

李兴华,汪吴凯,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(1): 84-91.

DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2022.01.008

# 节水抗旱稻发展现状、优势及需解决的主要问题

李兴华<sup>1</sup>,汪吴凯<sup>2</sup>,杨特武<sup>2</sup>,周强<sup>1</sup>,夏方招<sup>2</sup>

1.黄冈市农业科学院,黄冈 438000;

2.华中农业大学植物科学技术学院/农业农村部长江中游作物生理生态与耕作重点实验室,武汉 430070

**摘要** 节水抗旱稻是一类新型水稻品种,集高产、优质和节水抗旱于一体。发展节水抗旱稻不仅可降低水稻生产对水资源的依赖,扩大水稻种植范围和面积,有利于保障粮食安全,还变革了传统水稻的种植方式,可显著降低水稻生产的劳动强度以及对环境的负面影响,促进资源节约型和环境友好型“两型”农业的发展。本文论述了我国节水抗旱稻发展现状、优势,分析了可能制约节水抗旱稻发展的主要因素,提出了节水抗旱稻未来的主要研究方向,以期节水抗旱稻扩大推广应用提供参考。

**关键词** 节水抗旱稻;粮食安全;水资源;发展优势;“两型”农业

**中图分类号** S 511.6 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2022)01-0084-08

我国60%以上的人口以稻米为主食,水稻生产在保障我国粮食安全战略中占有至关重要的地位<sup>[1]</sup>。得益于水稻育种和栽培技术的进步,我国已建立众多适宜不同生态区和耕作制度的高产稳产水稻生产系统。然而,普通水稻品种适应水生环境生长,抗旱性差,其分布和种植范围高度依赖于水资源条件,进一步扩大栽培面积已受到极大的局限。近年来,我国科技工作者在节水抗旱稻品种培育和推广上取得重要进展,为突破水资源限制、扩大水稻种植面积以及保障粮食安全开辟了新途径,同时也有利于促进我国资源节约型和环境友好型“两型”农业的发展。

## 1 节水抗旱稻及其抗旱生理机制

节水抗旱稻是指集普通水稻高产、优质与旱稻节水抗旱特性于一体的栽培稻品种新类型,既可在水田节水栽培,也可在旱地种植。在水田栽培,产量和稻米品质与普通水稻相当,但可节水50%以上;在旱地种植,几乎达到旱稻的抗旱能力,但产量明显高于旱稻<sup>[2-3]</sup>。前人研究发现,在干旱条件下节水抗旱稻根系干物质积累量、根系总吸收面积和活跃吸收面积、根长等大于普通水稻<sup>[4]</sup>,可最大限度地吸收土壤水分,使叶片保持较高的水势<sup>[4]</sup>和较强的光合

作用<sup>[4-5]</sup>。此外,在干旱条件下节水抗旱稻根系含有较高的过氧化物酶和超氧化物歧化酶活性,具有较强的活性氧清除能力,同时还含有较高的玉米素、玉米素核苷含量<sup>[4,6]</sup>和组织束缚水含量,有利于在干旱条件下维持生存<sup>[7]</sup>,并能在干旱复水后快速恢复生机<sup>[4,8]</sup>。

## 2 节水抗旱稻的发展

节水抗旱稻是在旱稻研究的基础上发展起来的一类新型栽培稻品种<sup>[3]</sup>。旱稻在我国具有悠久的种植历史,在北魏贾思勰编纂的《齐民要术》中就已详细记载了旱稻的栽培技术。建国初期,我国旱稻种植面积达330多万hm<sup>2</sup>,但种植的品种均为农民自主改良或引进的传统常规品种<sup>[9]</sup>,产量低,种植效益差。由于灌溉条件的改善和水稻高产育种技术的进步,旱稻逐渐被水稻所替代<sup>[3]</sup>。据统计,目前我国旱稻种植面积约为177万hm<sup>2</sup>,仅占稻作总面积的5%左右,主要分布在广西、云南、贵州等省(自治区)山区和半山区,以及河南、河北等干旱少雨地区<sup>[9]</sup>。

20世纪90年代以来,随着水资源短缺问题日益突出,我国加快了旱稻研究及育种的步伐。1992年,我国从巴西引进旱稻品种“IAPAR 9”,并在江西等地试种获得成功,引起有关部门和专家的高度重

收稿日期: 2021-06-28

基金项目: 国家重点研发计划专项(2017YFD0301402)

李兴华, E-mail: lixh199015@163.com

通信作者: 杨特武, E-mail: yangtewu@mail.hzau.edu.cn

视<sup>[10]</sup>。2000年,我国首次召开了早稻生产研讨会,之后农业科研单位加强了传统早稻品种的改良和水稻抗旱性育种研究,中国农业大学育成“早稻297”“早稻9号”等品种,中国水稻所选育出“中早3号”等品种,云南省农业科学院选育出“云陆”“陆引”等品种,辽宁省农业科学院育成“早72”等品种,丹东农业科学院育成“丹梗”等品种,上海市农业科学院农业生物基因中心育成“沪早3号”和“沪早7号”等品种(<https://www.ricedata.cn/variety/index.htm>)。然而,这些品种往往忽视了病虫害抗性、水肥利用效率和稻米品质等性状的改良,在水资源较好的条件下种植优势不强<sup>[10]</sup>。

