

刘国兰,余新桥,刘毅,等.节水抗旱稻品种选育的回顾与展望[J].上海农业学报,2022,38(4):20-25.

节水抗旱稻品种选育的回顾与展望

刘国兰,余新桥*,刘毅,张安宁,王飞名,罗利军**

(上海市农业生物基因中心,上海 201106)

摘要: 培育和应用节水抗旱稻品种对于增加和稳定水稻单产、缓解我国水资源短缺状况、保护生态环境和保障粮食安全具有十分重要的意义。通过回顾我国节水抗旱稻育种工作的发展历程,总结不同时期育成品种的特点,并对节水抗旱稻育种计划的发展方向和前景进行展望。

关键词: 节水抗旱稻;育种;常规品种;杂交稻;标记辅助选择

中图分类号: S511.03 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3924(2022)04-020-06

Review and prospect on development of water-saving and drought-resistance rice (WDR) varieties

LIU Guolan, YU Xinqiao*, LIU Yi, ZHANG Anning, WANG Feiming, LUO Lijun**

(Shanghai Agrobiological Gene Center, Shanghai 201106, China)

Abstract: Development and application of water-saving and drought-resistance rice (WDR) is of great significance for increasing and stabilizing rice yield, alleviating the shortage of water resources, protecting ecological environment and ensuring food security. This paper reviews the developmental process of WDR breeding in China, categorizes the characteristics of WDR varieties released in different periods, and prospects the trends of WDR breeding programs in the future.

Key words: Water-saving and drought-resistance rice (WDR); Breeding; Inbred variety; Hybrid rice; Marker assisted selection

水稻作为我国第一大粮食作物,其产量约占粮食总产的40%。水稻生产关乎国家粮食安全^[1]。然而,目前水稻生产面临资源与环境的严峻挑战,主要表现在:水稻生产用水占全国总耗水量的50%左右,我国是缺水大国,每年农业灌溉缺水1200亿m³,干旱使大部分中低产田严重减产,干旱缺水与水稻用水矛盾日益严重;因农药化肥的增加水稻生产长期保持水层的种植方式使面源污染越来越严重,温室气体排放加重。因此,提高水稻品种的节水抗旱特性,培育并推广应用节水抗旱稻品种,可为保障粮食安全开辟新途径^[2]。

发展节水抗旱稻优势在于:1)有利于缓解水资源短缺危机;2)可以在山岗坡地、新改田、工业抛荒地等旱地种植,扩大水稻种植面积;3)节工省本,轻简化栽培方式可降低水稻生产劳动强度;4)有利于降低温室气体排放,促进低碳农业发展;5)可减少灌溉次数,降低化肥和农药产生的面源污染,提高磷肥利用效率,减少水稻对砷化物的吸收^[2-6]。因此,培育和应用节水抗旱稻品种,对于增加和稳定水稻单产、缓解我国水资源短缺状况、保护生态环境和保障粮食安全具有十分重要的意义^[7]。

随着旱稻品种审定制度及渠道的改变及节水抗旱稻理念的发展,节水抗旱稻品种选育方向正朝着更符合市场需求方向发展。在此过程中,2010年节水抗旱稻概念在《J EXP BOT》提出^[8],2016年《节水抗旱

收稿日期:2022-04-30

基金项目:上海市科学技术委员会科技创新行动计划(21N11900200);上海市科技兴农项目(2019-02-08-00-08-F01110)

作者简介:刘国兰(1980—),女,博士,研究员,从事节水抗旱稻分子育种工作。E-mail:guolanliu@126.com

* 共同第一作者,E-mail:yuxq66@126.com

** 通信作者,E-mail:lijun@sage.org.cn

稻术语》国家行业标准正式颁布实施^[9],2018 年国家审定委员会批准设立“国家节水抗旱稻品种区域试验”,同年节水抗旱鉴定中心获检验检测机构(CMA)资质认定证书,这规范化了抗旱性鉴定流程,推动了节水抗旱稻品种的发展和合作,使节水抗旱稻品种的培育和应用上了新的高度。

