

# 栽培稻种质资源的深根比鉴定评价

杨 波<sup>1,2</sup>, 陈 亮<sup>2</sup>, 楼巧君<sup>2</sup>, 李铁梅<sup>2</sup>, 徐小艳<sup>2</sup>, 罗利军<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 华中农业大学植物科学技术学院, 武汉 430070; <sup>2</sup> 上海市农业生物基因中心, 上海 201106)

**摘要:** 干旱是水稻生产中最严重的非生物胁迫, 增强根系对深层土壤水分的吸取能力是提高水稻抗旱性的重要育种目标。为筛选优异抗旱稻种资源, 本研究对 2234 份栽培稻种质资源进行了以深根比为鉴定指标的避旱性鉴定评价, 在水分梯度抗旱大棚中对 131 份具有不同深根比的种质进行了孕穗期抗旱性鉴定评价。供试材料的深根比变异范围为 8.6%~60.1%, 平均深根比为 25.8%, 47.2% 材料的深根比集中在 20%~30% 之间, 25.2% 材料的深根比低于 20%, 深根比超过 40% 的高深根比种质仅占 6.1%; 国外材料中高深根比种质比例达到了 24.4%, 其次是上海 (17.9%) 和湖南 (15.6%), 广东、贵州和广西的高深根比种质比例均低于 1%; 地方品种的深根比略高于育成品种 (系), 地方品种的高深根比种质比例也高于育成品种 (系); 籼稻深根比高于粳稻深根比, 粳稻中高深根比种质比例是籼稻的 3.6 倍; 在籼稻种质中, 湖南籼稻材料中高深根比种质比例较高, 而广东、广西和贵州等省的籼稻种质中都只有 1 份高深根比种质。孕穗期抗旱性鉴定结果显示, 高深根比种质中的高抗旱材料比例是低深根比材料的 3.2 倍、是中等深根比材料的 2.0 倍。综合分析干旱胁迫和正常水分条件下的结实率以及两种情况下的每穗粒数比值和结实率比值等抗旱性鉴定指标, 筛选获得 26 份抗旱性优异材料, 可作为水稻节水抗旱育种优良亲本和应用抗旱基因挖掘。

**关键词:** 栽培稻种质资源; 抗旱性; 避旱性; 深根比

## Evaluation of Cultivated Rice Germplasm Resources for Deep Rooting

YANG Bo<sup>1,2</sup>, CHEN Liang<sup>2</sup>, LOU Qiao-jun<sup>2</sup>,  
LI Tie-mei<sup>2</sup>, XU Xiao-yan<sup>2</sup>, LUO LI-jun<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> College of Plant Science & Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070;

<sup>2</sup> Shanghai Agrobiological Gene Center, Shanghai 201106)

**Abstract:** Drought is the most serious abiotic stress in rice, and improving its drought resistance via enhancing water uptake capability from deep soil is one of the main objectives in the breeding program. In this study, 2234 cultivated rice germplasm resources from China and abroad were evaluated for drought avoidance using the ratio of deep rooting (RDR) as the index. 131 germplasm with different RDR were evaluated for drought resistance at the reproductive stage. The mean RDR of tested genotypes is 25.8%, ranging from 8.6% to 60.1%. In 25.2% of tested genotypes the RDR was less 20%, and in 47.2% of tested genotypes a RDR was between 20% and 30%, only 6.1% of tested genotypes a RDR was more than 40%. Exotic germplasm collected from abroad, as well as the genotypes from Shanghai, Hunan, and Jiangsu provinces of China were observed with a higher RDR. Less than 1% of the germplasm from Guangdong, Guizhou and Guangxi provinces of China had a RDR over 40%. In general, the landrace germplasm population showed a higher RDR than that of the improved

收稿日期: 2022-04-07 修回日期: 2022-06-06 网络出版日期: 2022-08-22

URL: <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20220407005>

第一作者研究方向为水稻避旱性遗传机理研究, E-mail: 754586026@qq.com

通信作者: 陈亮, 研究方向为稻种资源和水稻抗旱性研究, E-mail: cl@sage.org.cn

**基金项目:** 上海市科技兴农重点攻关项目 (应用基础类) (沪农科攻字 (2015) 第 6-1-1 号); 国家重点研发计划 (2016YFDO100100)

**Foundation projects:** Shanghai Agriculture Applied Technology Development Program, China (Grant No.G2015060101); National Key Technology Research and Development Program of China (2016YFDO100100)

cultivars ( lines ). In japonica and indica germplasm, 13.2% and 3.7% of tested genotypes, respectively, were observed with a RDR over 40%. There are 33 high RDR germplasm from Hunan province while one high RDR indica germplasm from Guangdong, Guangxi, and Guizhou, respectively. Considering the spikelet fertility under drought and water conditions, as well as the relative spikelets per panicle and relative spikelet fertility, 26 genotypes showing strong drought resistance were identified, which are good donors for rice drought resistance breeding and gene mining.