2003年,上海市农业科学院农业生物基因中心将早稻抗旱特性与普通水稻高产、优质性状相结合,育成世界上第一个节水抗旱稻三系不育系“沪早1A”<sup>[11]</sup>,随后相继配组出“早优2号”“早优3号”“早优73”等杂交节水抗旱稻品种,尤其是“早优73”,在产量、节水抗旱和稻米品质等方面表现优异<sup>[12]</sup>。目前,节水抗旱稻品种培育已成为我国水稻育种的一个重要方向,不断有新品种问世并得到推广应用,如广西柳州市农业科学研究所选育的“玉优柳早1号”,湖北黄冈市农业科学院选育的“节优804”等。根据国家水稻数据中心数据(<https://www.ricedata.cn/variety/index.htm>)统计,在2005—2020年的16年间,我国培育并通过省级及以上审定的节水抗旱稻品种共12个(不含不育系),其中2020年审定的品种数最多(3个),占25%。在品种类型上,籼型品种占92%,其中籼型三系杂交品种占67%;在地域分布上,审定品种主要集中在上海,占76%,湖北、安徽、广西等省(自治区)各有1个品种通过省级审定。

目前,我国节水抗旱稻的推广应用主要集中在安徽、上海、浙江、江西、河南、湖北、湖南等省市,种植面积逐年扩大,2019年推广面积约13.3万hm<sup>2</sup>([https://www.360kuai.com/pc/9fde707526961eda6?co-ta=3&kuai\\_so=1&tj\\_url=so\\_vip&sign=360\\_57c3bbd1&refer\\_scene=so\\_1](https://www.360kuai.com/pc/9fde707526961eda6?co-ta=3&kuai_so=1&tj_url=so_vip&sign=360_57c3bbd1&refer_scene=so_1)),其中安徽省推广面积最大,达到7.8万hm<sup>2</sup>(<https://kd.youth.cn/a/18KAmAVv1Ad4pro>)。

### 3 发展节水抗旱稻的优势

#### 3.1 有利于缓解水资源短缺的危机

我国是一个水资源短缺的国家,人均水资源占

有量不足世界平均水平的1/4。由于95%以上的水稻生产需要额外灌溉,仅水稻生产就消耗了我国50%的淡水资源<sup>[13-14]</sup>。此外,在我国水稻主产区也常常发生季节性和区域性干旱,导致水稻大幅减产<sup>[15]</sup>。节水抗旱稻水分利用效率较普通水稻提高近40%<sup>[16]</sup>,具有明显的节水优势(表1)。汪吴凯<sup>[17]</sup>研究表明,节水抗旱稻在水势低于-65kPa的土壤中仍可正常生长,以节水抗旱稻作再生稻种植,两季生产比普通水稻节约灌溉用水488.8mm。因此,发展节水抗旱稻对于缓解我国水资源短缺危机具有重要意义。

#### 3.2 扩大水稻的种植范围

节水抗旱稻不但可以在传统水田种植,也可在山坡岗地、工业抛荒地、盐碱地等旱地种植,从而可扩大水稻种植范围和面积,确保粮食生产不留死角。周爱华<sup>[18]</sup>试验表明,在工业抛荒地种植节水抗旱稻品种“早优8号”,可获得500kg/667m<sup>2</sup>以上的产量;笔者所在研究团队连续2a在湖北省黄冈市山坡岗地采取撒播方式种植节水抗旱稻品种“节优804”,可达550kg/667m<sup>2</sup>左右的水平。

#### 3.3 节本省工,降低水稻生产劳动强度

节水抗旱稻主要利用自然降水生产,不需长期淹灌,改变了传统水稻生产的作业方式,即使在普通水田种植,也可在中后期实现“穿皮鞋下田”,大大降低了水稻生产的劳动强度,达到轻简化栽培目的,并可节约生产成本。据高欢等<sup>[10]</sup>统计,在早播早管条件下种植节水抗旱稻,一季可节省育秧、插秧等人工30~45个/hm<sup>2</sup>,减少投入3750~4500元/hm<sup>2</sup>。Bi等<sup>[19]</sup>研究发现,在节水灌溉条件下节水抗旱稻根系可分泌大量有机酸,促进植株对土壤磷的利用,有利于节约磷肥的投入。

#### 3.4 减少温室气体排放

普通水稻田甲烷(CH<sub>4</sub>)排放量大,而旱地一氧化二氮(N<sub>2</sub>O)排放量大<sup>[20]</sup>。普通稻田土壤长期处于淹水状态,氧化还原电位低,促使CH<sub>4</sub>不断产生和排放<sup>[21]</sup>。Weller等<sup>[22]</sup>研究表明,节水抗旱稻田的CH<sub>4</sub>排放量较普通水稻田减少93.8%,而N<sub>2</sub>O排放量增加50%,温室气体排放强度降低51.2%;孙会峰等<sup>[23]</sup>研究表明,在节水灌溉条件下节水抗旱稻田的CH<sub>4</sub>排放量较普通水稻田减少71.7%,N<sub>2</sub>O排放量增加38.4%,温室气体排放强度降低46.2%(表1)。不同研究者的结果差异可能与不同品种本身的温室气体排放特性有关<sup>[24]</sup>。据Zhang等<sup>[25]</sup>估