1 由旱稻向节水抗旱稻品种的探索

我国水稻抗旱性改良的系统研究始于 1992 年,巴西陆稻‘IAPAR9’在我国引进、试种的成功促进了旱稻资源的收集、改良和水稻抗旱性研究等工作。2000 年农业部启动了全国旱稻区试试验,相继审定了一些适合不同生态区的旱稻品种^[2,4],如‘秦爱’‘旱稻 2 号’‘中早 3 号’‘丹粳 5 号’‘丹粳 6 号’‘旱 72’‘云陆’‘陆引’等(<https://www.ricedata.cn/variety/>),这些品种采用传统旱稻模式选育,侧重抗旱性的提升,但品种的产量优势不强^[10],在有灌溉条件的高产田块没有竞争优势。1998 年上海市农业生物基因中心尝试将水稻高产优质特性和旱稻的抗旱性结合,以水稻优良的不育系珍汕 97A 与旱稻资源广泛测配,发现从东南亚引种的品种‘EAIC139-55-1-2’测交种保持不育,继而进行回交转育,于 2003 年育成世界上第一个节水抗旱不育系沪早 1A^[11];1999 年以东南亚旱稻材料 ET28 为母本与水稻恢复系 6078、明恢 86 杂交培育出早恢 3 号,与沪早 1A 配制的组合‘早优 3 号’2006 年通过上海市审定^[12],至此实现三系配套。伴随着国家旱稻区域试验的停止,品种审定都按水稻区试标准,这对产量提出了更高的要求。‘沪优 2 号’(‘早优 2 号’)是全国历史上唯一参加了一年旱稻区域试验之后,又参加华南水稻区域试验,继而通过国家审定的品种。节水抗旱稻首次育成的 2 个三系组合‘早优 2 号’和‘早优 3 号’抗旱性强,适应性较好,望天田或缺水条件下产量明显优于普通水稻,在四川、广西、浙江、三亚、湖南、福建等地示范种植表现较好^[13-19]。‘早优 3 号’在四川冬水田稻区免耕直播种植较当地水稻杂交稻平均增产 6.4%^[13],但应用面积却很小,主要原因是母本沪早 1A 柱头活力差,异交结实率偏低^[11],组合制种产量低,制种成本太高。

常规籼稻品种‘沪早 15 号’于 2006 年通过了国家旱稻品种审定。‘沪早 15 号’是以水稻‘七秀占’与旱稻‘中早 3 号’杂交选育而成,熟期较迟,产量较高,抗旱性强,中抗稻瘟病,米质一般。‘沪早 15 号’是上海市农业生物基因中心首个知识产权转让的旱稻品种,2007 年合肥市丰宝农业科技服务有限公司获得‘沪早 15 号’品种开发权,累计推广面积达 6 000 hm² 以上。‘沪早 15 号’在安徽种植时,虽抗旱性强,但易落粒,限制了其推广应用。此阶段品种选育目标是在保证品种的抗旱性基础上提高产量,无论是杂交稻‘早优 2 号’‘早优 3 号’,还是常规稻‘沪早 15 号’,产量都极显著高于对照品种‘中早 3 号’,增产幅度均超 30%。

节水抗旱稻一词最早出现在 2005 年上海市科技兴农“节水抗旱稻的遗传改良与新品种(组合)选育”和“节水抗旱稻高产栽培技术集成”项目中,项目旨在培育节水抗旱稻品种及研究栽培技术。在节水抗旱稻品种选育过程中,如果说在 2005 年之前主要侧重品种抗旱性的选育和研究,那么之后也逐渐关注到水分利用效率。对比研究水稻品种‘汕优 63’和旱稻品种‘中早 3 号’水分利用效率,发现‘中早 3 号’抗旱性比‘汕优 63’强,但不同时期的水分利用效率均低于‘汕优 63’^[20]。

