本是最早提出并开展水稻超高产育种的国家. 1981年, 日本农林水产省组织了主要国立育种单位, 开展了名为“超高产水稻开发及栽培技术确定”的大型合作研究项目, 旨在15年内实现水稻单产提高50%的育种目标. 该计划试图通过籼粳杂交选育高产新品种, 并辅以配套栽培技术来实现产量的新突破^[4,5]. 然而, 在1981~1989年间, 共育成了6个新品种, 但由于结实率低、稻米品质差和抗倒伏能力弱等问题, 难以大面积推广种植^[6]. 与此同时, 国际水稻研究所(IRRI)于1989年正式启动了水稻“新株型”(NPT)超高产育种计划. 该计划以NPT品系为材料, 研究理想株型的建成和高产机理, 通过塑造少蘖、大穗、壮秆等特征来提高育种成效^[7]. 然而育成的品种同样由于米质、结实率和抗病性等原因, 尚未达到设计的产量目标, 无法实现大面积推广应用^[8].

我国以不足世界7%的耕地面积, 养育着占世界22%的人口, 这种人口与耕地的比例不平衡对我国农业和土地资源提出了严峻的挑战. 在那个“以粮为纲”的年代, 全国上下都在关注粮食产量, 这也牵动着许多农业科学家的心. 其中, 被誉为“中国半矮秆水稻之父”的黄耀祥, 其因深受恩师丁颖先生的启发, 对水稻育种研究有着持之以恒和精益求精的态度, 在他的带领下, 成功培育出第一个通过人工杂交获得的矮秆籼稻品种“广场矮”^[9], 比“IR8”早7年问世, 开启了世界水稻育种的第一次绿色革命, 这为我国后续超级稻育种的发展提供了重要的种质资源; 此后, 我国超级稻先驱杨守仁提出超级稻育种的理论, 认为理想株型是以形态为主的增产理论, 优势利用是以机能为主的增产理论, 两者相结合, 形态与机能兼顾, 才是水稻超高产育种的正确导向. 其创立的籼粳稻杂交、理想株型、

超高产育种三大理论体系, 为中国超级稻育种事业的发展奠定了重要的理论基础^[10]. 在他的启发和带领下, 其学生陈温福也致力于水稻事业发展, 不仅与杨守仁先生共同提出“水稻超高产育种”概念, 同时为后续中国超级稻育种发展提供了优异的骨干亲本, 在我国北方粳型稻超级稻选育中起到举足轻重的作用^[11].

在经历了矮化育种、杂种优势利用两次飞跃后, 我国水稻单产长期停滞不前的历史背景下, 美国世界观察研究所所长莱斯特·布朗提出了未来在水资源短缺、耕地减少的客观情况下, 究竟谁能来养活中国14亿人口的问题. 杨守仁、袁隆平、杨仁催、黄耀祥、闵绍楷、谢华安、陈温福和程式华等众多知名育种专家, 在时任农业部科技教育司司长程序先生支持下, 认真分析当时中国农业持续发展问题, 结合第一次绿色革命的成就, 提出中国迫切需要新的农业科技革命^[12]. 联合了国内数十家优势科研单位共同提出“中国超级稻育种计划”, 组成汇集包括育种、栽培、植保、推广等多个学科领域的攻关协作组, 成功形成超级稻研究的“大联合大协作”. 农业部于1996年正式启动由中国水稻研究所主持的“中国超级稻研究”重大项目, 拉开了以高产为目标的超级稻育种序幕, 并确定了第一、二、三期育种目标, 即2000年亩产达到700公斤, 2005年亩产达到800公斤, 2010年亩产达到900公斤^[13]. 通过总结我国水稻自20世纪50年代以来的育种经验, 并借鉴国际水稻研究所新株型育种理念, 中国最终明确了以“塑造理想株型和强调优势利用相结合”的超级稻育种理念和技术路线, 旨在培育出产量、品质及抗性等综合性状协同提升的优良水稻新品种^[14]. 经过近30年的不断创新, 中国超级稻培育取得了举世瞩目的成就, 已跃居国际领先水平. 我国不仅培育了一批产量高、品质优、抗逆性强的超级稻品种, 同时实现了配套栽培技术的集成应用. 从1996年杨守仁先生选育的第一个超级稻品种“沈农256”至今, 经农业农村部确认、冠名超级稻的水稻品种共计211个, 其中退出品种82个, 生产推广品种129个(网络版附表1). 目前, 我国超级稻年均推广面积超过1.3亿亩, 占水稻种植面积的30%, 累计推广种植面积已超过22.5亿亩. 随着第五期产量攻关目标(亩产1100公斤)的成功实现, 超级稻有效带动了全国水稻单产水平的均衡提升, 为确保我国口粮绝对安全做出了战略性贡献^[15]. 这一成就不仅是我国水稻育种科技创新的重要成果, 推动了我国水稻单产的

第三次飞跃,更孕育着一场新的水稻革命。

随着超级稻的育种实现水稻产量的大幅提升,我国的水稻育种目标已经从仅仅关注产量转变为注重高产、优质和多抗,育种理念也由单纯的高产优质逐渐转向少投入、多产出和环境友好。因此,基于超级稻育种的基础,我国的水稻育种科学家提出了“绿色超级稻”育种计划。该计划的目标是通过将品种资源、基因组研究和分子育种技术相结合,强化对重要性状生物学的基础研究和基因发掘,培育出兼具抗病、抗虫、抗逆、营养高效、高产优质特性的新品种^[16~18]。“绿色超级稻”育种计划的提出不仅有望推动水稻的“第二次绿色革命”^[19],同时,不断刷新高产纪录的超级稻和“绿色超级稻”将实现有机融合,共同推动育种目标的转型升级,为绿色农业的可持续发展做出重要贡献。

2 优异亲本种质创新推动我国超级稻育种发展历程

纵观超级稻产量取得突破的历史,是亲本种质不断创新的过程。水稻产量的持续突破和综合性状的改良都离不开种质材料的创新和育种理论的完善。本文将简要综述在中国超级稻育种进程中产生重大影响的骨干亲本,包括“扬稻6号”(93-11和荃9311A)、光温敏不育系“Y58S”、强优势籼型恢复系“华占”与广亲和甬粳不育系等的超级杂交稻育种利用,以及南北方常规超级稻选育和推广的情况。

2.1 扬稻6号(93-11)成功开启超级杂交稻选育大门

扬稻6号(93-11)系“扬稻4号”与“3021”杂交, F₁种子经⁶⁰Co-γ辐射诱变育成的一种中籼稻新品种,具有广泛利用价值。在稻作研究方面,93-11是全球首个完成全基因组框架测序的籼稻品种,为稻作研究提供了更全面、深入和准确的基础数据,同时也为稻作育种、种植和保护提供了科学指导,促进了稻作的可持续发展和优化^[20]。在育种实践中,93-11是一种丰产、米质优良、抗倒性极强的稻种,同时具有抗白叶枯病、稻瘟病、纹枯病、稻飞虱等多种病虫害的特点^[21]。在大面积种植下,亩产600公斤以上,高产田块更可达826.2公斤。该品种已于1997~2008年在江苏、安徽、湖北、河南、浙江等省份推广种植8000多万亩,为当时丰产、优质、多抗无法兼顾的主栽品种生

产难题提供了解决方案。

93-11不仅是顶尖的常规稻品种,还具有较高的配合力。它是我国自20世纪90年代以来应用范围最广、规模最大的两系杂交恢复系,也是“三系”红莲型杂交稻配组中最成功的恢复系。国内科研单位利用93-11配制了一系列超级稻品种,包括两优培九、扬两优6号、Y两优1号和新两优6号等。这些品种对于推动两系和“三系”红莲型杂交稻的优势利用起到了巨大作用^[22]。根据不完全统计,由93-11为亲本配制而成的超级稻品种累计推广面积超过5亿亩。其中,以“培矮64S”为母本,以“93-11”品系为父本杂交获得的两优培九,凭借93-11的广亲和性以及培矮S粳稻的血缘关系,创造了超强的优势,展现出超高的产量潜力,于2000年突破亩产700公斤,实现了第一期超级杂交稻产量目标。此外,该品种具有优异的品质和广泛的生态适应性。它适宜在南方稻作区(包括西南、华南、长江中下游)以及河南(信阳、南阳)、陕西(汉中)等一季稻作区广泛种植,也可在广东南部、广西桂南作早稻种植,在赣南、浙南作双季晚稻和再生稻种植^[23]。两优培九是我国第一个将两系法与亚种间优势结合的杂交稻品种,其成功育成标志着我国杂交水稻育种研究进入了一个全新的时代,为籼型两系超级杂交稻开启了大门。随后,由广占63-4S与93-11培育成的两系超级杂交稻扬两优6号,通过同步协调光合生产能力和干物质积累量的增长,极大地提高了产量、品质和抗性的融合,被业界誉为“全面性”的超级稻,并在2005~2021年累计推广面积超过1亿亩^[24](表1)。此外,2010年,安徽荃银高科种业公司以强优势恢复系93-11为核心材料,成功育成聚合两系和三系亲本优势的优质三系不育系荃9311A,开拓了“以恢制保”的不育系选育新模式。由于荃9311A具有高配合力、优质、高产、易制种等优异特性,以其为母本配组育成的杂交组合国内通过各级审定共172个245品次(其中国审112个138品次),海外审定21个,获植物新品种权保护71项,成为21世纪以来育成品种数量最多的水稻不育系。因此,以扬稻6号为核心的新品种创新极大地推动了我国杂交水稻的提质增效和种业振兴的协同发展。