测,假如安徽省以节水抗旱稻替代普通水稻种植,温室气体减排潜力可达到 16.92 Mt CO<sub>2</sub>-eq。可见,发展节水抗旱稻有利于降低温室气体排放,促进低碳农业的发展。

### 3.5 削减农业面源污染

普通水稻田在施肥后如遇强降雨或人工排水,大量氮(N)、磷(P)养分随地表径流进入自然水体,造成农业面源污染<sup>[26]</sup>。种植节水抗旱稻由于减少

灌溉次数,可降低化肥、农药随耕层渗漏或地表径流产生的面源污染。孙会峰等<sup>[23]</sup>研究表明,在节水灌溉条件下,种植节水抗旱稻土壤总氮径流流失总量较普通水稻减少 35%,总磷径流流失总量则相近(表 1)。高欢等<sup>[10]</sup>研究发现,在旱播旱管种植模式下节水抗旱稻土壤总氮和总磷径流流失总量比普通水稻分别降低 67.6%和 33.3%,农药总流失量减少 85%以上(表 1)。

表 1 节水抗旱稻与普通水稻品种的环境效应比较

Table 1 Comparison of environmental effects between water-saving and drought-resistant rice(WDR) and common rice varieties

项目 Items	节水抗旱稻 WDR	普通水稻 Common rice	参考文献 References
水分利用效率/(kg/(hm <sup>2</sup> ·mm)) WUE	13.79	9.86	[16]
	7.32	5.27	[17]
	7.20	115.80	[22]
温室气体排放 Greenhouse gas emission	甲烷/(kg/hm <sup>2</sup> ) CH <sub>4</sub>	16.84	[23]
	一氧化二氮/(kg/hm <sup>2</sup> ) N <sub>2</sub> O	1.60	[22]
	温室气体排放强度/(kg CO <sub>2</sub> -eq/t)	1.90	[23]
	Greenhouse gas emission intensity	360.20	[22]
养分径流流失总量 Total nutrient runoff loss	总氮/(kg/hm <sup>2</sup> ) Total N	0.31	[23]
		0.11	[10]
	总磷/(kg/hm <sup>2</sup> ) Total P	0.05	[23]
		0.04	[10]
农药总流失量 Total pesticide loss	灭草松/(mg/hm <sup>2</sup> ) Bentazone	2.1	[10]
	2-甲-4-氯二甲酰胺/(mg/hm <sup>2</sup> ) 2-Methyl-4-chlorodicarbonamide	0.2	
	阿维菌素/(μg/hm <sup>2</sup> ) Abamectin	68.4	
	茚虫威/(mg/hm <sup>2</sup> ) Indoxacarb	5.4	
	烯啶虫胺/(mg/hm <sup>2</sup> ) Nitenpyram	5.4	

### 3.6 改善稻米品质

垩白粒率是衡量稻米外观品质的主要指标之一,垩白粒率越低,稻米品质越好。在旱播旱管条件下节水抗旱稻稻米垩白粒率比在水田淹灌种植平均低 12%(图 1)。杨晓龙等<sup>[28]</sup>研究也表明,在灌浆期土壤干旱条件下节水抗旱稻“早优 113”的稻米垩白粒率比淹灌种植低 13.4%。生育后期水源不足是造成稻米垩白粒率升高的主要原因<sup>[29]</sup>,节水抗旱稻因抗旱力较强,灌浆期在干旱条件下仍可积累光合产物,从而有利于稻米品质的改善。

长期淹灌常导致普通水稻籽粒砷显著积累<sup>[30]</sup>,这是由于淹水使土壤氧化还原电位降低,砷(V)被还原成砷(III),造成土壤砷的生物有效性提高,致使水稻对砷的吸收增加<sup>[31]</sup>。赵方杰等<sup>[32]</sup>研究表明,淹灌种植的稻谷中砷含量较早作种植高 10~15 倍。节水抗旱稻不需长期淹水种植,有利于降低稻米中砷的含量。

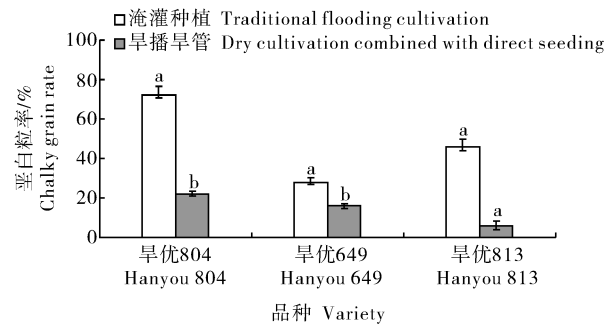


图 1 旱播旱管和传统淹灌条件下节水抗旱稻米垩白粒率差异<sup>[27]</sup>

Fig.1 Difference in chalky grain rate of WDR under the dry cultivation combined with direct seeding and the traditional flooding cultivation

