

DOI: 10.13376/j.cblls/2018131

文章编号: 1004-0374(2018)10-1090-10



黎志康, 中国农业科学院作物科学研究所二级研究员、博士生导师, 中国农作物基因资源与基因改良国家重大科学工程首席科学家。国际动植物基因组年会植物分子育种分会主持人, 第二、三届国际植物分子育种研讨会主席。先后担任 *Plant Breeding*、*Plant Genome*、*JIA* 杂志编委, 《作物学报》和《分子植物育种》杂志副主编。设计提出了回交导入结合分子标记跟踪的绿色超级稻育种技术和策略, 将种质资源有利基因发掘、目标性状的定向改良和遗传信息累积、设计和聚合改良、育种后代快速稳定等的品种选育过程实现完全整合。主持了由比尔梅琳达盖茨基金会资助的“为亚非脱贫培育推广绿色超级稻”重大国际合作项目, 项目在 13 个亚非国家共审定推广了 70 多个绿色超级稻品种, 包括应用上述育种路线在短短 5~7 年内培育的 20 多个高产多抗的绿超新品种, 累计推广面积超过 5 000 万亩。



徐建龙, 中国农业科学院作物科学研究所研究员、博士生导师, “水稻分子设计技术与应用”创新团队首席科学家、“水稻分子育种”创新小组组长。1987 年获得浙江农业大学遗传育种专业学士学位, 2001 年获得浙江大学遗传育种专业博士学位, 2003 年在菲律宾国际水稻研究所水稻分子育种博士后研究结束后, 引进到作物科学研究所任职。致力于水稻种质资源有利基因挖掘与分子设计育种研究, 在水稻 QTL 定位、优异基因挖掘、分子育种方面具有丰富经验。近 5 年来, 在 *PLoS Genet*、*TAG*、*Rice*、*Front Plant Sci* 等核心学术期刊发表 SCI 论文 30 余篇, 获省级科技进步奖一等奖 1 项。

## “绿色超级稻”助力亚非国家农业生产的可持续发展

王文生, 高用明, 徐建龙\*, 黎志康\*

(中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081)

**摘要:** 水稻是亚洲人民的主要粮食作物, 也逐渐成为非洲人民增长最快的食物来源。随着人口增长、土地减少以及资源环境的不断恶化, 如何进一步保障稻米生产能力的可持续增长是我们面临的巨大挑战。为了应对该挑战, 中国科学家提出了“绿色超级稻”的概念。在中国政府和比尔及梅琳达·盖茨基金会的支持下, 2008 年启动了“为非洲和亚洲资源贫瘠地区培育绿色超级稻”的重大国际合作项目, 项目执行 10 年来, 绿色超级稻品种在亚非目标国家的适应性试验与示范推广成效显著, 产生了良好的社会效益。现对绿色超级稻项目实施的改良回交育种技术、绿色超级稻在亚洲和非洲目标国家的品种试验、审定和推广情况及产生的社会效益等进行概述, 并指出目前存在的问题及其对策。

**关键词:** 绿色超级稻; 可持续发展; 回交育种; 粮食安全

**中图分类号:** Q33; S511      **文献标志码:** A

**收稿日期:** 2018-09-19

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划(“863”计划)(2014AA10A601); 比尔及梅琳达·盖茨基金会(OPPGD51587, 1393, 1130530)

**\*通信作者:** E-mail: zhkli1953@126.com (黎志康); xujianlong@caas.cn (徐建龙)

## “Green Super Rice” achieving sustainable development of agricultural production in Asian and African countries

WANG Wen-Sheng, GAO Yong-Ming, XU Jian-Long\*, LI Zhi-Kang\*

(Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Rice is the main food crop for the Asian people and has been gradually becoming the fastest growing food source for the African people. But as populations grow, land shrinks, and the environment deteriorates, how to further increase rice productivity while ensuring the sustainability of this production activity is our biggest challenge. In response to this challenge, Chinese scientists have proposed the concept of “Green Super Rice (GSR)”. With the support of the Chinese government and the Bill & Melinda Gates Foundation, in 2008, a major international cooperation project “The Green Super Rice for The Resource Poor of Asia and Africa” was launched. The adaptability test, demonstration and dissemination of GSR varieties have achieved remarkable results and produced significant social and economic benefits in the target countries in Asia and Africa. This article provides an overview of the improved backcross-breeding technology, and testing, registration and extension of GSR as well as the resultant socio-economic benefits of this project in the Asian and African target countries. In the end, problems of GSR extension and its resolving strategy are also discussed.

**Key words:** Green Super Rice; sustainable development; backcross breeding technology; food security

水稻是亚洲人民的主要粮食作物,也是南亚、东南亚资源贫瘠地区农民赖以生存的根本。过去30年以来,水稻在非洲的生产和消费稳步上升,并成为增长最快的食物来源。在西非,水稻是传统的主要粮食作物之一,超过4 500万人从事水稻生产,但绝大部分稻作生产只能依靠雨水灌溉(望天田)。水稻望天田的面积在亚洲有6 000万 $\text{hm}^2$ ,非洲撒哈拉边缘有790万 $\text{hm}^2$ ,平均产量只有0.5~2.5 $\text{t}/\text{hm}^2$ ,而且不同年份之间还很不稳定。亚洲和非洲望天田占全球稻田面积的35%左右,而且多分布在最贫困、最容易被忽视的地区<sup>[1-2]</sup>。第一次绿色革命由于其高投入农业模式,未能受到这些资源贫瘠地区农民的青睐。亚洲和非洲撒哈拉边缘望天田生态系统的水稻生产特点是肥水投入少,面临一系列生物和非生物逆境的威胁。其中,缺水和干旱是限制产量的最重要因素。第一次绿色革命培育的矮秆品种由于未对抗旱性或水分利用效率进行改良,大多不适应望天田生态系统。此外,土壤问题(过量盐分、碱性和酸性)也是望天田和沿海地区水稻生产的主要限制因素。在亚洲和非洲撒哈拉边缘,大量宜于种植水稻的土地因盐分含量过高而处于抛荒状态。因非生物逆境(干旱、高盐、冷害、高温等)造成的产量损失年平均达20%以上。此外,这些地区的水稻生产还面临一系列病虫害的威胁,如稻瘟病、白叶枯病、纹枯病、螟虫、卷叶虫和褐飞虱以及其他地区特异性病虫害(通格鲁病毒病、非洲水稻