2.2 光温敏不育系“Y58S”加速促进两系超级杂交稻的品种选育

随着“两优培九”等超级杂交稻在生产中大面积推

表 1 扬稻六号育成的超级稻品种及种植面积(~2021年)

Table 1 Super rice varieties bred from Yangdao 6 and their planting area (~2021)

地区	超级稻品种~2021年种植面积(667 hm ²)				总计
	两优培九	新两优6号	扬两优6号	Y两优1号	
陕西省	0	0	0	4	4
海南省	9	0	0	0	9
云南省	4	0	0	6	10
广东省	13	0	0	67	80
贵州省	140	0	13	0	153
重庆市	0	0	0	261	261
江苏省	298	43	143	130	614
福建省	243	11	131	70	455
四川省	0	0	0	346	346
浙江省	906	80	63	26	1075
广西壮族自治区	200	424	27	659	1310
河南省	405	216	866	543	2030
湖南省	1240	127	190	578	2135
江西省	1668	112	349	230	2359
安徽省	1004	1783	1085	579	4451
湖北省	2937	521	1567	601	5626
总计	9067	3317	4434	4100	20918

广种植, 一些超级稻品种逐渐表现出高温结实差、抗病性差等弊端, 严重影响其增产潜力. 因此, 选育更优异的广亲和杂交亲本是培育高产、优质、抗病的新型超级杂交稻的关键. Y58S是利用安农S-1作为不育基因供体, 与常菲22B、Lemont、培矮64S进行杂交和复交, 通过优质、高光效、抗病等优良性状的聚合, 实现多个有利基因的累加. 最终成功选育的广适性水稻高温敏不育系^[25]. Y58S作为我国两系杂交稻骨干亲本, 通过引入热带粳稻血缘, 进一步提高亚种间杂种优势的利用水平. 同时, 通过全生育期动态理想株型塑造, 显著提高群体对光能的利用率, 协调改良“源-流-库”关系. 这为我国超级杂交稻的品种选育和产量突破提供了更多选择. 目前以Y58S为亲本选配的Y两优系列强优势组合约有120多个. 其中包括与93-11、远恢2号、R900等强恢系育成的超级稻第二、三、四期攻关的领跑品种Y两优1号、Y两优2号、Y两优900等, 被称为“超级母亲”. 据不完全统计, 自2006年以来, Y两优系列品种累计推广面积已达到2亿亩以上, 是我国年推广面积较大的两系杂交稻系列品种, 具有显著的经济效益和社会效益(表2).

“Y两优1号”是湖南杂交水稻研究中心以自育低

温敏不育系Y58S与93-11配组育成的两系超高产杂交稻组合. 作为第一期超级稻代表性品种两优培九的兄弟品种, “Y两优1号”株型更优异、分蘖能力增强且耐高温能力大大提高, 结合超高产栽培技术, 显著提高了结实率并增加了粒重. 该品种已于2008年被农业部确认为广适型超级稻品种, 2008年在南陵县推广近2000公顷, 平均产量约11.25吨/公顷, 高产栽培条件下可达12吨/公顷, 成功突破第二期超级稻的产量目标^[26,27].

“Y两优2号”在保持理想株叶形态、优良米质、强抗逆性、广适应性等特点的基础上, 由于广亲和性父本远恢2号的加入, 从而再次实现产量的突破. 该组合于2011年在湖南省隆回县羊古坳乡的高产示范片进行产量验收, 其平均亩产量达927公斤, 率先实现第三期超级稻攻关目标, 并于2014年被农业部认定为超级稻品种^[28].

“Y两优900”是以Y58S为母本, 以感光型强优恢系R900为父本选育成的第四期超级杂交稻品种, 于2013年在湖南创造了较大面积亩产约988公斤的世界纪录. 相比“Y两优2号”, “Y两优900”主要的技术创新是进一步塑造动态理想株型和大幅度提高籼粳亚种间

表 2 Y两优系列超级稻2016~2021年种植面积

Table 2 Planting area of Y Liangyou series super rice from 2016 to 2021

品种	年种植面积(667 hm ²)						总计
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
Y两优1号	36	67	102	161	199	301	866
Y两优2号	81	77	45	39	19	17	278
Y两优5867	13	16	16	83	120	—	248
Y两优900	77	92	114	169	210	143	805
Y两优1173	12	17	27	27	28	31	142
Y两优957	—	—	10	26	26	36	98
Y两优305	—	—	15	12	13	—	40
总共	219	269	329	517	615	528	2477

杂种优势利用水平;同时其成功化解了超级杂交稻超大穗与高结实率难以协调的矛盾,实现了以超大穗达成超高产攻关育种目标;此外,“Y两优900”以发达的根系和优异的节尖配置实现了超高产和强抗倒的有机结合^[29]。

“Y两优957”(Y58S×创恢957)是在第四期超级稻的基础上,通过进一步进行株型改良而实现水稻产量、抗倒伏性及抗逆性的突破。该品种在保持穗大粒多、高结实率、光适应性的基础上,通过提高分蘖能力、增加有效穗数以实现大穗多穗的高度协调;同时由于其株高较矮、株型紧凑、茎秆坚韧、群体通风透光性好、光能利用率高,因此具有高度抗倒、抗病抗逆性强等显著特点;此外,“Y两优957”米质优异,全部米质达到国家《优质稻谷》标准2级以上,米饭口感优良,成功改善“杂交水稻口感不佳”的问题。2016年9月9日,“Y两优957”在湖南省邵阳市隆回县113.2亩示范田进行的现场测产中,取得平均亩产1000.5公斤的佳绩,于2019年被成功评定为“创新型绿色优质超级稻”新品种^[30]。总之,Y58S的成功选育实现了水稻杂种优势利用和理想株型育种的完美结合,同时搭配合理的栽培技术,大幅度提高了水稻产量和肥水利用率,为超高产两系杂交稻的选育提供了更多可能。

2.3 超强优势恢复系“华占”横空出世,推动超级杂交稻更新换代

21世纪以来,随着扬稻6号的成功选育,中国杂交水稻正式进入籼型两系杂交稻时代。扬稻6号是一种具有广适应性的恢复系品种,通过与其衍生系作为亲本进行杂交培育,数量不断增加,推广面积迅速扩大。直

至“华占”的横空出世,标志着中国杂交水稻品种新一轮的更新换代。“华占”是中国水稻研究所引用广东省农业科学院水稻研究所的SC02-S6为基础材料,经过反复测交与系统选育而成的超强恢复系材料。华占以其优异的稳产性和综合表现力在中国水稻产区尤其是籼稻产区广为人知。目前为止,以“华占”为父本所配组合已超过300个,推广面积占我国杂交稻总推广面积的前3位^[31]。据国家水稻数据中心统计,截至2021年12月31日,以华占为“父本”的已审定品种累计有198个,其中三系组合100个,两系组合98个。这种“华占”奇迹的形成,在我国水稻育种史上具有划时代意义。

作为一种常规稻种,“华占”的最大特点是分蘖较多、稳产性较好。作为杂交亲本,它具有广泛的亲和性和配合力,可与两系不育系或三系不育系的母本组合。目前,利用华占作为恢复系,培育了一系列超级稻组合,这些组合在生产上取得了非常好的效果,包括天优华占、晶两优华占、C两优华占和隆两优华占等。这些组合具有广泛的适应性,在广东、湖北、河南、四川等16个省份得到广泛种植,累计推广面积超过1亿亩(表3)。其中由天丰A和华占组合选育的籼型三系杂交稻——“天优华占”被称为华占系列的经典品种。它以多穗、齐穗高结实率维持较高产量,同时具备优质、多抗和适应性强等优点。该品种于2012和2013年两次评为超级稻品种^[32]。连续八年(2011~2018年)被农业部推荐为主导品种,累计推广面积超过3500万亩,是我国连作晚稻超级稻育种的重大突破。由华占培育的C两优华占是一种籼型两系杂交水稻品种,以其稳产和强抗性而闻名,在长江中下游国审区试中产量和抗性都名列前茅。稻瘟病综合指数为3.4,稻曲病发生较

表3 华占育成的超级稻品种及种植推广面积(~2021年).