## 4 当前发展节水抗旱稻存在的主要问题

### 4.1 优良品种少

尽管目前在节水抗旱稻品种的选育上已取得重

要进展,但通过审定的品种数量仍然较少。对已通过省级及以上审定的节水抗旱稻品种分析发现,产量大多介于 7 500~9 800 kg/hm<sup>2</sup>,最低者仅 6 447.0 kg/hm<sup>2</sup>(表 2)。在稻米品质上,仅早优 3 号、早优 8 号、早优 540 和沪早 1512 等 4 个品种达到农业农村部 NY/T 593—2002《食用稻品种品质》标准,占 33.3%;在

稻瘟病抗性上,仅早优 8 号、早优 681 和节优 804 这 3 个品种达到中抗等级(3 级),占 25%(表 2)。综上所述可知,与优良普通水稻品种相比,现有节水抗旱稻品种在产量、米质和稻瘟病抗性上均不具明显优势。另外,适应轻简化栽培、机械化生产、不同耕作制度和种植方式的高产优质节水抗旱稻品种也尤为缺乏。

表 2 目前通过省级及以上审定的节水抗旱稻品种及其特性

Table 2 WDR varieties and their characteristics currently released by provincial or above Crop Variety Certification Committees

品种 Variety	产量/(kg/hm <sup>2</sup> ) Yield	米质等级 Rice quality grade	稻瘟病抗性等级 Rice blast resistance grade
早优 3 号 Hanyou No.3	9 249.6	3	5
早优 2 号 Hanyou No.2	7 543.5	普通 Common	9
早优 8 号 Hanyou No.8	7 954.4	2	3
玉优柳早 1 号 Yuyouliuhan No.1	6 447.0	普通 Common	9
早优 113 Hanyou 113	9 185.7	普通 Common	9
早优 73 Hanyou 73	9 795.0	普通 Common	5
沪早 19 Huhan 19	7 921.5	普通 Common	5
沪早 1509 Huhan 1509	8 038.5	普通 Common	5
早优 540 Hanyou 540	9 249.6	3	5
早优 681 Hanyou 681	9 151.5	普通 Common	3
节优 804 Jieyou 804	9 514.7	普通 Common	3
沪早 1512 Huhan 1512	8 538.0	2	5

注:数据来源于国家水稻数据中心。Note:Data from China rice data center (<https://www.ricedata.cn/variety/index.htm>.)

#### 4.2 适宜栽培技术缺乏

节水抗旱稻属于新生事物,大面积推广才刚刚起步,配套栽培技术尚未建立。已有研究表明,不同管理模式对节水抗旱稻的产量形成具有显著影响<sup>[27]</sup>。毕俊国等<sup>[33]</sup>研究发现,随着灌溉量的减少,节水抗旱稻产量呈现逐渐下降的趋势,当节水达到 60%时产量较淹灌种植显著降低。笔者所在研究团队试验表明,采用平作直播方式栽培时,由于土壤墒情差异及鸟害等因素的影响,常常很难保证节水抗旱稻一播全苗和出苗整齐一致。汪吴凯<sup>[17]</sup>研究发现,将节水抗旱稻用作再生稻种植时再生季产量形成机制与普通水稻品种存在明显差异。因此,根据不同生态区的自然资源特点、种植制度和品种特性开展适宜栽培技术研究,对于促进节水抗旱稻的发展具有重要意义。

#### 4.3 养分需求规律不明,缺乏适宜施肥技术

国内外研究者在普通水稻养分利用规律和适宜施肥技术等方面开展了长期的大量研究<sup>[34]</sup>,而目前关于节水抗旱稻的相关研究较少,生产上仍参照普通水稻的技术方案进行施肥。在节水栽培条件下,由于土壤水分条件和氧化还原状况不同于常规稻

田,因而会影响土壤养分的转化和有效性<sup>[35]</sup>。赵全志等<sup>[36]</sup>研究表明,土壤水分状况显著影响旱稻对养分的吸收,植株的养分吸收量随土壤含水量的提高而显著升高。笔者所在研究团队初步观察发现,节水抗旱稻对养分的吸收利用规律可能不同于普通水稻品种,有待于深入探讨。

#### 4.4 杂草难防治

在早播早管条件下,田间杂草丛生导致严重减产甚至绝收,是制约节水抗旱稻大面积推广的主要因素之一。在上海市节水抗旱稻种植区调查发现,节水抗旱稻田杂草种类多达 12 科 26 种,尤其以千金子、稗草、马唐等发生频率高<sup>[37]</sup>(表 3)。目前市面上节水抗旱稻专用除草剂很少,生产上一般应用普通稻田除草剂,防治效果差,需要加强研究。陈博聪等<sup>[38]</sup>研究表明,出苗后用噁唑·氰氟乳油防治节水抗旱稻田禾本科杂草,用药后 30 d 的防效达到 84.1%,也可用噁唑酰草胺乳油防治马唐,用氰氟草酯乳油防治千金子。笔者所在研究团队试验表明,在早直播后 3 d 内应用二甲戊灵和吡·松·丁草胺进行苗前封闭,可有效降低节水抗旱稻田间杂草的发生。