**Key words:** cultivated rice germplasm; drought resistance; drought avoidance; ratio of deep rooting

我国是一个水资源贫乏国家,且水资源时空分布严重不均衡,全国各地均易发生旱灾<sup>[1]</sup>。《中国水旱灾害公报》显示,2008—2018 年度间全国农作物平均因旱受灾 14707 千公顷,粮食损失 220 亿公斤。水稻是我国的主要粮食作物之一,但水稻生产也消耗了农业用水量的 70%,干旱是我国 65% 中低产稻田的主要限制因素<sup>[2]</sup>。水稻灌溉种植过程中排放大量甲烷<sup>[3]</sup>、增加稻谷中砷的积累<sup>[4]</sup>、造成严重面源污染<sup>[5]</sup>。因此,提高水稻抗旱性、减少水稻灌溉用水、解决灌溉种植衍生的一系列问题已成为水稻育种栽培研究的急迫重大任务。种植节水抗旱稻可以减少灌溉用水、提高降雨利用率、躲避或减轻干旱胁迫、减少温室气体排放、减少稻田面源污染<sup>[6-7]</sup>。

根系是植物吸收水分和养分的主要器官,一个发达的深根系统在植物抵御干旱胁迫过程中起重要作用。水稻的根系一般分布较浅,从深层土壤中吸取水分的能力有限,容易受干旱胁迫影响<sup>[8]</sup>。避旱性是抗旱性的第一道防御,主要是通过发达的深根系统来吸取深层土壤水分,免受或减轻干旱胁迫影响,使植株能保持更长时间的正常生长发育<sup>[2]</sup>。针对水稻根长、根粗、根系空间分布、根系拔力、根系穿透力等根系性状及其与抗旱性的关系已有一系列研究<sup>[9]</sup>。但由于水稻根系属于须根系,难以直接观测水稻根系的立体形态特征,深根性的遗传生理研究进展缓慢。近年来发展的篮子法是一种有效的水稻深根系统观察方法,已应用于观测水稻根系的生长角度<sup>[10]</sup>和深根比(RDR, ratio of deep rooting)的遗传研究<sup>[11-12]</sup>。采用篮子法定位克隆了第一个深根比主效基因 *DROI*,该基因与水稻抗旱性密切相关<sup>[13]</sup>。本课题组采用大田篮子法调查了水稻分子育种计划亲本和中国水稻微核心种质等资源的深根比<sup>[12,14]</sup>,开展了深根比 QTL 定位分析和不同生长角度根系的转录组分析<sup>[12,15]</sup>。但总体来说,目前对栽培稻的深根特性了解还是较少。本研究以深根比作为避旱性评价指标对 2234 份栽培稻种质资源进行了避旱性鉴

定,在水分梯度玻璃大棚内对 131 份具有不同深根比材料进行了孕穗期抗旱性评价,旨在了解栽培稻抗旱性多样性,筛选鉴定优异抗旱资源,为我国水稻抗旱性育种和抗旱基因挖掘提供更广泛的种质资源支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试材料均由国家重点研发计划课题“水稻种质资源精准鉴定与创新利用”项目组提供,包括我国南方 12 省(市、区)及国外引进的栽培稻种质 2234 份(表 1),来源广泛、多样性丰富。其中,籼稻和粳稻分别为 1673 份和 561 份,地方品种和选育品种(系)分别为 204 份和 2030 份,均用于深根比检测鉴定。其中,131 份具有不同深根比的种质分为高、中、低 3 组材料,各包含 100 份、12 份和 19 份种质,其平均深根比分别为 46.1%、25.1% 和 8.1%,用于开展孕穗期抗旱性鉴定。

### 1.2 试验方法

**1.2.1 深根比检测** 采用大田“篮子法”进行深根比检测<sup>[12]</sup>,篮子规格为:顶部直径为 17 cm、底部直径为 10 cm、高度为 7 cm,种植密度为 30 cm × 30 cm(两个篮子中心相距的距离)。试验在位于上海市金山区廊下镇南陆村的上海市农业生物基因中心试验基地开展,于 2017—2018 年夏季分两个批次对 2234 份种质进行深根比调查,每份种质调查 6 个篮子。试验田块要尽量平整,秧苗移栽前将篮子埋入试验田,室内育秧,将 2 周龄水稻苗定植于篮子正中央,在水稻生长期间保持浅层水,根据其生长状况进行施肥及田间管理。移栽后 30~35 d 进行深根比的测定,调查分蘖数、浅根数、深根数。将篮子轻轻地从田里拔出来,在水里清洗干净篮子外的泥土。将穿透篮子底部的根系定义为深根(根系与篮子所在平面角度为 50°~90°),将穿透篮子四壁的根系定义为浅根(根系与篮子所在平面角度为 0~50°),深根比即为深根数占总根数的比值。

把深根比超过 40% 的种质定义为高深根比种质。

**1.2.2 抗旱性鉴定** 2019—2020 年在水分梯度抗旱玻璃大棚内对 131 份水稻种质进行了孕穗期的抗旱性重复鉴定,试验基地位于上海市青浦区白鹤镇胜利村。抗旱鉴定田块长 64 m、宽 8.2 m,四周深水沟深 2 m。田块纵向的中间位置留出 0.5 m 形成浅水沟,水沟两侧种植试验材料,株行距为 0.25 m、0.2 m,每个材料种植 3 行,每行种植 18 穴,单本移栽。断水时先将四周深水沟抽干,中间浅水沟一直保持略低于田面的水深,从而从浅水沟到深水沟逐渐产生正常、轻度、中度到重度的干旱胁迫梯度。供试材料根据正常水分条件下的抽穗期调整播种日期,使所有材料同期进入幼穗分化,从幼穗分化起始断水 30 d。记录正常水分和干旱处理下植株的抽穗期,以干旱处理下抽穗延迟天数作为抗旱评价指标。考察正常水分 - 轻度和中度 - 重度区域内的每穗粒数和结实率,计算这两个性状在干旱胁迫与正常水分条件下的比值,即相对每穗粒数和相对结实率作为抗旱性的评价指标。两个指标均超过 90.0% 则定义为高度抗旱(高抗),两个指标均在 80.1%~90.0% 之间则定义为抗旱(抗),两个指标均在 70.1%~80.0% 之间则定义为中度抗旱(中抗),两个指标均在 50.0%~70.0% 之间则定义为中度旱敏感(中敏),两个评价指标之一低于 50.0% 则定义为高度旱敏感(高敏)。