黄斑病毒病、稻瘿蚊等)。大部分水稻产区因生物逆境造成的产量损失年均在15%以上。因此,培育和推广多抗的水稻品种是保障亚洲和非洲撒哈拉边缘望天田地区粮食安全和消除贫困的有效方法之一。

全球人口到2050年预计将达到100亿,稻米生产力需要跟上全球人口增长的步伐,才能保证人民免遭饥饿。在如今土壤消耗、水分流失以及不断变化的气候条件下,人们面临的最大挑战是如何进一步提高稻米生产力,同时,保证这种生产活动的可持续性。从技术上讲,实现这一目标主要依赖于改良水稻品种及相适应的水稻种植技术。中国作为最大的水稻消费和生产国,在过去几十年里建立了较完善的水稻育种体系。中国的水稻育种家在20世纪50年代的矮化育种和70年代的杂交稻育种中发挥了先锋和开拓者作用,对第一次绿色革命做出了重大贡献。近年来,科学技术的进步,特别是分子生物学、基因组学、遗传学和作物生理学方面的进展,为加速培育高产多抗的水稻新品种提供了新的契机。中国在2002年启动的水稻功能基因组计划已经克隆和发掘了数以百计的水稻重要农艺性状基因(如产量、籽粒品质、抗非生物逆境、抗病虫和营养高效利用)<sup>[3]</sup>。这些基因及其紧密连锁的分子标记的开发大大促进了水稻性状的分子标记辅助改良。在中国农业部和洛氏基金的支持下,中国于1998年建立了由国内11家不同生态区的水稻优势

育种单位参加的中国水稻分子育种协作网 (China National Rice Molecular Breeding Network, CNRMBN)<sup>[4]</sup>。CNRMBN 的最终目标就是通过分子标记技术与常规育种技术相结合培育“绿色超级稻 (Green Super Rice, GSR)”品种, 有效克服水稻生产的各种限制因素, 实现第二次绿色革命。

“绿色超级稻”是由华中农业大学张启发教授提出的, 旨在高产优质的基础上兼有多种病虫害的抗性、肥料的高效吸收利用、节水抗旱或抗逆境等绿色性状的水稻新品种<sup>[5]</sup>。“绿色超级稻”不仅是指具有绿色性状的新品种, 它还代表“资源节约、环境友好”的绿色发展的育种新理念和“高产、高效、生态、安全”的栽培管理方式。“绿色超级稻”的培育和推广应用, 将实现水稻生产中“少打农药、少施化肥、节水抗旱、优质高产”的目标。

为了使亚洲和非洲撒哈拉边缘的贫困农民从中国的水稻育种和遗传学/基因组学领域取得的巨大成就中获益, 中国政府与比尔及梅琳达·盖茨基金会在2008年联合资助了一个国际合作重大项目——“为非洲和亚洲资源贫瘠地区培育绿色超级稻”。该项目由中国农业科学院作物科学研究所黎志康研究员牵头, 联合国内外水稻优势育种单位经过近10年的努力, 培育和引种了一批GSR品种, 在非洲和亚洲目标国家和地区试种、审定和推广, 对目标国家稻作发展和粮食安全做出了重大的贡献。现将该项目在国内外的执行情况和取得成效介绍如下。

## 1 项目主要预期目标及服务的目标国家

“为非洲和亚洲资源贫瘠地区培育绿色超级稻”项目执行期为10年, 分为3期: 第1期2008年8月至2012年10月; 第2期2012年11月至2016年3月; 第3期2016年3月至2019年2月。项目的长期目标是在亚洲和非洲撒哈拉边缘及中国西南五省快速培育和推广GSR新品种, 使这些地区的非规模化生产的农民(小型农户)平均水稻生产能力提高20%以上, 增加这些目标国家和地区3000多万农民的农业收入。该项目的具体目标是通过引种和穿梭育种等方法为东南亚、南亚、撒哈拉以南非洲和中国西南部地区, 培育和推广资源高效和抗多种生物和非生物逆境的绿色超级稻新品种, 以达到减少饥荒、保障贫困稻农的粮食安全和提高收入水平。主要目标国家包括: 8个亚洲国家(菲律宾、越南、老挝、印度尼西亚、斯里兰卡、孟加拉国、

印度和巴基斯坦)、8个非洲国家(莫桑比克、坦桑尼亚、卢旺达、埃塞俄比亚、乌干达、尼日利亚、马里和塞内加尔)以及中国西南五省(宁夏、贵州、四川、云南和广西)。至今, 通过项目的执行已向19个国家的26个研究机构累计发放水稻品种或育种材料多达5235份(表1)。