表 3 上海试验区节水抗旱稻田间主要杂草<sup>[37]</sup>

Table 3 Major weeds in the field of water-saving and drought-resistant rice in Shanghai City

科 Family	种类 Species	数目 Number
禾本科 Gramineae	千金子 <i>Leptochloa chinensis</i> 、稻稗 <i>Echinochloa crusgalli</i> 、旱稗 <i>Echinochloa hispidula</i> (Retz.) Nees、马唐 <i>Digitaria sanguinalis</i> (L.) Scop.、牛筋草 <i>Eleusine indica</i> (L.) Gaertn.、狗尾草 <i>Setaria viridis</i> (L.) Beauv.、双穗雀稗 <i>Paspalum paspaloides</i> (Michx.)Scribn.	7
莎草科 Cyperaceae	异型莎草 <i>Cyperus difformis</i> L.、碎米莎草 <i>Cyperus iria</i> L.、水莎草 <i>Juncellus serotinus</i> 、香附子 <i>Cyperus rotundus</i> L.	4
菊科 Asteraceae	鳢肠 <i>Eclipta prostrata</i>	1
苋科 Amaranthaceae	空心莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i> 、凹头苋 <i>Amaranthus lividus</i> L.	2
马齿苋科 Portulacaceae	马齿苋 <i>Portulaca oleracea</i> L.	1
十字花科 Brassicaceae	焊菜 <i>Cardamine arisanensis</i> Hayata	1
大戟科 Euphorbiaceae	铁苋菜 <i>Acalypha australis</i> L.、斑地锦 <i>Euphorbia maculata</i> 、地锦 <i>Parthenocissus tricuspidata</i>	3
千屈菜科 Lythraceae	水苋菜 <i>Ammannia</i> L.	1
柳叶菜科 Onagraceae	丁香蓼 <i>Ludwigia prostrate</i>	1
玄参科 Scrophulariaceae	通泉草 <i>Mazus japonicus</i> 、陌上菜 <i>Lindernia procumbens</i> (Krock.) Philcox	2
藜科 Chenopodiaceae	母草 <i>Lindernia crustacea</i> (L.) F. Muell.、小藜 <i>Chenopodium serotinum</i> L.	2
蓼科 Polygonaceae	春蓼 <i>Polygonum persicaria</i> L.	1

#### 4.5 长期环境效应不明

尽管目前多数研究认为,相对于普通水稻品种而言,发展节水抗旱稻有利于消减环境污染,但未见相关长期研究报道。同时,前人研究发现,旱稻存在连作障碍问题,主要是在连续种植条件下土壤线虫不断增加所致<sup>[39]</sup>。关于在长期节水灌溉种植下,节水抗旱稻的病虫害发生规律、对土壤环境的影响以及是否存在连作障碍等问题,目前知之甚少。笔者所在研究团队初步观察发现,在旱管条件下节水抗旱稻虫害发生特点和防治要求可能不同于普通水稻品种,有待深入研究。

## 5 节水抗旱稻未来研究方向

综上所述,发展节水抗旱稻在缓解水资源危机、保护生态环境和保障粮食安全等方面展现出良好的应用前景,但仍存在诸多可能制约其未来发展的因素,仍需加强研究:

1) 高产优质多抗新品种选育。一是要加强对现有节水抗旱种质的研究与利用,将节水、抗旱、水分和营养高效利用等特性进行聚合,创制新的种质资源。Xia 等<sup>[40]</sup>通过全基因组关联分析,鉴定出多个与抗旱性相关的数量性状位点;毕俊国等<sup>[41]</sup>筛选获得抗咪唑啉酮类除草剂的水稻新种质,经序列分析发现为 *ALS* 基因编码区突变导致第 627 位丝氨酸改变为天冬酰胺所致。这些新发现的基因未来可用于节水抗旱稻新品种培育。二是结合常规杂交育种、分子标记辅助选择等方法,选育集节水抗旱、高

产、优质、抗病虫等优良性状于一体的新品种。张安宁等<sup>[42]</sup>采用常规回交育种和分子标记辅助选择相结合的方法,获得了聚合抗褐飞虱基因 *Bph6*、*Bph9*、*Bph14* 和 *Bph15* 的节水抗旱稻“早恢 3 号”改良系。三是针对不同耕作制度和种植方式,选育适应轻简化栽培和机械化生产的品种,包括种子活力高、苗期生长势强,适宜于旱直播的品种,以及再生力强、适宜于再生稻生产的品种。王飞名等<sup>[43]</sup>选育出了早熟、米饭口感好、中抗褐飞虱且耐直播的节水抗旱稻新组合“沪早 1509”。

