

不同旱直播方式对水稻根系形态特征及产量的影响

叶旭波, 冶会锋, 马童杰, 代晓华*

(宁夏大学, 银川 750000)

摘要:为明确不同旱直播方式对水稻根系形态及产量的影响,本试验以宁粳47号和宁粳43号水稻品种为材料,采用保墒旱条播、保墒旱穴播以及播后上水3种旱直播方式,研究不同旱直播方式对水稻根系形态及产量的影响。结果表明,2个水稻品种在不同旱直播方式下根系形态变化具有一致性。苗期与灌浆期,保墒旱条播方式根长、根表面积、根体积以及根干重均大于保墒旱穴播与播后上水方式;孕穗期,保墒旱穴播方式根长、根表面积、根体积以及根干重均大于保墒旱条播与播后上水方式;播后上水方式在不同生育时期根长、根表面积、根体积均为最小。保墒旱条播与保墒旱穴播方式根直径在不同生育时期表现出下降趋势,播后上水方式表现出先上升后下降的趋势;生育中后期,播后上水方式根直径均大于保墒旱条播与保墒旱穴播方式。不同处理间宁粳47号保墒旱穴播方式产量最高;宁粳43号播后上水方式产量最高。相关性分析表明,孕穗期宁粳47号根长、根体积及根干重与产量间呈极显著正相关,灌浆期呈正相关;孕穗期宁粳43号根长、根表面积及根体积与产量间呈显著负相关,灌浆期呈正相关。

关键词:水稻;旱直播;根系形态;产量

中图分类号:S511.042

文献标识码:A

文章编号:2096-5877(2024)03-0005-08

Effects of Different Dry Direct Seeding Methods on Root Morphological Characteristics and Yield of Rice

YE Xubo, YE Huifeng, MA Tongjie, DAI Xiaohua*

(Ningxia University, Yinchuan 750000, China)

Abstract: In order to clarify the effects of different dry direct seeding methods on the root morphology and yield of rice, this study used Ningjing 47 and Ningjing 43 varieties to compare the differences of rice root morphology and yield under different dry direct seeding methods, which were drill sowing with moisture conservation, hole sowing with moisture conservation and water supply after sowing. The results showed that the root morphological changes of the two cultivars were consistent under different dry direct seeding methods. The root length, root surface area, root volume and root dry weight of drill sowing were all higher than those of hole sowing and water supply after sowing at seedling and filling stage. At booting stage, the root length, root surface area, root volume and root dry weight of hole sowing were all higher than those of drill sowing and water supply after sowing, and the water supply after sowing was the least at different growth stages. The root diameter of drill and hill-drop sowing showed a decreasing trend at different growth stages, while the root diameter of water supply after sowing showed a rising trend at first and then decreasing trend after sowing. In the middle and later stages of growth, the root diameter of the water supply after sowing after sowing was larger than that of the drill and hole sowing methods. In conclusion, under the same sowing amount, the root morphology of drill sowing was better than that of hole sowing and water supply after sowing at seedling stage and tillering stage, which was more conducive to the growth and development of plants, and the root senescence was slow in the late growth stage, which was more conducive to the enrichment of seeds of plants, so as to increase the yield. Correlation analysis showed that the root length, root volume and root dry weight of Ningjing 47 at booting stage had extremely significant positive correlation with yield, and had positive correlation at filling stage. The root length, root surface area and root volume of Ningjing 43 at booting stage had significant negative correlation

收稿日期:2023-10-21

基金项目:宁夏回族自治区重点研发计划项目(2018BBF02018)

作者简介:叶旭波(1996-),男,在读硕士,主要从事作物高产优质高效栽培技术研究。

通信作者:代晓华,女,教授,E-mail: 1204623750@qq.com

with yield, and had positive correlation at filling stage.

Key words: Rice; Dry direct seeding; Root morphology; Yield

根系作为水稻最主要的器官之一,对水稻的生长发育和产量起着重要的作用^[1-4]。水稻根系属须根系,主要分布于0~20 cm土层,具有吸收水分和养分的功能,还起到对植株的支撑、固定作用,同时也是一些激素与氨基酸的合成场所^[5-7]。根系的生长发育受到自身遗传特性与外界环境的共同影响,种植方式对其生长发育也起着至关重要的作用^[8-9]。水稻根系形态指标主要包括根长、根粗、根表面积、根体积、根系分布、根干重等^[10]。叶勇^[3]、孙浩燕^[11]等认为良好的根系形态有利于促进植株地上部与地下部间的物质交换运输及养分吸收,进而直接影响地上部性状与产量。当前,有关根系的研究主要集中于根系形态对养分吸收^[12]、生理特性^[13]以及根系生长调控^[14]的影响等,有关旱直播方式对水稻根系形态影响的研究较少。刘红江等^[15]研究发现直播稻根系分布较人工移栽和机插稻浅,根长与根直径也小于人工移栽与机插稻;任万军等^[16]发现人工移栽与抛栽的根长、根数、发根力等特征具有显著差异,抽穗后,免耕留茬抛秧方式根系干重更高。程建平等^[17]研究表明,机械条直播、机械穴直播和人工撒播三种种植方式中,在齐穗期根重、主根数、根尖数、根总长均以机械穴直播最大,人工撒播最小。李杰^[6]研究发现,直播稻由于播量过大,导致群体茎蘖数过多,个体空间较小,加剧了根系间对于养分的竞争,因此根长较短且直径小;机插稻在抽穗后根系干重小且下降快,根直径也较人工移栽小。侯文平等^[18]认为水稻的栽培方式会直接影响水稻的产量和品质,金峰等^[19]研究发现与大垄双行和宽窄行种植方式相比,等株行距下适当增大株距可以提高光截获量,增加叶片光能利用率,进而促进籽粒灌浆,增加成穗率和粒重,进而提高水稻产量。