2 节水抗旱稻的正式提出与品种的进一步发展

2009 年第三届国际干旱大会上首次提出“节水抗旱稻”的概念^[7],把节水抗旱稻(Water-saving and drought-resistance rice, WDR)明确定义为既具有水稻的高产优质特性,又具有旱稻的节水抗旱特性的一种新的栽培稻类型。

针对目标区域培育不同类型的节水抗旱稻品种。选育出以 BT 型节水抗旱稻不育系沪早 2A^[21]配制的粳型三系组合‘早优 8 号’,并于 2010 年通过上海审定;为满足上海市“国庆稻”市场需求,培育出早熟优质品种‘早玉香粳’^[22],最大限度保留水稻优良特性的同时增加品种的抗旱性。‘早优 8 号’(‘早优湘晴’)具有节水抗旱、高产优质、便于轻型栽培等特性,既可在高产水稻田作普通杂交稻种植,也可在工业抛荒地、新开垦的盐碱地、无灌溉条件的中、低产田种植^[23-24]。上海地区雨水充足,且农田灌溉设施相对较好,‘早优 8 号’在节水灌溉条件下比当地高产品种的产量和水分利用效率高^[25-27],但复原抗旱性强^[28]的优势未能充分显现。

在籼型三系杂交选育上,取得突破性进展的工作是沪早 1A 异交结实率低的改良,将开花习性好的水稻雄性不育保持系与沪早 1B 杂交,选育出配合力、稻米品质、香味不变,异交结实率高的节水抗旱稻新不育系沪早 7A,于 2012 年通过安徽省农作物品种审定委员会鉴定;由沪早 7A 与早恢 3 号配制的杂交节水抗旱稻组合‘早优 73’于 2014 年通过安徽省品种审定^[29]。‘早优 73’的培育成功,极大地推动了节水抗旱稻的发展,随着种植面积的扩大,节水抗旱稻不断展示着它的优势,越来越受农民的喜爱。‘早优 73’是节水抗旱稻里程碑式的品种,目前是长三角地区尤其是安徽省种植面积最大的杂交稻品种,近 10 年的时间里,依然保持着较强的市场生命力,并通过湖北、广西等省审定,在江西、河南、湖南、浙江、福建等省进行了引种备案^[30-31]。‘早优 73’生育期适宜,米质优异,丰产、稳产性好,适宜轻型栽培,不仅省工、省心、省力,还对种植环境有一定的保护;在丰水或干旱时均能获得较高的产量;面对大风等恶劣天气也有较高的抗倒伏能力,近几年,在极端天气频发的恶劣气候下,‘早优 73’在抗旱、耐淹、品质等方面表现优异,极大地推动了节水抗旱稻事业的发展^[30]。‘早优 73’稻米在 2018 年荣获中国(三亚)国际水稻论坛“最受喜爱十大优质稻米品种”“安徽省优质食味品质籼稻品种”,2019 年荣获“第二届全国优质稻品种食味品质鉴赏金奖(籼稻)”^[31]。2021 年王家坝闸开闸泄洪,洪水退去,节水抗旱稻‘早优 73’“浴水重生”,从近地面处再生出新的茎干,现场测产显示产量达到 5 595 kg/hm²^[32]。

三系组合是节水抗旱稻中数量最多的一个类型,针对不同生育期、不同生态区,还选育了适宜广西早稻种植的‘早优 113’^[33],适宜上海单季晚稻种植的‘早优 127’‘早优 780’,适宜云南陆稻种植的‘早优 737’,适宜上海种植的‘早优 540’^[34],适宜湖北省西南以外地区作中稻种植的‘沪优 549’等新品种(表 1)。“沪优 549”具有节水抗旱、高产、氮肥高效等特点,是第一个被认定的绿色超级稻品种。‘沪优 549’的地上部氮素积累量和氮素籽粒生产效率较‘扬两优 6 号’分别高 6.71% 和 2.39%,表明‘沪优 549’较高的产量得益于其较大的库容量,表现为较多的每穗颖花数和较高的生物量^[35]。