## 2 采用回交后代目标性状极端选择高效选育多抗水稻绿超新品种

传统上, 回交育种通常被广泛采用以改良由单个主基因控制的遗传力高的性状。同时, 它也被证明可以通过主效QTL/基因的转育来有效地改善单个复杂性状, 包括非生物/生物胁迫耐受性/抗性和产量潜力<sup>[6-10]</sup>。尽管几乎所有复杂性状的初级基因库都有足够的遗传多样性, 但迄今为止, 通过回交育种改良水稻产量性状和提高水稻对两种或多种非生物胁迫的耐受性, 很少有成功的案例。本课题组最近提出了一种改进的回交育种方法, 可以更快地选育抗多种非生物胁迫的新品种, 同时在正常灌溉条件下也有良好的产量表现<sup>[11]</sup>。

改进的回交育种方法有以下主要步骤: (1) 将具有广泛适应性的受体亲本与不同的供体亲本进行杂交来培育分离的回交群体; (2) 针对不同目标国家的目标性状, 在多种胁迫条件下对回交群体进行第一轮的目标性状选择和后代交叉选择或验证, 形成目标性状选择导入系群体; (3) 使用高通量基因芯片对选择的导入系(introgression lines, ILs)进行基因分型、QTL定位和遗传网络解析; (4) 通过QTL聚合或分子轮回选择(molecular recurrent selection, MRS)培育优良的GSR品种。采用上述改良回交育种策略, 本课题组于2008年雨季在国际水稻研究所(IRRI)开始对16个供体品种导入黄华占(Huanghuazhan, HHZ)的BC<sub>1</sub>F<sub>2</sub>群体进行不同复杂性状, 如高产、抗旱、耐盐等的严格筛选和选育, 获得了预期效果。以下以8个供体(OM1723、Phalgun、IR50、IR64、特青、PSBRc66、CDR22和PSBRc28)导入黄华占(HHZ)的BC<sub>1</sub>F<sub>2</sub>群体的选育进行举例说明(图1)。以黄华占为对照, 从黄华占背景的8个供体导入后代, 在正常水田选出高产植株100株, 在旱和盐胁迫条件下分别筛选到抗旱植株109株和耐盐植株120株。将第一轮获得的329个株系继续于2009年旱季进行目标性状的第二轮交叉筛选和后代验证, 分别获得163株高产、105株抗旱和228株耐盐植株。

表1 GSR材料向目标国家的发放情况

地区	国家	研究机构	发放的GSR材料份数		
			1期	2期	3期
南亚	孟加拉国	BIRRI、BRAC	644	212	100
	印度	IIRR、CRRI、IIAB	-	170	46
	巴基斯坦	NIBGE、PARC	644	302	-
	斯里兰卡	RRDI	324	42	-
东南亚	菲律宾	PhilRice	-	74	-
	印度尼西亚	ICRR、BSHS	521	80	-
	越南	VAAS	322	-	-
	老挝	NAFREC	320	42	-
	柬埔寨	CARDI	320	-	-
东非和南非	坦桑尼亚	ARI KATRIN、IRRI hub	-	151	94
	莫桑比克	IIAM	-	119	-
	卢旺达	RAB	-	37	-
	乌干达	NACCRI	-	72	66
	埃塞俄比亚	EIAR	-	78	-
	布隆迪	IRRI Hub	-	84	87
	肯尼亚	IRRI Hub	-	40	-
西非和中非	尼日利亚	NCRI、Green Agric West Africa Ltd	-	26	87
	马达加斯加	AfricaRice	-	-	44
	塞尼加尔	AfricaRice	-	-	87
合计			3 095	1 529	611

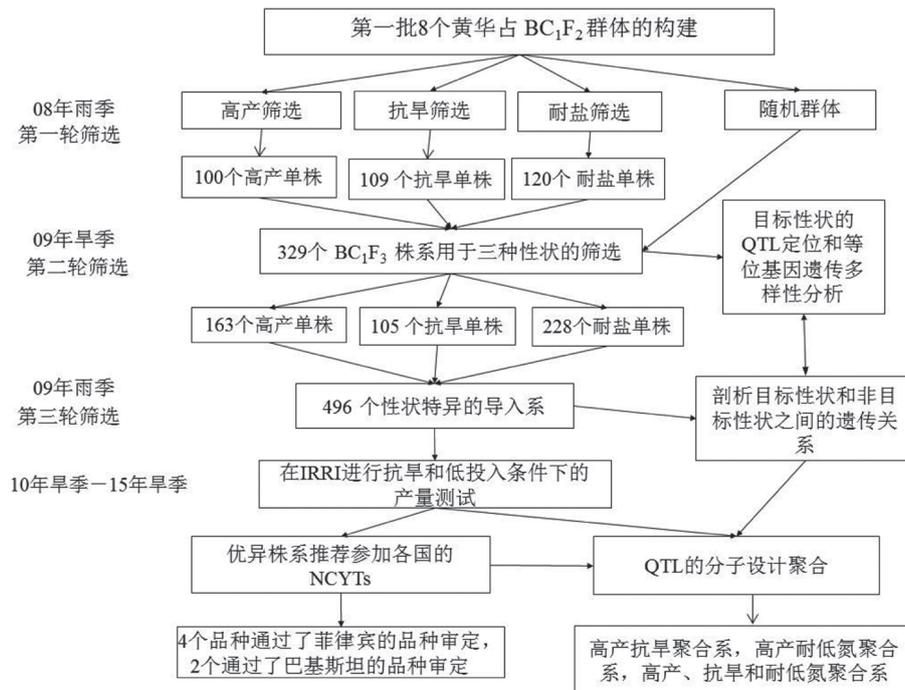


图1 利用回交导入选择方法来改良多个复杂性状的育种过程

对获得的 496 个目标性状选择导入系分别在正常、旱和盐胁迫的条件下进行产量初级评选, 在不同条件下从优系中选优株, 最终培育出 13 个

品种在菲律宾、越南和巴基斯坦通过审定 (表 2)。同时, 对 496 个目标性状选择导入系和 9 个亲本进行重测序获得 40 万高通量 SNP (single nucleotide