水稻作为宁夏引黄灌区重要的粮食作物^[20],以单季稻作为主要种植方式,种植面积约为8万hm²,总产量约70万t,其中直播种植面积占总种植面积的90%^[21],主要的直播种植方式有保墒旱条播、保墒旱穴播和播后上水。生产上播后上水面临给水晚,水稻生育期缩短,而保墒旱直播面临播种量大、保苗率低、群体结构不合理等问题,尤其是直播稻的根系分布较浅,造成群体抗逆性较差,后期易倒伏。本研究通过研究宁夏引

黄灌区水稻直播所采用的保墒旱条播、保墒旱穴播与播后上水三种旱直播方式对水稻根系形态特征及产量的影响,以期为宁夏引黄灌区直播稻生长调控提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

供试材料为宁夏地区主栽水稻品种宁粳43号和宁粳47号。

1.2 试验地概况

试验于2020年在银川市永宁县望洪镇宁夏农林科学院农作物研究所科研试验基地开展。该地区属大陆性干旱气候,年降水量约260 mm,年蒸发量约1 500 mm,土壤类型为灌淤土,土壤肥力中等,前茬作物为水稻,土壤基础理化性质见表1。

表1 土壤基础理化性质

土层 /cm	有机质 /g·kg ⁻¹	全氮 /g·kg ⁻¹	速效磷 /mg·kg ⁻¹	速效钾 /mg·kg ⁻¹	土壤容重 /mg·cm ⁻³	pH值
0~20	13.1	0.7	17.18	113.6	1.29	8.42

1.3 试验设计

采用两因素随机区组设计,A因素(品种):A₁宁粳47号,A₂宁粳43号。B因素(直播方式):B₁保墒旱条播,B₂保墒旱穴播(20 cm×10 cm),B₃播后上水(20 cm×10 cm);3次重复,共18个小区。小区长9 m,宽2.6 m,过道宽0.6 m,试验地面积507.6 m²。试验地播前整地同大田,基肥随整地施入,氮肥18 kg/667 m²,磷肥9 kg/667 m²,钾肥6 kg/667 m²,播种量14 kg/667 m²,3月19日播种,其他管理措施同大田。

1.4 测定内容及方法

分别于苗期、孕穗期、灌浆期在每小区内选择长势均匀一致的植株(3次重复),以植株为中心,取20 cm×20 cm×20 cm的土体装入取样袋,带回实验室用水浸泡,待土体松软后使用清水冲去泥土,取出根系,再使用Espon Expression 11000 XL根系扫描仪进行图像扫描保存,扫描完毕后将根系放入75 °C烘箱烘干至恒重,称取根干重。所得图像采用WinRHIZO系统进行根长、根直径、根表面积、根体积的分析。

成熟期,条播方式每小区取1 m长样段,穴播方式每小区取10穴(3次重复),进行室内考种,测

定单株穗数、单穗粒数、千粒重等。

1.5 数据处理与分析

采用 Excel 2016 软件进行数据处理,采用 SPSS 25.0 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同早直播方式对水稻根系形态指标的影响

2.1.1 不同早直播方式对水稻总根长的影响

由表 2 可知,随生育进程的推进,2 个水稻品种不同处理间总根长均表现为先上升后下降的趋

势,生育中期最大,生育后期随根系衰老,总根长逐渐下降。宁粳 47 号在苗期和灌浆期总根长均大于宁粳 43 号,孕穗期小于宁粳 43 号。苗期,2 个水稻品种不同处理间总根长表现为: $B_1 > B_2 > B_3$;宁粳 47 号 B_1 较 B_2 、 B_3 分别提高 35.2% 和 186.3%,宁粳 43 号 B_1 较 B_2 、 B_3 分别提高 46.6% 和 229.8%;孕穗期,2 个水稻品种不同处理间总根长表现为: $B_2 > B_1 > B_3$;宁粳 47 号 B_2 较 B_1 、 B_3 分别提高 37.5% 和 46.9%,差异显著;宁粳 43 号 B_2 较 B_1 、 B_3 分别提高 10.9% 和 48.6%, B_1 、 B_2 均与 B_3 差异显著。灌浆期,