表 1 通过省市级及以上审定的早稻或节水抗旱稻品种*

Table 1 Water-saving and drought-resistance rice varieties released by provincial or national approval

审定年份	品种名称	审定编号	品种类型	审定年份	品种名称	审定编号	品种类型
2003	‘中早 3 号’	国审稻 2003030	粳型常规早稻	2018	‘早优 737’	滇审稻 2018035	籼型三系杂交稻
2004	‘沪早 3 号’	国审稻 200405	粳型常规早稻	2019	‘早优 540’	沪审稻 2019012	籼型三系杂交稻
2004	‘沪早 7 号’	沪农品审稻(2004)第 009 号	粳型常规早稻	2019	‘沪优 549’	鄂审稻 2019026	籼型三系杂交稻
2006	‘沪早 15 号’	国审稻 2006072	籼型常规早稻	2022		桂审稻 2022128 号	
2006	‘早优 3 号’	沪农品审稻(2006)第 006 号	籼型三系杂交稻	2020	‘沪早 1512’	沪审稻 2020013	籼型常规稻
2006	‘早优 2 号’	沪农品审稻(2006)第 005 号	籼型三系杂交稻	2020	‘沪早 106’	沪审稻 2020011	粳型常规稻
2010	(‘沪优 2 号’)	国审稻 2010034		2020	‘早优 681’	沪审稻 2020014	籼型三系杂交稻
2010	‘早优 8 号’	沪农品审(2010)第 006 号	粳型三系杂交稻	2020	‘早优 3015’	国审稻 20200312	籼型三系杂交稻
2012	‘早玉香粳’	沪农品审水稻(2012)第 005 号	粳型常规稻	2020	‘节优 804’	鄂审稻 20200080	籼型三系杂交稻
2012	‘早优 113’	沪农品审水稻(2012)第 004 号	籼型三系杂交稻	2021	‘早优 8200’	鄂审稻 20210073	籼型三系杂交稻
2014		桂审稻 2014016 号		2021	‘早两优 8200’	国审稻 20210448	籼型两系杂交稻
2014	‘早优 73’	皖稻 2014024	籼型三系杂交稻	2021	‘沪早 1517’	沪审稻 2021010	籼型常规稻
2021		鄂审稻 20210001		2021	‘早优 640’	沪审稻 2021009	籼型三系杂交稻
2021		桂审稻 2021221 号		2021	‘沪早 7 优华宝占’	琼审稻 2021003	籼型三系杂交稻
2016	‘WDR48’	鄂审稻 2016026	粳型常规稻	2022	‘早两优 8208’	赣审稻 20220034	籼型两系杂交稻
2016	‘沪早 61’	沪审稻 2016006	粳型常规稻			桂审稻 2022029 号	
2017	‘沪早 1509’	沪审稻 2017012	籼型常规稻	2022	‘早优 217’	桂审稻 2022078 号	籼型三系杂交稻
2017	‘沪早 19’	沪审稻 2017011	籼型常规稻	2022	‘早优 3928’	桂审稻 2022042 号	籼型三系杂交稻
2018	‘早优 780’	沪审稻 2018009	籼型三系杂交稻				

注: * 仅限笔者团队及合作单位培育的品种。

籼型常规稻的选育是在‘沪早 15’的基础上,针对其抗倒性差、易落粒、米饭偏硬等缺点进行改良,培育出产量、品质和抗倒性明显提高的‘沪早 19’^[36]和‘沪早 1509’^[37]。粳型常规稻则是在‘沪早 3 号’的基础上,选育节水抗旱、优质高产的新品种,如‘WDR48’^[38]、‘沪早 68’和‘沪早 61’^[39],其米质均达国标优质三级米及以上。无论是籼型还是粳型常规稻,均是在前期对应类型的推广品种基础上,于选育过程中保留抗旱性的优势,同时加强对优质、产量等性状的选择。