表2 通过改进的回交育种方法育成审定的绿色超级稻新品种

审定国家	轮回亲本	GSR名称	品种审定名称	审定年份
巴基斯坦(2)	HHZ	GSR IR1-5-S10-D3-Y2	NIBGE GSR-I	2015
	HHZ	GSR IR1-5-S12-D3-Y2	NIBGE GSR-II	2015
菲律宾(18)	HHZ	GSR IR1-12-D10-S1-D1	Salinas 29	2018
	HHZ	GSR IR1-12-S2-Y3-Y2	GSR 12a	2015
	HHZ	GSR IR1-1-Y4-Y1	GSR 1	2014
	HHZ	GSR IR1-21-Y4-Y2-Y1	Tubigan 45	2018
	HHZ	GSR IR1-3-S13-Y1-S1	Tubigan 44	2018
	HHZ	GSR IR1-5-S14-S2-Y2	GSR 5	2014
	HHZ	GSR IR1-5-S6-S3-D1	Tubigan 37	2016
	HHZ	GSR IR1-5-S8-D3-SU1	GSR 5a	2014
	HHZ	GSR IR1-8-S6-S3-Y2	GSR 8	2016
	WTR1	GSR IR2-12-Y15-Y2-Y2	GSR 22	2015
	WTR1	GSR IR2-1-L1-L1-L2	GSR 21	2015
	WTR1	GSR IR2-1-L1-N1-L2	GSR 24	2015
	WTR1	GSR IR2-7-L4-L1-R2	GSR 23	2015
	IR64	IR 83140-B-11-B	GSR 11	2014
	IR64	IR 83142-B-19-B	GSR 2	2015
	IR64	IR83140-B-28-B	Salinas 19	2014
	IR64	IR83140-B-36-B	Katihan 4	2014
	IR64	IR84675-58-4-1-B-B	Salinas 20	2014
越南(2)	HHZ	HHZ5-DT1-DT1	Gia Loc 501	2016
	HHZ	HHZ11-Y10-DT3-Y3	Gia Loc 502	2016

HHZ: Huanghuazhan; WTR1: Weed tolerance rice 1

polymorphisms) 基因型, 结合高产、抗旱和耐低氮鉴定, 采用聚合群体的频率偏分离定位方法<sup>[12]</sup>, 定位了影响这些目标性状的 QTL<sup>[13]</sup>。在此基础上, 根据导入系高产、抗旱和耐低氮表型及主效 QTL 基因型分布, 通过 KASP SNP 标记将带有不同目标性状有利基因的导入系聚合, 从后代选育出聚合抗旱和耐低氮能力增强与兼具抗旱和耐低氮的新品系, 其中 PL6 聚合了 2 个抗旱 QTL, PL36 聚合了 2 个耐低氮 QTL, PL50 聚合了 2 个抗旱和 1 个耐低氮 QTL, PL66 聚合了 2 个耐低氮和 1 个抗旱 QTL; 这些聚合系在正常条件下产量与对照黄华占相仿, 在干旱和低氮胁迫条件下, 比黄华占表现出显著的增产优势<sup>[13]</sup>。研究表明, 优良品种背景的目标性状选择导入系, 不仅可以用于影响目标性状主效 QTL 的定位, 而且更是实现不同目标性状有利基因聚合的分子育种材料平台, 实现了复杂性状 QTL 定位和有利基因挖掘与品种改良的完整结合<sup>[13]</sup>。

在采用回交导入改良黄华占多个抗逆性取得成功的基础上, 本课题组联合 IRRI 启动了第二期回交改良育种。以抗杂草稻 1 号 (WTR1) 和 TME-

50518 为轮回亲本共构建了 55 个回交群体, 采用图 1 中所示的技术路线获得了 2 个背景的 3 640 个目标性状选择导入系, 进一步通过多种环境的产量品比试验, 择优参加各个目标国家的区试。迄今, 利用黄华占、WTR1 和 IR64 品种为背景构建选择导入系, 培育的 22 个 GSR 品种通过了菲律宾、巴基斯坦、越南和印度尼西亚等国审定 (表 2), 70 多个有希望的 GSR 品系目前正在多个目标国家进行区试。在 IRRI、亚洲和非洲的许多目标国家的灌溉和干旱条件下, 许多 GSR 品种的优异表现已得到充分证明<sup>[7]</sup>。例如, WTR1 的后代导入系显示出多个与高产相关的特征, 包括较大的生物量、具有抗倒伏性的粗茎秆、适度的分蘖能力、稻穗较大等特征。这些 WTR1 导入系在多个环境的重复试验中表现优异, 其中 GSR IR2-8-Y14-SU3-R2 导入系在菲律宾 5 个测试点, 产量比杂交稻 (Meztiso 6) 和常规种 (NSIC Rc 238) 对照分别增产 7.8% 和 20.2% (表 3)。GSR 品系 IR1-12-D10-S1-D1 在全球多个环境表现突出, 在全球测试的 12 个优良品种中产量最高, 具备较好的对干旱和盐胁迫等多种非生物逆境的耐受性<sup>[14]</sup>。