表 2 不同早直播方式对水稻总根长的影响

品种	处理	总根长/ $\times 10^4 \text{m} \cdot 667 \text{m}^{-2}$		
		苗期	孕穗期	灌浆期
宁粳 47 号	保墒早条播(B_1)	29.2±7.0a	115.7±7.9b	102.1±3.5a
	保墒早穴播(B_2)	21.6±5.3ab	159.1±5.8a	100.0±4.3a
	播后上水(B_3)	10.2±0.5b	108.3±14.3b	87.8±6.2b
宁粳 43 号	保墒早条播(B_1)	27.7±6.4a	150.3±6.2a	92.9±18.3a
	保墒早穴播(B_2)	18.9±1.4ab	166.7±10.5a	86.6±1.1a
	播后上水(B_3)	8.4±0.0b	112.2±6.5b	75.2±2.6b
F 值	A	0.30 NS	4.32 NS	3.00 NS
	B	9.22**	17.06**	2.00 NS
	A×B	0.01 NS	1.73 NS	0.04 NS

注:A 表示品种,B 表示早直播方式,小写字母不同表示差异显著($P < 0.05$),“*”和“**”分别表示在 0.05 和 0.01 水平差异显著,NS 表示差异不显著,下同

2 个水稻品种不同处理间总根长表现为: $B_1 > B_2 > B_3$;宁粳 47 号 B_1 较 B_2 、 B_3 分别提高 2.1% 和 16.3%,宁粳 43 号 B_1 较 B_2 、 B_3 分别高 7.3% 和 23.5%, B_1 、 B_2 均与 B_3 差异显著。从 F 值来看,早直播方式在苗期和孕穗期存在极显著效应,灌浆期不显著;不同生育时期,品种以及品种×早直播方式的互作效应均不显著。

2.1.2 不同早直播方式对水稻平均根直径的影响

由表 3 可知,随生育进程推进,生育前期至中期,保墒早条播与保墒早穴播方式下 2 个水稻品种平均根直径均表现出下降的趋势,生育后期宁粳 47 号表现出增加趋势,宁粳 43 号表现出下降趋势,播后上水方式下 2 个水稻品种平均根直径均表现出先增加后降低的趋势。不同生育时期宁粳 43 号平均根直径均大于宁粳 47 号。苗期,2 个水稻品种不同处理间平均根直径表现为: $B_1 > B_2 > B_3$;宁粳 47 号 B_1 较 B_2 、 B_3 分别提高 26.8% 和 147.8%, B_1 、 B_2 均与 B_3 差异显著;宁粳 43 号 B_1 较 B_2 、 B_3 分别提高 23.7% 和 156.7%,不同处理间差异显著。孕穗期,2 个水稻品种不同处理间平均根直径表现

为: $B_3 > B_1 > B_2$;宁粳 47 号 B_3 较 B_1 、 B_2 分别提高 3.6% 和 13.5%,宁粳 43 号 B_3 较 B_1 、 B_2 分别提高 1.4% 和 10.1%,2 个水稻品种不同处理间差异均不显著。灌浆期,宁粳 47 号不同处理间平均根直径表现为: $B_1 > B_3 > B_2$, B_1 较 B_3 、 B_2 分别提高 0.8% 和 8.6%;宁粳 43 号不同处理平均根直径表现为: $B_3 > B_1 > B_2$, B_3 较 B_1 、 B_2 分别提高 0.3% 和 7.8%,2 个水稻品种 B_3 、 B_1 均与 B_2 差异显著。从 F 值来看,早直播方式在苗期和灌浆期存在极显著效应;不同生育时期,品种以及品种×早直播方式的互作效应不显著。

2.1.3 不同早直播方式对水稻根表面积的影响

由表 4 可知,随生育进程推进,2 个水稻品种不同处理间根表面积变化趋势一致,均表现先增加后降低的趋势。苗期,除保墒早穴播方式外,宁粳 43 号根表面积均大于宁粳 47 号;孕穗期,宁粳 43 号根表面积均大于宁粳 47 号;灌浆期,宁粳 43 号根表面积均小于宁粳 47 号。苗期,2 个水稻品种不同处理间根表面积表现为: $B_1 > B_2 > B_3$;宁粳 47 号 B_1 较 B_2 、 B_3 分别提高 33.6% 和 96.3%,宁粳 43

表3 不同旱直播方式对水稻平均根直径的影响

品种	处理	平均根直径/mm		
		苗期	孕穗期	灌浆期
宁梗47号	保墒旱条播(B ₁)	1.064 1±0.091 9a	0.624 1±0.003 2a	0.627 9±0.004 2a
	保墒旱穴播(B ₂)	0.839 3±0.093 4a	0.569 9±0.058 2a	0.578 4±0.009 6b
	播后上水(B ₃)	0.429 5±0.015 0b	0.646 7±0.021 1a	0.622 9±0.007 9a
宁梗43号	保墒旱条播(B ₁)	1.320 5±0.034 4a	0.643 7±0.032 4a	0.630 1±0.003 3a
	保墒旱穴播(B ₂)	1.067 5±0.093 3b	0.592 9±0.027 1a	0.586 4±0.007 3b
	播后上水(B ₃)	0.514 4±0.012 1c	0.652 6±0.004 3a	0.632 2±0.004 3a
F值	A	11.82 NS	0.42 NS	0.75 NS
	B	58.89**	2.72 NS	27.9**
	A×B	0.92NS	0.04NS	0.44NS