### 1.3 数据统计与分析

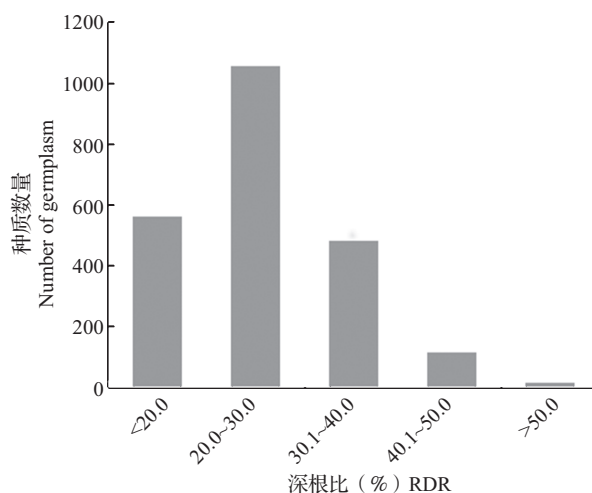
采用 WPS Excel 2016 软件进行数据整理和统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 2234 份材料的深根比检测结果分析

**2.1.1 深根比表型变异** 2234 份供试材料的平均深根比为 25.8%,变异范围为 8.6%~60.1%,1054 份材料的深根比处在 20%~30% 之间,占比 47.2%;563 份材料的深根比小于 20%,占比 25.2%;深根比超过 40% 的高深根比种质 136 份,占比 6.1% (图 1)。说明栽培稻中具有高深根比的种质资源较少,需要鉴定更多的种质资源,筛选出综合性状优良的高深根比种质。

**2.1.2 不同地理来源材料的深根比表现** 2234 份栽培稻来源于我国南方 12 个省(市、区)及国外,平均深根比表型值的排序为上海>湖南>国外>江苏>浙江>江西>重庆>福建>贵州>广西>四川>广东>云南,平均深根比分别为 32.2%、



RDR: ratio of deep rooting, the same as below

图 1 2234 份栽培稻种质资源的深根比分布特征  
Fig.1 Distribution characteristics of RDR of 2234 cultivated rice germplasm

31.3%、30.1%、29.3%、29.1%、25.8%、24.6%、24.1%、22.6%、21.8%、21.6%、21.1% 和 20.7%。国外材料来源广泛,深根比的变异也最大,其次是江西和重庆材料,江苏和云南的材料变异最小,最大和最小深根比种质均出现在湖南材料中。国外材料中高深比种质占比最高(24.4%),其次是上海(17.9%)和湖南(15.6%),江苏(6.9%)、浙江(6.6%)和江西(5.6%)具有相近的高深根比例,广东、广西、云南、贵州和重庆等省(市)的高深根比种质都只有 1 份(表 1)。湖南 167 份籼稻种质中有高深根比种质 22 份,占比 13.2%,43 份粳稻种质中有高深根比种质 11 份,占比 25.6%,其籼粳种质的高深根比种质比例都比较高。说明栽培稻的深根比与地理来源密切相关,水稻抗旱育种中要加强湖南种质的筛选利用。

**2.1.3 地方品种和育成品种(系)的深根比表现** 2234 份种质中地方品种有 204 份,主要来自江西、上海、湖南、贵州和云南等省市,分别有 51、49、46、27 和 20 份(表 1),其平均深根比为 27.0%,高深根比种质 14 份,占比 6.9%。2030 份育成品种(系)的平均深根比为 25.7%,高深根比种质 100 份,占比 5.2%(表 2)。地方品种的平均深根比略高于育成品种(系),高深根比种质比例高于育成品种(系)。说明地方品种中也蕴含着丰富的高深根比资源。

表 1 2234 份不同来源地栽培稻种质资源的深根比表型值比较  
Table 1 RDR of 2234 cultivated rice germplasm from different regions

来源 Origin	数量 No.	平均值 (%) Mean	标准差 (%) SD	变异系数 (%) CV	变幅(%) Variation range	高深根比 数量 No.of RDR>40%	高深根比比例 (%) Ratio of RDR>40%	地方品种数量 No. of landrace	籼稻数量 No. of indica	高深根比 籼稻数量 No. of indica with RDR>40%
广东 Guangdong	356	21.1	5.6	26.3	9.6~42.7	1	0.3	0	356	1
广西 Guangxi	105	21.8	5.6	25.6	12.4~42.5	1	0.9	7	105	1
云南 Yunnan	86	20.7	4.6	22.3	12.3~45.9	1	1.2	20	85	0
贵州 Guizhou	189	22.6	6.1	27.0	10.4~40.7	1	0.5	27	164	1
福建 Fujian	343	24.1	6.7	27.8	10.6~52.9	8	2.3	0	343	8
湖南 Hunan	210	31.3	8.7	27.9	8.6~60.1	33	15.6	46	167	22
江西 Jiangxi	160	25.8	8.0	30.9	10.5~47.5	9	5.6	51	152	8
浙江 Zhejiang	91	29.1	7.3	25.2	13.5~48.4	6	6.6	0	51	3
江苏 Jiangsu	376	29.3	6.5	22.3	13.8~54.3	26	6.9	1	59	6
四川 Sichuan	64	21.6	6.3	29.2	11.3~51.2	1	1.6	1	62	1
重庆 Chongqing	21	24.6	7.6	30.8	15.3~41.8	1	4.8	0	21	1
上海 Shanghai	145	32.2	7.9	24.5	16.2~58.4	26	17.9	49	58	4
国外 Abroad	93	30.1	10.9	36.2	9.5~55.8	22	24.4	0	57	6
总计 Total	2234	25.8	8.0	31.1	8.6~60.1	136	6.1	204	1673	62