表3 育成绿色超级稻新品种在菲律宾多点试种的产量表现

品系名称	轮回亲本	区试产量(t/hm <sup>2</sup> )										平均 (t/hm <sup>2</sup> )	较最好的 常规稻对 照品种增 产(%)	较最好的 杂交稻对 照品种增 产(%)	
		Munoz		San Mateo		Los Baños		Ubay		RTR	Average				
		旱 季	雨 季	旱 季	雨 季	旱 季	雨 季	旱 季	雨 季	旱 季	雨 季				旱 季
GSR IR2-8-Y14-SU3-R2	WTR1	8.81	3.56	8.03	6.25	8.31	4.61	7.19	4.3	6.67	8.09	5.08	6.58	20.24	7.85
GSR IR2-5-L10-Y1-Y2	WTR1	8.43	3.79	7.65	6.62	7.92	5	6.8	4.33	6.84	7.7	5.32	6.51	18.88	6.49
GSR IR2-1-R5-N1-Y3	WTR1	8.87	3.08	8.09	6.02	8.36	3.42	7.24	4.09	6.02	8.14	4.52	6.33	15.69	3.3
GSR IR2-7-Y11-SU3-Y2	WTR1	8.25	3.33	7.47	6.32	7.75	4.58	6.62	4.32	6.55	7.52	5.02	6.27	14.57	2.18
GSR IR2-1-Y16-S1-R2	WTR1	NA	2.5	7.89	5.68	8.17	4.38	7.05	4.04	6.21	7.95	4.56	6.25	14.26	1.87
GSR IR2-5-L10-U1-R2	WTR1	8.04	3.91	7.26	6.3	7.53	4.48	6.41	4.44	6.61	7.31	5.14	6.23	13.77	1.38
GSR IR1-21-S16-Y1-SU1-D3	HHZ	8.37	3.7	7.59	6.11	7.86	3.78	6.74	4.11	6.35	7.64	4.81	6.22	13.71	1.32
GSR IR2-19-Y14-L2-L2	WTR1	8.86	2.52	8.09	5.48	8.36	3.32	7.24	3.59	6.23	8.14	4.23	6.18	12.94	0.55
NSIC Rc132H (Mestizo 6)	CK1	8.56	2.16	7.78	6.08	8.05	3.84	6.93	4.06	6.24	7.83	4.48	6.15	12.39	0
IRRI 156 (NSIC Rc238)	CK2	6.91	3.69	6.13	6.07	6.41	3.02	5.29	4.33	6.71	6.18	4.77	5.47	0	
IRRI 123 (PSB Rc82)	CK3	6.79	3.22	6.01	5.88	6.28	4.14	5.16	4.02	6.29	6.06	4.71	5.39	-1.6	
IRRI 104 (PSB Rc10)	CK4	6.56	1.54	5.78	3.56	6.06	2.45	4.93	2.66	4.32	5.83	2.91	4.37	-20.2	

WTR1: Weed tolerance rice 1; HHZ: Huanghuazhan; CK: 对照

### 3 引种国内现有品种或组合在国外审定和推广的情况

项目先后从中国农业科学院作物科学研究所、华中农业大学、上海农业生物基因中心等 10 多家科研单位和高校搜集了 63 个常规稻品种(系)和 100 个杂交稻品种, 这些品种(系)被引种到亚洲和非洲的目标国家进行多年多点试验, 择优参加目标国家区域试验, 最终有 26 个常规稻品种在印度、越南、莫桑比克等 10 个亚非国家通过审定并推广(表 4)。另有来自安徽、武汉和云南的种子企业和企业的 26 个杂交稻品种在巴基斯坦、印度尼西亚等 5 个亚洲国家通过审定, 推广面积超过 63 万 hm<sup>2</sup>(表 5)。

上海农业生物基因中心培育的 GSR 品种 SACG-4 在印度和老挝等国通过审定。在印度和菲律宾的 7 个不同地点的试验结果表明, SACG-4 的

平均产量可以达到 5.84 t/hm<sup>2</sup>, 远远高于当地对照品种的 5.01 t/hm<sup>2</sup> 和 5.20 t/hm<sup>2</sup>, 比当地对照品种平均增产 15% 左右(表 6)。

华中农业大学培育的华 564 和来自广东的水稻品种丝苗在莫桑比克通过了品种审定。华 564 和丝苗在莫桑比克的 5 个试验地点都表现出高产的特性, 平均产量分别达到 8.41 t/hm<sup>2</sup> 和 8.51 t/hm<sup>2</sup>, 比当地对照品种(Limpopo)平均增产 62.1% 和 63.9%(表 7)。

华中农业大学培育的华 565 和来自广东的水稻品种抗草稻 1 号在孟加拉国通过了品种审定, 这两个品种在孟加拉国的 5 个地点产量试验结果表明, 平均产量分别达到每公顷 6.36 t/hm<sup>2</sup> 和 6.24 t/hm<sup>2</sup>, 比当地对照品种(dhan28)平均增产 15.6% 和 13.4%(表 8)。