此阶段节水抗旱稻品种选育的思路是以抗旱性强的旱稻和高产的水稻为双亲,通过在不同平台交叉选择,实现节水抗旱稻品种的抗旱性和丰产性,同时兼具轻简栽培等特点。如低世代在没有犁底层的山地进行避旱性选择,在水田旱种进行耐旱性选育,在高产栽培条件下进行产量选择,充分整合避旱性、耐旱性和高水分利用效率特点^[7,40]。这个时期的品种选育主要侧重抗旱、丰产性和稻米品质,对于品种的稻瘟病抗性要求也是随着品种审定要求以及在生产过程中出现的问题才逐步引起重视。如将稻瘟病抗性基因(*Pi1*、*Pi2*和*Pi9*)导入到节水抗旱稻保持系沪早1B和恢复系早恢3号,获得抗病性显著高于轮回亲本的株系^[41];利用*Xa23*基因,改良沪早1B白叶枯病抗性^[42];将抗褐飞虱基因*Bph6*、*Bph9*、*Bph14*和*Bph15*以单独和聚合方式导入节水抗旱稻恢复系早恢3号,获得一系列含有单基因、双基因、三基因和四基因的改良系^[43];以水稻优良品种‘黄华占’为受体,以携带抗褐飞虱基因和抗旱性好的节水抗旱稻‘M535’为供体,提高‘黄华占’的抗旱及抗虫性^[44];将抗稻瘟病基因*Pi2*、*Pi9*、*Pi25*和*Pigm*,抗白叶枯病基因*Xa21*、*Xa23*,抗褐飞虱基因*Bph14*、*Bph15*、*Bph6*和*Bph9*等以单独及聚合的方式导入到早恢3号、早恢15号、沪早7A/B、沪早5S、‘沪早61’等骨干亲本中,实现绿色性状基因聚合,创制了一批富含不同绿色性状的节水抗旱稻新种质^[45]。亲本的回交改良在新的审定制度下为原品种延长了市场生命力。创制的节水抗旱抗病虫等新种质为选育绿色性状更多或者说更适应市场的新品种奠定了材料基础。

3 节水抗旱稻品种新的发展机遇

2018年全国农业技术推广服务中心把节水抗旱稻作为特殊类型设立区试组,旨在选育出一批优于对照品种‘早优73’的节水抗旱稻新品种。抗旱性是品种表现第一考察要素,要求新品种在保证抗旱性的基础上,兼具其他特性。例如,2020年通过国家审定的节水抗旱稻品种‘早优116’和‘早优3015’具有早熟、高产特性,其中‘早优3015’与‘早优73’相比,在长江中下游作一季稻种植时全生育期少4.7d,株高矮6.8cm,两年区域试验平均产量提高4.47%;通过省级审定的常规籼稻‘沪早1512’具高产、优质特性;常规粳稻品种‘沪早106’具有早熟、高产特点;晚粳品种‘申稻8号’具有高产、优质特性;三系杂交稻‘早优681’具高产、中抗稻瘟病特性;三系杂交稻‘早优78’具有高产、优质特性等。第一个节水抗旱稻两系杂交组合‘早两优8200’于2021年通过国家审定,是由节水抗旱稻两系不育系沪早82S和恢复系早恢8200配制的两系组合,两年区试平均产量比‘早优73’(CK)增产3.68%。同年通过湖北省审定的三系组合‘早优8200’是由节水抗旱稻三系不育系沪早7A和恢复系早恢8200配组而成,‘早两优8200’和‘早优8200’均具有中抗白叶枯病、高产、优质、中抗稻瘟病、耐热等特性。这主要与恢复系早恢8200特性有关,早恢8200是由早恢3号通过分子标记辅助导入稻瘟病与白叶枯病抗性基因改良而成。优质、高产、中抗稻瘟病的籼型三系组合‘早优640’和籼型常规稻‘沪早1517’于2021年通过上海市审定(表1)。另有‘早两优8208’于2022年通过江西和广西省品种审定,‘早优217’‘早优711’‘早优3928’通过广西省品种审定。此阶段的节水抗旱稻品种选育是在前期品种高产和抗旱的基础上,实现多个抗病虫基因及优质基因的有效累加,这也是前期通过分子标记辅助改良进行亲本种质创新的必然结果和节水抗旱稻的发展趋势。