Table 3 Super rice varieties bred from Huazhan and their planting area (~2021)

地区	超级稻品种~2021年种植面积(667 hm ²)				总计
	C两优华占	隆两优华占	晶两优华占	天优华占	
陕西省	2	0	0	0	2
海南省	0	1	0	0	1
云南省	10	4	18	10	42
广东省	0	8	43	92	143
贵州省	41	13	24	29	107
重庆市	144	80	81	17	322
江苏省	17	8	5	5	35
福建省	6	39	78	86	209
四川省	342	138	110	126	716
浙江省	0	5	3	17	25
广西壮族自治区	0	22	66	117	205
河南省	314	56	278	0	648
湖南省	101	417	600	1076	2194
江西省	54	600	278	1105	2037
安徽省	382	220	286	216	1104
湖北省	574	340	298	168	1380
总计	1987	1951	2168	3064	9170

轻, 抗倒伏能力较强^[33,34]. 该品种在2014年被确定为“超级稻”, 连续多年占据杂交水稻推广面积前十的位置, 并多次成为第一大品种. 它的优势在于能够面对不同年份的气候条件, 均能保持稳定高产.

“隆两优华占”是由隆科638S和华占配组培育的籼型两系杂交水稻新组合, 具有高产稳产、优质广适的特点. 该组合在2015~2017年先后通过长江上游中籼、长江中下游中籼、华南晚籼、武陵山区中籼等4个区域的审定以及湖南、江西和福建等省级审定, 并且在全国籼稻种植区都表现出高产稳产性. 于2017年被农业部认定为超级稻品种. 此外, 隆两优华占米质优良、抗病性强、氮肥利用率高, 于2019年被认定为“绿色超级稻”^[35]. “晶两优华占”是继“隆两优华占”之后, 又一种由华占配组培育的绿色超级稻品种. 该品种在保持丰产稳产、抗虫抗逆和米质优异的同时, 因其较低的重金属吸附率和隔离累积率而受到大力推广种植^[36]. 截至2023年, “隆两优华占”和“晶两优华占”因其优异的综合性状和高度适配的栽培技术仍然位居全国杂交水稻推广面积前三名. 根据国家农技推广中心统计数据, 截至2021年, 华占组合年推广面积超过1600万亩. 在2015~2021年的全国种植面积前十的杂交稻品种中,

华占连续6年有3~4个组合被列入, 这一令人震惊的成就被誉为中国水稻育种界的“奇观”-“华占现象”.

2.4 籼粳杂交稻成功培育使我国超级稻产业发展登上新台阶

我国栽培水稻主要包括籼稻和粳稻, 利用其杂种优势一直是提高水稻产量的有效途径. 20世纪70年代, 袁隆平先生成功利用籼稻品种的杂种优势培育杂交水稻, 单产大幅提升, 实现了我国第二次绿色革命. 然而, 由于亚种间存在生殖隔离导致F₁代育性下降、粳型不育系高温育性不稳定以及父母本花时差异导致制种产量偏低等一系列育种“卡”点, 严重限制了我国籼粳超级杂交稻在推广应用和产业发展方面的进展. 因此, 如何充分利用籼稻和粳稻这两个亚种间的超强优势一直备受育种专家的关注.

籼粳杂交稻的成功培育主要依赖于籼粳亚种间杂种优势的利用, 而这一过程的核心在于克服籼粳杂交的不亲和性和后代不育性问题. 其中, 包括中国品种“02428”(粳稻)、“明恢63”(籼稻)^[37,38], 菲律宾品种“Calotoc”等优异种质作为广亲和基因的重要来源或鉴定亲本, 其提供的广亲和基因(如S5-n)是籼粳杂交稻成功

的关键, 通过克服籼粳亚种间杂交的不育性, 使杂交后代具有正常的育性, 解决亚种间的生殖隔离问题^[39]. 目前, 籼粳杂交水稻育种实践取得了多方面的突破. 例如, 中国水稻研究所育成的嘉禾优系列和春优系列, 以及浙江省宁波市农业科学研究所和宁波市种子有限公司育成的甬优系列等多个籼粳杂交稻组合已经开始在全国范围内广泛推广应用.

籼粳杂交稻的成功培育离不开突破籼粳亚种生殖隔离的新型粳稻不育系种质的创制. 通过籼粳杂交和回交育种, 创制出兼具籼粳优点的中间型种质, 为杂交稻的选育提供了更多可能性. 如“甬优系列”的父本和母本均具有籼粳中间型特性. 截至2022年, 宁波市种子有限公司选育并在生产上应用的甬粳系列不育系达到15个, 宁波市农业科学研究所的数量达到11个. 这些不育系与其他亲本配组形成的通过省级以上审定的杂交品种组合数量更是高达89个, 其中包括63个籼粳杂交稻(图1), 这使得我国超级稻育种产业取得了新的进展. 甬优6号是在2005年育成的籼粳杂交超级稻, 它在产量、品质和抗病性等方面表现出色, 成功实现了亩产700~750公斤的目标产量. 因此, 被评定为第一个籼粳杂交超级稻, 这也意味着成功突破了籼粳远缘杂交的难题^[40]. 目前, 甬优系列杂交水稻已有7个组合被评定为籼粳杂交超级稻品种(网络版附表1), 2010~2024年, 累计种植面积已超过2800万亩. 甬优系列杂交稻明确采用粳型不育系作为母本, 籼型恢复系作为父本的选配方式, 这是提高籼粳间利用优势的有效方法, 这种籼粳杂交品种不仅在产量上获得了大幅提升, 还具有更多的口感上的优势, 既有籼稻的松软口感, 又有粳稻的口感^[41]. 例如, 在2018年评定为超级稻的“甬优1540”就在稳定有效穗数的基础上, 有效提高了穗粒数和总颖花数, 从而提高了产量. 在2012和2013年两年的产量验收中, 其平均产量超过12吨/公顷. 同时, 该品种也是近几年甬优超级稻系列种植面积最广的超级稻品种(2016~2022年累计种植面积达到926万亩)^[42]. 另外, “甬优15号”也因其优异的稻米品质连续多年被评为浙江省的“好稻米”^[43]. 随着甬优系列水稻的成功育成, 越来越多的水稻育种家开始挑战水稻籼粳亚种间的强优势利用, 并取得了良好的成果. 例如, 中国水稻研究所和嘉兴市农业科学研究所等单位合作育成的嘉禾优7245、嘉禾优5号等籼粳杂交稻在保持丰产性的同时, 还兼顾了优质和养分高效利用

特点. 嘉禾优5号于2019年和2021年先后通过了长江中下游稻区和北方黄淮粳稻区国家水稻品种审定, 该品种百亩平均亩产量达到了超级稻田测产验收产量的要求, 并于2022年被评定为超级稻品种^[44].

尽管目前籼粳超级杂交稻的产量优势明显且育种成效显著, 但其在全国的推广应用范围仍然有限, 生产问题也依然突出. 目前, 籼粳超级杂交稻产业还处于起始阶段. 除了需要解决远缘杂交生殖隔离障碍, 还需要应对生产中普遍存在的不育系高温自交结实和亚种间花期不遇等实际问题. 因此, 籼粳超级杂交稻产业的发展还需要科学家们进一步深入鉴定并挖掘有利的基因资源和创制新种质, 这是一个需要走很长一段路的过程.

2.5 常规超级稻的选育与推广, 整体提升了我国稻米品质

根据我国《超级稻品种确认办法》, 超级稻是指水稻新品种, 其品质好、抗性强、增产幅度大. 只有在产量、品质和抗性等各项指标均达到具体要求, 并且通过农业部认定的品种, 才能被称为“超级稻”. 尽管目前已经通过审定的超级稻品种中, 籼型杂交稻占比较多, 但是超级稻绝不仅限于超级杂交稻, 常规稻在超级稻育种方面同样具有重要作用^[45]. 目前, 可冠名的常规粳型超级稻品种约有40个, 主要分布在东北粳稻区(辽宁省、吉林省、黑龙江省)和南方稻区(江苏省).