### 4 审定品种的推广应用情况

截至 2018 年 3 月, 绿色超级稻项目共在亚洲

表4 引种国内常规稻品种在国外的审定情况

审定国家	GSR名称	品种审定名称	审定年份
柬埔寨(2)	八桂香(Ba-Gui-Xiang)	Ba-Gui-Xiang	2013
	Guiyu7	Guiyu7	2013
老挝(5)	RC 8	RC 8	2014
	SACG-4	SACG-4	2014
	Wanxian 763	Wanxian 763	2014
	华564 (Hua564)	Hua564	2014
	中组14 (Zhongzu14)	Zhongzu14	2014
卢旺达(1)	08繁10 (08Fan10)	Buryohe	2013
孟加拉国(3)	SACG-7	BINAdhan-17GSR	2015
	华565 (Hua565)	BRRIdhan75	2016
	抗草稻(Weed Tolerant Rice)	BRRI dhan69	2014
莫桑比克(3)	华564 (Hua564)	Hua 564	2015
	黄华占(Huanghuazhan)	Huang-Hua-Zhan	2014
	丝苗(Simiao)	Simiao	2015
斯里兰卡(1)	CNI9028 (早粳788)	Bg 251GSR	2014
乌干达(1)	中广优1号(GSR 0057)	Okille	2014
印度(4)	黄华占(Huanghuazhan)	PR126	2017
	华565 (Hua565)	BINA 17	2018
	SACG-4	BRRI 75	2018
	抗草稻(Weed Tolerant Rice)	BRRI 69	2018
印度尼西亚(2)	黄华占(Huanghuazhan)	Impari 42 Agritan GSR	2015
	中组14 (Zhongzu14)	Impari 43 Agritan GSR	2015
越南(2)	CNI 9026 (08繁10)	Gia loc 102	2013
	CNI9028 (早粳788)	Gia loc 101	2014
菲律宾(1)	TME80518	GSR15	2014
巴基斯坦(1)	JH15-1-1-1	PARC GSR-I	2015

和非洲 14 个目标国家审定品种 74 个, 其中常规稻品种 48 个, 杂交稻品种 26 个。目前这些品种正在各个目标国家稳步推广应用。根据各个目标国参加单位反馈的推广面积和绿色超级稻种子的生产量, 推算绿色超级稻品种在亚洲和非洲 11 个目标国家的累计种植面积达到 235 万  $\text{hm}^2$  (常规稻 172 万  $\text{hm}^2$ , 杂交稻 63 万  $\text{hm}^2$ ), 其中越南超过 100 万  $\text{hm}^2$ , 菲律宾 54 万  $\text{hm}^2$  (表 9)。随着审定品种的增多以及推广体系的不断完善, 绿色超级稻品种在亚洲和非洲目标国家的推广和种植面积将不断扩大。

## 5 新品种推广取得的社会经济效益评估

2012 年, Pandey 等<sup>[15]</sup>认为, 针对受胁迫的望天田系统, 水稻育种技术开发和传播策略应该考虑其胁迫情况的异质性和复杂性, 将多种非生物胁迫抗性聚合到广适性水稻品种中是应对这种情况的最有效方法。2016 年, Yorobe 等<sup>[16]</sup>根据对菲律宾和孟加拉国望天田和灌溉生态系统中部分新培育的

GSR 品种的社会经济评估报告, 认为 GSR 水稻品种对产量和净收入产生了显著影响。与常规水稻品种相比, GSR 品种的产量显著提高, 抗性明显增强, GSR 和非 GSR 品种相比平均增产 0.89~1.83  $\text{t}/\text{hm}^2$ , 平均增收为 230.9 美元/ $\text{hm}^2$ 。到目前为止, 在非洲和亚洲目标国家总共推广 GSR 品种 235 万  $\text{hm}^2$ , 估计为农户平均增收 5.4 亿美元。研究结果表明, 对遭遇极端气候的地区如菲律宾, 在发生洪水过多的雨季, GSR 品种对稻农的影响更加有利。目前, 在菲律宾农业部的支持下, 具有多种非生物胁迫抗性的 GSR 品种正在菲律宾迅速扩大, 可望取代当地的常规品种。因此, GSR 品种为菲律宾的粮食安全和扶贫提供了难得而有利的机会<sup>[16]</sup>。2015 年, 在菲律宾和越南培育审定的 13 个 GSR 品种共生产了 5.5 万 t 认证种子, 足以满足两国 160 多万户小型稻农的 150 多万  $\text{hm}^2$  稻田的用种需要。可以预计, 育成的 GSR 品种将会对这些目标国家的粮食安全和扶贫产生重大影响。

表5 绿色超级稻杂交稻在国外的审定情况

审定国家	审定名称	审定年份	推广面积(万hm <sup>2</sup> )	承担单位
巴基斯坦(11)	TFA121	2011	10	安徽荃银高科种业有限公司
	TARA 786	2015	0.5	安徽荃银高科种业有限公司
	ROSHAN	2016	0.5	安徽荃银高科种业有限公司
	PEARL-1	2011	0.5	安徽荃银高科种业有限公司
	Komal	2009	10.5	武汉庆发禾盛农业发展公司
	Heera	2009	1.1	武汉庆发禾盛农业发展公司
	Hs777	2008	3.0	武汉庆发禾盛农业发展公司
	Hs9393	2010	6.1	武汉庆发禾盛农业发展公司
	Hs9022	2010	0.6	武汉庆发禾盛农业发展公司
	Zy688	2010	0.4	武汉庆发禾盛农业发展公司
	Zy018	2010	0.2	武汉庆发禾盛农业发展公司
孟加拉国(5)	WIN301	2015	0.4	安徽荃银高科种业有限公司
	WIN302	2015	0.6	安徽荃银高科种业有限公司
	HS-273	2014	8.1	湖北省种子集团有限公司
	HS-48	2014	3.2	湖北省种子集团有限公司
	HS-Q1	2014	2.0	湖北省种子集团有限公司
越南(2)	HS-297	2014	3.2	湖北省种子集团有限公司
	SQ-2	2013	0.2	安徽荃银高科种业有限公司
印度尼西亚(6)	Mapan 2	2011	1.3	安徽荃银高科种业有限公司
	Mapan 5	2011	1.8	安徽荃银高科种业有限公司
	P89	2014	4.0	安徽荃银高科种业有限公司
	HS-38	2014	4.8	湖北省种子集团有限公司
	BSHS1-GSR	2014		BOSHIMA c/o Weijun Xu
	BSHS6-GSR	2014		BOSHIMA c/o Weijun Xu
老挝(2)	Jinyou 14	2017	0.16	云南金瑞种业有限公司
	Jinyou 16	2017	0.16	云南金瑞种业有限公司
合计			63.4	