品种只有走向市场才能体现其真正价值。继‘早优73’‘沪早61’等品种成功转让给第一家专注节水抗旱稻研发和推广的上海天谷生物科技股份有限公司后,又迎来了新的合作伙伴,2020年安徽丰大集团成立江苏丰大生物科技有限公司,专注于节水抗旱稻的“育繁推”业务,同时上海市农业生物基因中心与江苏丰大生物科技有限公司共同成立江苏丰大生物研究院,以加大节水抗旱稻品种研发与市场推广力度。目前,‘早优3015’‘早优549’‘沪早19’和‘早两优8200’等品种已转让给江苏丰大生物科技有限公司进行市场推广开发。作为国审品种的‘早优3015’和‘早两优8200’已在市场上初显实力,深受农户喜欢。上海市农业生物基因中心的节水抗旱稻品种也深受其他企业的认可,2019年‘早优737’市场开发权转让给国银天府农业科技股份有限公司,2022年‘早优8200’市场开发权转让给中垦锦绣华农武汉科技有限公司,‘早两优8208’市场开发权转让给江西春风农业科技有限公司。

4 节水抗旱稻品种选育的展望

目前,在节水抗旱稻品种选育上已取得重要进展,但通过审定的品种相对于不同生态区域的需求,

或者与审定水稻品种相比,数量仍然较少,对应不同生态区域的适应轻简化栽培、营养高效的高产优质节水抗旱稻品种则少之又少。为了改变水稻的传统种植模式,扩大栽培稻的种植面积,缓解水资源危机和耕地压力,更好发挥节水抗旱稻在种源农业方面的作用,节水抗旱稻研究仍需加强。

一是加强氮磷肥高效利用的资源筛选。在节水抗旱基础上聚合营养利用高效特性,培育可大量减少化肥施用的节水抗旱稻新品种,如‘沪优549’的选育^[35]。另外,多年的水旱定量栽培试验表明,节水抗旱稻通过根系分泌有机酸增加磷的吸收从而稳定产量^[5],其磷的吸收效率优于超级杂交稻品种。但大多数节水抗旱稻品种不是氮磷高效品种,这是育种工作者需要关注的。

二是加强稻米品质(特别是食味品质)的改良,在实现绿色生产的基础上,大幅度提高稻米的经济价值。如何使得品种的稻米品质(尤其食味品质)能达到‘早优73’的水平,或者说如何提高整精米率是后期品种选育重点。

三是立足于轻型栽培,整合耐直播(长中胚轴、抗除草剂)、耐盐碱、再生力强、耐高温、耐淹等优良性状相关基因。长中胚轴、除草剂和耐盐碱相关工作仍是未来较长时间内育种工作的重点,也是节水抗旱稻今后在沿海滩涂或盐碱地、新垦坡地或贫瘠地更好发挥作用的关键。

四是基础研究与应用研究相结合,实现节水抗旱、抗病虫、优质高产的全基因组选择,培育少打农药,少施化肥,高产优质的节水抗旱稻新品种。应用现代育种技术,更快培育适应市场需求的品种,并将其推向更广的应用区域。

五是加强育种合作,广泛与科研院所、大学或公司合作,将节水抗旱稻不育系和恢复系广泛改良或者测配,选育适宜不同生态区的节水抗旱稻杂交新组合。如‘7优370’‘7优88’‘节优804’‘沪早7优华宝占’等品种,都是通过节水抗旱稻不育系与合作方的优良恢复系进行组配,选育出来的优良品种。今后还将建立更广泛的合作,培育更多节水抗旱稻新品种,加大其在不同生态区的应用。