常规超级稻的选育主要依赖于“优良种质的聚合与创新”, 这一过程涉及多个控制优异性状主效基因的聚合, 如含有半矮秆基因*SD1*的“IR8”、含有*IPA1*的优良等位基因的“中嘉早17”和“黄华占”等以及具有抗逆、抗病、抗虫基因的“IR64”和“珍汕97”等均是常规杂交稻选育的重要亲本种质, 这些种质资源的创新和利用, 为超级稻的高产、优质、抗逆等性状的提升提供了重要支撑, 推动了水稻育种的快速发展^[46,47].

东北地区因其独特的气候条件一直是我国粳稻的主要种植区. 东北稻米以其口感好、产量高而著称, 其粳米产量已超过全国粳米产量的50%. 因此, 常规粳型超级稻的成功选育促成了东三省成为我国目前常规粳型超级稻覆盖率最高的地区. 在“中国超级稻育种”项目实施以来, 2001年通过辽宁省农作物品种审定委员会审定, “沈农265”成为第一个粳型超级稻品种. 该品

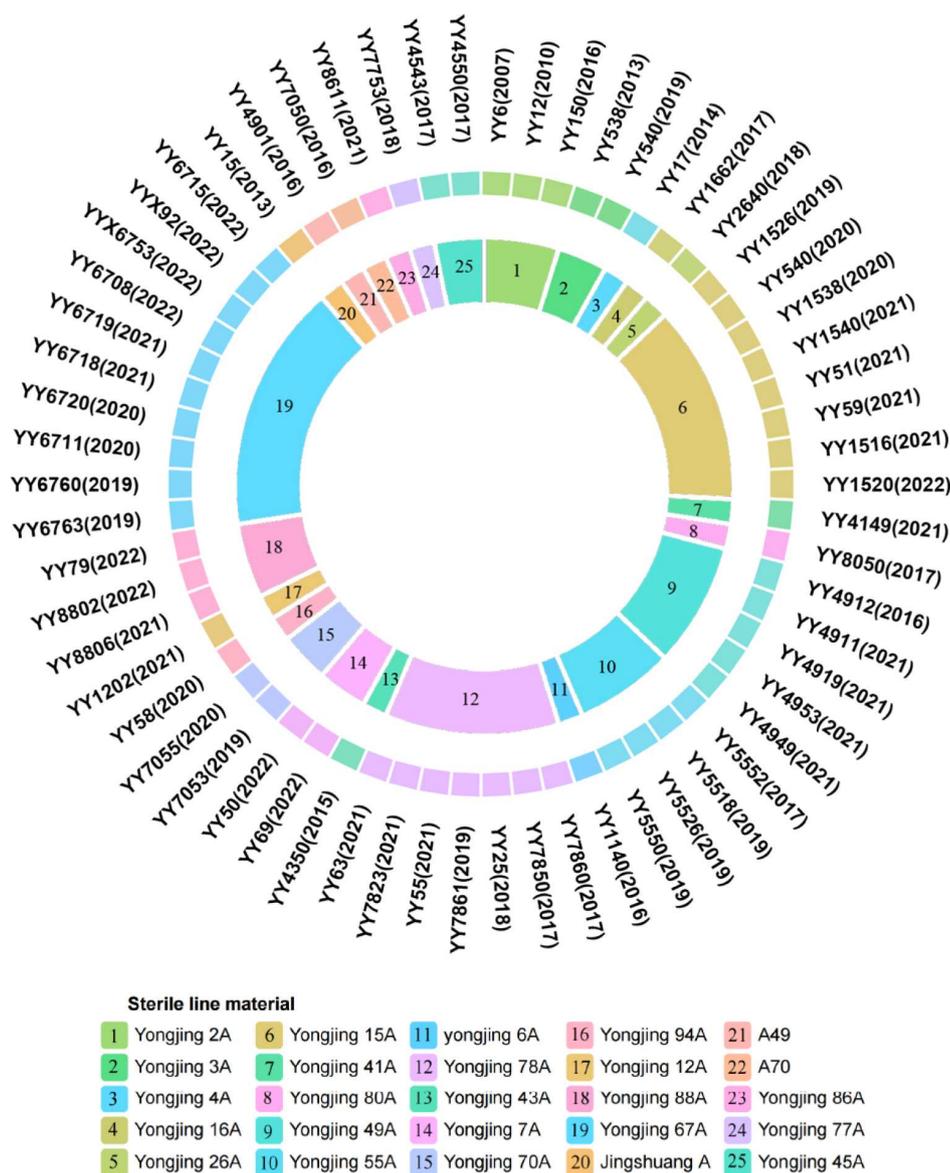


图 1 甬粳系列不育系材料及其选育品种(~2022)
Figure 1 Yongjing series sterile line material and its bred varieties (~2022)

种在“理想株型与优势利用相结合”的理论指导下，首次将直立穗与大穗结合起来。这样做既保持了较强的生理优势，还通过塑造理想株型构建了高光效群体结构，进而提高了光合效率和干物质含量的积累，该品种产量潜力巨大，并且具有较强的抗病性、抗逆性和广泛的适应性，因此很快被推广种植^[48]。

东北地区位于欧亚大陆，尤其是黑龙江等省份属于高纬度地区，全年温度较低，昼夜温差大。因此，在稻米的选育过程中，除注重产量和品质外，还需要提高

其耐寒性。2013年，经过两年的超级稻产量验收，“龙粳31号”正式被农业部认定为寒地早粳超级稻品种。该品种亩产量高达758公斤，品质优良，抗病耐寒性强。自2012年推广以来，种植面积迅速增长，2013年达到1692万亩，成为全国种植面积最大的粳稻品种^[49]。近年来，随着北方粳稻品种的不断改良和育种栽培技术的不断改进，越来越多的高产、耐寒、优质超级稻新品种被培育出来，包括沈农606^[50]、吉粳88^[51]、龙粳21^[52]、龙粳14^[53]、松粳15^[54]等。这对大幅度提高北方粳稻的

单产量, 稳定东北粮仓地位和保障中国粮食特别是“口粮”安全具有重要意义。

近年来, 以江苏省为代表的长江中下游稻区在品质和产量协同改良的超级稻育种方面也取得了巨大成功, 先后培育出多个优质超级常规稻品种, 包括南粳46、南粳9108、南粳5505等^[55]。这些品种多次获得全国优质稻品种食味品质鉴评金奖。其中南粳46被誉为“江苏最好吃的大米”, 因其稻米品质优异、米粒晶莹剔透; 在营养方面, 富含更多的蛋白质、淀粉、维生素和微量元素; 不仅成为中国南方主推的商品稻米品种, 而且是中国粮食出口的主力品种^[56]。近年来, 为了满足人们对优质食味粳稻品种的选择要求, “南粳”系列不断迎来新成员, 如2021年评定的超级稻品种南粳5718^[57]、南粳3908等^[58]。这些新品种在保持超高产量和优异米质的同时, 还将抗逆性和抗倒伏性融入育种目标, 实现了水稻高产、稳产和优质的有机融合。同时配合绿色高效的栽培技术, 真正实现了水稻的“好种、好吃、好收”。优质食味超级稻的培育从根本上实现了人们从“吃得饱”“吃得好”向“吃得健康”“吃得营养”的转变。

结合超级稻评定标准, 在确保产量高、品质好的同时, 高抗性、节肥、抗倒也是超级稻选育的重要目标之一。结合多种育种技术, 通过增强水稻对病虫害和不良环境的抵抗力, 减少因自然灾害和病虫害造成的损失, 进而提高水稻生产的安全性和稳定性。例如, 运用分子育种技术, 挖掘并应用广谱稻瘟病抗性基因的金香玉1号^[59]、川康优2115^[60]等品种凭借较高的抗病性和省肥、节药等特性于2024年成功评选为高效绿色超级稻品种; 除抗病虫害、耐高(低)温外, 由于我国盐碱地面积大, 培育推广耐盐碱水稻品种是开发利用沿海滩涂盐碱地, 保障耕地面积最为有效的途径, 杂交稻品种“爽两优138”兼顾产量、米质和耐高温的同时, 在盐碱田中(土壤盐度0.5%左右)表现优异, 同时也正因为其较高的抗性和优异的再生能力使其于2024年成功入选为超级稻品种^[61]。