表4 不同旱直播方式对水稻根表面积的影响

品种	处理	根表面积/m ² ·667 m ⁻²		
		苗期	孕穗期	灌浆期
宁梗47号	保墒旱条播(B ₁)	1 083.6±282.5a	2 365.8±149.1b	1 957.2±79.1a
	保墒旱穴播(B ₂)	811.2±138.0a	2 900.3±294.9a	1 813.3±68.5a
	播后上水(B ₃)	552.0±98.5a	2 205.2±313.9b	1 612.2±130b
宁梗43号	保墒旱条播(B ₁)	1 135.5±273.5a	3 017.5±49.9ab	1 896.5±453.5a
	保墒旱穴播(B ₂)	761.1±161.6a	3 093.8±136.1a	1 661.3±62.3a
	播后上水(B ₃)	572.2±75.4a	2 532.4±210.6b	1 183.7±91.1b
F值	A	0.002 NS	5.03*	1.67 NS
	B	4.23*	4.34*	3.51 NS
	A×B	0.04 NS	0.61 NS	0.45 NS

号 B₁ 较 B₂、B₃ 分别提高 49.2% 和 98.4%，2 个水稻品种不同处理间差异均不显著。孕穗期，2 个水稻品种不同处理间根表面积表现为：B₂>B₁>B₃；宁梗 47 号 B₂ 较 B₁、B₃ 分别提高 22.6% 和 31.5%，差异显著；宁梗 43 号 B₂ 较 B₁、B₃ 分别提高 2.5% 和 22.2%。灌浆期，2 个水稻品种不同处理间根表面积表现为：B₁>B₂>B₃；宁梗 47 号 B₁ 较 B₂、B₃ 分别提高 7.9% 和 21.4%，宁梗 43 号 B₁ 较 B₂、B₃ 分别提高 14.2% 和 60.2%，B₁、B₂ 均与 B₃ 差异显著。从 F 值来看，品种在孕穗期存在显著效应，苗期和灌浆期不显著；旱直播方式在苗期和孕穗期存在显著效应，灌浆期不显著。不同生育时期，品种×旱直播方式的互作效应不显著。

2.1.4 不同旱直播方式对水稻根体积的影响

由表 5 可知，随生育进程推进，2 个水稻品种不同处理间根体积变化趋势一致，均表现先增加后降低的趋势。苗期和孕穗期，宁梗 43 号根体积均大于宁梗 47 号；灌浆期，除保墒旱条播方式外，宁梗 43 号根体积均小于宁梗 47 号。苗期，2 个水稻品种不同处理间根体积表现为：B₁>B₂>B₃；宁梗 47 号 B₁ 较 B₂、B₃ 分别提高 20.0% 和 130.8%，宁梗 43

号 B₁ 较 B₂、B₃ 分别提高 35.7% 和 137.5%，B₁、B₂ 均与 B₃ 差异显著。孕穗期，2 个水稻品种不同处理间根体积表现为：B₂>B₁>B₃；宁梗 47 号 B₂ 较 B₁、B₃ 分别提高 15.8% 和 22.2%，宁梗 43 号 B₂ 较 B₁、B₃ 分别提高 14.3% 和 21.7%。灌浆期，2 个水稻品种不同处理间根体积表现为：B₁>B₂>B₃；宁梗 47 号 B₁ 较 B₂、B₃ 分别提高 15.4% 和 25.0%；宁梗 43 号 B₁ 较 B₂、B₃ 分别提高 24.0% 和 55.0%，宁梗 43 号不同处理间差异不显著。从 F 值来看，品种仅在孕穗期存在显著效应；不同生育时期，旱直播方式以及品种×旱直播方式的互作效应不显著。

2.1.5 不同旱直播方式对水稻根干重的影响

由表 6 可知，随生育进程推进，2 个水稻品种不同处理间根干重均表现先上升后下降的趋势。苗期，除保墒旱条播方式外，宁梗 47 号根干重均小于宁梗 43 号；孕穗期，宁梗 47 号根干重均小于宁梗 43 号；灌浆期，宁梗 47 号根干重均大于宁梗 43 号。苗期，2 个水稻品种不同处理间根干重表现为：B₁>B₂>B₃；宁梗 47 号 B₁ 较 B₂、B₃ 分别提高 24.1% 和 176.9%，宁梗 43 号 B₁ 较 B₂、B₃ 分别提高 5.6% 和 150.0%，B₁、B₂ 均与 B₃ 差异显著。孕穗期，