参 考 文 献

- [1] 李辉.“节水抗旱稻”:解决水稻缺水问题:罗利军团队成果记[J].世界科学,2011(9):36-39.
- [2] 李兴华,汪昊凯,杨特武,等.节水抗旱稻发展现状、优势及需解决的主要问题[J].华中农业大学学报,2022,41(2):84-91.
- [3] 涂军明,邓桥江,曹志刚,等.节水抗旱稻的特性及其丰产高效栽培技术[J].湖北农业科学,2020,59(20):32-34.
- [4] 黄雪萍,方康书,方江林.节水抗旱稻生产现状分析及发展策略[J].安徽农学通报,2010,16(19):75-77.
- [5] BI J G, HOU D P, ZHANG X X, et al. A novel water-saving and drought-resistance rice variety promotes phosphorus absorption through root secreting organic acid compounds to stabilize yield under water-saving condition[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 315: 127992.
- [6] 孙会峰,周胜,陈桂发,等.水稻品种对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J].农业环境科学学报,2015,34(8):1595-1602.
- [7] 罗利军.节水抗旱稻的培育与应用[J].生命科学,2018,30(10):1108-1112.
- [8] LUO L J. Breeding for water-saving and drought-resistance rice (WDR) in China [J]. Journal of Experimental Botany, 2010, 61 (13): 3509-3517.
- [9] 中华人民共和国农业部.节水抗旱稻术语:NY/T 2862—2015[S].北京:中国农业出版社,2016.
- [10] 高欢,赵洪阳,聂元元,等.节水抗旱稻研究进展及其在水稻绿色生产的作用[J].上海农业学报,2017,33(6):123-128.
- [11] 余新桥,梅捍卫,刘康,等.优质节水抗旱雄性不育系‘沪早1A’的选育与利用[J].上海农业学报,2006,22(2):32-35.
- [12] 余新桥,李明寿,梅捍卫,等.杂交节水抗旱稻新组合沪优2号的选育[J].分子植物育种.2010,8(6):1177-1179.
- [13] 王方明,竭润生,李永英,等.早熟杂交稻早优3号在川东北冬水田稻区免耕直播栽培试验初报[J].杂交水稻,2012,27(4):46-48.
- [14] 梅道亮,叶永棋,罗利军,等.节水抗旱杂交稻早优3号节水减污作用研究[J].中国稻米,2007,13(3):31-32.
- [15] 李道远,黄振曼,张大刊,等.节水抗旱杂交稻早优3号试种试验[J].广西农业科学,2007,38(3):247-250.
- [16] 周运瑶.抗旱水稻早优3号在三亚推广应用的前景分析[J].热带农业工程,2008,32(2):53-54,62.
- [17] 陈小妹,张素芬,李代炳.沪优2号引种试验及高产栽培技术[J].农业科技通讯,2011(7):94-96.
- [18] 施鸿鑫,孙雄彪.节水灌溉下节水抗旱稻品种沪优2号产量优势及其生理基础[J].中国稻米,2019,25(2):64-68.
- [19] 叶灼金,谢玉眉.沪优2号望天田高产栽培技术[J].福建稻麦科技,2012,30(3):67-68.
- [20] 邹桂花,梅捍卫,余新桥,等.不同灌水量对水、早稻营养生长和光合特性及其产量的影响[J].作物学报,2006,32(8):1179-1183.
- [21] 余新桥,李明寿,刘国兰,等.BT型节水抗旱不育系‘沪早2A’的选育[J].上海农业学报,2011,27(3):43-46.
- [22] 刘国兰,王飞名,方江林,等.早熟优质节水抗旱稻‘早玉香粳’的选育及栽培技术[J].上海农业学报,2014,30(2):112-114.
- [23] 周爱华.早稻早优湘晴在浦东新区种植表现及推广应用的探讨[J].浙江农业科学,2011,52(6):1317-1318.
- [24] 龚丽英,方江林,刘国兰,等.粳型杂交稻早优8号高产制种技术[J].浙江农业科学,2013,54(7):777-779.
- [25] 张耗,刷成欣,陈婷婷,等.节水灌溉对节水抗旱水稻品种产量的影响及生理基础[J].中国农业科学,2012,45(23):4782-4793.
- [26] 褚光.不同水分、养分利用效率水稻品种根系特征及其调控技术[D].扬州:扬州大学,2016.