表 2 地方品种和育成品种(系)的深根比  
Table 2 RDR of landrace and improved cultivars

类型 Type	数量 No.	深根比均值 (%) Mean RDR	标准差 (%) SD	变异系数 (%) CV	变幅(%) Variation range	深根比>40% 数量 No. of RDR>40%	占比(%) Ratio of RDR>40%
地方品种 Landrace	204	27.0	8.4	31.1	12.5~60.1	14	6.9
育成品种(系) Cultivar(line)	2030	25.7	8.0	31.1	8.6~58.4	100	5.2

在 204 份地方品种中深根比高于 40% 的种质为 14 份,主要来自湖南和上海,分别为 7 份和 6 份,还有 1 份来自江西(表 3)。湖南和上海的地方品种共计 95 份,占地地方品种比例为 46.6%,但高深根比种质占比 92.9%。20 份最高深根比育成品种(系)中有 6 份为国外引进品种(其中上海引进 4 份、云南与浙江各引进 1 份)、湖南 6 份、上海 3 份、江苏 2 份,浙江、四川和福建各 1 份(表 3)。

**2.1.4 籼稻和粳稻的深根比表现** 供试材料中有 1673 份籼稻,广东、广西、福建和重庆等省市材料均为籼稻,云南、四川、江西、贵州和湖南等省

材料主要是籼稻(表 1),其平均深根比为 24.3%,其中高深根比种质 62 份,占比 3.7%,主要来自湖南和福建。561 份粳稻主要来自江苏、上海、浙江和国外,其平均深根比为 30.4%,其中高深根比种质 74 份,占比 13.2%(表 4),主要来自上海、江苏、湖南和国外。粳稻高深根比种质比例是籼稻的 3.6 倍,20 个深根比最大的粳稻材料中有 11 个材料的深根比超过了 50%,而 20 个深根比最大的籼稻材料中只有 4 个材料的深根比超过了 50%(表 5)。说明粳稻中具有更丰富的高深根比资源,要加强对粳稻中的高深根比资源和基因的挖掘与利用。



表 3 14 份高深根比地方品种和 20 份高深根比育成品种(系)

Talbe 3 14 landraces and 20 improved cultivars with higher RDR

编号 Code	名称 Name	深根比(%) RDR	亚种类型 Sub-species	种质类型 Type of germplasm	来源 Origin
2017-B2068	桂花糯	40.1	粳稻	地方品种	湖南
2017-B1864	黄丝糯	40.4	粳稻	地方品种	湖南
2017-B2136	老虎黄	40.8	粳稻	地方品种	上海
2017-B2047	冷水糯	42.3	粳稻	地方品种	湖南
2017-B2039	白丝糯	43.0	粳稻	地方品种	湖南
2017-B2111	黄种 -1	43.1	粳稻	地方品种	上海
2017-B2140	小果子糯	43.7	粳稻	地方品种	上海
2017-B2129	铁秆青 -3	44.1	粳稻	地方品种	上海
2017-B2115	大绿种 -1	44.6	粳稻	地方品种	上海
2017-B1958	红麻糯	45.0	粳稻	地方品种	湖南
2017-B1312	越南早生	46.5	籼稻	地方品种	江西
2017-B2104	六十日	53.3	粳稻	地方品种	上海
2017-B2062	旱糯稻	54.8	粳稻	地方品种	湖南
2017-B2046	禾子	60.1	粳稻	地方品种	湖南
2017-B2266	IPEACO 162	48.1	粳稻	国外引进	上海
2017-B2188	松 1018	48.1	粳稻	选育品种	上海
2017-B1206	嘉育 67	48.4	籼稻	选育品种	浙江
2017-B1421	R9000	48.5	籼稻	选育品种	湖南
2017-B2041	早稻矮子王	48.5	籼稻	选育品种	湖南
2017-B2034	8043	48.5	籼稻	选育品种	湖南
2017-B1720	稻品 98	48.7	籼稻	品系	江苏
2017-B0533	NERICA4	49.7	籼稻	国外引进	云南
2017-B2043	本地糯(团糯)	50.3	籼稻	选育品种	湖南
2017-B1251	ORO	50.9	粳稻	国外引进	浙江
2017-B2249	绵恢 725	51.2	籼稻	选育品种	四川
2017-B2200	SJFR7-8	52.2	粳稻	品系	上海
2017-B2263	CICA 4	52.9	粳稻	国外引进	上海
2017-B1159	矮辐 31	52.9	籼稻	选育品种	福建
2017-B2052	湘早籼 6 号	53.0	籼稻	选育品种	湖南
2017-B1753	连梗 9 号	54.3	粳稻	选育品种	江苏
2017-B1998	州恢 217	54.8	粳稻	恢复系	湖南
2017-B2268	PRATAO	55.1	粳稻	国外引进	上海
2017-B2267	LAC 23	55.8	粳稻	国外引进	上海
2017-B2149	沪早 3 号	58.4	粳稻	选育品种	上海

表 4 籼稻和粳稻的深根比

Table 4 RDR of indica and japonica rice

亚种类型 Sub-species	数量 No.	深根比均值(%) Mean RDR	标准差(%) SD	变异系数(%) CV	变幅(%) Variation range	深根比>40% 数量 No. of DR>40%	占比(%) Ratio of RDR>40%
籼稻 <i>Indica rice</i>	1673	24.3	7.4	30.5	8.6~53.0	62	3.7
粳稻 <i>Japonica rice</i>	561	30.4	8.1	26.7	12.1~60.1	74	13.2