2) 配套栽培技术研究。一是深入开展节水抗旱稻产量形成机制和养分吸收利用规律研究,建立配套高产优质高效栽培及适宜施肥技术方案。二是深入开展节水抗旱稻病虫害发生规律和防治技术研究,集成绿色高效防控技术体系。

3) 加大节水抗旱稻长期环境效应评价研究,尤其应加强长期连作对土壤理化和生物性质的影响研究,提高对未来发展的预见力并针对性地提出相应的预案。

## 参考文献 References

- [1] 朱德峰,张玉屏,陈惠哲,等.中国水稻高产栽培技术创新与实践[J].中国农业科学,2015,48(17):3404-3414. ZHU D F, ZHANG Y P, CHEN H Z, et al. Innovation and practice of high-yield rice cultivation technology in China[J]. Scientia agriculturae sinica, 2015, 48(17): 3404-3414 (in Chinese with English abstract).

- [2] LUO L, MEI H, YU X, et al. Water-saving and drought-resistance rice: from the concept to practice and theory[J]. *Molecular breeding*, 2019, 39 (10/11): 145-149.
- [3] LUO L J. Breeding for water-saving and drought-resistance rice in China[J]. *Journal of experimental botany*, 2010, 61 (13): 3509-3517.
- [4] 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-resistant rice [J]. *Field crops research*, 2014, 162: 108-119.
- [5] 宋维周, 刘仁旺, 江颂颂, 等. 节水抗旱稻与高产水稻不同叶位光合特征对土壤水分变化的响应[J]. *华中农业大学学报*, 2019, 38(2): 45-54. SONG W Z, LIU R W, JIANG S S, et al. Responses of photosynthetic characteristics of different leaf positions in water-saving and drought-resistant rice and high-yield rice to soil moisture change[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2019, 38(2): 45-54 (in Chinese with English abstract).
- [6] 侯丹平, 谭金松, 毕庆宇, 等. 水分胁迫对节水抗旱稻产量形成和根系形态生理特性的影响[J]. *中国水稻科学*, 2021, 35(1): 27-37. HOU D P, TAN J S, BI Q Y, et al. Effects of water stress on yield formation and root morphological and physiological characteristics of water-saving and drought-resistant rice[J]. *Chinese journal of rice science*, 2021, 35(1): 27-37 (in Chinese with English abstract).
- [7] 罗利军, 张启发. 栽培稻抗旱性研究的现状与策略[J]. *中国水稻科学*, 2001, 15(3): 50-55. LUO L J, ZHANG Q F. The status and strategy on drought resistance of rice[J]. *Chinese journal of rice science*, 2001, 15(3): 50-55 (in Chinese with English abstract).
- [8] 罗利军, 梅捍卫, 余新桥, 等. 节水抗旱稻及其发展策略[J]. *科学通报*, 2011, 56(11): 804-811. LUO L J, MEI H W, YU X Q, et al. Water-saving and drought-resistance rice and its development strategy[J]. *Chinese science bulletin*, 2011, 56(11): 804-811 (in Chinese with English abstract).
- [9] 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. HUANG X P, FANG K S, FANG J L. Current situation analysis and development strategy of water-saving and drought-resistant rice production [J]. *Anhui agricultural science bulletin*, 2010, 16 (19): 75-77 (in Chinese).
- [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. GAO H, ZHAO H Y, NIE Y Y, et al. Research progress and application of water-saving and drought-resistant rice on rice green production[J]. *Acta agricultural Shanghai*, 2017, 33(6): 123-128 (in Chinese with English abstract).
- [11] 余新桥, 梅捍卫, 刘康, 等. 优质节水抗旱雄性不育系“沪旱1A”的选育与利用[J]. *上海农业学报*, 2006, 22(2): 32-35. YU X Q, MEI H W, LIU K, et al. Breeding and utilization of drought-resistant rice CMS line “Huhan 1A”[J]. *Acta agricultural Shanghai*, 2006, 22(2): 32-35 (in Chinese with English abstract).
- [12] 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. YU X Q, LIU G L, LI M S, et al. A new water-saving and drought-resistant hybrid rice combination “Hanyou 73”[J]. *Hybrid rice*, 2016, 31(4): 79-81 (in Chinese with English abstract).
- [13] MATSUI T, OMASA K, HORIE T. High temperature at flowering inhibits swelling of pollen grains, a driving force for thecae dehiscence in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Plant production science*, 2000, 3(4): 430-434.
- [14] LI Y. Water saving irrigation in China[J]. *Irrigation and drainage*, 2006, 55(3): 327-336.
- [15] 景蕊莲. 作物节水抗旱研究进展[J]. *中国农业科技导报*, 2007, 9(1): 1-5. JIN R L. Advances of research on drought resistance and water use efficiency in crop plants[J]. *Review of China agricultural science and technology*, 2007, 9 (1): 1-5 (in Chinese with English abstract).
- [16] ADEKOYA M A, LIU Z C, VERED E, et al. Agronomic and ecological evaluation on growing water-saving and drought-resistant rice (*Oryza sativa* L.) through drip irrigation[J]. *Journal of agricultural science*, 2014, 6(5): 110-119.
- [17] 汪吴凯. 节水抗旱稻适宜氮肥运筹及“一种两收”生产模式研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020. WANG W K. Suitable nitrogen management and “plant once and harvest twice” production pattern for water-saving and drought-resistant rice (WDR) [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [18] 周爱华. 节水抗旱稻“早优八号”在浦东新区试种探索[J]. *上海农业科技*, 2011, 41(5): 46-47. ZHOU A H. Trial-planting exploration of water-saving and drought-resistant rice “Hanyou 8” in Pudong New Area[J]. *Shanghai agricultural science and technology*, 2011, 41(5): 46-47 (in Chinese).
- [19] 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/OL]. *Journal of cleaner production*, 2021, 315: 127992 [2021-06-28]. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127992>.
- [20] XING G, ZHAO X, XIONG Z Y, et al. Nitrous oxide emission from paddy fields in China[J]. *Acta ecologica sinica*, 2009, 29(1): 45-50.
- [21] ROTHFUSS F, CONRAD R. Vertical profiles of CH<sub>4</sub> concentrations, dissolved substrates and processes involved in CH<sub>4</sub> production in a flooded Italian rice field[J]. *Biogeochemistry*, 1992, 18(2): 137-152.
- [22] WELLER S, JANZ B, JÖRG L, et al. Greenhouse gas emissions and global warming potential of traditional and diversified tropical rice rotation systems[J]. *Global change biology*, 2016, 22(1): 432-448.
- [23] 孙会峰, 周胜, 张继宁, 等. 利用节水抗旱稻协同减排温室气体和面源污染效果研究[J]. *上海农业学报*, 2020, 36(5): 79-85.