3 未来超级稻面临的新挑战

超级稻育种是确保口粮绝对安全的战略需要, 尽管超级稻育种现状呈现出积极的发展态势并取得了显著的成就, 自2015年来, 水稻总产稳定在2亿吨以上。但

作为一个拥有14亿人口的大国, 随着耕地面积的不断减少和人们对粮食的多样化需求的增加, 未来超级稻育种仍会面临诸多挑战。

(1) 种质资源挖掘不满足育种需求。种质资源作为农业的“芯片”, 加强水稻种质的收集对未来超级稻育种具有重要的战略意义。其中野生稻作为栽培稻的祖先, 具有丰富的遗传资源, 尽管我国现在拥有包括21种、1.2万多份的全球最重要的野生稻资源圃^[62], 但当前已应用于生产中的野生稻种质依旧有限, 且随着超级稻育种的不断深入, 可利用的优异种质资源逐渐减少, 导致遗传基础狭窄, 这将极大增加未来超级稻育种的难度。

(2) 育成品种不适合当前生产环境。近年来, 全球性高温、干旱、洪涝等极端气候和病虫害的频发、盐碱地面积的增加及土地重金属污染的加重, 对我国未来粮食安全构成了严重威胁。研究统计数据显示, 气候变化将使农作物大幅度减产^[63]。因此, 这迫切需要我们提高抗旱、耐高温、耐淹等抗逆性水稻品种的培育和推广。

(3) 育成品种不满足当前社会需要。长期以来, 高产一直是超级稻育种追求的主要目标, 尽管我国水稻总产量完全自给自足的同时还略有盈余, 但随着人民生活水平的提高, 对米质的要求也逐渐提高, 使得我国依旧是全球主要稻米进口国之一, 尤其是进口泰国、越南等具有特殊风味和营养品质高的稻米, 可以优化人民饮食结构、提高生活品质。这也意味着, 未来超级稻育种中, 在维持高产的同时, 仍要兼顾品质的提升以满足市场的需求。

(4) 农药、化肥的过量使用与环境友好的突出矛盾。在以往的水稻种植过程中, 农民往往通过过度施肥以期获得更好的产量, 这一方面这导致水稻植株变高不易倒伏, 另一方面, 也使得超级稻高产低质、高水肥不绿色等质疑声逐渐增大, 同时极大地增加了农业的成本。

(5) 育种新技术的发展与育种实际相脱节。尽管籼稻和粳稻亚种间杂种不育问题上取得了重要突破, 但如何解决籼粳杂交稻制种花时不遇、育性恢复等对稳定亚种间杂交的应用以及基因编辑与分子育种等技术在超级杂交稻育成中的精准性和安全性等问题仍需进一步解决。

(6) 政策支持与资金投入不均衡。超级稻育种周

期长、投入大、风险高, 超级稻育种计划在未来的发展中, 不仅需要育种家的不懈努力, 还需要国家政策的支持和大量资金的投入, 这对加大新品种的推广应用和提高农民的认识和接受度至关重要。

4 新时期超级稻育种新策略

超级稻主要理念是将理想株型与杂种优势利用相结合, 新时期的超级稻育种策略主要围绕提高产量、品质和抗病虫、耐逆性以及减少农药和化肥使用等绿色性状进行。其中, 技术创新是未来超级稻育种新策略的核心, 也是超级稻取得重大突破的必要手段。2019年, 王克剑研究团队^[64]通过基因编辑成功获得了无融合生殖的杂交种子材料, 首次证明了杂交稻进行无融合生殖的可行性。近期, 中国水稻研究所与江西省农业科学院合作^[65], 成功开发出高效诱导的水稻单倍体诱导系, 并将其应用于水稻两系不育系的培育中, 成功实现了双单倍体技术(doubled haploid technology)在水稻育种中的规模化应用, 该技术相较于传统育种需要6~10个世代的自交或回交, 大大缩短了育种时间。中国科学院李家洋团队与国内外多家单位合作^[66], 通过组装异源四倍体高秆野生稻基因组, 创制了世界首例重新设计和快速驯化的四倍体水稻, 实现“从0到1”的突破, 开辟了全新的作物育种方向; 谷晓峰团队^[67]利用人工智能的方法, 系统实现了水稻、玉米等物种中表观修饰位点的预测等; 黄学辉团队^[68]通过创建水稻育种基因池, 联合开发智能化水稻育种导航程序, 构建最完善的水稻数量性状基因关键变异图谱, 极大提高基因定位能力, 与此同时, RiceNavi通过依赖大数据和人工智能技术帮助育种家更高效地设计育种方案, 推动超级稻的精准育种。2022年, 李家洋团队^[69]通过启动子编辑技术, 成功优化了调控水稻株型和产量的关键基因*IPAI*的表达模式, 培育出具有理想株型和高产潜力的水稻新品种, 这一技术为水稻株型改良和产量提升提供了新的思路。以上不断创制的突破性新种质和育种新技术的涌现将为传统水稻分子育种向4.0智能化超级稻育种新时代迈进提供重要的材料和技术支撑。

骨干亲本作为育种过程中的核心种质资源, 它们在不同时代的育种中发挥了重要作用。目前, 通过对现有骨干材料的遗传背景、亲缘关系以及性状传递等

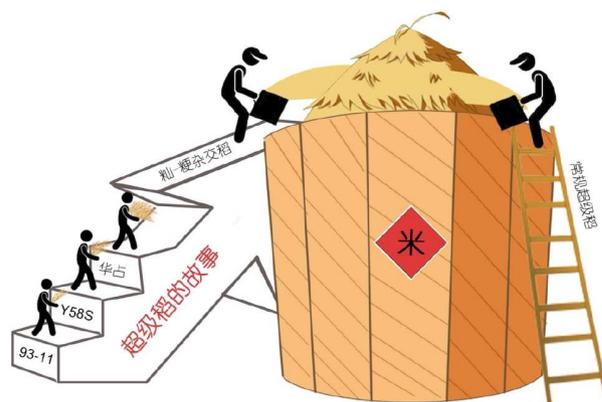


图2 超级稻育种进程

Figure 2 Process of super rice breeding

方面进行分析揭示了这些材料间的相似性和差异性, 如恢复系“明恢63”和“9311”的SNP标记显示出较高的遗传相似性, “珍汕97”作为“明恢63”的亲本之一, 两者在系谱上具有直接的血缘关系等^[70]。此外, 不同时代的骨干材料反映了不同时期育种目标的转变, 如“IR8”和“珍珠矮”中*SD1*基因发现和引入, 实现了水稻植株的矮化, 提高其抗倒伏能力^[71]; 广亲和相关基因(如*S5-n*)的广泛使用, 极大地提高杂交水稻的育性; 携带*IPAI*, *DEP1*, *GS2*优异等位基因骨干亲本(“9311”“明恢63”“黄华占”“沈农265”等)的利用极大地提高了超级稻的产量和抗性^[72]。未来的超级稻发展中, 我们有必要对更多骨干亲本的基因背景进行测序分析, 挖掘关键基因, 并利用分子设计育种技术聚合有利基因, 进而创制新的优异亲本。同时, 现阶段还要加强对野生稻、特异材料等种质资源的挖掘、鉴定和从头驯化, 通过利用和整合各种遗传资源, 为超级稻育种提供多样化的遗传基础, 打破遗传瓶颈, 尤其是在极端高温天气频繁出现的大环境下, 抽穗扬花期高温胁迫已成为制约水稻稳产的核心问题。在接下来的几十年里, 挖掘和培育抽穗期耐高温的品种材料, 将是超级稻升级换代的重大任务。地方品种作为长期自然选择和人工驯化的产物, 具有独特的适应性和优良性状, 同时通过全基因组关联分析挖掘地方品种中优良等位基因, 对培育适合特定生产区域的水稻品种具有重要的作用。此外, 通过构建利用突变体材料和远缘杂交资源的创制, 一方面有利于基因功能研究和挖掘新育种靶点, 另一方面, 可以打破种属界限, 促进优异外源基

因的导入与利用^[73], 推动水稻育种的持续创新。

超级稻育种作为一个综合性的系统工程, 其发展离不开国家农业政策的资金支持和推广普及, 以及多学科交叉融合、科企融合协作, 共同实现育种体系的优化完善, 加速推进中国水稻生产中的第三次产量飞跃; 通过不断探索全基因组选择、基因编辑、智能化等现代分子技术, 利用并聚合高产、优质、多抗、

广适应性等多个目标性状的优良基因, 有益于推动水稻从传统育种向高效、精准、定向的分子设计育种转变^[74,75]。此外, 未来超级稻育种策略将更侧重于绿色、环保的种植模式, “高产、高效、生态、安全”等绿色超级稻理念的推广应用, 不仅有助于提高农业生产效率、减少环境污染, 同时对未来全球农作物生产和促进农业的可持续发展具有重要的作用^[76]。