表 5 深根比较高的 20 份籼稻和 20 份粳稻种质

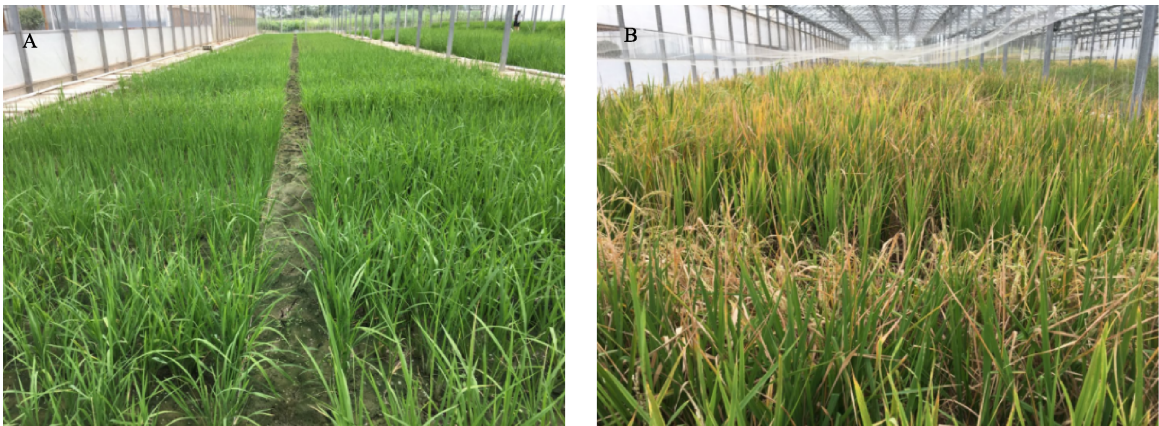
Table 5 20 Indica and 20 Japonica rice germplasm with higher RDR

编号 Code	名称 Name	深根比(%) RDR	亚种类型 Sub-species	类型 Type	来源 Origin
2017-B2189	S13-14	46.1	粳稻	选育品种	上海
2017-B2178	沪粳 108	46.5	粳稻	选育品种	上海
2017-B2000	巴西陆稻(光壳)	47.0	粳稻	国外引进	湖南
2017-B1614	盐城 235	47.3	粳稻	品系	江苏
2017-B1459	L63M36	47.5	粳稻	品系	江西
2017-B2088	甬粳 18	48.0	粳稻	选育品种	浙江
2017-B2261	IAC 1	48.0	粳稻	国外引进	上海
2017-B2266	IPEACO 162	48.1	粳稻	国外引进	上海
2017-B2188	松 1018	48.1	粳稻	选育品种	上海
2017-B1251	ORO	50.9	粳稻	国外引进	浙江
2017-B2200	SJFR7-8	52.2	粳稻	品系	上海
2017-B2263	CICA 4	52.9	粳稻	国外引进	上海
2017-B2104	六十日	53.3	粳稻	地方品种	上海
2017-B1753	连粳 9 号	54.3	粳稻	选育品种	江苏
2017-B1998	州恢 217	54.8	粳稻	恢复系	湖南
2017-B2062	旱糯稻	54.8	粳稻	地方品种	湖南
2017-B2268	PRATAO	55.1	粳稻	国外引进	上海
2017-B2267	LAC 23	55.8	粳稻	国外引进	上海
2017-B2149	沪早 3 号	58.4	粳稻	选育品种	上海
2017-B2046	禾子	60.1	粳稻	地方品种	湖南
2017-B1960	早原丰 -3	45.0	籼稻	选育品种	湖南
2017-B1089	沙粳一号	45.2	籼稻	选育品种	福建
2017-B1400	赣晚籼 37 号	45.6	籼稻	选育品种	江西
2017-B1719	稻品 97	46.0	籼稻	品系	江苏
2017-B1994	湖恢 628	46.1	籼稻	恢复系	湖南
2017-B1696	苏籼 1 号	46.4	籼稻	选育品种	江苏
2017-B1408	R458	46.5	籼稻	选育品种	江西
2017-B1312	越南早生	46.5	籼稻	地方品种	江西
2017-B1247	IRBB 7	47.6	籼稻	国外引进	浙江
2017-B1906	岳矮早 1 号	47.6	籼稻	选育品种	湖南
2017-B1206	嘉育 67	48.4	籼稻	选育品种	浙江
2017-B1421	R9000	48.5	籼稻	选育品种	湖南
2017-B2041	早稻矮子王	48.5	籼稻	选育品种	湖南
2017-B2034	8043	48.5	籼稻	选育品种	湖南
2017-B1720	稻品 98	48.7	籼稻	品系	江苏
2017-B0533	NERICA4	49.7	籼稻	国外引进	云南
2017-B2043	本地糯(团糯)	50.3	籼稻	选育品种	湖南
2017-B2249	绵恢 725	51.2	籼稻	选育品种	四川
2017-B1159	矮辐 31	52.9	籼稻	选育品种	福建
2017-B2052	湘早籼 6 号	53.0	籼稻	选育品种	湖南

2.2 孕穗期抗旱性与深根比的关系

为了了解深根比与抗旱性的关系,在水分梯度抗旱鉴定玻璃大棚内对 131 份具有不同深根比的种质开展了孕穗期抗旱性鉴定(图 2)。发现 19 份低深根比种质中只有 4 份达到了抗旱水平,12 份中深根比种质中有 5 份达到了抗旱水平,100 份高深根比种质中则有 49 份达到抗旱水平,其中 17

份种质达到高抗旱水平(表 6)。高深根比种质中高抗旱比例是低深根比种质的 3.2 倍、是中深根比种质的 2.0 倍,说明抗旱性与深根比密切相关,提高深根比确实能提高抗旱性。相关性分析表明,深根比与相对每穗粒数、相对结实率的相关系数分别为 0.1768 和 0.1613,达到了 5% 的显著性水平。



A: 断水前; B: 断水 30 d 后  
A: Before water withdraw; B: After water withdraw for 30 days