- SUN H F, ZHOU S, ZHANG J N, et al. Synergistical mitigation of greenhouse gas emission and non-point source pollution by planting water-saving and drought-resistance rice (WDR) [J]. *Acta agricultural Shanghai*, 2020, 36(5): 79-85 (in Chinese with English abstract).
- [24] 孙会峰, 周胜, 陈桂发, 等. 水稻品种对稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(8): 1595-1602. SUN H F, ZHOU S, CHEN G F, et al. Effects of rice cultivars on CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from rice fields[J]. *Journal of agro-environment science*, 2015, 34(8): 1595-1602 (in Chinese with English abstract).
- [25] ZHANG X X, SUN H F, BI J Q, et al. Estimate greenhouse gas emissions from water-saving and drought-resistance rice paddies by denitrification-decomposition model[J/OL]. *Clean technologies and environmental policy*, 2021, 23 [2021-06-28]. <https://doi.org/10.1007/s10098-021-02094-z>.
- [26] HUANG N B, SU B L, LI R R, et al. A field-scale observation method for non-point source pollution of paddy fields[J]. *Agricultural water management*, 2014, 146: 305-313.
- [27] 李兴华, 张盛, 王欢, 等. 不同种植方式对节水耐旱稻产量、外观品质及经济效益的影响[J]. *江苏农业科学*, 2021, 49(3): 78-82. LI X H, ZHANG S, WANG H, et al. Effects of different planting methods on yield, appearance quality and economic benefit of water-saving and drought-resistant rice[J]. *Jiangsu agricultural sciences*, 2021, 49(3): 78-82 (in Chinese).
- [28] 杨晓龙, 程建平, 汪本福, 等. 灌浆期干旱胁迫对水稻生理性状和产量的影响[J]. *中国水稻科学*, 2021, 35(1): 38-46. YANG X L, CHENG J P, WANG B F, et al. Effects of drought stress at grain filling stage on rice physiological characteristics and yield[J]. *Chinese journal of rice science*, 2021, 35(1): 38-46 (in Chinese with English abstract).
- [29] 李国生, 王志琴, 袁莉民, 等. 结实期土壤水分和氮素营养对水稻产量与品质的交互影响[J]. *中国水稻科学*, 2008, 22(2): 161-166. LI G S, WANG Z Q, YUAN L M, et al. Coupling effects of soil moisture and nitrogen nutrient during grain filling on grain yield and quality of rice[J]. *Chinese journal of rice science*, 2008, 22(2): 161-166 (in Chinese with English abstract).
- [30] NORTON G J, TRAVIS A J, DANKU J M C, et al. Biomass and elemental concentrations of 22 rice cultivars grown under alternate wetting and drying conditions at three field sites in Bangladesh[J]. *Food and energy security*, 2017, 6(3): 98-112.
- [31] 龙水波, 曾敏, 周航, 等. 不同水分管理模式对水稻吸收土壤砷的影响[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(4): 1003-1008. LONG S B, ZENG M, ZHOU H, et al. Effects of different water management patterns on soil arsenic uptake by rice[J]. *Acta scientiae circumstantiae*, 2014, 34(4): 1003-1008 (in Chinese with English abstract).
- [32] 赵方杰, 谢婉滢, 汪鹏. 土壤与人体健康[J]. *土壤学报*, 2020, 57(1): 1-11. ZHAO F J, XIE W Y, WANG P. Soil and human health[J]. *Acta pedologica sinica*, 2020, 57(1): 1-11 (in Chinese with English abstract).
- [33] 毕俊国, 谭金松, 张安宁, 等. 灌溉量对节水抗旱稻产量及水分利用效率的影响[J]. *上海农业学报*, 2019, 35(3): 7-10. BI J G, TAN J S, ZANG A N, et al. Effects of irrigation amount on yield and water use efficiency of water-saving and drought-resistance rice (WDR) [J]. *Acta agricultural Shanghai*, 2019, 35(3): 7-10 (in Chinese with English abstract).
- [34] PENG S, BURESH R, HUANG J, et al. Improving nitrogen fertilization in rice by site specific N management[J]. *Agronomy for sustainable development*, 2010, 30(3): 649-656.
- [35] CUCU M A, SAID-PULLICINO D, MAURINO V, et al. Influence of redox conditions and rice straw incorporation on nitrogen availability in fertilized paddy soils[J]. *Biology and fertility of soils*, 2013, 50(5): 755-764.
- [36] 赵全志, 高桐梅, 宁慧峰, 等. 分蘖期土壤水分对旱稻矿质养分吸收的影响[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(6): 92-95. ZHAO Q Z, GAO T M, NING H F, et al. Effects of soil moisture on mineral nutrition uptake in upland rice at tillering stage[J]. *Journal of soil and water conservation*, 2005, 19(6): 92-95 (in Chinese with English abstract).
- [37] 余新桥. 节水抗旱稻化控除草及高产栽培技术研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2007. YU X Q. Studies on chemical control of weed and cultivation technology of high yield for water-saving and drought-resistant rice[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2007 (in Chinese with English abstract).
- [38] 陈博聪, 杨军, 姜绪, 等. 10 种除草剂对旱稻禾本科杂草防效及安全性评价[J]. *山东农业科学*, 2021, 53(1): 109-113. CHEN B C, YANG J, JIANG X, et al. Efficacy of 10 herbicides in controlling gramineous weeds for upland rice and their safety evaluation[J]. *Shandong agricultural sciences*, 2021, 53(1): 109-113 (in Chinese with English abstract).
- [39] NIE L, PENG S, CHEN M, et al. Aerobic rice for water-saving agriculture: a review[J]. *Agronomy for sustainable development*, 2012, 32(3): 411-418.
- [40] XIA H, LUO Z, XIONG J, et al. Bi-directional selection in upland rice leads to its adaptive differentiation from lowland rice in drought resistance and productivity[J]. *Molecular plant*, 2019, 12(2): 170-184.
- [41] 毕俊国, 谭金松, 刘毅, 等. 抗咪唑啉酮类除草剂水稻种质的筛选鉴定[J]. *植物遗传资源学报*, 2020, 21(4): 804-808. BI J G, TAN J S, LIU Y, et al. Screening and identification of rice germplasm resistant to imidazolinone herbicide[J]. *Journal of plant genetic resources*, 2020, 21(4): 804-808 (in Chinese with English abstract).
- [42] 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. ZHANG A N, LIU Y, WANG F M, et al. Pyramiding and evaluation of brown planthopper resistance genes in water-saving and drought-resistance restorer line[J]. *Acta agronomica sinica*, 2019, 45(11): 1764-1769 (in Chinese with English abstract).