参考文献

- Zhu B B. Analysis of the long-term supply and demand trends of rice in China (in Chinese). *Chin Grain Econ*, 2007, 6: 19–21 [祝滨滨. 我国稻米中长期供求趋势分析. *中国粮食经济*, 2007, 6: 19–21]
- Xin Y Y. The perfect “triple jump” of China’s super rice (in Chinese). *Curr Affair Rep*, 2012, 11: 4 [辛业芸. 中国超级稻的完美“三级跳”. *时事报告*, 2012, 11: 4]
- The Ministry of Agriculture initiated the research and development plan for super rice with an output of 1,000 kilograms per mu (in Chinese). *Fujian Rice Wheat Sci Technol*, 2014, 32: 37 [农业部启动亩产1000公斤超级稻攻关计划. *福建稻麦科技*, 2014, 32: 37]
- Xu Z J, Chen W F. Introduction to the achievements of Japan’s super high-yield rice breeding program (in Chinese). *World Agric*, 1991, 7: 16–17 [徐正进, 陈温福. 日本水稻超高产育种计划成果简介. *世界农业*, 1991, 7: 16–17]
- Zhou Y Q. Current status of super high-yield rice breeding in Japan (in Chinese). *Seed World*, 1989, 12: 2 [周耀群. 日本水稻超高产品种育种现状. *种子世界*, 1989, 12: 2]
- Xu Z J. New progress in super high-yield rice breeding in Japan (in Chinese). *Chin Agric Sci Bull*, 1991, 7: 4 [徐正进. 日本水稻超高产育种新进展. *中国农学通报*, 1991, 7: 4]
- Yang R C. Research progress on new plant type rice at the International Rice Research Institute (in Chinese). *Hybrid Rice*, 1998, 13: 3 [杨仁崔. 国际水稻研究所新株型稻研究进展. *杂交水稻*, 1998, 13: 3]
- Du S Y, Wang S H, Li C Q, et al. Progress and challenges in super rice breeding (in Chinese). *Chin Agric Sci Bull*, 2006, 22: 195 [杜士云, 王守海, 李成荃, 等. 超级稻育种进展及存在的问题. *中国农学通报*, 2006, 22: 195]
- Huang Y X. Strategic decisions in crop breeding: ecological breeding of rice (in Chinese). *Guangdong Agric Sci*, 1990, 4: 3–7 [黄耀祥. 作物育种的战略性决策—水稻生态育种. *广东农业科学*, 1990, 4: 3–7]
- Yang S R. New trends in super high-yield rice breeding: combining ideal plant type with advantageous traits (in Chinese). *J Shenyang Agric Univ*, 1987, 1: 1–3 [杨守仁. 水稻超高产育种的新动向——理想株形与有利优势相结合. *沈阳农业大学学报*, 1987, 1: 1–3]
- Chen W F, Xu Z J, Zhang L B, et al. Theory and practice of super high-yield breeding in northern japonica rice (in Chinese). *Sci Agric Sin*, 2007, 40: 869–874 [陈温福, 徐正进, 张龙步, 等. 北方粳型稻超高产育种理论与实践. *中国农业科学*, 2007, 40: 869–874]
- Cheng X. Heading into the 21st century: China is calling for a new revolution in agricultural science and technology (in Chinese). *Sci Technol Rev*, 1997, 12: 5 [程序. 走向21世纪, 中国正呼唤新的农业科技革命. *科技导报*, 1997, 12: 5]
- Yuan L P. Future prospects of super hybrid rice breeding technology in China (in Chinese). *China Rural Discov*, 2015, 1: 18–21 [袁隆平. 中国超级杂交稻育种技术的未来展望. *中国乡村发现*, 2015, 1: 18–21]
- Cheng S H. Innovation and application of super rice breeding technology in China (in Chinese). *Sci Agric Sin*, 2016, 49: 2 [程式华. 中国超级稻育种技术创新与应用. *中国农业科学*, 2016, 49: 2]
- Ma W. Yuan Longping’s team achieves a breakthrough of 1000 kg per mu yield in super rice (in Chinese). *China Sci Technol*, 2014, 10: 2 [马伟. 袁隆平团队超级稻亩产首破千公斤. *科技中国*, 2014, 10: 2]
- Li R. Chinese scientists propose “Green Super Rice” initiative (in Chinese). *China Mining News*, 2008: C03 [李荣. 我科学家提出“绿色超级稻”计划. *中国矿业报*, 2008: C03]
- Zhang Q F. *Conception and Practice of Green Super Rice* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2009 [张启发. 绿色超级稻的构想与实践. 北京: 科学出版社, 2009]
- Zhang H B, Wu Y N, Mo Y F, et al. Research progress and prospects of Green Super Rice (in Chinese). *J Huazhong Agric Univ*, 2022, 41: 28–39

- [张浩博, 吴伊宁, 莫伊凡, 等. 绿色超级稻的研究进展与展望. 华中农业大学学报, 2022, 41: 28–39]
- 19 Zhang Q F. The way of rice in the new era (in Chinese). In: Proceedings of the 10th National Conference on Wheat Genomics and Molecular Breeding. 2023, [张启发. 新时期的稻之道. 见: 第十届全国小麦基因组学及分子育种大会. 2019]
- 20 Yang G K, Chen Z Q, Chen Z J, et al. A case study on the development of SNP-dCAPS markers in rice using 93-11 as a parent based on second-generation sequencing data (in Chinese). *Mol Plant Breed*, 2014, 12: 8 [杨广阔, 陈子强, 陈在杰, 等. 基于二代测序数据开发以93-11为亲本的水稻SNP-dCAPS标记的研究实例. 分子植物育种, 2014, 12: 8]
- 21 Xu M L, Zhang H X, Huang N S, et al. Breeding and utilization of Yangdao 6, a new high-quality, high-yield, and disease-resistant mid-season indica rice variety (in Chinese). *China Rice*, 2001, 1: 3 [徐卯林, 张洪熙, 黄年生, 等. 优质高产抗病中籼新品种扬稻6号的选育及利用. 中国稻米, 2001, 1: 3]
- 22 Bai H S, Zhan C Y, Wang B H, et al. Mid-season indica rice Yangdao 6 and its application in hybrid rice breeding (in Chinese). *Hybrid Rice*, 2001, 6: 16–18 [白和盛, 詹存钰, 王宝和, 等. 中籼扬稻6号及其在杂交稻育种中的应用. 杂交水稻, 2001, 6: 16–18]
- 23 Lv C G, Li X, Zong S Y, et al. Analysis of the wide adaptability of super hybrid rice Liangyoupeijiu (in Chinese). *Chin J Rice Sci*, 2019, 33: 191–205 [吕川根, 李霞, 宗寿余, 等. 超级杂交稻两优培九的广适性分. 中国水稻科学, 2019, 33: 191–205]
- 24 Zhang H X, Ji H J, Xiao N, et al. Analysis of high-yield source-sink characteristics of two-line hybrid rice Yangliangyou 6 (in Chinese). *J Yangzhou Univ*, 2009, 30: 54–58 [张洪熙, 季红娟, 肖宁, 等. 两系杂交稻扬两优6号高产源库特征分析. 扬州大学学报, 2009, 30: 54–58]
- 25 Deng Q Y. Breeding of Y58S, a widely adaptable photoperiod- and thermo-sensitive genic male sterile line in rice (in Chinese). *Hybrid Rice*, 2005, 20: 4 [邓启云. 广适性水稻光温敏不育系Y58S的选育. 杂交水稻, 2005, 20, 2: 4]
- 26 Yu Z B. High-yield cultivation techniques for Y-liangyou 1 (in Chinese). *Anhui Agric Sci Bull*, 2009, 15: 113–114 [俞再葆. Y两优1号高产栽培技术. 安徽农学通报, 2009, 15: 113–114]
- 27 Liu R T, Shen W B, Bian S X, et al. Characteristics and high-yield cultivation techniques of Y-liangyou 1 (in Chinese). *Mod Agric Sci Technol*, 2012, 572: 88–90 [刘仁泰, 沈文波, 卞守祥, 等. Y两优1号的特征特性及高产栽培技术. 现代农业科技, 2012, 572: 88–90]
- 28 Wu J, Deng Q Y, Zhuang W, et al. Breeding and application of Y-liangyou 2, a pioneer combination of the third-phase super hybrid rice (in Chinese). *Hybrid Rice*, 2015, 30: 14–16 [吴俊, 邓启云, 庄文, 等. 第3期超级杂交稻先锋组合Y两优2号的选育与应用. 杂交水稻, 2015, 30: 14–16]
- 29 Li J W. Morphological and physiological characteristics of the fourth-phase super rice Y-liangyou 900 and its ultra-high-yield cultivation techniques (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Changsha: Hunan Agricultural University, 2015 [李建武. 第四期超级稻Y两优900形态生理特性及其超高产栽培技术研究. 硕士学位论文. 长沙: 湖南农业大学, 2015]
- 30 Zhu F L, Deng Q Y, Zhou P, et al. Characteristics and high-yield cultivation techniques of Y-liangyou 957 (in Chinese). *Cult Cult*, 2018, 6: 55–56 [朱发林, 邓启云, 周萍, 等. Y两优957特征特性及高产栽培技术. 耕作与栽培, 2018, 6: 55–56]
- 31 Zhou S C, Ke W, Miao R W, et al. Establishment of a core germplasm breeding system for rice and its application in high-quality rice breeding (in Chinese). *Guangdong Agric Sci*, 2021, 48: 1–8 [周少川, 柯苇, 缪若维, 等. 水稻核心种质育种体系创建及优质稻育种实践. 广东农业科学, 2021, 48: 1–8]
- 32 Yu S M, Chen R X, Lv Z L, et al. Study on the suitable sowing dates for the new hybrid rice combination Tianyouhuazhan as single-season and double-season late rice (in Chinese). *China Rice*, 2009, 5: 4 [禹盛苗, 陈润兴, 吕周林, 等. 杂交稻新组合天优华占作单季、连作晚稻种植适宜播种期的研究. 中国稻米, 2009, 5: 4]
- 33 Lin Y. C-liangyouhuazhan: a new high-yield and high-quality two-line hybrid mid-season rice combination (in Chinese). *Hybrid Rice*, 2014, 29: 2 [林勇. 高产优质两系杂交中稻新组合C两优华占. 杂交水稻, 2014, 29: 2]
- 34 Gao G J, Chen T C, Xie B Z. Summary of high-yield demonstration and key cultivation techniques for hybrid rice C-liangyouhuazhan on a hundred-mu scale (in Chinese). *China Rice*, 2014, 20: 90–91 [高广金, 陈天春, 谢邦忠. 杂交稻C两优华占百亩高产示范总结及主要栽培技术. 中国稻米, 2014, 20: 90–91]
- 35 Fu C J, Fu X X, Qin P, et al. Breeding and application of Longliangyouhuazhan, a widely adaptable and high-quality super hybrid rice (in Chinese). *Hybrid Rice*, 2020, 35: 25–29 [符辰建, 符星学, 秦鹏, 等. 广适型优质超级杂交稻隆两优华占的选育与应用. 杂交水稻, 2020, 35: 25–29]
- 36 Xie H P, Zhou X W, Lai X M. Performance and high-yield cultivation techniques of Jingliangyouhuazhan in Tangtang Town, Fogang County (in Chinese). *South Agric*, 2021, 15: 2 [谢惠萍, 周小武, 赖杏梅. 晶两优华占在佛冈县汤塘镇的引种表现及高产栽培技术. 南方农业, 2021, 15: 2]
- 37 Zou J S, Nie Y Q. Preliminary utilization of the broad affinity selection “02428” in hybridization between indica and Japonica subspecies (in