图 2 玻璃大棚内水分梯度设施鉴定水稻抗旱性  
Fig.2 Evaluating drought resistance at reproductive stage in glass greenhouse with water gradient

表 6 不同深根比种质的抗旱性鉴定

Table 6 Drought resistance evaluation at reproductive stage for rice germplasm with different RDR

项目 Item	低深根比数量 No.of low RDR	占比(%) Ratio	中深根比数量 No.of medium RDR	占比(%) Ratio	高深根比数量 No.of high RDR	占比(%) Ratio
高敏 HDS	9	47.4	2	16.7	32	32.0
中敏 MDS	6	31.6	5	41.7	19	19.0
中抗 MDR	2	10.5	2	16.7	18	18.0
抗 DR	1	5.3	2	16.7	14	14.0
高抗 HDR	1	5.3	1	8.3	17	17.0
相对每穗粒数(%)RSPP	53.7		68.8		68.3	
相对结实率(%)RSF	62.3		82.9		76.8	
平均深根比(%)ARDR	8.1		25.1		46.1	

HDS: High drought sensitivity; MDS: Medium drought sensitivity; MDR: Medium drought resistance; DR: Drought resistance; HDR: High drought resistance; RSPP: Relative spikelet per panicle; RSF: Relative spikelet fertility; ARDR: Average of RDR, the same as below

综合分析干旱胁迫和水分正常条件下的结实率及相对每穗粒数、相对结实率、干旱延迟天数等抗旱鉴定指标,筛选出了 26 份抗旱性达到高抗和抗的材

料,其中籼稻 8 份、粳稻 18 份,主要来自江苏、上海和国外,只有 1 份地方品种(表 7),包含 2 份低深根比种质、4 份中深根比种质和 20 份高深根比种质。

表 7  26 份抗旱优异材料  
Table 7  26 genotypes with superior drought resistance

编号 Code	名称 Name	类型 Type	亚种 Sub-species	来源 Origin	深根比 (%) RDR	干旱处理 下结实率 (%) SFD	正常水份 下结实率 (%) SFW	相对每穗 粒数(%) RSPP	相对结实率 (%) RSF	延迟天数 DDD
2017-B0113	青威 1 号	选育品种	籼稻	广东	25.0	56.8	65.8	99.0	86.3	4
2017-B0242	胜桂 2	选育品种	籼稻	广东	25.0	63.2	78.9	93.4	80.2	3
2017-B0438	秋 B	品系	籼稻	广西	7.3	73.6	73.0	96.9	100.9	1
2017-B0532	IRAT104	选育品种	籼稻	国外引进	25.2	84.3	83.9	91.1	100.5	4
2017-B0533	NERICA4	选育品种	籼稻	国外引进	49.0	75.4	86.5	89.2	87.2	2
2017-B1037	辐射 632	选育品种	籼稻	福建	25.1	77.9	80.0	92.6	97.4	3
2017-B1135	能干 2 号	选育品种	籼稻	福建	44.3	68.9	69.7	94.9	98.8	1
2017-B1614	盐城 235	品系	粳稻	江苏	42.9	88.9	88.7	98.6	100.3	3
2017-B1738	宁粳 7 号	选育品种	粳稻	江苏	42.3	80.9	83.5	92.9	96.9	0
2017-B1743	W023	品系	粳稻	江苏	6.8	78.4	80.6	90.7	97.2	4
2017-B1820	常农粳 5 号	选育品种	粳稻	江苏	47.5	82.3	84.8	93.2	97.0	0
2017-B1835	武运 3264	选育品种	粳稻	江苏	38.8	70.1	80.7	90.9	86.8	2
2017-B1840	香血粳 515	品系	粳稻	江苏	40.9	63.3	71.7	91.4	88.3	2
2017-B2033	8042	选育品种	籼稻	湖南	42.8	75.9	80.8	84.6	94.0	0
2017-B2062	旱糯稻	地方品种	粳稻	湖南	46.7	83.1	83.1	98.3	100.0	1
2017-B2088	甬粳 18	选育品种	粳稻	浙江	45.6	66.5	76.6	97.1	86.8	2
2017-B2174	青香软粳	选育品种	粳稻	上海	47.8	72.6	80.7	78.1	90.0	3
2017-B2180	沪粳 144	选育品种	粳稻	上海	44.9	80.7	86.2	90.4	93.6	0
2017-B2183	沪长粒香粳	选育品种	粳稻	上海	43.9	68.8	69.2	84.7	99.4	2
2017-B2189	S13-14	选育品种	粳稻	上海	50.2	85.3	85.5	96.8	99.8	1
2017-B2193	金廊粳 2 号	品系	粳稻	上海	57.7	76.0	78.3	97.2	97.0	0
2017-B2201	SJRF7-56	品系	粳稻	上海	58.2	69.9	72.6	89.9	96.3	4
2017-B2252	MILT1444	选育品种	粳稻	国外引进	42.2	75.0	77.0	76.0	97.4	1
2017-B2259	中旱 3 号	选育品种	粳稻	浙江	47.7	85.8	90.5	95.0	94.8	0
2017-B2267	LAC23	选育品种	粳稻	国外引进	55.7	69.0	81.2	96.0	85.1	0
2017-B2269	IRAT109	选育品种	粳稻	国外引进	45.0	81.0	88.1	94.2	91.9	5

SFD: Spikelet fertility under drought; SFW: Spikelet fertility under water; DDD: Delayed days under drought

3 讨论

水稻根系属于须根系,从稻田中挖掘出来后难以保持根系的原有空间状态。因此,水稻深根性研究需要一种合适的方法。近年来,篮子法被应用于观测水稻根系的生长角度(深根比)<sup>[10, 12-13, 16]</sup>。本研究采用大田篮子法<sup>[12]</sup>观测了 2234 份栽培稻种质资源的深根比,发现栽培稻的深根比存在丰富的变异,最小深根比只有 8.6%,最大深根比达到了 60.1%,但栽培稻中深根比超过 40% 的高深根比种质偏少,占比只有 6.1%,粳稻中高深根比种质比