表5 不同早直播方式对水稻根体积的影响

品种	处理	根体积/m ³ ·667m ⁻²		
		苗期	孕穗期	灌浆期
宁粳47号	保墒早条播(B ₁)	0.30±0.11a	0.38±0.02a	0.30±0.02a
	保墒早穴播(B ₂)	0.25±0.01a	0.44±0.11a	0.26±0.01ab
	播后上水(B ₃)	0.13±0.02b	0.36±0.06a	0.24±0.02b
宁粳43号	保墒早条播(B ₁)	0.38±0.10a	0.49±0.03a	0.31±0.09a
	保墒早穴播(B ₂)	0.28±0.12a	0.56±0.03a	0.25±0.02a
	播后上水(B ₃)	0.16±0.02b	0.46±0.05a	0.20±0.01a
F值	A	0.56 NS	5.64*	0.13 NS
	B	2.98 NS	1.47 NS	2.52 NS
	A×B	0.08 NS	0.02 NS	0.16 NS

表6 不同早直播方式对水稻根干重的影响

品种	处理	根干重/kg·667m ⁻²		
		苗期	孕穗期	灌浆期
宁粳47号	保墒早条播(B ₁)	18.0±6.3a	92.2±21.3a	51.0±3.3a
	保墒早穴播(B ₂)	14.5±1.2a	111.6±8.9a	47.0±1.4a
	播后上水(B ₃)	6.5±0.1b	74.5±6.7b	43.8±3.7a
宁粳43号	保墒早条播(B ₁)	17.0±0.6a	111.4±12.1a	49.7±10.6a
	保墒早穴播(B ₂)	16.1±1.6a	118.1±8.5a	45.0±2.3a
	播后上水(B ₃)	6.8±0.1b	77.4±4.9b	42.9±4.4a
F值	A	0.01 NS	0.99 NS	0.10 NS
	B	9.06**	5.73*	0.92 NS
	A×B	0.11 NS	0.27 NS	0.01 NS

2个水稻品种不同处理间根干重表现为: B₂>B₁>B₃; 宁粳47号 B₂较 B₁、B₃分别提高21.0%和49.8%, 宁粳43号 B₂较 B₁、B₃分别提高6.0%和52.6%, B₁、B₂均与 B₃间差异显著。灌浆期, 2个水稻品种不同处理间根干重表现为: B₁>B₂>B₃; 宁粳47号 B₁较 B₂、B₃分别提高8.5%和16.4%, 宁粳43号 B₁较 B₂、B₃分别提高10.4%和15.9%, 2个水稻品种不同处理间差异均不显著。从F值来看, 早直播方式在苗期和孕穗期存在极显著或显著效应; 不同生育时期, 品种以及品种×早直播方式的互作效应不显著。

2.1.6 不同根系形态指标间的相关性分析

由表7可知, 宁粳47号根长分别与根表面积和根干重呈显著正相关($r=0.735$ 和 $r=0.768$), 根表面积与根体积呈极显著正相关($r=0.939$)。宁粳43号根长分别与根表面积和根干重呈极显著正相关($r=0.900$ 和 $r=0.949$), 根长与根体积呈显著正相关($r=0.671$), 根直径与根表面积呈极显著正相关($r=0.836$), 根直径与根体积呈显著正相关($r=0.748$), 根表面积分别与根体积和根干重呈极显著正相关($r=0.837$ 和 $r=0.910$), 根体积与根干重

呈显著正相关($r=0.777$)。

2.2 不同早直播方式对水稻产量及产量构成因素的影响

由表8可知, 宁粳47号不同处理间产量表现为: B₂>B₁>B₃, B₂较 B₁、B₃分别提高8.3%和14.9%。不同处理穗数表现为: B₂>B₃>B₁, B₂较 B₃、B₁分别提高30%和40.3%; 穗粒数表现为: B₃>B₁>B₂, B₃较 B₁、B₂分别提高15.9%和32.3%; 千粒重表现为: B₁>B₂>B₃, B₁较 B₂、B₃分别提高10.2%和12.5%, B₁与 B₂、B₃间差异显著。宁粳43号不同处理间产量表现为: B₃>B₁>B₂, B₃较 B₁、B₂分别提高0.6%和3.0%, 不同处理间差异不显著。不同处理穗数表现为: B₂>B₁>B₃, B₂较 B₁、B₃分别提高9.9%和18.3%; 穗粒数表现为: B₃>B₂>B₁, 播后上水方式较其他两种方式分别提高13.7%和16.0%; 千粒重表现为: B₁>B₃>B₂, 各处理间差异不显著。相同处理下, 宁粳47号产量均高于宁粳43号, 宁粳47号穗数高于宁粳43号, 宁粳47号千粒重低于宁粳43号。从F值来看, 品种对千粒重及产量的影响存在极显著效应, 早直播方式对产量及产量构成因素存在显著或极显著效应, 品种×早直播方式

表7 不同根系形态指标间的相关性分析

品种	相关系数	根长	根直径	根表面积	根体积	根干重
宁粳47号	根长	1				
	根直径	0.485	1			
	根表面积	0.735*	0.632	1		
	根体积	0.604	0.658	0.939**	1	
	根干重	0.768*	0.474	0.503	0.418	1
宁粳43号	根长	1				
	根直径	0.652	1			
	根表面积	0.900**	0.836**	1		
	根体积	0.671*	0.748*	0.837**	1	
	根干重	0.949**	0.657	0.910**	0.777*	1