表6 GSR品种SACG4在菲律宾和印度的产量表现情况

地点	菲律宾			印度				平均产量 (t/hm <sup>2</sup> )	比当地对照 平均增产(%)
	Nueva Ecija	Odisha	Samastipur	Gujarat	Karnataka	Hyderabad	Hardinath		
SACG 4	8.1	3.8	7	4.6	7.3	6.6	3.5	5.84	15
当地对照1	6.6	3.5	7.1	4.1	7.2	3.8	2.8	5.01	
当地对照2	7.8	2.8	6.5	4.1	7.3	4.6	3.3	5.2	

表7 GSR品种丝苗和华564在莫桑比克不同地点的产量表现情况

品种名称	产量(t/hm <sup>2</sup> )					平均产量 (t/hm <sup>2</sup> )	比当地对照 平均增产(%)
	Chokwe	Bilene	Chilebene	Chokwe-D4	Xai-Xai		
丝苗	10.21	6.19	8.61	8.63	10.3	8.41	62.1
华564	9.61	5.8	9.02	9.63	9.57	8.51	63.9
Limpopo (对照)	5.45	4.23	4.98	5.93	5.35	5.19	

## 6 结语及展望

水稻的可持续生产是许多亚洲和非洲国家粮食安全和减贫的关键。特别是近年来面对全球极端气候的频繁出现, 亚洲和非洲雨养地区的水稻生产能

力变得尤其脆弱。因此, 提高亚洲和非洲大部分雨养地区的水稻生产能力, 维持全球的稻米生产力是未来几十年全球水稻育种家面临的巨大挑战。“绿色超级稻(GSR)”表现为在较少投入的情况下能稳定高产的水稻品种, 尤其对气候变化引起的频繁极

表8 GSR品种华565和抗杂草稻1号在孟加拉国不同地点的产量表现情况

品种名称	产量(t/hm <sup>2</sup> )					平均产量 (t/hm <sup>2</sup> )	比当地对照 平均增产(%)
	Bhanga	Comilla	Sonagazi	Barisal	Satkhira		
华565	7.19	8.2	3.31	6.5	6.6	6.36	15.6
抗杂草稻1号	6.07	8	4.13	6.81	6.2	6.24	13.4
BRRI dhan28 (对照)	7.44	6.7	3.38	5.8	4.2	5.5	

表9 GSR常规稻品种在亚非目标国家的推广和种植面积

国家	种子生产量 (t)				推广面积 (hm <sup>2</sup> )			根据种子生产量推测的 种植面积 (35 kg/hm <sup>2</sup> )				总面积 (hm <sup>2</sup> )
	2012-2015	2016	2017	至 2018.3	2012-2015	2016	2017	2012-2015	2016	2017	至 2018.3	
	孟加拉国	10	7	48	23	-	-	-	296	204	1 381	
印度	1	750	100	400	-	-	-	28	21 429	2 857	11 429	35 743
巴基斯坦	-	-	-	-	10	85	580	-	-	-	-	675
斯里兰卡	1	-	-	-	-	300	700	18	-	-	-	1 018
菲律宾	18 827	5	5	-	-	61	1 161	537 914	135	149	-	539 420
印度尼西亚	1	0	5	-	-	-	100	32	6	156	-	194
越南	34 733	-	-	-	-	61 000	35 100	992 371	-	-	-	1 088 471
老挝	26	-	-	-	-	-	-	742	-	-	-	742
乌干达	550	9	13	-	-	-	7 000	15 714	257	377	-	23 348
卢旺达	121	-	-	-	-	720	-	3 462	-	-	-	4 182
莫桑比克	343	6	8	15	-	-	19 000	9 800	157	214	414	29 585
合计	54 613	777	179	438	10	62 166	63 641	1 560 377	22 188	5 134	12 489	1 725 905

端逆境的干扰具有较强抵抗力和恢复力，是应对未来水稻生产面临挑战而提出的重要概念。在“863”计划和比尔及梅琳达·盖茨基金项目等资助下，项目组采取国内现有品种的引种试种结合改进的回交育种策略，成功地选育出一批适应不同目标国家种植的GSR品种，这些GSR品种推广应用的效果已初见端倪。提出以改进的回交育种策略为代表的GSR育种技术，强调在回交育种中极端表型选择和选择导入系目标性状QTL/QTL网络的高效发掘的基础上<sup>[17]</sup>，根据选择导入系的表型和QTL基因型信息进一步通过设计育种聚合不同QTL的有利等位基因，选育聚合多个有利基因的多抗新品种<sup>[7,18-19]</sup>。近年来，应用这种育种策略已经选育出大量有应用前景的GSR品种。这些品系在短短6~8年内在多个亚洲目标国家通过了审定和推广，表现出对多种非生物胁迫的良好抗性。