例是籼稻的 3.6 倍(表 4)。这与王培等<sup>[14]</sup>和 Lou 等<sup>[12]</sup>对水稻分子育种亲本和中国水稻微核心种质的深根比检测结果相似。湖南材料中籼粳稻高深根比种质都比较多,而广东、广西、贵州等省的籼稻材料中深根比超过 40% 均只有 1 份,水稻抗旱育种要加强湖南种质的应用。值得注意的是,本研究中来自云南的材料只有 86 份,其中 85 份为籼稻,且深根比都低于 40%,唯一的一份粳稻种质云粳优 14 具有较高的深根比,为 45.9%。云南是我国稻种资源遗传多样性最丰富的地区<sup>[17]</sup>,存在大量抗旱性强的陆稻资源<sup>[18]</sup>,后续要加强对这部分陆稻种质资源的



抗旱性筛选鉴定与利用。

避旱性是水稻抗旱性的第一道防御,深根比越高,植株从深层土壤中吸取水分的可能性越高,抗旱性就越强<sup>[8]</sup>。土壤水分梯度鉴定法是一种有效的水稻抗旱性鉴定方法<sup>[19-20]</sup>。本研究利用此方法对 131 份不同深根比材料进行了孕穗期抗旱性鉴定,发现高深根比种质中有 49.0% 达到了中等抗旱以上水平,而低深根比种质中只有 21.1% 达到了中等抗旱以上水平(表 6)。本研究包含了 18 份由上海引进鉴定的抗旱性较好的国外材料<sup>[21]</sup>,其中有 10 份的深根比超过了 40%,占比 55.6%。说明提高水稻的深根比确能增强水稻中度-重度干旱胁迫下的抗旱性,大田篮子法是一种有效的水稻深根比鉴定方法。

精准高效的表型鉴定是种质资源开发利用的基础,培育适应全球气候变化的优异品种需在大量种质资源中发掘和利用抗旱、耐热、抗病虫和水肥高效利用的优异种质资源<sup>[22]</sup>。我国水稻种植历史悠久,是水稻主要的起源地,稻种资源非常丰富,是水稻育种不断突破的宝贵资源<sup>[23]</sup>。本研究从 2234 份栽培稻种质中鉴定到 136 份深根比超过 40% 的优异种质,筛选鉴定出 26 份抗旱性较强的优异种质。农保选等<sup>[24]</sup>也从这批资源中鉴定出了 7 份抗南方水稻黑条矮缩病的优异抗源材料。说明这批稻种资源中蕴含着各类优异资源,今后要开展更多栽培稻种质资源的精准鉴定评价和创新利用,挖掘优异种质,解析优异性状的分子遗传基础,为水稻生物育种提供更多优异基因资源。

#### 参考文献

- [1] 王浩,汪林,杨贵羽,贾玲,姚懿真,张珉桐. 我国农业水资源形势与高效利用战略举措. 中国工程科学, 2018, 20(5): 9-15  
Wang H, Wang L, Yang G Y, Jia L, Yao Y Z, Zhang Y T. Agricultural water resource in China and strategic measures for its efficient utilization. Strategic Study of Chinese Academy of Engineering, 2018, 20(5): 9-15
- [2] 罗利军,张启发. 栽培稻抗旱性研究的现状与策略. 中国水稻科学, 2001, 15(3): 209-214  
Luo L J, Zhang Q F. The status and strategy on drought resistance of rice (*Oryza sativa* L.). Chinese Journal of Rice Science, 2001, 15(3): 209-214
- [3] 朱小莉,黄琼,宋开付,马静,张广斌,徐华. 常年淹水稻田甲烷产生潜力和产生途径的季节变化. 土壤学报, 2022, DOI: 10.11766/trxb202107050347  
Zhu X L, Huang Q, Song K F, Ma J, Zhang G B, Xu H. Seasonal variations in methane production potential and methanogenic pathway in a permanently flooded rice field. Acta Pedologica Sinica, 2022, DOI: 10.11766/trxb202107050347
- [4] Stone R. Arsenic and paddy rice: A neglected cancer risk? Science, 2008, 321: 184-185
- [5] 刘方平. 稻田水肥管理对不同尺度区域农业面源污染排放规律影响分析. 江西农业学报, 2016, 28(12): 105-109  
Liu F P. Effects of irrigation and fertilization in paddy field on discharge of agricultural non-point-source pollution in different-scale districts. Acta Agriculturae Jiangxi, 2016, 28(12): 105-109
- [6] 罗利军,梅捍卫,余新桥,刘鸿艳,冯芳君. 节水抗旱稻及其发展策略. 科学通报, 2011, 56(11): 804-811  
Luo L J, Mei H W, Yu X Q, Liu H Y, Feng F J. Water-saving and drought-resistance rice and its development strategy. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(11): 804-811
- [7] 罗利军. 节水抗旱稻的培育与应用. 生命科学, 2018, 30(10): 1108-1112  
Luo L J. Development of water-saving and drought-resistance rice (WDR). Chinese Bulletin of Life Science, 2018, 30(10): 1108-1112
- [8] Kondo M, Murty M V, Aragones D V. Characteristics of root growth and water uptake from soil in upland rice and maize under water stress. Soil Science and Plant Nutrition, 2000, 46: 721-732
- [9] Henry A. IRRI's drought stress research in rice with emphasis on roots: Accomplishments over the last 50 years. Plant Root, 2013, 7: 92-106
- [10] Kato Y, Abe J, Kamoshita A, Yamagishi J. Genotypic variation in root growth angle in rice (*Oryza sativa* L.) and its association with deep root development in upland fields with different water regimes. Plant and Soil, 2006, 287: 117-129
- [11] Uga Y, Okuno K, Yano M. *Dro1*, a major QTL involved in deep rooting of rice under upland field conditions. Journal of Experimental Botany, 2011, 62: 2485-2494
- [12] Lou Q J, Chen L, Mei H W, Wei H B, Feng F J, Wang P, Xia H, Li T M, Luo L J. Quantitative trait locus mapping of deep rooting by linkage and association analysis in rice. Journal of Experimental Botany, 2015, 66: 4749-4757
- [13] Uga Y, Sugimoto K, Ogawa S, Rane J, Ishitani M, Hara N, Kitomi Y, Inukai Y, Ono K, Kanno N, Inoue H, Takehisa H, Motoyama R, Nagamura Y, Wu J Z, Matsumoto T, Takai T, Okuno K, Yano M. Control of root system architecture by *DEEPER ROOTING 1* increases rice yield under drought conditions. Nature Genetics, 2013, 45: 1097
- [14] 王培,陈亮,楼巧君,李铁梅,罗利军. 全球水稻分子育种计划亲本的深根特性鉴定. 作物杂志, 2014, 4: 39-43  
Wang P, Chen L, Lou Q J, Li T M, Luo L J. Characterization of deep rooting of the parental lines used in the international rice molecular breeding program. Crops, 2014, 4: 39-43
- [15] Lou Q J, Chen L, Mei H W, Xu K, Wei H B, Feng F J, Li T M, Pang X M, Shi C P, Luo L J, Zhong Y. Root transcriptomic analysis revealing the importance of energy metabolism to the development of deep roots in rice (*Oryza sativa* L.). Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 1314
- [16] Uga Y, Ebana E, Abe J, Morita S, Okuno K, Yano M. Variation in root morphology and anatomy among accessions of cultivated rice (*Oryza sativa* L.) with different genetic backgrounds. Breeding Science, 2009, 59: 87-93