注：“*”表示显著相关，“**”表示极显著相关，下同

表8 不同早直播方式对水稻产量及产量构成因素的影响

品种	处理	穗数/万穗·667m ⁻²	穗粒数/粒	千粒重/g	产量/kg·667m ⁻²
宁粳47号	保墒旱条播(B ₁)	27.8a	113±2ab	24.65a	707.5±16.9ab
	保墒旱穴播(B ₂)	39.0a	99±6b	22.37b	765.9±16.8a
	播后上水(B ₃)	30.0a	131±13a	21.91b	666.4±17.1b
宁粳43号	保墒旱条播(B ₁)	28.2a	100±1a	25.97a	642.5±15.6a
	保墒旱穴播(B ₂)	31.0a	102±3a	25.51a	627.0±4.7a
	播后上水(B ₃)	26.2a	116±14a	25.96a	646.1±8.4a
F值	A	2.8 NS	1.6 NS	69.0**	41.8**
	B	4.2*	4.4*	7.2**	4.0*
	A×B	1.2 NS	0.7 NS	5.5 NS	9.0**

的交互对产量存在极显著效应。

2.3 不同时期根系形态与产量的相关性

由表9可知,孕穗期宁粳47号根长、根体积及根干重与产量呈极显著正相关性,灌浆期呈正相关性。孕穗期宁粳43号根长、根表面积及根体积与产量间呈显著负相关性,灌浆期呈正相关性。

表9 不同时期根系形态与产量的相关性

	孕穗期		灌浆期	
	宁粳47号	宁粳43号	宁粳47号	宁粳43号
根长	0.912**	-0.672*	0.448	0.450
根直径	-0.874**	-0.401	-0.551	0.474
根表面积	0.487	-0.736*	0.356	0.320
根体积	0.918**	-0.683*	0.265	0.440
根干重	0.934**	-0.426	0.180	0.663

3 讨论与结论

3.1 讨论

水稻根系的长度、粗度、数量以及生长角度等受到肥水、土壤质地以及种植方式等因素的影响,不同的指标反映出水稻根系在生长发育过程中形态特征的变化^[22]。不同直播方式下水稻的根系形态具有显著的差异,研究发现,直播稻由于没有缓苗期,因此早期生长迅速,分蘖早,易形成大群体,导致早期直播方式群体根长和根重增长较快,但由于根系下扎浅,生育中后期群体茎蘖数过大,个体间竞争加剧导致无效分蘖死亡,所以直播方式群体根长、根体积、根干重等都会出现不同程度的下降^[13, 23-24]。本研究结果表明,不同早直播方式下,2个水稻品种根长、根表面积、根体积、根干重随生育进程变化均表现出先上升后

下降的趋势,这与前人的研究结果相一致。此外,孕穗期宁粳43号不同处理间根长、根表面积与根干重均高于宁粳47号,但灌浆期均低于宁粳47号,说明生育后期宁粳43号根系衰亡速度较宁粳47号快。全生育期2个水稻品种保墒旱条播方式平均根直径最大,保墒旱穴播方式次之,播后上水方式最小,相关性分析表明,宁粳47号根直径与根表面积呈正相关,但未达到显著水平,宁粳43号根直径与根表面积呈极显著正相关($r=0.836$),2个水稻品种不同处理间条播方式平均根表面积最大,因此平均根直径最长。Uddin等^[25]发现根系的吸收速率取决于根表面积,不同生育时期根表面积的大小取决于根的总长度。本研究结果表明,苗期与灌浆期,保墒旱条播方式下根长最长,表面积也最大;孕穗期,保墒旱穴播方式根长最长,表面积同样也最大;不同生育时期,播后上水方式下根长均为最小,表面积也最小,相关性分析表明,宁粳47号根长与根表面积呈显著正相关($r=0.735$),宁粳43号平均根长与根表面积呈极显著正相关($r=0.900$)。程建平^[17]以插秧稻为对照,通过对穴播、条播、撒播三种直播方式研究发现,齐穗期穴播方式总根长、根表面积、根重均为最大,撒播最小,条播次之,三种直播方式间差异显著。王在满^[26]以培杂泰丰和玉香油占为材料,比较人工条播和人工穴播方式对水稻根系生长的影响发现,与条播方式相比,穴播方式可以显著提高分蘖期培杂泰丰的根干质量和孕穗期的单茎根体积,对玉香油占而言,穴播方式可以提高分蘖期单茎根体积和根平均直径。本研究结果也表明,保墒旱穴播方式可以提高孕穗期根长、根体积、根表面积和根干重,但差异不显著。生育中后期,保墒旱穴播方式根系平均直径均小于保墒旱条播方式;灌浆期,保墒旱穴播方式根体积和根干重均有一定程度的下降且小于保墒旱条播方式,这与王在满^[26]的研究结果不一致。分析其主要原因为保墒旱穴播方式在同播量下具有较高的出苗率和基本苗数,所以在孕穗期穴播方式下水稻群体大,因此根系体积和根干重均最大,而在生育后期个体间竞争过大,群体恶化,导致根系发育受阻死亡,造成一定程度的下降。因此接下来可以通过设计减少播量的试验来继续验证这一推论。不同生育时期,播后上水方式在根长、根体积、根表面积、根干重等方面均低于保墒旱条播与保墒旱穴播方式,主要原因可能是播后上水为旱种水管,所谓旱种水管是指播种后立即进行田间灌溉等待出苗,出齐苗后再进行常规水