绿色超级稻项目在国内的执行过程中，也遇到了很多问题。第一，需要充分认识和了解当地的水稻种植环境、投入水平、种植习惯、当地人民的口味和品质需求等，这样才可以更好地根植于当地的具体情况；其次，不同国家在水稻技术和种植制度

上存在着较大的差异和差距，目前水稻技术输出，与不同国家的合作仅限于技术和人员的培训交流，并没有着力于解决与当地种植技术和推广体系上存在的差距；再者，水稻品种的快速审定和品种的大规模推广需要建立一种反馈机制，借此逐步形成一套能满足资源禀赋和技术变化要求且与文化传统相适应的完整体系。此外，目前国内对育成农作物审定品种对外输出的管理办法已经不适应当前“一带一路”农业走出去的迫切需求，难以高效服务中国农业“走出去”的整体布局，管理办法急需进行改革和完善。

随着我国“一带一路”政策的进一步开放，需要有更多的农业先进技术和产品走出国门。在短期内要培育更多更好的适应气候变化的GSR水稻品种，并配套相应的绿色增产增效技术，最大化地发挥GSR品种在这些目标国家的增产增效作用，促进目标国家农业的可持续发展，从而真正提高这些目标国家小型农户收益，这迫切需要育种、栽培、植保、农机和农业经济等多学科的大协作。同时，急需建立一种灵活、高效和安全的种质资源交换和品种输出管理新模式，最大程度地减少农业技术和

品种输出的障碍。如何充分利用国家“一带一路”相关的农业政策, 集中国内优势力量, 在帮助资源贫困国家大力发展农业的同时, 缓解我国自身的农业生产压力, 确保我国的粮食安全, 是摆在农业科研人员面前的一项重要历史任务。

#### [参 考 文 献]

- [1] Mackill DJ, Coffman WR, Garrity DP. Rainfed lowland rice improvement[M]. Los Baños, Metro Manila, The Philippine: International Rice Research Institute, 1996
- [2] Pandey S. Breeding Strategies for rainfed lowland rice in drought-prone environments[C]: Proceedings of An International Workshop Held at Ubon Ratchathani, Thailand, 1997, 5-8 November
- [3] 肖景华, 吴昌银, 韩斌, 等. 中国水稻功能基因组研究进展. 中国科学, 2009, 39: 1711-22
- [4] 罗利军. 水稻等基因导入系构建与分子技术育种. 分子植物育种, 2005, 3: 609-12
- [5] Zhang QF. Strategies for developing Green Super Rice. Proc Natl Acad Sci USA, 2007, 104: 16402-9
- [6] Ali AJ, Xu JL, Ismail AM, et al. Hidden diversity for abiotic and biotic stress tolerances in the primary gene pool of rice revealed by a large backcross breeding program. Field Crops Res, 2006, 97: 66-76
- [7] Ali J, Xu JL, Gao YM, et al. Innovative Green Super Rice (GSR) molecular breeding strategy: achievements and advances. Philipp J Crop Sci, 2012, 37: 49
- [8] He YX, Zheng TQ, Hao XB, et al. Yield performances of japonica introgression lines selected for drought tolerance in a BC breeding programme. Plant Breeding, 2010, 129: 167-75
- [9] Lafitte HR, Li ZK, Vijayakumar CHM, et al. Improvement of rice drought tolerance through backcross breeding: Evaluation of donors and selection in drought nurseries. Field Crops Res, 2006, 97: 77-86
- [10] Meng LJ, Lin XY, Cui YR, et al. Identification and screening of salt and alkaline tolerance in rice using advanced backcross introgression populations. Mol Plant Breeding, 2010, 18: 72-80
- [11] Ali J, Xu JL, Gao YM, et al. Harnessing the hidden genetic diversity for improving multiple abiotic stress tolerance in rice (*Oryza sativa* L.). PLoS One, 2017, 12: e0172515
- [12] Cui Y, Zhang F, Xu J, et al. Mapping quantitative trait loci in selected breeding populations: a segregation distortion approach. Heredity, 2015, 115: 538
- [13] Feng B, Chen K, Cui Y, et al. Genetic dissection and simultaneous improvement of drought and low nitrogen tolerances by designed QTL pyramiding in rice. Front Plant Sci, 2018, 9: 306
- [14] Dingkuhn M, Laza MRC, Kumar U, et al. Improving yield potential of tropical rice: Achieved levels and perspectives through improved ideotypes. Field Crops Res, 2015, 182: 43-59
- [15] Pandey S, Gauchan D, Malabayabas M, et al. Patterns of adoption of improved rice varieties and farm-level impacts in stress-prone rainfed areas in South Asia. IRRI Books, 2012
- [16] Yorobe JM, Ali J, Pede VO, et al. Yield and income effects of rice varieties with tolerance of multiple abiotic stresses: the case of green super rice (GSR) and flooding in the Philippines. Agric Econ, 2016, 47: 261-71
- [17] 徐建龙, 高用明, 傅彬英, 等. 回交导入后代水稻种质有利基因的鉴定与筛选研究. 分子植物育种, 2005, 3: 619-28
- [18] 高用明, 张帆, 王文生, 等. 绿色性状分子设计聚合育种理论技术体系创建. 科技创新导报, 2016, 13: 167-8
- [19] 黎志康. 我国水稻分子育种计划的策略. 分子植物育种, 2005, 3: 603-8