- [ 17 ] 黄燕红,孙立新,王象坤. 中国栽培稻遗传多样性中心和起源研究. 植物遗传资源学报, 2005, 6( 2 ): 125-129  
Huang Y H, Sun L X, Wang X K. Study on the center of genetic diversity and its origin of cultivated rice in China. Journal of Plant Genetic Resources, 2005, 6( 2 ): 125-129
- [ 18 ] 徐建欣,杨洁,胡祥伟,苏子涵,王云月. 陆稻苗期抗旱性鉴定指标筛选与评价. 中国农学通报, 2015, 31( 3 ): 29-34  
Xu J X, Yang J, Hu X W, Su Z H, Wang Y Y. Screening and evaluation of the drought resistance identification indexes of upland rice varieties during seedling stage. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31( 3 ): 29-34
- [ 19 ] 刘鸿艳,邹桂花,刘国兰,胡颂平,李明寿,余新桥,梅捍卫,罗利军. 水分梯度下水稻 CT, LWP 和 SF 的相关及其 QTL 定位研究. 科学通报, 2005, 50( 2 ): 130-139  
Liu H Y, Zou G H, Liu G L, Hu S P, Li M S, Yu X Q, Mei H W, Luo L J. Correlation and QTL mapping of CT, LWP, and SF of rice under soil moisture gradient. Chinese Science Bulletin, 2005, 50( 2 ): 130-139
- [ 20 ] 张安宁,王飞名,余新桥,梅捍卫,罗利军. 基于土壤水分梯度鉴定法的栽培稻抗旱标识品种筛选. 作物学报, 2008, 34( 11 ): 2026-2032  
Zhang A N, Wang F M, Yu X Q, Mei H W, Luo L J. Screening marker varieties with drought resistance in cultivated rice ( *Oryza sativa* L. ) using identification method with soil moisture gradient. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34( 11 ): 2026-2032
- [ 21 ] Liu H Y, Mei H W, Yu X Q, Zou G H, Liu G L, Luo L J. Towards improving the drought tolerance of rice in China. Plant Genetic Resources, 2006, 4( 1 ): 47-53
- [ 22 ] 王晓鸣,邱丽娟,景蕊莲,任贵兴,李英慧,李春辉,秦培友,谷勇哲,李龙. 作物种质资源表型性状鉴定评价: 现状与趋势. 植物遗传资源学报, 2022, 23( 1 ): 12-20  
Wang X M, Qiu L J, Jing R L, Ren G X, Li Y H, Li C H, Qing P Y, Gu Y Z, Li L. Evaluation on phenotypic traits of crop germplasm: Status and development. Journal of Plant Genetic Resources, 2022, 23( 1 ): 12-20
- [ 23 ] 韩龙植,曹桂兰. 中国稻种资源收集、保存和更新现状. 植物遗传资源学报, 2005, 6( 3 ): 359-364  
Han L Z, Cao G L. Status of collection, conservation and propagation of rice germplasm in China. Journal of Plant Genetic Resources, 2005, 6( 3 ): 359-364
- [ 24 ] 农保选,秦碧霞,夏秀忠,张宗琼,杨行海,曾宇,谢慧婷,李战彪,韩龙植,李丹婷. 栽培稻种质资源的南方水稻黑条矮缩病抗性鉴定评价. 植物遗传资源学报, 2021, 22( 4 ): 939-950  
Nong B X, Qin B X, Xia X Z, Zhang Z Q, Yang X H, Zeng Y, Xie H T, Li Z B, Han L Z, Li D T. Evaluation of cultivated rice germplasm resources for resistance to southern rice black-streaked dwarf disease. Journal of Plant Genetic Resources, 2021, 22( 4 ): 939-950