- [27] 卞金龙,蒋玉兰,刘艳阳,等. 干湿交替灌溉对抗旱性不同水稻品种产量的影响及其生理原因分析[J]. 中国水稻科学,2017,31(4):379-390.
- [28] CHU G, CHEN T T, WANG Z Q, et al. Morphological and physiological traits of roots and their relationships with water productivity in water-saving and drought-resistance rice[J]. Field Crops Research, 2014, 162:108-119.
- [29] 余新桥,刘国兰,李明寿,等. 节水抗旱杂交稻新组合早优 73[J]. 杂交水稻,2016,31(4):79-81.
- [30] 梅长军. 耐旱节水水稻新品种早优 73 号的特征特性及其在安徽省的推广成效[J]. 现代农业科技,2020(6):50,52.
- [31] 毛夏丰,王震. 节水抗旱稻早优 73 在湖南省的种植表现及高产栽培技术[J]. 现代农业科技,2020(8):13,16.
- [32] 马爱平. 筛选优异种质资源造就节水抗旱的“稻坚强”[J]. 农业知识,2022(1):43-44.
- [33] 刘国兰,李明寿,郭嗣斌,等. 杂交节水抗旱稻新组合早优 113 号的选育与应用[J]. 南方农业学报,2013,44(11):1806-1809.
- [34] 张安宁,王飞名,刘毅,等. 高产优质节水抗旱稻新组合早优 540[J]. 杂交水稻,2021,36(3):112-114.
- [35] WU L L, YUAN S, HUANG L Y, et al. Physiological mechanisms underlying the high-grain yield and high-nitrogen use efficiency of elite rice varieties under a low rate of nitrogen application in China[J]. Frontiers in Plant Science, 2016, 7:1024.
- [36] 刘国兰,王飞名,潘忠权,等. 籼型常规优质节水抗旱稻沪早 19 的选育与栽培技术[J]. 中国稻米,2020,26(增刊1):124-125.
- [37] 王飞名,刘国兰,张安宁,等. 早熟高产节水抗旱稻新品种‘沪早 1509’的选育与应用[J]. 上海农业学报,2020,36(1):14-18.
- [38] 刘国兰,刘毅,王飞名,等. 粳型常规节水抗旱稻新品种 WDR48 的选育与栽培技术[J]. 中国稻米,2020,26(增刊1):119-120.
- [39] 刘国兰,王飞名,张安宁,等. 优质常规节水抗旱稻新品种沪早 61 选育与栽培技术要点[J]. 中国稻米,2020,26(增刊1):127-128.
- [40] LUO L J, MEI H W, YU X Q, et al. Water-saving and drought-resistance rice: from the concept to practice and theory[J]. Molecular Breeding, 2019, 39(10/11):1-15.
- [41] 安正帅,刘国兰,梅捍卫,等. 标记辅助改良节水抗旱杂交稻亲本材料的稻瘟病抗性[J]. 分子植物育种,2010,8(6):1172-1176.
- [42] 刘毅,王加红,黎良通,等. 分子标记辅助选择 *Xa23* 基因改良节水抗旱稻亲本的白叶枯病抗性研究[J]. 上海农业学报,2014,30(1):13-16.
- [43] 张安宁,刘毅,王飞名,等. 节水抗旱稻恢复系的抗褐飞虱分子标记辅助选育及抗性评价[J]. 作物学报,2019,45(11):1764-1769.
- [44] 王飞名,孔德艳,刘国兰,等. 分子标记辅助选择改良‘黄华占’的褐飞虱抗性与抗旱性[J]. 上海农业学报,2020,36(3):9-14.
- [45] 余新桥. 绿色种质资源的创新与多基因聚合利用[J]. 分子植物育种,2021,19(6):2057-2063.

(责任编辑:郭娇)