[43] 王飞名, 刘国兰, 张安宁, 等. 早熟高产节水抗旱稻新品种沪旱 1509 的选育与应用[J]. 上海农业学报, 2020, 36(1): 14-18.  
WANG F M, LIU G L, ZHANG A N, et al. Breeding and appli-

cation of a new WDR variety Huhuan 1509 with early maturity and high yield [J]. Acta agricultural Shanghai, 2020, 36(1): 14-18 (in Chinese with English abstract).

## Development status, advantages and main problems to be resolved of water-saving and drought-resistant rice

LI Xinghua<sup>1</sup>, WANG Wukai<sup>2</sup>, YANG Tewu<sup>2</sup>, ZHOU Qiang<sup>1</sup>, XIA Fangzhao<sup>2</sup>

1. Huanggang Academy of Agricultural Sciences, Huanggang 438000, China;

2. College of Plant Sciences and Technology/Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System in the Middle Reaches of the Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

**Abstract** Water-saving and drought-resistant rice (WDR) is a novel type of rice variety that integrates high-yield, high-quality, water-saving and drought-resistance. The development of WDR can not only reduce the dependence of rice production on water resources, expand the scope and area of rice cultivation, and help ensure food security, but also changes the traditional rice planting methods and significantly reduces the labor intensity of rice production and the negative impact on the environment. Therefore, the development of WDR is conducive to the promotion of “two-oriented” agriculture, i.e., resource-conserving and environment-friendly agriculture. This article discusses the development status, advantages and main problems to be resolved of WDR in China. The main factors that may restrict the development of WDR were analyzed. The research directions of WDR needed to be strengthened in the future were proposed. It will provide a guideline for the future study and development of WDR in China.

**Keywords** water-saving and drought-resistant rice (WDR); food security; water resource; advantages; “Two-Oriented” agriculture

(责任编辑: 张志钰)