- Chinese). *Sci Agric Sin*, 1989, 22: 6–14 [邹江石, 聂毓琦. 广亲和选系“02428”在籼粳亚种间杂交的初步利用. *中国农业科学*, 1989, 22: 6–14]
- 38 Ikehashi H, Araki H. Varietal screening of compatibility types revealed in F1 fertility of distant crosses in rice. *Japan J Breed*, 1984, 34: 304–312
- 39 Yang K H, Bi C Q. Research and utilization of wide compatibility of rice (in Chinese). *Hubei Agric Sci*, 1989, 8: 36–40 [杨克虎, 毕春群. 水稻广亲和性的研究与利用. *湖北农业科学*, 1989, 8: 36–40]
- 40 Li D W, Chen J, Zhao Y F, et al. High-yield cultivation techniques of super rice Yongyou 6 (in Chinese). *China Agric Technol Extens*, 2007, 23: 25–26 [李大文, 陈睿, 赵益福, 等. 超级稻甬优6号高产栽培技术. *中国农技推广*, 2007, 23: 25–26]
- 41 Lu Y F. Characteristics and supporting techniques of new indica-japonica hybrid rice combinations in the Yongyou series (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012 [陆永法. 甬优系列籼粳杂交水稻新组合特征特性与配套技术研究. 博士学位论文. 中国农业科学院, 2012]
- 42 Qiu F, Wu Z G, Chen J L, et al. Demonstration performance and ultra-high-yield mechanized transplanting cultivation techniques of the new japonica hybrid combination Yongyou 1540 (in Chinese). *J Anhui Agric Sci*, 2014, 42: 2 [邱枫, 吴正贵, 陈金林, 等. 杂粳新组合甬优1540示范表现及机插超高产栽培技术. *安徽农业科学*, 2014, 42: 2]
- 43 Lin W Y, Yang S H. Supporting high-yield cultivation techniques for high-quality indica-japonica hybrid rice Yongyou 15 (in Chinese). *Fujian Rice Wheat Sci Technol*, 2015, 33: 2 [林文益, 杨生河. 优质籼粳杂交稻甬优15高产栽培配套技术. *福建稻麦科技*, 2015, 33: 2]
- 44 Gao R C. Jiayouzhongke 13-1: a new high-quality three-line hybrid rice combination (in Chinese). *Hybrid Rice*, 2019, 4: 2 [高荣村. 优质三系杂交稻新组合嘉优中科13-1. *杂交水稻*, 2019, 4: 2]
- 45 Chen W F, Xu Z J, Tang L. Research progress and prospects of super rice breeding in China (in Chinese). In: *Proceedings of the 2012 Northeast Rice Development Academic Symposium*. Shenyang, 2012 [陈温福, 徐正进, 唐亮. 中国超级稻育种研究进展与前景. 见: 2012东北水稻发展学术研讨会. 沈阳. 2012]
- 46 Wang J L, Li Z X, Chen W F. Research progress and application of the semi-dwarf gene SD1 in rice breeding (in Chinese). *Chin J Rice Sci*, 2016, 30: 123–130 [王建龙, 李志新, 陈温福. 水稻半矮秆基因SD1的研究进展及其在育种中的应用. *中国水稻科学*, 2016, 30: 123–130]
- 47 Li Z X, Wang J L. Application of aggregation and innovation of elite rice germplasm in super rice breeding (in Chinese). *Hybrid Rice*, 2016, 31: 1–7 [李志新, 王建龙. 水稻优良种质的聚合与创新在超级稻育种中的应用. *杂交水稻*, 2016, 31: 1–7]
- 48 Chen W F, Xu Z J, Zhang L B, et al. Theory and practice of super high-yield breeding in northern japonica rice (in Chinese). *Sci Agric Sin*, 2007, 40: 869–874 [陈温福, 徐正进, 张龙步, 等. 北方粳型稻超高产育种理论与实践. *中国农业科学*, 2007, 40: 869–874]
- 49 Wang R Y. High-yield and high-quality cultivation techniques of super rice variety Longjing 31 (in Chinese). *China Seed Ind*, 2013, 8: 2 [王瑞英. 超级稻品种龙粳31的高产优质栽培技术. *中国种业*, 2013, 8: 2]
- 50 Zhang X J, Li W J, Li H J, et al. Growth and development characteristics and yield formation traits of super rice Shennong 265 (in Chinese). *J Huazhong Agric Univ*, 2008, 27, 445–450 [张喜娟, 李伟娟, 李红娇, 等. 超级稻沈农265生长发育特性及产量形成特点. *华中农业大学学报*, 2008, 27: 445–450]
- 51 Zhang J G, Zhang S Y, Quan C Z, et al. Excellent characteristics and popularization of super rice Jijing 88 (in Chinese). *China Rice*, 2008, 8: 3 [张俊国, 张三元, 全成哲, 等. 超级稻吉粳88的优异特性及推广应用. *中国稻米*, 2008, 8: 3]
- 52 Chen S Q, Yang L M, Zhao H X, et al. Research on high-yield cultivation techniques for high-quality super rice Longjing 21 in cold regions (in Chinese). *Heilongjiang Agric Sci*, 2014, 32: 6 [陈书强, 杨丽敏, 赵海新, 等. 寒地优质超级稻龙粳21配套高产栽培技术研究. *黑龙江农业科学*, 2014, 2: 6]
- 53 Liu C Z. Research on ultra-high-yield fertilization techniques for super rice Longjing 14 (in Chinese). *Cult Cult*, 2007, 6: 48–49 [刘传增. 超级稻龙粳14超高产施肥技术研究. *耕作与栽培*, 2007, 6: 48–49]
- 54 Zhang S L, Yan P, Wu H T, et al. Cultivation techniques and high-yield analysis of the new super rice variety Songjing 15 (in Chinese). *Seed*, 2021, 40: 129–136 [张书利, 闫平, 武洪涛, 等. 超级稻新品种松粳15的栽培技术与高产分析. *种子*, 2021, 40: 129–136]
- 55 Wang C L, Zhang Y D, Zhu Z, et al. Research progress on breeding new japonica rice varieties with excellent taste in Jiangsu Province (in Chinese). In: *Proceedings of the 15th National Symposium on Agricultural Biochemistry and Molecular Biology*. Lanzhou, 2016 [王才林, 张亚东, 朱镇, 等. 江苏省优良食味粳稻新品种选育研究进展. 见: 全国农业生物化学与分子生物学第十五届学术研讨会. 兰州. 2016]
- 56 Wang C L, Zhang Y D, Zhu Z, et al. Breeding and application of the new high-quality rice variety Nanjing 46 (in Chinese). *China Rice*, 2008, 3: 38–40 [王才林, 张亚东, 朱镇, 等. 优质水稻新品种南粳46的选育与应用. *中国稻米*, 2008, 3: 38–40]
- 57 Wei X D, Zhang Y D, Song X M, et al. Photosynthetic physiological characteristics of high yield in super rice variety Nanjing 5718 (in Chinese). *Acta Agron Sin*, 2022, 48: 2879–2890 [魏晓东, 张亚东, 宋雪梅, 等. 超级稻品种南粳5718高产的光合生理特性研究. *作物学报*, 2022, 48:

2879–2890]

- 58 Chen T, Zhang Y D, Zhao Q Y, et al. Breeding and cultivation techniques of the new late japonica rice variety Nanjing 3908 with excellent taste, disease resistance, and high yield (in Chinese). *Jiangsu Agric Sci*, 2019, 47: 3 [陈涛, 张亚东, 赵庆勇, 等. 优良食味抗病高产晚粳稻新品种南粳3908的选育和栽培技术. *江苏农业科学*, 2019, 47: 3]
- 59 Cheng Y. Analysis of the trial performance of high-quality rice ‘Jinxiangyu 1’ in Jianhu County (in Chinese). *Shanghai Agric Sci Technol*, 2023, 2: 47–49 [成玉. 优质稻‘金香玉1号’在建湖县的试种表现分析. *上海农业科技*, 2023, 2: 47–49]
- 60 Song H P, Liu K Y, Huang G, et al. High-yield and high-efficiency cultivation techniques of Chuankangyou 2115 in hilly areas of central Sichuan (in Chinese). *Sichuan Agric Sci Technol*, 2023, 11: 32–35 [宋和平, 刘开燕, 黄岗, 等. 川康优2115在川中丘陵区高产高效栽培技术. *四川农业科技*, 2023, 11: 32–35]
- 61 Sun P Y, Shu F, Deng H F. High yield of hybrid rice seed production area innovation (in Chinese). *J Hybrid Rice*, 2022, 37: 139 [孙平勇, 舒服, 邓华凤. 杂交水稻制种大面积单产创新高. *杂交水稻*, 2022, 37: 139]
- 62 Zheng X, Peng Y, Qiao J, et al. Wild rice: unlocking the future of rice breeding. *Plant Biotechnol J*, 2024, 22: 3218–3226
- 63 Xiao F J, Zhang H D, Wang C Y, et al. The possible effect of climate change on China’s agriculture and adaptive countermeasures (in Chinese). *J Natural Disast*, 2006, 15: 327–331 [肖凤劲, 张海东, 王春乙, 等. 气候变化对我国农业的可能影响及适应性对策. *自然灾害学报*, 2006, 15: 327–331]
- 64 Wang C, Liu Q, Shen Y, et al. Clonal seeds from hybrid rice by simultaneous genome engineering of meiosis and fertilization genes. *Nat Biotechnol*, 2019, 37: 283–286
- 65 Liu C, Yan S, Mao F, et al. Large-scale production of rice haploids by combining superior haploid inducer with PTGMS lines. *Plant Commun*, 2024, 5: 101067
- 66 Yu H, Lin T, Meng X, et al. A route to *de novo* domestication of wild allotetraploid rice. *Cell*, 2021, 184: 1156–1170.e14
- 67 Wang Y, Zhang P, Guo W, et al. A deep learning approach to automate whole-genome prediction of diverse epigenomic modifications in plants. *New Phytol*, 2021, 232: 880–897
- 68 Wei X, Qiu J, Yong K, et al. A quantitative genomics map of rice provides genetic insights and guides breeding. *Nat Genet*, 2021, 53: 243–253
- 69 Song X, Meng X, Wang J, et al. Engineering rice ideal plant architecture for improved grain yield by editing the promoter of IPA1. *Nat Biotechnol*, 2022, 40: 1277–1285
- 70 Xing F. Annotation and comparative analysis of the genomes of indica rice Zhenshan 97 and Minghui 63 (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016 [邢锋. 籼稻珍汕97和明恢63基因组的注释和比较分析. 博士学位论文. 武汉: 华中农业大学, 2016]
- 71 Wang J L, Li Z X, Chen W F. Research progress and application of the semi-dwarf gene *SD1* in rice breeding. *Chin J Rice Sci*, 2016, 30: 123–130
- 72 Zhang Q F, Li J S. Advances in mining and functional research of high-temperature tolerance genes in rice. *Sci Agric Sin*, 2021, 54: 1–10
- 73 Zhang Q F, Li J S. Advances in mining and functional research of high-temperature tolerance genes in rice (in Chinese). *Sci Agric Sin*, 2021, 54: 1–10 [张启发, 李建生. 水稻耐高温基因的挖掘与功能研究进展. *中国农业科学*, 2021, 54: 1–10]
- 74 Jiang Q G. Utilization of wild rice germplasm resources in rice breeding (in Chinese). *Hybrid Rice*, 2006, 21: 4 [江青贵. 野生稻种质资源在水稻育种中的利用. *杂交水稻*, 2006, 21: 4]
- 75 Yang X H, Zhou J F, Feng L. Utilization and conservation of wild rice germplasm resources in China (in Chinese). *China Rice*, 2023, 29: 8 [杨晓红, 周晋峰, 冯璐. 中国野生稻种质资源利用与保护. *中国稻米*, 2023, 29: 8]
- 76 Fang H W, Fang W J. Promoting green planting technology to advance sustainable agricultural development (in Chinese). *Grassroots Agric Technol Extens*, 2016, 2 [方海维, 方文杰. 推广绿色种植技术促进农业可持续发展. *基层农技推广*, 2016: 2]

From germplasm innovation to plant type optimization: three decades of breeding practice and enlightenment of super rice in China

ZHAO HuiBo^{1,2†}, PENG YouLin^{3†}, YANG YuLu¹, ZHANG GuangHeng^{1,2*} & QIAN Qian^{1,2,3*}

¹ State Key Laboratory of Rice Biology and Breeding, China National Rice Research Institute, Hangzhou 310006, China

² National Nanfan Research Institute (Sanya), Chinese Academy of Agricultural Sciences, Sanya 572024, China

³ Yazhoubay National Laboratory, Sanya 572024, China

† Contributed equally to this work

* Corresponding authors, E-mail: qianqian188@hotmail.com; zhangguangheng@126.com

Rice is one of the most important staple crops in the world, and enhancing rice production through technology is an important approach to addressing global food security issues. China is not only a populous country but also a major producer and consumer of rice. However, with the increasing population, water scarcity, and decreasing arable land, the food gap is growing year by year, posing severe challenges to rice production. In order to ensure the long-term and effective food supply for China's 1.4 billion people, maintain China's leading position in the field of rice breeding, and promote the third leap in rice production, China officially launched the "Super Rice Breeding Program" in 1996. With the continuous improvement of super rice breeding theories and the innovation in parent germplasm resources, the yield records of super rice have been constantly refreshed, making significant contributions to solving food security issues in China. This article mainly focuses on the creation and utilization of key parent germplasm that has had a significant impact on the breeding process of super rice in China, as well as the selection and promotion of high-quality conventional super rice varieties. It provides an overview of the important milestones in the development of super rice in China. It aims to provide references for further promoting the innovation of super rice germplasm and technological integration, accelerating the realization of the third leap in rice production in China.

super rice, key parent, ideal plant type, heterosis, breeding process

doi: [10.1360/SSV-2025-0003](https://doi.org/10.1360/SSV-2025-0003)