分管理,而条播与穴播方式为旱种旱管,所谓旱种旱管是指播种后不需要田间灌溉直至出苗3~5叶后再进行常规水分管理^[27],因此导致播后上水方式较保墒旱条播与保墒旱穴播水稻根系下扎浅,这与川田信一郎^[28]的观点相一致,其认为与低湿田相比,干旱田不论是伸长冠根数还是总根数均比低湿田高,根系下扎较低湿田深。其次,Uddin等^[25]通过对比不同品种水稻在直播方式和移栽方式对水稻根系的影响发现,不同种植方式下,水稻品种的单株根数与分蘖数密切相关,分蘖数越多,其总根数和总根长越大。本研究中播后上水方式较保墒旱条播与保墒旱穴播方式分蘖数少,因此可能在一定程度上导致播后上水方式根系形态指标低于条播与穴播方式。

有关根系与产量间的关系前人做了大量研究,王春雨^[9]研究表明,抽穗期群体根长、群体根体积与有效穗数呈显著或极显著正相关。李杰^[23]、周晓冬^[29]等认为水稻产量与根长、根直径、根干重及根数等呈显著或极显著正相关。刘桃菊等^[30]通过建立数学回归模型发现齐穗期水稻上位根根长密度、根干重密度与产量呈正相关性,而刘波^[31]研究发现根系性状与产量在生育前期无显著相关性,抽穗期群体根长、根尖数及根体积与产量呈显著负相关性,成熟期群体根干重与产量呈显著负相关性,其认为根系的冗余生长不利于水稻高产,无效根的生长会影响水稻高产;蔡昆争等^[32]同样提出“根系冗余生长”的观点,即在一定范围内根系数量与产量呈正相关,但当超出适宜范围后会导致根冠比或根系生长量过大,形成次库,造成养分消耗,不利于灌浆和产量形成,导致产量随根系数量的增加而减少。本研究结果表明,2个水稻品种保墒旱穴播方式下孕穗期根长、根体积均最大,其有效穗数也最高,这与王春雨^[9]的研究结果相似,说明根长、根体积的增长有利于促进有效穗数的形成。2个水稻品种不同处理间宁粳47号保墒旱穴播方式下产量最高,宁粳43号播后上水方式产量最高,相关性分析表明孕穗期宁粳47号根长、根体积及根干重与产量间呈极显著正相关性,灌浆期呈正相关性,这与李杰^[6]、周晓冬^[29]等的研究结果相似,说明宁粳47号在孕穗期与灌浆期根系发育状况对产量形成有促进作用。孕穗期宁粳43号根长、根表面积及根体积与产量间呈显著负相关性,灌浆期呈正相关性,说明孕穗期根系发育状况不利于产量形成,分析其原因可能与刘波^[31]、蔡昆争^[32]等提出的根系冗余观点有关,即宁粳43号在孕穗期根系生长量过

大,形成次库造成养分的消耗,此外根系性状自身间也相互影响,且产量形成受到地下部与地上部的共同作用,因此仅用简单的线性关系来描述根系发育与产量的复杂关系是远远不够的,需综合对地上部与地下部的关系进行深入研究。

3.2 结论

通过对不同旱直播方式根系形态特征的研究发现,2个水稻品种在不同旱直播方式下根系形态变化一致。保墒旱条播方式在苗期与灌浆期根长、根表面积、根体积以及根干重均大于保墒旱穴播与播后上水方式,孕穗期保墒旱穴播方式下根长、根表面积、根体积以及根干重均大于保墒旱条播与播后上水方式,播后上水方式在不同生育时期均为最小。3种旱直播方式下根直径变化趋势具有显著差异,2个水稻品种保墒旱条播与保墒旱穴播方式根直径在不同生育时期总体表现出下降趋势,播后上水方式均表现出先上升后下降的趋势;生育中后期,播后上水方式根直径均大于保墒旱条播与保墒旱穴播方式。2个水稻品种保墒旱条播方式下有利于促进千粒重的增加,保墒旱穴播方式下有利于促进有效穗数的增加,播后上水方式下有利于穗粒数的增加。不同处理间宁粳47号保墒旱穴播方式产量最高,宁粳43号播后上水方式产量最高,相关性分析表明,孕穗期宁粳47号根长、根体积及根干重与产量间呈极显著正相关,灌浆期呈正相关。孕穗期宁粳43号根长、根表面积及根体积与产量间呈显著负相关,灌浆期呈正相关。综合来看,2个水稻品种根系性状与产量的关系与品种差异有关。

参考文献:

- [1] Barker R, Johns S, Trane R, et al. Analysis of plant root gravitropism[J]. *Methods in Molecular Biology*, 2022, 2494: 3-16.
- [2] Inukai Y, Ashikari M, Kitano H. Function of the root system and molecular mechanism of crown root formation in rice[J]. *Plant and Cell Physiology*, 2004(45): 12-17.
- [3] 叶勇.不同播量和栽插深度对机插水稻根系特性的影响及其与地上部分生长和产量的关系[D].贵阳:贵州大学,2017.
- [4] 朱安,高捷,黄健,等.水稻根系形态生理及其与稻米品质关系的研究进展[J].*作物杂志*,2020(2):1-8.
- [5] 沈铨智.白马湖农场不同种植方式对粳稻产量品质及生长的影响[D].扬州:扬州大学,2018.
- [6] 李杰.不同种植方式水稻群体生产力与生态生理特征的研究[D].扬州:扬州大学,2011.
- [7] 杨建昌.水稻根系形态生理与产量、品质形成及养分吸收利用的关系[J].*中国农业科学*,2011,44(1):36-46.
- [8] 何艳.不同播栽方式和秸秆还田对土壤理化性质和水稻根系生长及氮素利用的影响[D].雅安:四川农业大学,2019.
- [9] 王春雨.不同种植方式下氮素水平对杂交水稻根系形态及养分吸收特性的影响[D].雅安:四川农业大学,2018.
- [10] 李婷婷,冯钰枫,朱安,等.主要节水灌溉方式对水稻根系形态生理的影响[J].*中国水稻科学*,2019,33(4):293-302.
- [11] 孙浩燕.施肥方式对水稻根系生长、养分吸收及土壤养分分布的影响[D].武汉:华中农业大学,2015.
- [12] 李娟,章明清,林琼,等.水稻根系氮磷钾吸收特性及其模拟模型研究[J].*土壤通报*,2011,42(1):117-122.
- [13] 刘波,田青兰,钟晓媛,等.机械化播栽对杂交水稻根系性状的影响[J].*中国水稻科学*,2015,29(5):490-500.
- [14] 蔡昆争.水稻栽培群体根系的生长冗余和结构优化[D].广州:华南农业大学,2001.
- [15] 刘红江,蒋银涛,陈留根,等.不同播栽方式对水稻根系生长及产量形成的影响[J].*江苏农业学报*,2015,31(2):310-316.
- [16] 任万军,杨文钰,樊高琼,等.不同种植方式对水稻植株发根力的影响[J].*核农学报*,2007,21(3):287-290.
- [17] 程建平,赵锋,吴波,等.不同直播种植模式对水稻根系特征和产量形成的影响[J].*湖北农业科学*,2013,52(24):5979-5983.
- [18] 侯文平,王成瑗,张文香,等.栽培方式对有机栽培水稻产量与品质的影响[J].*东北农业科学*,2020,45(1):1-7.
- [19] 金峰,王帅,邵玺文,等.株行距配置对吉林稻区水稻产量及群体微气象因子的影响[J].*东北农业科学*,2017,42(5):6-14.
- [20] 马洪文,贺奇.宁夏直播稻栽培特点与杂草治理策略[J].*东北农业科学*,2021,46(2):3-6.
- [21] 闫益庚.宁夏吴忠市利通区水稻机械化种植方式的探究[D].杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [22] 褚光,杨凯鹏,王静超,等.水稻根系形态与生理研究进展[J].*安徽农业科学*,2012,40(9):5097-5101.
- [23] 李杰,张洪程,常勇,等.高产栽培条件下种植方式对超级稻根系形态生理特征的影响[J].*作物学报*,2011,37(12):2208-2220.
- [24] 金军,薛艳凤,于林惠,等.水稻不同种植方式群体质量差异比较[J].*中国稻米*,2006(6):31-33.
- [25] Uddin M R, Wade L J, Pyon J Y, et al. Rooting behavior of rice cultivars under different planting methods[J]. *Journal of Crop Science & Biotechnology*, 2009, 12(1): 17-23.
- [26] 王在满,郑乐,张明华,等.不同播种方式对直播水稻倒伏指数和根系生长的影响[J].*江苏农业学报*,2016,32(4):725-728.
- [27] 轧宗杰,卢树昌,侯琨.水稻旱直播栽培发展现状、问题及应用前景[J].*作物杂志*,2020(2):9-15.
- [28] 川田信一郎.水稻的根系[M].北京:农业出版社,1984:8-10.
- [29] 周晓冬,董桂春,张岳芳,等.水稻穗重构成因子与根系性状关系的研究[J].*江苏农业科学*,2007(4):5-8.
- [30] 刘桃菊,戚昌瀚,唐建军.水稻根系建成与产量及其构成关系的研究[J].*中国农业科学*,2002,35(11):1416-1419.
- [31] 刘波.机械化播栽对杂交水稻根系性状及产量的影响[D].雅安:四川农业大学,2015.
- [32] 蔡昆争,骆世明,段舜山.水稻根系在根袋处理条件下对氮养分的反应[J].*生态学报*,2003,23(6):1109-1116.

(责任编辑:范杰英)